

A. S. Eddington

Die Naturwissenschaft auf neuen Bahnen

(New pathways in science)



Aus dem Englischen übersetzt von
Wilhelm Westphal

Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1935

V i e r B i l d t a f e l n

ISBN 978-3-322-98349-7 ISBN 978-3-322-99086-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-99086-0

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1935

A l l e R e c h t e v o r b e h a l t e n

Einbandentwurf Günther Clausen, Braunschweig

VORWORT

Diese Schrift enthält die Messenger Lectures*, die ich im April und Mai 1934 an der Cornell-Universität gehalten habe. Das 2. und 12. Kapitel sind nachträglich hinzugefügt; die übrigen zwölf Kapitel entsprechen den zwölf Vorlesungen der Reihe. Es ist Bedingung der Stiftung, daß die Vorlesungen veröffentlicht werden.

Abgesehen von einem kleinen Buch über die Expansion des Weltalls liegt meine letzte Veröffentlichung etwa sechs Jahre zurück. Die Schriften „Stars and Atoms“ (1927), „The Nature of the Physical World“ (1928) und „Science an the Unseen World“ (1929)* enthielten praktisch alles, was ich zu sagen im Sinn hatte. Ein wissenschaftlicher Verfasser wird durch seine früheren Schriften in eine Verlegenheit gebracht; entweder erscheinen seine neuen Bücher wie ein ziemlich zusammenhangloser Nachtrag zu jenen, oder er muß über einen erheblichen Stoff, den er nicht noch einmal darzustellen wünscht, nur oberflächlich hinweggehen. Da mir die zweite Möglichkeit nicht behagte, so entschloß ich mich, das Beste aus dem zu machen, was mir in den letzten sechs Jahren durch den Kopf gegangen ist. Ich sprach deshalb in Cornell über die verschiedensten Themen und benutzte als Grundstock den Stoff, der in einer Anzahl von Vorträgen und Reden enthalten ist, die ich seit 1929 zu halten Gelegenheit hatte. Ich sprach auch noch von einigem anderen, das meine Aufmerksamkeit erregt hatte. Der

* Die Messenger Lectures sind Gastvorlesungen, die auf einer Stiftung des Herrn Messenger beruhen. D. Übers.

** Die hier angeführten Schriften liegen sämtlich auch in deutscher Übersetzung vor: „Dehnt sich das Weltall aus?“ (übersetzt von Helene Weyl, Stuttgart 1933); „Sterne und Atome“ (übersetzt von Otto Friedrich Bollnow, Berlin 1928); „Das Weltbild der Physik“ (übersetzt von Marie Freifrau Rausch von Traubenberg und Hermann Diesselhorst, Braunschweig 1931); „Die Naturwissenschaft und die Welt des Unsichtbaren“ (übersetzt von Wilhelm Dening, Berlin 1930). D. Übers.

allgemeine Plan war so angelegt, daß jede Vorlesung einem besonderen Thema gewidmet war; nur der Indeterminismus verteilt sich über zwei Kapitel. Die Wahl der Themen sicherte einen gewissen inneren Zusammenhang; ich habe aber nicht den Versuch gemacht, eine systematische Einführung in die Gedankengänge der heutigen Physik zu geben. Die größte Lücke besteht vielleicht in dem Fehlen jeder Darstellung der Grundgedanken der Relativitätstheorie; ich konnte es nicht über mich gewinnen, alles das, was in den Kapiteln 1 bis 3, 6 und 7 von „The Nature of the Physical World“ enthalten ist, noch einmal darzustellen und die Art der Darstellung nur um der Abwechslung willen zu ändern.

Im einleitenden Kapitel versuche ich den philosophischen Standpunkt der heutigen Physik so darzustellen, wie ich ihn auffasse, und zu zeigen, in welcher Beziehung das von der Physik geschaffene Weltbild zu der unseren Sinnen geläufigen Welt steht. Das 2. Kapitel bildet eine Einschaltung und enthält eine Übersicht über unser atomphysikalisches Wissen usw., die manchem Leser zum Verständnis der folgenden Kapitel nützlich, anderen Lesern als eine Auffrischung ihres Gedächtnisses willkommen sein wird. Dann folgen vier Vorlesungen, die ein gemeinsames Band verbindet; sie betreffen die Auswirkungen des statistischen Typus physikalischer Gesetze, die zuerst auf dem Wege über die Thermodynamik in die Physik eindringen, und die in den jüngst verflossenen Jahren den alten kausalen Gesetzestypus aus den Grundlagen der Physik gänzlich verdrängt haben. Die letzte dieser vier Vorlesungen, die von der Wahrscheinlichkeit handelt, hat neben ihrer Anwendung auf statische Gesetze auch ein allgemeineres Interesse.

Dann folgt ein vollständiger Themenwechsel, und die nächsten vier Kapitel sind der Astrophysik gewidmet. Indem wir mit der Sonne und den uns wohlbekannten Sternen beginnen, gehen wir zu größeren Entfernungen über, bis wir zu dem System von Milliarden Milchstraßen gelangen, die das Weltall bilden. Dieser letzte Gegenstand ist in meinem Buch „The Expanding Universe“ ausführlicher behandelt. Hier gebe ich nur einen viel kürzeren Überblick. In dieser Vorlesung (10. Kapitel) stoßen wir auf die rätselhafte „kosmologische Konstante“, die uns wieder zu den physikalischen Grundbegriffen zurückführt, mit denen sich die beiden nächsten Kapitel beschäftigen. Das 11. Kapitel ist, wie ich zugeben muß, für ein Buch dieser Art viel zu schwierig. Ich kann es nur damit rechtfertigen, daß der Gegenstand, der mich seit fünf Jahren fast voll-

kommen in Anspruch genommen hat, und der kaum etwas anderes neben sich aufkommen ließ, notwendig in jede von mir gehaltene Vorlesungsreihe hineinspielen mußte. Die nächste Vorlesung über Gruppentheorie ist ein etwas gewagter Versuch; sie gibt aber mehr als irgendein anderer Teil dieses Buches den Grundton der heutigen Naturphilosophie wieder.

Das Kapitel „Kritiken und Kontroversen“ könnte auf Grund seiner Überschrift erwarten lassen, daß ich in gedrängter Form auf die zahlreichen Fragen antworten würde, die von Beurteilern und Fragestellern und vielen anderen aufgeworfen worden sind, die wertvolle Beiträge zu den von mir vertretenen Ansichten beigesteuert haben. Man wird sich aber wohl leicht überzeugen, daß das einen viel zu weiten Raum beansprucht hätte. Wenn es möglich ist, auf einen Einwand kurz und bestimmt zu antworten, so ist es kaum der Mühe wert, aller Welt mitzuteilen, daß er von dem und dem erhoben wurde. Wenn er aber ernster zu nehmen ist, so ist meistens eine weitläufige Erklärung und Erörterung nötig. Im allgemeinen gebe ich mich mit dem Gedanken zufrieden, daß meine Beweisführungen, sofern sie etwas taugen, sich schon ihren Platz erobern werden, ohne daß ihr Urheber in jedem Fall eingreifen muß, um sie vor entschlossenen Gegnern — manchmal auch vor allzu begeisterten Freunden — in Schutz zu nehmen. Ich möchte aber an dieser Stelle meinen Dank für viele Aufsätze von Philosophen und anderen aussprechen, die meine Schriften achtungsvoll besprochen haben. Ich habe die Berechtigung von Einwänden manchmal anerkennen müssen, und dann haben sie ihren Einfluß auf die Weiterentwicklung meiner Gedanken nicht verfehlt. Oft hätte ich gern eine Antwort verfaßt, in der Hoffnung, eine gegenseitige Verständigung auf diese Weise zu fördern. Aber eine solche Antwort kostet mindestens ebensoviel Zeit und Mühe wie ein selbständiger Aufsatz, und so mußte ich diese Gelegenheiten mit seltenen Ausnahmen vorbeigehen lassen. Im Schlußkapitel wende ich mich wieder zu dem philosophischen Standpunkt des 1. Kapitels, aber diesmal betrachte ich denjenigen Teil des „Erfahrungsproblems“, den die Methoden der Physik nicht zu behandeln beanspruchen. Ein Teil dieser Vorlesung ist einem Vortrag entnommen, den ich im Rahmen einer Rundfunkvortragsreihe über Naturwissenschaft und Religion gehalten habe.

Ungeachtet meines Bestrebens, die Dinge möglichst einfach darzustellen, muß ich an die Aufmerksamkeit meiner Leser

beträchtliche Anforderungen stellen. Da die einzelnen Kapitel in gewissem Grade voneinander unabhängig sind, so steigert sich die Schwierigkeit im allgemeinen gegen den Schluß der Kapitel. Daher kann der Leser zu Beginn des folgenden Kapitels wieder auf eine Atempause hoffen.

Mit diesen Vorlesungen sind für mich glückliche Erinnerungen an die Wochen verknüpft, die ich an der Cornell-Universität verbrachte. Den Freunden, die mich dort willkommen hießen, und dem großen Kreis meiner Zuhörer, der mich durch seine Anteilnahme ermutigte, sollen sie gewidmet sein.

C a m b r i d g e , im September 1934.

A. S. E.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Kapitel. Naturwissenschaft und Erfahrung	1
2. Kapitel. Die Mitwirkenden	25
3. Kapitel. Das Ende der Welt	47
4. Kapitel. Der Niedergang des Determinismus	68
5. Kapitel. Indeterminismus und Quantentheorie	87
6. Kapitel. Wahrscheinlichkeit	104
7. Kapitel. Der Bau der Sterne.	128
8. Kapitel. Inneratomare Energie	152
9. Kapitel. Kosmische Wolken und Nebel	174
10. Kapitel. Die Expansion des Weltalls.	195
11. Kapitel. Die Naturkonstanten	217
12. Kapitel. Die Gruppentheorie	242
13. Kapitel. Kritiken und Kontroversen	264
14. Kapitel. Ausklang	295

1. Kapitel

NATURWISSENSCHAFT UND ERFAHRUNG

Besteht die Harmonie, die die menschliche Erfahrung in der Natur zu entdecken glaubt, unabhängig von solcher Erfahrung? Sicher nicht. Eine Wirklichkeit, die von dem Geist, der sie in sich aufnimmt, erschaut und erfüllt, vollkommen unabhängig wäre, ist eine Unmöglichkeit. Selbst wenn es eine von uns so unabhängige Welt wirklich gäbe, so wäre sie für uns ewig unzugänglich. Was wir die „objektive Wirklichkeit“ nennen, ist, genau genommen, das, was mehreren denkenden Wesen gemeinsam ist und ihnen allen gemeinsam sein könnte. Wir werden sehen, daß dieses Gemeinsame nichts anderes sein kann, als die durch mathematische Gesetze ausgedrückte Harmonie.

Poincaré. Der Wert der Wissenschaft.

I.

Als ein mit Bewußtsein begabtes Wesen bin ich in eine Geschichte verwickelt. Der wahrnehmende Teil meines Geistes erzählt mir eine Geschichte von einer mich umgebenden Welt. Die Geschichte handelt von wohlvertrauten Dingen; von Farben, Klängen, Gerüchen, die diesen Dingen eigen sind, von dem grenzenlosen Raum, in dem sie sich aufhalten, und von dem ewig dahinfließenden Strom der Zeit, der Wechsel und Zufall mit sich führt. Sie handelt von anderem Leben, denn dem meinen, das seinen eigenen Zwecken und Zielen nachgeht.

Diese Geschichte ist mir verdächtig geworden; denn ich bin ein Naturforscher. An vielen Beispielen hat es sich herausgestellt, daß die Dinge nicht das sind, was sie zu sein scheinen. Wenn ich dem Geschichtenerzähler glauben will, so steht vor mir jetzt ein stofflicher Tisch. Aber die Physik hat mich gelehrt, daß der Tisch keineswegs der zusammenhängende Stoff ist, als der er in der Geschichte erscheint. Er ist ein Schwarm winziger elektrischer Ladungen, die mit unbeschreiblicher Geschwindigkeit hin und her sausen. Mein Tisch gleicht weit mehr einem Mückenschwarm als einem soliden Stoff.

So bin ich zu der Erkenntnis gekommen, daß ich auf den Geschichtenerzähler, der in meinem Geiste lebt, kein allzu großes Vertrauen setzen darf. Andererseits geht es aber nicht gut an, daß ich ihn ganz überhöre, denn seine Geschichte hat im allgemeinen gewisse wahrheitsgemäße Grundlagen, besonders dann, wenn sie mich selbst nahe angeht. Denn ich spiele ja selbst eine Rolle in der Ge-

schichte, und wenn ich mein Stichwort nicht zur rechten Zeit sage, so ist es schlecht um mich bestellt. Zum Beispiel erscheint da in der Geschichte plötzlich ein Kraftwagen, der mit großer Geschwindigkeit auf den Mitwirkenden zufährt, der ich selbst sein soll. Als Naturforscher habe ich an der Geschichte im einzelnen viel auszusetzen — an der Stofflichkeit, der Farbe, der schnell wachsenden Größe des sich nähernden Dinges —, aber ich folge doch dem Rat des Erzählers, daß man gut tut, aus dem Wege zu springen.

In meinem Bücherschrank stehen dickleibige Schriften, die eine andere Geschichte von meiner Umwelt erzählen. Wir nennen sie die naturwissenschaftliche Geschichte. Eine unserer ersten Aufgaben muß es sein, die Beziehung zwischen der alltäglichen und der naturwissenschaftlichen Geschichte dessen, was um uns herum geschieht, verstehen zu lernen.

Es gab eine Zeit, da bestand kein sehr tiefgehender Unterschied zwischen den beiden Fassungen. Der Naturforscher übernahm die alltägliche Geschichte in ihrem allgemeinen Umriß; er verbesserte nur hier und da einige Tatbestände und arbeitete einige Einzelheiten heraus. Seit einiger Zeit aber haben sich die alltägliche und die naturwissenschaftliche Geschichte weiter und weiter voneinander entfernt, so daß es schließlich schwer wurde, zu erkennen, daß sie überhaupt noch irgend etwas miteinander gemein haben. Die Physik, nicht zufrieden mit einer vollkommenen Umwälzung unserer Begriffe von den Stoffen, ist auch mit unseren Begriffen von Raum und Zeit seltsam umgesprungen. Nicht einmal die Kausalität blieb verschont. Die Physik sucht heute entschlossen nach einer von Grund auf neuen Fassung der Geschichte unserer Erfahrung und lehnt die alltägliche Geschichte als eine allzu trügerische Grundlage ab.

So sehr wir aber auch versuchen, einen sauberen Anfang zu machen, indem wir instinktive oder überlieferte Auslegungen der Erfahrung verwerfen und nur ein solches Wissen anerkennen, das durch streng wissenschaftliche Methoden begründet werden kann; so können wir uns doch nicht gänzlich von dem Erzähler der Alltagsgeschichte freimachen. Zwar ist es unser Grundsatz, daß wir ihm nie recht trauen dürfen, aber wir können ihn in der Naturwissenschaft schlechthin nicht entbehren. Wir machen einen sehr kunstvollen physikalischen Versuch mit Galvanometern, Mikrometern usw., die eigens dazu ersonnen sind, die Fehlbarkeit der menschlichen Wahrnehmungen auszuschalten. Aber schließlich müssen wir uns doch auf unsere Wahrnehmungen verlassen, denn sie sind es, die uns das Ergebnis des Versuchs mitteilen. Auch bei einem selbstregistrierenden Appa-

rat bedienen wir uns unserer Sinne, um die Aufzeichnungen zu lesen. So wenden wir uns, nachdem wir den Versuch in Gang gesetzt haben, an den Erzähler der Alltagsgeschichte und sagen: „Nun bringe das mit in deine Geschichte hinein!“ Vielleicht hat er uns eben noch erzählt, daß der Mond ungefähr die Größe eines Tellers hat oder etwas ähnlich rohes und unwissenschaftliches. Nunmehr bricht er ab, um uns zu berichten, daß ein Lichtfleck mit dem Skalenteil 53 auf der Skala unseres Galvanometers zusammenfällt. Und diesmal glauben wir ihm — mehr oder minder. Jedenfalls benutzen wir diese Auskunft als Grundlage unserer wissenschaftlichen Schlüsse. Wenn wir mit dem wirklichen Anfang beginnen sollen, müssen wir fragen, warum wir der Auskunft des Erzählers über Galvanometer trauen, obgleich er doch sonst so wenig vertrauenswürdig ist. Denn vermutlich ist seine fruchtbare Erfindungsgabe durchaus fähig, sogar ein Galvanometer phantastisch auszus schmücken.

Ich will keine Zeit an Dinge verschwenden, über die es keine Meinungsverschiedenheit unter naturwissenschaftlich denkenden Menschen gibt. So will ich voraussetzen, daß wir uns einig sind, daß die einzige Verbindung zwischen dem Erzähler, der in unserem Geiste lebt, und der äußeren Welt, die er in seiner Geschichte zu beschreiben vorgibt, das Nervensystem in unserem Körper ist. Soweit unsere alltägliche bildliche Vorstellung von den Vorgängen in unserer Umwelt auf unserem Gesichtssinn beruht, rührt sie von Impulsen längs der Sehnerven her, die die Netzhaut mit dem Gehirn verbinden, und bei unseren anderen Sinneswerkzeugen liegt es ähnlich. Natürlich bemerkt man nicht die Impulse selbst. Der Erzähler hat sie in eine spannende Geschichte verarbeitet. Das Innere eures Kopfes muß etwa einer Zeitungsredaktion gleichen. Es ist mit der Außenwelt durch Nerven verbunden, die die Rolle von Telegraphendrähten spielen. Die Meldungen von der Außenwelt kommen in Schlüsselschrift längs dieser Drähte an. Das ganze Geschehen ist in diesen verschlüsselten Meldungen enthalten. In der Redaktion wird aus ihnen eine Geschichte fürs Publikum zurechtgemacht, teils unter rechtmäßigem Gebrauch gesammelter Erfahrungen, aber auch mit einem Schuß journalistischer Einbildungskraft. Und diese freie Übersetzung der Originalnachrichten ist es, die in unser Bewußtsein tritt.

Verfügten wir über eine vollständige Aufzeichnung der längs der Nerven übertragenen Impulse, so besäßen wir alles Material, das dem Geschichtenerzähler als Grundlage für seine Geschichte gedient haben kann, soweit seine Geschichte sich auf die Außenwelt

bezieht. Und auf dieses Material müssen wir uns stützen, wenn wir die hinter der Geschichte versteckte Wahrheit zu entdecken wünschen. Um die Aufgabe der Physik zu würdigen, wollen wir annehmen, daß wir im Besitze dieser Gegebenheiten sind, der Punkte und Striche oder was immer die Signale seien, die an den Nervenenden bei den Gehirnzellen ankommen. Alles, was die Physik über die Außenwelt aussagen kann, muß aus ihnen geschlossen werden können. Sofern unser physikalisches Weltbild irgend etwas enthalten sollte, was nicht in Gestalt von Nervensignalen zu uns gelangt sein kann, so müssen wir es ausmerzen. Wie in einer belagerten Stadt Gerüchte über Ereignisse in der Welt da draußen umlaufen, die nicht von außen her empfangen sein können, so bilden sich in unserem Geiste allerhand Vorstellungen von Gestalten und Erscheinungen in der Außenwelt, die nicht von außen her übertragen sein können. Sie sind nicht von der Art jener Nachrichten, die über die unmittelbaren Verbindungsdrähte laufen. Wir verfallen ständig in den gleichen Irrtum, wie der Empfänger eines Telegramms, welcher glaubt, die Handschrift sei die des Absenders. Die Nachrichten, wie wir sie im Bewußtsein wahrnehmen, sind mit Vorstellungen von Farbe, Raumerfüllung, Stofflichkeit ausgestattet. Diese Ausstattung ist aber in der Nachricht, wie sie uns von der Außenwelt übermittelt wurde, nicht enthalten. Sie wurde erst nach Empfang der Nachricht hinzugefügt, denn der Übertragungsmechanismus ist auf Grund seines eigensten Wesens unfähig, solche Formen der Anschauung zu übermitteln.

Die Begrenztheit des Übertragungsmechanismus wird schlagend beleuchtet bei der Unterhaltung mit einem farbenblinden Menschen. Auf Grund seiner erstaunlichen Irrtümer wissen wir, daß zwischen seiner und unserer Wahrnehmung der Umwelt ein großer Unterschied besteht. Aber es ist ihm völlig unmöglich, uns zu sagen, wieso seine Wahrnehmung von der unseren verschieden ist. Sieht er, wenn er Rot mit Grün verwechselt, beide Farben als rot oder beide als grün oder als etwas uns ganz Unbekanntes? Er hat keine Möglichkeit, uns das zu sagen. Das wahre Wesen seiner Wahrnehmung sitzt in seinem Geiste gefangen. Es kann nicht längs seiner Nerven ins Freie gelangen. Ebenso wenig kann es in unserem Nervensystem hinaufwandern, wenn es bis zu ihm gelangte. So können uns auch die sinnlichen Eigenschaften der Farbe, des Schalls und Geruchs nicht von den Dingen in der Außenwelt übermittelt worden sein, denen wir Farbe, Schall und Geruch zuschreiben. Denn sogar wenn wir annehmen, daß die Dinge selbst mit solchen

Eigenschaften begabt seien, wären sie ebenso unfähig wie der Farbenblinde, uns ihre Eigenschaft mitzuteilen. Die Rolle, die ein Ding der Außenwelt spielt, besteht darin, daß es mittelbar oder unmittelbar die Signale bedingt, die längs der Nerven verlaufen. Die Geschichte, die in unserem Bewußtsein lebendig wird, ist eine Wirkung dieser Signale, aber sie enthält viel, was nicht zur Botschaft von außen gehört.

Die Schlußfolgerung auf jegliche Art von Wissen über die Naturdinge, die am fernen Ende dieser Verbindungslinien liegen, kann daher augenscheinlich nur mittelbar sein. In dieser Hinsicht unterscheidet es sich von jenem Wissen, das auf die unmittelbare Wahrnehmung des Geistes von seinen eigenen Eindrücken, Gedanken und Regungen gegründet ist. Ich habe das an anderer Stelle so ausgesprochen: „Laßt uns nicht vergessen, daß der Geist das erste und unmittelbarste Ding in unserer Erfahrung ist; alles andere sind weit hergeholte Schlüsse“*. Das ist eine Feststellung, die die Physiker wohl beinahe als einen Gemeinplatz ansehen, die Philosophen hingegen als einen argen Trugschluß. Es ist schwer zu verstehen, warum zwischen uns eine solche Meinungsverschiedenheit bestehen soll. Ich habe geglaubt, sie könnte vielleicht, wie so manche andere Meinungsverschiedenheit, davon herrühren, daß wir nicht die gleiche Sprache reden. Aber einige jüngste Veröffentlichungen deuten darauf hin, daß die Kluft wohl tiefer ist, und daß die heutige Philosophie zu einer wissenschaftlich unhaltbaren Ansicht neigt (vgl. S. 266 ff.).

Wissenschaftlich denkende Menschen geben demnach durchweg zu, daß der Verbindungsweg zwischen der Außenwelt und dem menschlichen Bewußtsein sehr schmal ist. Während sie aber mit dem Verstande zustimmen, stellen sie ihre wissenschaftliche Blickrichtung nicht immer dementsprechend ein. Sie sind seltsam abgeneigt, die Behauptungen des Erzählers der Alltagsgeschichte anzuzweifeln, sogar dann, wenn es offenkundig ist, daß er Dinge erzählt, die weit jenseits seines Horizontes liegen. Das Gefühl, daß viele Folgerungen der Relativitäts- und Quantentheorie dem gesunden Menschenverstand widersprechen, beruht weitgehend auf dieser Starrköpfigkeit. Wir klammern uns an gewisse Züge in dem altgewohnten Bilde der Außenwelt, fast als wären wir überzeugt, daß ein Teil unseres wahrnehmenden Selbst über unseren Körper hinaus verlängert und in die Dinge der Außenwelt eingedrungen sei, und

* Science and the Unseen World, S. 24.

daß es so ihres wirklichen Wesens auf die gleiche unmittelbare Weise gewahr geworden sei, wie der Geist seiner Gedanken und Regungen gewahr wird. Wir halten an der gewohnten Vorstellung des Raums in der Außenwelt so zuversichtlich fest, als könne der menschliche Geist in den Raum hinaustreten und fühlen, ob etwas groß oder klein ist. Wenn aber ein Ding der Außenwelt am Ende der Nerven an die Tür klopft, so kann man nicht den Kopf hinausstecken und sehen, wer da klopft. Man kann von seinem Wesen nicht mehr wissen, als daß es derart beschaffen ist, daß man es für das Klopfen verantwortlich machen kann. Eine wissenschaftliche Theorie, die das Klopfen erklärt, ist nicht deshalb schlecht, weil sie dem üblichen, aber unverbürgten Gemälde des Geschichtenerzählers von dem, was hinter der ewig versiegelten Tür liegt, nicht entspricht.

II.

Allgemein gesagt ist es die Aufgabe der Physik, wissenschaftliche Schlüsse über die Außendinge aus einer Reihe von Signalen zu ziehen, die längs unserer Nerven verlaufen. Aber damit ist die Schwierigkeit des Problems noch zu gering bewertet. Das Material, aus dem wir unsere Schlüsse zu ziehen haben, bilden nicht die Signale selbst, sondern es ist eine phantasievolle Geschichte, die auf ihnen beruht. Es ist so, als würden wir aufgefordert, ein chiffriertes Telegramm zu entziffern, aber man gäbe uns nicht den Schlüssel, sondern nur eine von einem krassen Laien gemachte falsche Übersetzung.

Zwar vermag der Physiologe heutzutage die Nachrichten bei ihrem Durchgang durch die Nerven abzutasten. Er kann die Änderungen des elektrischen Potentials aufzeichnen, die auftreten, wenn ein Nerv gereizt wird, und die Aufzeichnung zeigt eine Folge von Schwingungen, die vermutlich die physikalische Ursache für die Wahrnehmung sind, die im Geiste entsteht. Wir können aber das Studium der Außenwelt nicht mit diesen Aufzeichnungen beginnen. Für ihre Nutzbarmachung ist ein ziemlich fortgeschrittenes wissenschaftliches Wissen vom Wesen des menschlichen Körpers und der Wirkungsweise der verschiedenen Nerven Vorbedingung. Der Physiologe kann nichts anderes tun, als die Botschaften auf ihrem Wege zu einem Gehirn abtasten und sie auf ein anderes Gehirn — sein eigenes — hinlenken. Das ist nicht sehr verschieden von der Methode des Physikers, der die von den Naturdingen

ausgesandten Nachrichten abfängt, ehe sie irgendeinen Nerv erreichen, und der sie beispielsweise veranlaßt, sich auf einer photographischen Platte selbst aufzuzeichnen. Auf dem einen oder anderen Weg müssen die Nachrichten schließlich doch an den Sitz eines Bewußtseins geführt werden, wenn sie in Wissen übersetzt werden sollen.

Es ist das unerbittliche Gesetz unserer Bekanntschaft mit der Außenwelt, daß das, was zum Wissen dargeboten wird, im Vorgang des Bewußtwerdens eine Wandlung erfährt.

So dürfen wir uns, wenn wir sagen, daß die ursprünglichen Gegebenheiten der Physik Nervensignale sind, nicht dadurch täuschen lassen, daß Nervensignale von uns als bekannte Vorgänge in der Außenwelt geschildert werden. Diese Identifizierung unserer ursprünglichen Gegebenheiten ist selbst nichts ursprünglich Gegebenes. Sie ist das Ergebnis unseres mittelbaren Schließens. Dies alles unterstreicht die Schwierigkeit, unser Wissen von der physikalischen Welt bis an seinen wirklichen Ursprung zu verfolgen. Wir bemerken, wie sie sich durch unsere Nerven in unseren Geist einschleicht; aber wir bedurften schon eines beträchtlich fortgeschrittenen Wissens von der Außenwelt, ehe wir überhaupt entdeckten, daß wir ein Nervensystem besitzen.

Mehr durch die Erfordernisse ihrer eigenen Entwicklung als durch Überlegungen der obigen Art sah sich die Physik genötigt, die Kluft anzuerkennen, die sich auftut zwischen der Außenwelt, wie sie in der Alltagsgeschichte der Wahrnehmung erscheint, und der Außenwelt, die ihre Nachrichten an der Eingangspforte des Geistes abgibt. Daher ist die naturwissenschaftliche Geschichte heute nicht mehr eine verbesserte Auflage der Alltagsgeschichte, sondern sie verfolgt ihren eigenen Plan. Wir kennzeichnen wohl den heutigen Standpunkt am besten, wenn wir sagen, daß wir die Alltagsgeschichte wie ein Kryptogramm, wie eine Schrift mit verstecktem Sinn behandeln.

Unsere sinnliche Erfahrung erzeugt ein Kryptogramm, und der Naturforscher ist ein Schwärmer, der sein Leben der Entzifferung des Kryptogramms widmet. Der Erzähler in unserem Bewußtsein erzählt ein Drama, etwa die Tragödie des Hamlet. In bezug auf das Drama ist der Forscher nur ein gelangweilter Zuschauer; er kennt ja die Unzuverlässigkeit der Stückeschreiber. Dennoch folgt er aufmerksam dem Spiel, gespannt auf die Spuren der Geheimschrift, die es birgt. Denn sie wird ihm, sofern er sie zu entziffern vermag, eine wirkliche geschichtliche Wahrheit enthüllen. Vielleicht trifft der

Vergleich noch besser zu, als ich ursprünglich vermutete. Vielleicht ist die Tragödie des Hamlet mehr als ein Kunstgriff zur Verschleierung eines Kryptogramms. Ich möchte zugeben — ja sogar behaupten —, daß das Bewußtsein mit seinen seltsamen Einbildungen einiges voraus hat vor dem verstandesmäßigen Begreifen des Sachverständigen für Geheimschriften. Im wahrsten Sinne ist das Spiel wichtiger als die Geheimschrift, nicht die Geheimschrift wichtiger als das Spiel. Es ist aber hier nicht unsere Aufgabe, diejenigen Merkmale des Menschengesistes zu betrachten, die die Grenzen der stofflichen Welt überschreiten. Wir sprechen von der Außenwelt der Physik, deren Wirkungen uns nur durch Signale längs unserer Nervenbahnen erreichen; und so müssen wir die Geschichte wie ein Kryptogramm behandeln.

Man findet die Lösung eines Kryptogramms, indem man die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Zeichen und Merkmale untersucht. Wir hätten gewiß nie Fortschritte in dem Problem der Schlußfolgerungen aus unserer sinnlichen Wahrnehmung gemacht, und eine theoretische Physik wäre nie entstanden, wenn nicht gewisse Regelmäßigkeiten und Wiederholungen in der sinnlichen Wahrnehmung bemerkbar wären. Diese Regelmäßigkeiten der Wahrnehmung nennen wir Naturgesetze. Ist ein solches Gesetz einmal erkannt, so wird es von da ab auch eine Richtschnur des wissenschaftlichen Schließens, so daß es uns zu weiterer Entzifferung verhilft, genau wie bei der Lösung eines ganz gewöhnlichen Kryptogramms.

Ich weiß nicht, wie der Erkenntnistheoretiker den Vorgang der Lösung eines Kryptogramms in sein Schema einordnen würde. Die entzifferte Nachricht wird aus dem Kryptogramm geschlossen, aber das Verfahren, nach dem geschlossen wird, kann kaum als ein logischer Schluß bezeichnet werden. Wenn ich sage, daß auf die wissenschaftliche Beschreibung der Außenwelt aus unserer sinnlichen Wahrnehmung geschlossen wird, und daß die Wesenheiten der physikalischen Welt aus Schlußfolgerungen bestehen, so brauche ich das Wort Schlußfolgerung in diesem allgemeinen Sinne.

Demnach liegt es uns ob, ein Schema zu entdecken, das durch die Regelmäßigkeiten und Wiederholungen in unserer sinnlichen Wahrnehmung enthüllt wird. Da diese Regelmäßigkeiten in den sinnlichen Wahrnehmungen aller Menschen auftreten, so stellt sich das Schema als eine Außenwelt dar, die die Erfahrungen im Bereich des Bewußtseins verschiedener Einzelwesen miteinander

verknüpft. Indem wir auf diese Weise den Gegenstand unseres Suchens definieren, bestimmen wir in gewissem Grade auch das Wesen dessen, was wir finden werden. Das Weltall der Physik muß schon auf Grund seiner Definition zwei Eigenschaften haben: es muß (ganz oder teilweise) Regelmäßigkeit zeigen und es muß außer uns sein. Wem etwa daran liegt, eine andere Ansicht über die sinnlichen Gegebenheiten oder über das Bewußtsein, in dem sie wohnen, zu haben, dem bestreiten wir nicht das Recht, seine Forschungen auf seine eigene Weise zu verfolgen. Soweit es sich aber um die Physik handelt, lassen wir alles beiseite, was für die Aufklärung der Regelmäßigkeiten und Wiederholungen ohne Belang ist.

Ich muß auch die Bedeutung des Wortes „Außenwelt“ besonders hervorheben. Die vertraute Welt meiner Wahrnehmung scheint außerhalb meiner selbst zu liegen. Aber vor dem Forum der Wissenschaft gilt das, was der Erzähler der Alltagsgeschichte berichtet, nicht als erwiesen. Auch die Welt meiner Träume erscheint mir als eine Außenwelt, und doch besteht sie nirgends als in meinem Geiste. Die Aussage, daß die Welt, die die Wesenheiten der Physik beherbergt, eine Außenwelt ist, ist von alledem ganz unabhängig. Überprüfe ich meinen Bewußtseinsinhalt mit dem Ziel, den Regelmäßigkeiten meiner sinnlichen Wahrnehmungen Ausdruck zu verleihen, so gibt es zwei mögliche Wege, die Gegebenheiten zu behandeln, zwei Wege, auf denen ich den Versuch zur Lösung des Kryptogramms unternehmen könnte. Unter den Gegebenheiten sind gewisse Gehörempfindungen „gesprochene Worte“ und gewisse Lichtempfindungen „gedruckte Worte“, die auf die eine oder andere Weise behandelt werden können. Ich könnte die in ihnen auftretenden Wiederholungen und Regelmäßigkeiten untersuchen, ohne einen Unterschied zwischen ihnen und anderen Gehör- und Lichtempfindungen zu machen. Dann sind alle Wiederholungen solche von Tatsachen in meinem eigenen Bewußtsein, und ihre Erforschung entführt mich nie dem Bezirk meines eigenen Geistes. Die Lösung des Kryptogramms, die durch diese Art der Behandlung erreicht wird, wird — wenn sie überhaupt gelingt — eine innere, egozentrische Welt sein. Aber eine solche Behandlung des Problems der sinnlichen Erfahrung gilt in der Regel nicht als empfehlenswert. Es wird ja auch kein Redner die Hoffnung aufgeben, daß seine Zuhörerschaft seine „gesprochenen Worte“ von einem anderen erkenntnistheoretischen Standpunkt betrachten wird, als den Klang von Schlägen gegen einen Blechtopf. Deshalb werden

gesprochene und geschriebene Worte in der Naturwissenschaft und gemeiniglich auch in der Philosophie nicht nur als unmittelbare Wahrnehmungstatsachen unseres eigenen Bewußtseins behandelt, sondern als etwas, das uns von Wahrnehmungstatsachen Kunde gibt, die im Bewußtsein anderer leben.

So hat das, womit sich uns eine Außenwelt zunächst ankündigt, keinen unmittelbaren Zusammenhang mit der Physik. Sie entspringt aus der Erkenntnis, daß das Problem der Erfahrung sich auf Gegebenheiten bezieht, die über das Bewußtsein vieler Einzelwesen verteilt sind. Die Zusammenfassung der Erfahrungen führt dann notwendig zur Betrachtung eines neutralen Bereichs, der sich mit keinem einzelnen menschlichen Geist deckt. So gehen wir zwar von individuellen geistigen Gegebenheiten aus; aber sobald wir uns an die Erforschung des Geistes anderer machen, werden wir zu der Vorstellung eines Außenbezirks (Raum und Zeit der Physik) geführt, der die von uns gefolgerten Dinge unserer vereinigten Erfahrungen beherbergt. Zu diesen gefolgerten Dingen gehören auch die Nervenfasern und Hirnzellen, in denen wir — bei weiterem Fortschritt der Entzifferung des Kryptogramms — die Ursache der Verbindung zwischen den Dingen dieser Außenwelt und einem einzelpersonlichen Bewußtsein beheimatet finden.

Wir haben gefragt, warum man dem Erzähler glauben soll, wenn er von Galvanometern spricht, obgleich er unglaublich ist, wenn er von Alltagsdingen spricht. Mir scheint, die Antwort ist die, daß der fragliche Punkt gar nicht die Wahrheit der Geschichte ist; den Physiker gehen nur die in ihr enthaltenen Spuren der Geheimschrift an. Das Galvanometer ist eine Vorrichtung, um die Geschichte so zu gestalten, daß die Deutung der in ihr enthaltenen Geheimschrift Irrtümern weniger ausgesetzt ist. Das legt der Phantasie des Erzählers keinen Zügel an.

III.

Der Vorgang der Enträtselung des Kryptogramms ist dadurch gekennzeichnet, daß viele unserer sinnlichen Gegebenheiten sich als überflüssig erwiesen, — nämlich als überflüssig bei der Untersuchung der Wiederholungen. Wir können beispielsweise den Gehörsinn entbehren, denn er zeigt nur Regelmäßigkeiten an, die statt dessen ebenso gut mit anderen Sinnen entdeckt werden können. Parallel mit der Beschränkung der Sinnestypen auf die

kleinste mögliche Zahl ging eine entsprechende Vereinheitlichung der Außenwelt. Ein einziges Schema der Regelmäßigkeiten genügt, an Stelle verschiedener Schemata für jeden unserer Sinne und vielleicht noch weiterer Schemata, elektrischen und magnetischen Sinnen entsprechend, wenn die Natur uns solche gegeben hätte. Diese Beseitigung einer Mannigfaltigkeit von Sinnestypen ist verantwortlich für einige der augenfälligsten Unterschiede zwischen dem gewöhnlichen und dem naturwissenschaftlichen Begriff der Außenwelt.

Ich schreibe dieses Kapitel an einem Herbsttage, und so fühle ich mich in einer vertrauten Welt, deren Hauptmerkmal die Farbe ist. In der physikalischen Welt gibt es keine Farbe. Ich glaube, das ist die richtige Art, es auszudrücken. Tatsächlich wird in der physikalischen Welt jede Farbe durch eine Zahl dargestellt, von der wir annehmen, daß sie die Länge einer Welle von bestimmter Art angibt. Entsprechend werde ich auf dem Telephonamt durch eine Nummer dargestellt, die ein Loch in einem Schaltbrett bezeichnet; aber man dürfte darum doch nicht sagen, daß ich im Fernsprechamt wohne. Anders gesagt, es gibt in der geltenden Beschreibung der physikalischen Welt nichts, das seine Geltung der Tatsache verdankt, daß wir einen Farbensinn haben. Jede unserer Behauptungen kann von einem Farbenblinden nachgeprüft und bestätigt werden. Und tatsächlich verdanken wir auch den größten Teil unseres genauen Wissens von den Farben der farbenblinden photographischen Platte.

Was ist geblieben, nachdem wir alle überflüssigen Sinne beseitigt haben? Es geht ohne Geschmack, Geruch, Gehör und gar ohne Tastgefühl. Nur unsere Augen müssen wir behalten, oder richtiger ein Auge, denn für unsere Fähigkeit des räumlichen Sehens besteht kein Bedürfnis. Das Auge braucht die Fähigkeit, Licht und Schatten zu messen oder abzuschätzen, nicht zu haben. Mir scheint, es genügt, wenn es zwei Schatten eben voneinander unterscheiden kann, damit es erkennt, ob ein undurchsichtiger Gegenstand sich in einer bestimmten Lage befindet oder nicht.

Mit dieser eingeschränkten Ausrüstung können wir geometrische Gestalt und Größe noch erkennen. Wir können erkennen, daß ein Gegenstand rund, ein anderer länglich erscheint, oder daß der eine offensichtlich größer ist als der andere. Vor einigen Jahren war ein Standpunkt erreicht, bei dem räumliche Gestalt und Größe die einzigen Merkmale unseres Alltagsbildes waren, die auch in der Außenwelt der Physik noch auftraten. Das führte zu einer Geo-

metrisierung der Physik. Man versteht, weshalb die Physik auf dieser Stufe in Methode und Wortschatz so weitgehend geometrisch wurde. Die beibehaltenen Gegebenheiten, die die regelmäßigen Wiederholungen enthielten, waren durchaus geometrisch. Alle anderen Gegebenheiten waren als überflüssig über Bord geworfen worden, sobald man erkannt hatte, daß sie nur die gleichen Wiederholungen enthüllten, wie die geometrischen Gegebenheiten.

Indem wir das sinnliche Rüstzeug unserer Beobachter begrenzten, trugen wir viel zur Schlichtung ihres Streites bei. Indem wir z. B. auf ihre Ohren verzichteten, beendeten wir die Auseinandersetzungen der musikalischen Kritiker. Ich sage nicht, daß sie über ein Nichts stritten, aber, was es auch sei, es ist ohne Belang für das Schema der Regelmäßigkeiten, dem der Physiker auf der Fährte ist.

Aber es erwies sich, daß die Beobachter weiter stritten, selbst als nur noch Gestalt und Größe zum Streiten übrig waren *. Deshalb ging 1915 Einstein zu einem neuen Angriff auf ihr sinnliches Rüstzeug über. Er beseitigte aus ihrem Auge die gesamte Netzhaut bis auf einen kleinen Fleck. Der Beobachter konnte in der Außenwelt Gestalt und Ausdehnung nicht mehr erkennen, wohl aber konnte er sagen, ob zwei Dinge sich augenscheinlich am gleichen Ort befinden oder nicht.

Wenn man etwas über Einsteins Relativitätstheorie liest, findet man viele Hinweise auf eine seltsame Gestalt, genannt „der Beobachter“, — das ist jener Mann, der gewohnheitsmäßig in einem Aufzug herabfällt oder mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde mit einem Flugzeug einherschaut. Da habt ihr jetzt sein Bild. Er hat ein Auge, sein einziges Sinnesorgan, und das ist farbenblind. Er kann nichts unterscheiden als nur zwei Schattierungen von Licht und Dunkelheit, so daß die Welt für ihn einer Schwarzweißzeichnung gleicht. Der empfindliche Teil seiner Netzhaut ist so eng begrenzt, daß er nur in einer Richtung gleichzeitig sehen kann. Wir bewilligen ihm jede beliebige Zahl von Assistenten, alle ebenso ausgerüstet wie er, so daß sie auf die verschiedenen Teile eines Versuches achten und ihr Wissen nachher in einen Topf werfen können. Nachdem wir ihn so verstümmelt haben, kann er einen Versuch nicht selbst ausführen. Wir nehmen die Versuche selbst vor und lassen ihn die Aufsicht führen. Der springende Punkt ist, daß wir ihm unser gesamtes Wissen von der Außenwelt, wie es heute in der Physik gilt, durch Versuche belegen

* Vgl. z. B. The Nature of the Physical World, S. 12—16. Das Weltbild der Physik, S. 19—23.

können. Wenn wir ihn nicht überzeugen können, haben wir kein Recht, auf diesem Wissen zu bestehen.

Ich will mich nicht damit aufhalten, dieses drastische Verfahren zur Einschärfung von Ehrfurcht vor der Wahrheit im einzelnen zu rechtfertigen. Ich will nur darauf hinweisen, daß es nicht so ganz und gar abwegig ist, denn wir haben ja dem Beobachter die Möglichkeit gelassen, zu erkennen, daß ein Zeiger mit einem bestimmten Punkt einer Skala zusammenfällt. Fast jede physikalische Messung, die auf einige Genauigkeit Anspruch macht, erweist sich als eine Zeigerablesung dieser Art. Statt uns auf unseren Wärmesinn zu verlassen, lesen wir die Länge eines Quecksilberfadens an der Gradteilung eines Thermometers ab. Anstatt uns auf unser inneres Zeitgefühl zu verlassen, beobachten wir das Zifferblatt einer Uhr. So wird der Beobachter im allgemeinen keine Schwierigkeit bei der Entscheidung von Genauigkeitsfragen haben. Seine Verstümmelung wird es ihm ziemlich schwer machen, dem, was der Versuch bezweckt, genau zu folgen. Aber mit Hilfe des Heeres von Assistenten, das wir ihm bewilligt haben, wird er eine ausreichende Aufsicht über alle Teile der Versuchsanordnung ausüben können.

Ich will ein Beispiel dafür geben, wie in der wissenschaftlichen Praxis Zeigerablesungen an die Stelle verschiedener sinnlicher Gegebenheiten gesetzt werden. Unser idealer Beobachter soll keinen Sinn für die Abstufung von Licht und Schatten haben. Darum werden ihm beim Anblick des Nachthimmels alle Sternpunkte in gleicher Helligkeit erscheinen. Wird ihn das nicht ziemlich untauglich zum Astronomen machen? Keineswegs. Denn wie erkennt denn ein Astronom von Beruf in Wirklichkeit die Helligkeitsunterschiede der Sterne? Zufällig ist das das Arbeitsgebiet, mit dem meine eigene Sternwarte jetzt hauptsächlich beschäftigt ist. Wir benutzen ein Verfahren, das auch an einigen anderen Orten üblich ist, und das erfahrungsgemäß für die helleren Sterne die bei weitem genauesten Ergebnisse liefert. Das Licht des Sternes wird durch ein Fernrohr auf eine lichtelektrische Zelle vereinigt. Doch halt, wie wissen wir, daß wir den richtigen Stern erwisch haben und daß wir den Stern wiedererkennen können, den wir gemessen haben? Sterne werden gewöhnlich an den Mustern erkannt, die sie mit anderen Sternen bilden — Kreuze, Dreiecke, W's usw. Aber man wird sich erinnern, daß Einstein das Gesichtsfeld unseres idealen Beobachters so eingeschränkt hat, daß er diese Muster nicht sehen kann. Das schadet gar nichts. Der Beobachter in Cambridge wäre auch sowieso nicht in der Lage, die Muster zu sehen, denn das Fernrohr ist so

eingebaut, daß die Beobachtungen in einem geschlossenen Raum ohne unmittelbare Sicht des Himmels gemacht werden; und wenn das lichtelektrische Gerät angebracht ist, kann der Beobachter durch das Fernrohr nicht mehr als einen Stern gleichzeitig sehen, genau als hätte Einstein seine Netzhaut wirklich operiert. Der Stern wird eingestellt und identifiziert durch Ablesungen auf zwei kreisförmigen Gradteilungen, die sich an dem Fernrohr befinden. So tritt sogar bei der Identifizierung des Sternes eine Zeigerablesung an die Stelle anderer sinnlicher Kennzeichen.

Das auf die lichtelektrische Zelle fallende Licht macht an der Oberfläche einer Kaliumschicht Elektronen frei, und diese werden durch eine konstante elektrische Spannung (die zufällig mit einer weiteren Zeigerablesung gemessen wird, nämlich mittels eines Voltmeters) auf die Nadel eines Elektrometers getrieben. Von technischen Einzelheiten abgesehen, ist es die Aufgabe des Beobachters, zu verfolgen, wie die Zeignadel des Elektrometers von der Koinzidenz mit dem einen Skalenteil zur Koinzidenz mit dem nächsten Skalenteil wandert, und gleichzeitig die dazu nötige Zeit mit einer Stoppuhr zu messen. Je heller das Licht des Sternes ist, um so kürzer ist die Zeit. So entpuppt sich schließlich die Helligkeitsmessung des Sternes selbst wiederum als eine weitere Zeigerablesung, nämlich die des Zeigers der Stoppuhr auf ihrem Zifferblatt*.

„Denn ein Stern übertrifft den anderen nach der Klarheit“, schreibt der Apostel. Der Nautische Almanach nimmt es genauer: 2 Ceti, $4^m 62$; α Andromedae, $2^m 15$; β Cassiopeiae, $2^m 42$; usw. Sogar den Glanz der Sonne hat man entsprechend als $— 26^m 7$ in die Größenskala eingeordnet. „Wie bist du vom Himmel gefallen, du schöner Morgenstern!“ All dein Glanz hat sich in eine Zeigerablesung an einer irdischen Stoppuhr verwandelt.

IV.

Wenn ein Verzeichnis von Zeigerablesungen der Weisheit letzter Schluß wäre, so dürften wir wohl fragen, ob dann die physikalische Wahrheit des Suchens wert ist. Aber die Zeigerablesungen sind nur

* Der Druck auf die Stoppuhr im richtigen Augenblick erfordert ein Tastgefühl, so daß in dieser Hinsicht die Beobachter in Cambridge vor unserem theoretischen Ideal nicht bestehen können. Aber das Prinzip wäre nicht verletzt, wenn ein selbsttätiges Verfahren zur Zeitnahme für die Bewegung der Nadel an die Stelle träte.

erst der Anfang; sie treten an die Stelle des Romans des Erzählers, den wir als einen falschen Ausgangspunkt ansehen müssen. Sie bilden das Material, das alle die Wiederholungen enthält, mit deren Hilfe das Kryptogramm entziffert wird; denn wir wissen aus Erfahrung, daß die Heranziehung einer größeren Mannigfaltigkeit sinnlicher Gegebenheiten nur Überflüssiges liefert. Wir werden in späteren Kapiteln einiges über die Ergebnisse der Entzifferung erfahren, und vielleicht werdet ihr euch dann überzeugen, daß die Rechenschaft, die wir uns über die Geschichte der Sterne geben können, ein keineswegs unebenbürtiger Ersatz dafür ist, daß wir die romantischen Phantasien unseres Erzählers zu den Akten gelegt haben.

Wenn nun jede Beobachtung auf Koinzidenzen und Zeigerablesungen beschränkt ist, so könnte man die Frage stellen, ob wir daraus je irgend etwas anderes erschließen können als ein System von Beziehungen zwischen Koinzidenzen und Zeigerablesungen. In gewissem Sinne lautet die Antwort: Nein. Wird aber die Frage in der Form gestellt: „Können wir, indem wir Zeigerablesungen handhaben, je zu einem Wissen gelangen, das nicht nach Zeigerablesungen riecht?“, so meine ich, daß man ebensowohl fragen könnte: „Kann ein Künstler, indem er Farben handhabt, je ein Werk schaffen, das nicht nach Farbe riecht?“ Aber ich möchte diese Frage nicht leicht-herzig beiseite schieben, denn sie trifft genau in den Kern des Unterschiedes zwischen der alten und der neuen naturwissenschaftlichen Betrachtungsweise. Wir werden später sehen, daß ein Schema von Beziehungen oder eine Struktur eine Bedeutung hat, die aus dem innersten Wesen dessen, was der Gegenstand der Beziehung ist, abgeleitet werden kann. Der Gegenstand unseres Forschens ist die Struktur, und wenn wir eine Kenntnis von der Struktur erlangt haben, dürfen wir das Gerüst geringschätzen, mit dessen Hilfe wir bis zu ihr vorgedrungen sind. Es tut der Würde der Struktur keinen Abbruch, daß ihre Elemente Zeigerablesungen sind; das ist ohnehin nur ihr Name im Munde des Erzählers.

Wenn nun keines der Bilder, die unsere sinnliche Wahrnehmung ausmachen, auf die physikalische Welt anwendbar ist, in welcher Gestalt können wir dann unser Wissen von der physikalischen Welt ausdrücken? Wir haben unser Kryptogramm entziffert, aber das Ergebnis ist eine Botschaft in unbekannter Sprache, und es besteht keine Hoffnung, daß wir sie je in die Sprache des Geschichtenerzählers übersetzen können. Doch folgt daraus keineswegs, daß sie der Einsicht des Geistes nicht zugänglich wäre. Die Anschauung ist

nur ein Teil unseres geistigen Rüstzeuges, und die Sprache der Anschauung ist nur ein Teil der Sprache des Wissens. Die Entzifferung der Geheimschrift in unserer Erfahrung führt zu einem Verständnis unserer Umwelt, das zwar wahrlich sehr abstrakt ist und nur durch eine symbolische Ausdrucksweise verstandesmäßig begriffen werden kann, das aber trotzdem dem Wissensdrange des menschlichen Geistes genügt. Im 12. Kapitel will ich versuchen, im einzelnen zu erklären, wie ein unverfälschtes Wissen von der Außenwelt ohne Bezugnahme auf anschauliche Bilder ausgedrückt und begriffen werden kann. Hier will ich mich mit einem Hinweis begnügen.

Der Satz, den ich jetzt gerade schreibe, kann in verschiedenen Gestalten auftreten. Er kann aus einer Reihe von Klängen bestehen, die ein Lauscher vernimmt. Er kann in einem Buch gedruckt sein. Er kann von einem Grammophon wiedergegeben werden, und er kann als eine Spur auf einer Schallplatte vorhanden sein. Ursprünglich war er ein geistiges Erzeugnis, ungesprochen und ungeschrieben. Alle diese Gestalten haben etwas gemein, und dieses gemeinsame Element macht, wenn wir es herauschälen können, den Satz aus *. Es könnte wohl Erscheinungsformen eines Satzes geben, die uns heute unvorstellbar sind, so wie man vor hundert Jahren sich kaum hätte vorstellen können, daß ein Satz sein Dasein als eine Schallplattenaufnahme führen könne. Wir beschreiben die verschiedenen Gestalten nach Art der uns geläufigen Bilder — als Klänge, Schallplatten, schwarze und weiße Gestalten —, aber der Satz selbst ist von allen vertrauten Bildern losgelöst. (Ich möchte wiederum daran erinnern, daß ich die genauen Worte meine, nicht den Sinn des Satzes.) Das macht unser Wissen von dem Satz nicht etwa unbefriedigend oder unvollständig. Wenn ich einem Kinde etwas von Nelsons berühmter Botschaft an die Flotte erzähle, so bedarf es keiner einleitenden Belehrung über die Methoden des Signalwesens zur See. Und wenn wir voraussehen könnten, daß über hundert Jahre ein bestimmter Satz von einem Wesen zu einem anderen gelangen wird, so wäre das ein genaues und verständliches Wissen um die Zukunft, selbst wenn die Übertragung mit Mitteln erfolgte, die für uns zur Zeit unvorstellbar sind, und die deshalb in der uns geläufigen Sprache nicht ausgedrückt werden können.

Der Satz, der die Lösung eines gewöhnlichen Kryptogramms bildet, ist nicht an eine bestimmte Daseinsform geknüpft. Gleichmaßen ist auch die Außenwelt der Physik, die die Lösung des

* Ich meine damit nicht den Sinn des Satzes, der auch durch einen anderen Satz oder in einer anderen Sprache vermittelt werden könnte.

Kryptogramms unserer sinnlichen Erfahrung bildet, nicht an eine bestimmte Daseinsform geknüpft. Betrachten wir also die Erfahrung als ein Ganzes, so stoßen wir beim Übergang von der geistigen Erfahrung zu den Vorgängen in der physikalischen Welt auf keine Unstetigkeit der Daseinsform, es sei denn, daß wir eine solche absichtlich herbeiführen*. Natürlich besteht ein Unterschied, denn unsere Analyse zielt ja darauf ab, Unterschiede festzustellen, aber es besteht kein Dualismus. Der alte philosophische Dualismus von Geist und Stoff scheint der jenes Menschen gewesen zu sein, der einen Teil seines Unterrichts mündlich, den anderen schriftlich erhielt, und der sich nun außerstande fühlt, diese Teile unter einen Hut zu bringen, und zwar wegen des unvereinbaren Wesens von Schallwellen und Tinte.

Bei der Abschaffung der überflüssigen Sinneswahrnehmungen haben wir unser Beobachtungsmaterial auf Zeigerablesungen oder, allgemeiner gesagt, auf Koinzidenzen beschränkt. Einsteins allgemeine Relativitätstheorie (1915) gründete sich auf den Grundsatz, daß beobachtbare Gegebenheiten stets durch Koinzidenzen beschrieben werden können, oder wie man zu sagen vorzieht, durch „Schnittpunkte von Weltlinien“. Offenbar muß jeder Schluß, den wir ziehen, jede Struktur, die wir der Außenwelt zuschreiben, derart beschaffen sein, daß sie invariant ist, d. h. unabhängig von jeglichen Veränderungen, die wir an unserem Bilde vornehmen, sofern diese nicht die Schnittpunkte von Weltlinien ändern, also Schnittpunkte in Punkte verwandeln, die keine solchen sind. Unsere Folgerungen müssen anpassungsfähig sein. Wenn wir ein Netzwerk von Linien ersinnen, deren Schnittpunkte den beobachteten Koinzidenzen punktweise entsprechen, so wird das Netzwerk, man möge es verformen oder verdrillen, wie man will, alles was wir wirklich wissen, immer noch richtig darstellen, sofern die Knotenpunkte unversehrt bleiben. Ich glaube, ein Musiker, der eine Rundfunkübertragung hört, kann im Geiste die Bewegungen der Finger und sogar des Kopfes und des Körpers des Pianisten sehen. Läßt er aber seine vorgefaßte Meinung bei Seite, so kann er aus dem Schall in Wirklichkeit nichts anderes schließen, als daß gewisse Tasten längere oder kürzere Zeit mit größerer oder kleinerer Kraft angeschlagen wurden, und jede vorgestellte Bewegung, die zu diesem Ergebnis

* Genau so, wie wir eine Unstetigkeit der Gestalt zwischen einem Kryptogramm und seiner Lösung schaffen könnten, indem wir jenes schriftlich und diese mündlich geben.

führt, ist ein in gleicher Weise zulässiger Schluß. Ebenso können wir, indem wir vorgefaßten Meinungen absagen, keine Entscheidung fällen zwischen verschiedenen möglichen Struktursystemen der Außenwelt, die zu der gleichen Folge von Impulsen an den menschlichen Nervenenden führen würden. Oder da die Struktur des Nervensystems selbst etwas Gefolgertes ist, so können wir die ganze Struktur der physikalischen Welt — einschließlich der Nerven — auf jede Weise umformen, bei der nicht die Folge der Impulse geändert wird, welche jene Punkte der Struktur erreichen, die als die Eingangspforten zum Bewußtsein erkannt worden sind. Die Lösung des Kryptogramms hat (gleich dem obigen Satz) viele Daseinsformen und auch (ungleich jenem Satz) viele gleichwertige und in gleicher Weise zulässige Darstellungen innerhalb der gleichen Daseinsform.

Diese Anpassungsfähigkeit der Darstellung — die so verschieden ist von der Darstellung unserer Umwelt in der Fassung des Erzählers — fand ihren Eingang in die Physik zuerst in Einsteins Relativitätstheorie. Darum ist die Relativitätstheorie ein so epochemachender Bruch mit der Überlieferung. Es ist bemerkenswert, daß die Umwälzung des Denkens aus der Physik selbst geboren wurde. Ich habe auseinandergesetzt, daß auf Grund der Eigenart unserer Bekanntschaft mit der physikalischen Welt eine Anpassungsfähigkeit der Darstellung dessen bestehen muß, was wir über sie entdecken — so daß viele scheinbar verschiedene Darstellungen der Weltstruktur in allem, was die Beobachtungen betrifft, gleichwertig sind. Aber diese Frage erhob sich in der Physik ursprünglich nicht auf Grund derartiger Betrachtungen. Der Physiker ist im gewöhnlichen Laufe seiner Arbeit auf eine Mannigfaltigkeit von Darstellungen gestoßen. Das hat ihn arg gestört. Er glaubte, er müsse entscheiden, welche Darstellung die „richtige“ ist. Es gab Dinge in der Natur, von denen er nie bezweifelt hatte, daß sie etwas ganz Bestimmtes seien. Der Geschichtenerzähler sagte das, und das genügte für einen Menschen, der mit nackten Tatsachen zu tun hat. Die Natur jedoch weigerte sich mit den kunstvollsten Mitteln, irgend etwas Genaues über sie zu enthüllen. Ich glaube nicht, daß die Natur ihrem Wesen nach ungenau und liederlich ist. Aber sie ist genau auf ihre eigene, nicht auf des Geschichtenerzählers Weise. Und so sah sich der Physiker schließlich durch seine eigenen Entdeckungen genötigt, die Erkenntnisgrundlagen und die Art von Wahrheit, die durch seine Methoden gewährleistet werden kann, etwas genauer unter die philosophische Lupe zu nehmen.

V.

Zur Zeit zerfällt die theoretische Physik scharf in die makroskopische und die mikroskopische Theorie. Jene handelt von Systemen von solchen Ausmaßen, daß sie unseren groben Sinnen zugänglich sind, diese von der winzigen atomaren Substruktur, die den groben Erscheinungen zugrunde liegt. Allgemein gesprochen werden makroskopische Systeme von der Relativitätstheorie, mikroskopische von der Quantentheorie beherrscht. Diese beiden Theorien müssen schließlich einmal verschmolzen werden. Die Verschmelzung ist tatsächlich heute im Werden. Zum Zweck einer allgemeinen Übersicht ist es aber einfacher, sie sich getrennt zu denken.

Die mikroskopische Physik führt Begriffe ein — Moleküle, Atome, Elektronen, Protonen, Photonen usw. —, die in der Alltagsgeschichte überhaupt nicht auftreten. Die Naturphilosophen neigten dazu, sie als im höheren Grade hypothetisch anzusehen, als die Gegenstände der makroskopischen Physik. Prof. H. Dingles „Science and Human Experience“ (S. 47) ist ein typisches Beispiel dieser Haltung. Nach ihm sind Atome und Elektronen unbeweisbare Hypothesen, Existenzen, deren Unbeobachtbarkeit ein Teil ihres eigentlichen Wesens ist. Er stellt sie in Gegensatz zu den gewöhnlichen „beobachtbaren“ Dingen, und er will uns glauben machen, daß sie nicht auf die gleiche Art mit der menschlichen Erfahrung verknüpft sind, wie jene älteren Insassen der physikalischen Welt, als da sind Stöcke und Steine und Sterne. Diese Unterscheidung erscheint mir ganz unverbürgt.

Ein Elektron ist nicht mehr und nicht weniger hypothetisch als ein Stern. Heute zählen wir Elektronen Stück für Stück im Geiger-Zähler, genau wie wir Sterne Stück für Stück auf einer photographischen Platte zählen. In welchem Sinne kann denn einem Elektron ein geringerer Grad von Beobachtbarkeit zugeschrieben werden als einem Stern? Ich weiß zwar nicht genau, ob ich sagen darf, daß ich schon ein Elektron gesehen habe. Doch hege ich den gleichen Zweifel, ob ich je einen Stern gesehen habe. Habe ich diesen gesehen, so auch jenes. Ich habe ein kleines Lichtscheibchen gesehen, umgeben von Beugungsringen, das nicht die mindeste Ähnlichkeit mit dem hat, was man sich unter einem Stern vorstellt. Aber der Name „Stern“ wird dem Ding in der physikalischen Welt beigelegt, von dem vor einigen hundert Jahren eine Kette von Verursachungen ausging, deren Ergebnis dieser einzelne Lichtfleck ist. Ich habe ebenso auch in einer Wilson-Kammer eine Spur gesehen, die nicht

im mindesten dem ähnelte, was man sich unter einem Elektron vorstellt. Aber der Name „Elektron“ wird dem Ding in der physikalischen Welt beigelegt, welches das Erscheinen dieser Spur verursacht hat (Tafel I). Wie kann man die Behauptung aufrecht erhalten, daß im einen Falle eine Hypothese eingeführt wurde, im anderen nicht?

Wenn wir also die Wirklichkeit der physikalischen Welt und der Wesenheiten, die sie aufbauen, erörtern, so haben wir keinen Grund, zwischen den makroskopischen und den mikroskopischen Wesenheiten einen Unterschied zu machen. Sie muß als ein Ganzes behandelt werden. Ist die physikalische Welt eine Hypothese, so sind Sterne und Elektronen hypothetisch; ist die physikalische Welt etwas Gefolgertes, so sind es auch Sterne und Elektronen; gibt es wirklich eine physikalische Welt, so sind auch die Sterne und die Elektronen Wirklichkeit. Natürlich dürfen wir nicht vergessen, daß die Wissenschaft fortschreitet, und daß die verschiedenen Wesenheiten, die nach der heute herrschenden Ansicht die physikalische Welt bilden, sozusagen auf Probezeit angestellt sind. Aber diese Unsicherheit der Verhältnisse innerhalb des physikalischen Schemas ist hier kein strittiger Punkt. Wir betrachten in diesem Kapitel nicht so sehr die vorläufigen Ergebnisse, als vielmehr die Grundlagen der Physik mit kritischen Augen. Vielleicht ist es ganz angebracht, eine Ausdrucksweise aus der Handels- und Finanzwelt zu entleihen. Man pflegt sich in Urkunden durch den Zusatz „Irrtum vorbehalten“ zu sichern. Ich beruhige mein Gewissen damit, daß Atome, Elektronen und andere Begriffe der mikroskopischen Physik (Irrtum vorbehalten) Hypothesen, Schlußfolgerungen oder Wirklichkeiten sind, je nachdem Stühle und Tische und andere alltägliche Dinge der physikalischen Welt Hypothesen, Schlußfolgerungen oder Wirklichkeiten sind.

Als wir unseren idealen Beobachter der meisten seiner Sinnesorgane beraubten, ließen wir ihm einen Teil eines Auges, auf daß er Koinzidenzen beobachten könne. War das nicht eine recht willkürliche Auswahl unter seinen verschiedenen Sinnesorganen? Vielleicht ja. Sie war lediglich durch praktische Erwägungen geboten. Ich will sie nicht auf philosophischem Boden verteidigen. Ich gedenke nicht, mich mit meinem Hund in eine Auseinandersetzung darüber einzulassen, ob gedanklich das Auge oder die Nase das vertrauenswürdigste Organ zur Erforschung der Außenwelt ist. Ich behaupte lediglich, daß in einem Wettkampf zwischen verschiedenen Beobachtern, deren jedem nur eine Art von sinnlicher Empfindung

bewilligt ist, der Einsteinsche Beobachter zur Zeit in der Entdeckung des Regelmäßigkeitsschemas, das allen sinnlichen Eindrücken zugrunde liegt, am weitesten gekommen ist. Die Technik des Experimentalphysikers ist mehr und mehr dahin gekommen, daß sie von der Beobachtung von Koinzidenzen (Zeigerablesungen und ähnlichen Messungen) abhängt. Schlüsse auf Grund unserer anderen Wahrnehmungen enthüllen zum Teil das gleiche Regelmäßigkeitsschema in der Natur, aber sie dringen in seiner Enträtselung nicht so weit vor. (Die Geschlossenheit des Schemas, das allen unseren verschiedenen Wahrnehmungen zugrunde liegt, ist kein Urteil a priori; sie ist ein, vielleicht falscher, Schluß, den wir aus denjenigen Bruchstücken des Schemas gezogen haben, die bisher entdeckt worden sind.) Da es sich um eine reine Frage der Zweckmäßigkeit zu handeln scheint, so sind wir meines Erachtens nicht berechtigt, der Wahrnehmung von Koinzidenzen eine besondere philosophische Bedeutung beizumessen. Im besonderen sollten wir unser geistiges Bild von einer Koinzidenz nicht in die Außenwelt verpflanzen.

Von unserem früheren wissenschaftlichen Standpunkt aus pflegten wir anzunehmen, daß es in der Außenwelt Gestalt und Größe genau so gäbe, wie sie in unserer Wahrnehmung erscheinen — nicht wie die Farbe, die durch eine Wellenlänge dargestellt werden mußte. Vielleicht möchten die meisten Physiker jetzt den Begriff der Koinzidenz auf dieselbe Weise übertragen und annehmen, daß die Koinzidenzen und Schnittpunkte, von denen in der naturwissenschaftlichen Beschreibung die Rede ist, den Koinzidenzen und Schnittpunkten in unserem geistigen Bilde genau gleichen. Ich glaube nicht, daß diese naive Übertragung von wesentlich geistigen Bezugsweisen zulässig ist; und es ist wichtig, festzustellen, daß die Quantentheorie eine deutliche Warnung dagegen erläßt.

Die beobachteten Koinzidenzen der groben Körper sind natürlich nur ungefähre Berührungen. Aber wenn wir es mit kleineren und kleinsten Teilchen zu tun bekommen, kann die Beobachtung der Koinzidenz zu ständig wachsender Genauigkeit verfeinert werden. Wenn die Koinzidenz der Schlußstein der Weltstruktur wäre, so sollten wir erwarten, ihre größte Verfeinerung in der Theorie der Atome und Elektronen zu finden. Aber im Gegenteil, die moderne Physik stellt Atome und Elektronen in einem Schema dar, das Koinzidenzen verbietet. Es gibt ein fundamentales Gesetz, genannt das Pauli-Verbot, welches aussagt, daß niemals zwei Elek-

tronen sich in derselben Zelle des Phasenraumes befinden können, in dem wir sie darstellen.

In der Quantentheorie geben wir den letzten Rest einer Übertragung der Elemente der Alltagswelt in die physikalische Welt auf. Die Beziehung zwischen diesen Welten besteht nicht in solcher Übertragung, sondern in einer Schlußfolgerung. Die Schlußfolgerungen ähneln den sinnlichen Gegebenheiten ebensowenig wie ein Verbrecher den von ihm hinterlassenen Spuren ähnelt. Ich habe gezögert, ob ich nicht einen Vorbehalt machen sollte. Ganze Zahlen übertragen wir ohne Bedenken aus der Alltagswelt in die physikalische Welt. Ein Apfel in der Alltagsgeschichte hat ein Gegenstück in der Außenwelt. Keiner unserer Alltagsbegriffe ist geeignet, das Wesen dieses Gegenstücks zu beschreiben, und wir können es nur mit einem Symbol bezeichnen, etwa mit X. Aber wir können dann jedenfalls sagen, daß das Gegenstück von zwei Äpfeln in der Alltagsgeschichte zwei X sind. Hierfür will ich mich verbürgen, aber ich möchte mich nicht darauf verlassen, daß die *Zweiheit* von zwei X genau das gleiche ist wie die *Zweiheit* von zwei Äpfeln. Im Falle von Elektronen möchte ich noch weiter gehen. Ich glaube nicht, daß die *Zweiheit* von zwei Elektronen auch nur ein Deut das gleiche ist wie die *Zweiheit* der beiden Äpfel in der Alltagsgeschichte. Tatsächlich sollte der Begriff der Menge in der Außenwelt als eine mit Alltagsworten nicht beschreibbare Eigenschaft betrachtet werden, die, ihrem Wesen nach diskontinuierlich, der Reihe der arithmetischen ganzen Zahlen zugeordnet werden kann, genau wie kontinuierliche Eigenschaften kontinuierlichen Maßzahlen zugeordnet werden.

VI.

Im Hinblick auf den engeren Zusammenhang, der heute zwischen der Naturwissenschaft und der Philosophie besteht, möchte ich eine Frage aufwerfen, die ihre Zusammenarbeit betrifft. Ein Merkmal der Naturwissenschaft ist ihre schrittweise Annäherung an die Wahrheit. Gibt es etwas entsprechendes in der Philosophie? Erkennt die Philosophie, und gibt sie eine angemessene Stellung dem, was nicht reine Wahrheit, wohl aber auf dem Wege zur Wahrheit ist? Ich möchte hier dem Leser eines vorbeugend sagen: Während ich ihm in diesem Eingangskapitel das Ideal vor Augen führe, nach dem wir streben, indem wir die Wahrheit über die Außenwelt von den

Phantasien des Geschichtenerzählers scheiden, werde ich mich in späteren Kapiteln nicht an denselben strengen Standpunkt halten. In der Tat würde es einen Mangel an Augenmaß bedeuten, wenn man den Dampfhammer der kritischen Philosophie benutzte, um jede Nuß am Baum der Wissenschaft zu knacken. Es ist wesentlich, daß die Philosophen erkennen möchten, daß sie es bei der Beschäftigung mit dem naturwissenschaftlichen Weltbild mit einem in allmählicher Entwicklung befindlichen Schema zu tun haben. Ich meine damit nicht einfach, daß sie es wegen seines Mangels an Endgültigkeit mit Vorsicht genießen sollten. Ich meine, daß das Fahrzeug des Fortschritts nicht nach den gleichen Grundsätzen ausgestattet ist wie ein Wohnhaus. Das naturwissenschaftliche Ziel ist notwendig etwas verschieden von dem philosophischen Ziel, und ich bin nicht bereit zuzugeben, daß es ein weniger würdiges Ziel ist.

Es würde der Naturwissenschaft nichts helfen, wenn die Philosophen uns ihre Einblicke in die reine Wahrheit aufdrängten, Jahrhunderte bevor unser Schema reif zur Aufnahme ist. Wäre die Physik von der Philosophie angeleitet worden, so wäre sie vielleicht schon lange vor Einstein relativistisch gewesen. Aber ich bin gewiß, daß die Physik jetzt nicht auf einer so hohen Stufe stehen würde, wenn sie niemals durch die nichtrelativistische Epoche des 19. Jahrhunderts hindurchgegangen wäre. Wenn also die Physik nach mühevoller Forschungsarbeit zu „revolutionären Schlüssen“ gelangt, von denen die Philosophie beansprucht, sie schon in der Wiege gekannt zu haben, so hat die Geschichte zwei Fassungen. Nach der einen ist der Physiker ein Arbeitsmann von dickköpfiger Veranlagung, der sehr viel schneller vorangekommen wäre, wenn er nur auf den Rat der Philosophen gehört hätte. Die zweite ist die, daß der Philosoph ein offizieller Zuschauer ist, der den Arbeitsmann stört, indem er ihm Werkzeuge in die Hand drückt, bevor er so weit ist, sie gebrauchen zu können. Wie gewöhnlich in solchen Fällen, dürfe die Wahrheit vermutlich irgendwo zwischen den beiden Fassungen liegen.

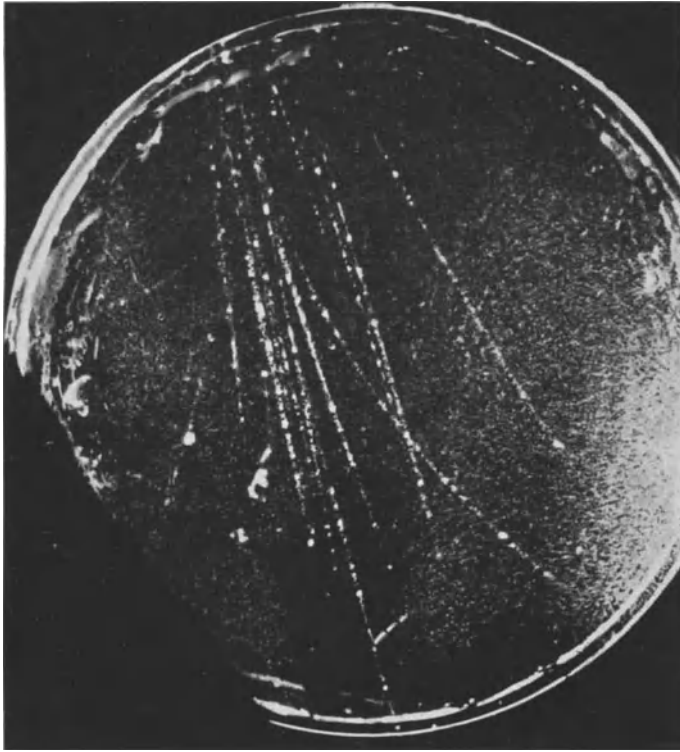
Ich glaube, daß ich, ehe ich schließe, der einfachen Frage Antwort stehen muß: Existiert die Außenwelt, wie sie („Irrtum vorbehalten“) in der Physik beschrieben wird, wirklich? Aber ich halte das gar nicht für eine „einfache Frage“. Die Schwierigkeit ist die, daß die Worte Existenz und Wirklichkeit, wie alle anderen Worte, die wir benutzen, einer Begriffsbestimmung bedürfen, und ich weiß nicht, an wen ich mich für eine anerkannte Begriffsbestimmung wenden soll. Es besteht kein Grund zu glauben, daß

ein Physiker, ein Mathematiker und ein Philosoph mit dem Wort „Existenz“ denselben Sinn verbinden. Descartes scheint geglaubt zu haben, daß er existiere, weil er dachte. Dr. Johnson scheint geglaubt zu haben, daß der Stein existiert, weil man ihn stoßen kann. Andere haben ihre eigene Existenz als eine strittige Frage angesehen.

Was mich betrifft, so ist jede Vorstellung, die ich vom Existieren habe, von meiner eigenen Existenz abgeleitet. Und so ist meine eigene Existenz eine tautologische Folge jeder Begriffsbestimmung, die ich anzunehmen bereit sein sollte. Andere bewußte Wesen existieren auch, denn ich bin überzeugt, daß ich ihnen die Merkmale nicht abstreiten darf, die ich an mir selbst erkenne. So schaffe ich die Ansätze für ein „Gewebe der Existenz“, zu dem alles, was zu meiner Kenntnis kommt, auf mannigfache Weise in Beziehung steht. Ich habe versucht, die besondere Weise aufzuzeigen, auf die die Welt der Physik mit ihm in Beziehung steht. Ich vermute, daß die meisten Menschen der Meinung sein werden, daß eine auf diese Weise in Beziehung gesetzte Welt Anspruch darauf hat, als ein Teil des gleichen Gewebes der Existenz angesehen zu werden. Aber ich kann mich nicht sonderlich für den Wunsch erwärmen, eine unklare statt einer genauen Beschreibung dieser Beziehung anzuwenden. Soweit ich indessen den Sinn der Frage beurteilen kann, scheint die Antwort bejahend zu sein, die Außenwelt, wie sie („Irrtum vorbehalten“) in der Physik beschrieben wird, die gibt es wirklich.

Es ist vielleicht nützlich, noch eines hinzuzufügen. Ich glaube nicht, daß bei einem irgendwie rechtmäßigen Gebrauch des Wortes gesagt werden kann, daß die Außenwelt der Physik die *e i n z i g e* Welt ist, die es in Wirklichkeit gibt.

Tafel I



Blackett und Occhialini

Elektronen und Positronen

Die Teilchen kommen von oben und durchlaufen in der Kammer ein magnetisches Feld, das die Elektronen nach links, die Positronen nach rechts ablenkt. Eine Positronenbahn mit ausgesprochener Krümmung nach rechts ist leicht erkennbar. Auf der linken Seite der Aufnahme sind zwei Elektronenbahnen sichtbar.

2. Kapitel

DIE MITWIRKENDEN

Die handelnden Personen
Sind, wie ich euch schon sagte, alle Geister,
Und sind in Luft, in dünne Luft zerflossen.
Shakespeare, Der Sturm.

I.

In den folgenden Kapiteln ist es häufig nötig, auf die wichtigsten Ergebnisse der Atomphysik und auf unser allgemeines Wissen von Atomen, Strahlung und Äther Bezug zu nehmen. Es gibt viele ausgezeichnete allgemein verständliche Bücher über diesen Gegenstand, und ich möchte mich nicht mit einer zwar spannenden, aber oft erzählten Geschichte aufhalten. Indessen schien es doch wünschenswert, hier eine kurze Übersicht über unser Wissen einzuschalten.

Wir haben gesehen, daß man zwischen der endgültigen naturwissenschaftlichen Beschreibung des physikalischen Weltalls und den geläufigen Bildern ganz streng unterscheiden muß. Hier aber werden wir mehr den handfesten Begriffen des Experimentalphysikers als denen des extremen Theoretikers folgen. Die naturwissenschaftlichen Begriffe beziehen sich auf eine Anzahl verschiedener Erkenntnisstufen, und wir brauchen nicht das Gedanken-
gut der äußersten Stufe bei jeder weniger bedeutenden Gelegenheit zu bemühen. Es empfiehlt sich nicht, beim Abschreiten der Länge eines Autobus in Begriffen der Atomtheorie zu denken. Und ähnlich kann der Physiker, der Atome zertrümmert, im praktischen Sinne sehr wohl verstehen, was er tut, ohne die tiefsinnigeren Begriffe der Wellenmechanik oder der Gruppentheorie heranzuziehen. So gehe ich in diesem Kapitel zunächst nicht bis zur äußersten Erkenntnisstufe, sondern mache auf einer Stufe halt, die wichtig ist, weil sie einen großen Teil des landläufigen Wortschatzes der Physik geliefert hat. Meine Beschreibung kann keine größere Genauigkeit oder Tiefe beanspruchen, als sie der Erkenntnisstufe entspricht, zu der sie gehört.

Es scheint, daß jeglicher Stoff aus zwei Arten von Elementarteilchen aufgebaut ist, aus Protonen und Elektronen. Das Proton trägt eine bestimmte Ladung von positiver Elektrizität, das Elektron

eine gleiche Ladung von negativer Elektrizität. Aber diese beiden Arten von Teilchen sind nicht in allen Beziehungen ein genaues Gegenstück zueinander, denn das Proton ist sehr viel schwerer als das Elektron, seine Masse ist etwa 1847 mal größer *.

Das wahre Gegenstück des Elektrons wurde vor etwa zwei Jahren entdeckt; es heißt das positive Elektron oder Positron. Es ist ein Teilchen von genau der gleichen Masse wie das Elektron, trägt aber statt einer negativen eine positive Ladungseinheit. Jedoch haben die Positronen offenbar nur ein überaus kurzes Dasein. Sie entstehen während gewisser sehr heftiger Energieumsetzungsvorgänge, wenn Materie von kosmischer Ultrastrahlung getroffen wird, oder wenn ein Atomkern mit sehr schnellen Teilchen beschossen wird. Aber nach Zurücklegung eines kurzen Weges

* Anmerkung des Übersetzers. Da man heute meist annimmt, daß die Annahme eines Kernaufbaues aus Protonen und Elektronen — wie sie bis 1933 allgemein vermutet wurde und auch in diesem Buche hier und weiter unten vertreten wird — neuerdings überholt und durch einen Aufbau aus Protonen und Neutronen ersetzt ist, habe ich den Verfasser im Mai 1935 gefragt, ob er irgendeine Änderung im Text zu machen wünscht. Er hat mir darauf folgendes geantwortet:

„Ich habe nichts zu ändern. Ich glaube mit Bestimmtheit, daß diejenigen, welche die Annahme des Aufbaues aus Protonen und Elektronen verwerfen, voreilige Schlüsse aus einer Kerntheorie ziehen, die noch sehr lückenhaft ist. Es kommt dabei auf die Frage heraus, ob das Neutron gleich Proton + Elektron ist oder ein ursprüngliches, unteilbares Teilchen. Denn im ersten Fall stimmt die moderne Auffassung, daß der Kern aus Protonen und Neutronen besteht, mit der alten Ansicht überein, daß er aus Protonen und Elektronen besteht, und fügt nur eine technische Einzelheit über die Gruppierung der Elektronen hinzu. So bleibt dann meine Darstellung richtig. Es scheint, daß die Hypothese, das Neutron sei ein unteilbares Teilchen, fast ausschließlich auf die Tatsache gegründet ist, daß sein Spin nicht die Summe des Protonen- und Elektronenspins ist. Das bedeutet aber nur, daß die Spintheorie noch nicht genügend entwickelt ist, um die Spinsumme unter den extremen Bedingungen zu berechnen, wie sie bei der engen Verbindung zu einem Kern vorliegen. Ich persönlich glaube, daß der halbzahlige Spin des Neutrons sich aus irgendeiner vernünftigen Theorie der engen Verbindung eines Elektrons und eines Protons ergeben würde.

Ich möchte auch noch hinzufügen, daß es reine Metaphysik ist, wenn man (wie das viele tun) sagt, daß es innerhalb des Kerns keine Elektronen gibt. Elektronen treten in den Kern ein, und Elektronen kommen aus dem Kern heraus. Die wissenschaftliche Analyse wird sie notwendig so darstellen, daß sie auf die eine oder andere Art im Innern sind, und es ist lediglich eine Frage der Terminologie, wenn wir dabei bleiben, für diese Art den Namen ‚Elektron‘ zu benutzen.“

vergehen sie, indem sie einem gewöhnlichen (negativen) Elektron mit dem Ergebnis begegnen, daß sie sich gegenseitig vernichten. Vermutlich hat auch das Proton sein Gegenstück, ein negatives Proton oder Negatron, aber man hat es noch nicht entdeckt.

Tafel I zeigt die Bahnen von Elektronen und Positronen. Sie sind mit der Nebelmethode von Prof. C. T. R. Wilson sichtbar gemacht, bei der sich kleine Wassertropfchen längs der Bahnen kondensieren. Das von Blackett und Occhialini stammende Bild zeigt einen Schauer solcher Teilchen, der durch ein einziges Ultrastrahlquant in Kupfer ausgelöst ist. Ein magnetisches Feld wurde so angebracht, daß die Elektronenbahnen nach links und die Positronenbahnen nach rechts abgelenkt werden. Die meisten Teilchen waren zu schnell, um merklich abgelenkt zu werden und können daher nicht ohne weiteres unterschieden werden. Aber ein Positron ist ganz deutlich, ein zweites mit schwächerer Krümmung wenigstens einigermaßen deutlich zu erkennen.

Sowohl Protonen wie Elektronen muß man sich als äußerst klein vorstellen, sehr viel kleiner als ein Atom. Früher nahm man an, daß ein Elektron einen Radius von $2 \cdot 10^{-13}$ cm habe, und daß das Proton noch erheblich kleiner sei. Jetzt aber betrachten wir sie beide als Massenpunkte. Das bedeutet nicht so sehr eine Richtigstellung unserer ursprünglichen Größenschätzung, als vielmehr die Anerkennung der Tatsache, daß die gewöhnlichen räumlichen Begriffe in dem Zweig der Physik, der sich mit diesen Teilchen befaßt, versagen. Es hat sich als nicht angemessen erwiesen, einem Elektron eine räumliche Ausdehnung zuzuschreiben, obgleich wir es auf eine andere Weise sozusagen wieder zu einem Elektron ergänzen müssen.

Der erste Schritt zum Aufbau der Materie aus Protonen und Elektronen ist der Aufbau eines Atoms. Es ist klar, daß jedes dauerhafte Gebilde aus einer gleichen Zahl von Protonen und Elektronen bestehen muß. Denn besäße es Protonen in der Überzahl, so hätte es einen positiven Ladungsüberschuß, und dieser würde jedes negativ geladene Elektron in der Nachbarschaft anziehen und es in das Gebilde hineinziehen, so lange bis der Überschuß ausgeglichen ist. Obgleich die Protonen und Elektronen im Atom in gleicher Zahl vorhanden sind, besteht in ihrer Anordnung eine große Asymmetrie. Sämtliche Protonen und etwa die Hälfte der Elektronen sind zu einem Gebilde mit einem Radius von rund 10^{-12} cm zusammengeschweißt, das der Kern genannt wird. Die übrigen Elektronen, die man äußere Elektronen nennt, umkreisen

den Kern auf verhältnismäßig weit entfernten Bahnen, so daß sich das ganze Atom über einen Bereich ausdehnt, dessen Radius rund 10^{-8} cm beträgt. Das Verhältnis ist etwa das gleiche wie das der Sonne zu ihrem Planetensystem. Die dem Atomkern entsprechende Sonne hat einen Radius von 690 000 km, während die durch die Bahn des Pluto bestimmte Grenze des Sonnensystems sich bis zu einem Radius von 5 900 000 000 km erstreckt. Wir können uns also ein Atom wie ein winziges Sonnensystem vorstellen.

Wir können die verschiedenen Atomarten genauer bezeichnen, indem wir 1. die Zahl der Protonen im Kern, 2. die Zahl der äußeren Elektronen oder, was auf das gleiche hinauskommt, den Überschuß der Zahl der Protonen über die Zahl der Elektronen im Kern angeben. Die erste Zahl gibt (wenn wir die Protonenmasse gleich 1 setzen) angenähert die Masse des Atoms an, denn die Elektronen sind so leicht, daß ihre Massen kaum mitzählen. Die zweite Zahl heißt die Atomnummer oder Ordnungszahl; sie ergibt den (positiven) Ladungsüberschuß des Kerns. Die chemische Bezeichnung eines Atoms richtet sich lediglich nach seiner Ordnungszahl. So heißt z. B. ein Atom mit der Kernladung 17, das demnach auch 17 äußere Elektronen hat, Chlor. Es gibt aber zwei gewöhnliche Arten von Chlor, deren eine 35 Protonen und 18 Elektronen im Kern besitzt und daher das Atomgewicht 35 hat, während die zweite mit 37 Protonen und 20 Elektronen im Kern das Atomgewicht 37 hat. Wir bezeichnen sie als zwei „Isotope“ des Chlors. Bei den meisten Erscheinungen macht es kaum etwas aus, ob ein Chloratom von der Masse 35 oder von der Masse 37 beteiligt ist. Bei Diffusionsversuchen wird sich das erste als etwas beweglicher zeigen. Aber im allgemeinen sind die Unterschiede so geringfügig, daß die Chemiker seit 150 Jahren ständig mit Chlor gearbeitet haben, ohne je zu bemerken, daß es eine Mischung zweier Atomarten ist.

Die Ordnungszahlen der Elemente erstrecken sich von 1 beim Wasserstoff bis 92 beim Uran. Bis auf zwei sind sämtliche Stellen mit bereits entdeckten Elementen besetzt. Viele von ihnen haben, wie das Chlor, zwei oder mehr Isotope, so daß die Gesamtzahl der heute bekannten stabilen Atomarten die Zahl 240 überschreitet. Außer diesen gibt es zahlreiche kurzlebige, radioaktive Atome. Es steht nicht fest, ob 92 die obere Grenze der Ordnungszahlen ist. Wenn wir instabile Atome, die nach wenigen Minuten zusammenbrechen, mit in Betracht ziehen, so gibt es auch das Element 93, das kürzlich von Fermi künstlich erzeugt wurde.

Das Element von der Ordnungszahl 1 erfordert besondere Beachtung. Seine einfachste Form ist der gewöhnliche Wasserstoff, der aus einem Proton und einem äußeren Elektron besteht. Es unterscheidet sich also von allen anderen Elementen dadurch, daß sein Kern ein Elementarteilchen, kein zusammengesetztes Gebilde ist. Dieser Unterschied ist so wichtig, daß es manchmal vorteilhaft ist, die Sache so anzusehen, daß es zwei Spielarten der Materie gibt, nämlich Wasserstoff und Nicht-Wasserstoff (S. 138 u. 158).

Vor einiger Zeit wurde ein Isotop, der „schwere Wasserstoff“, entdeckt. Es hat einen Kern aus 2 Protonen und 1 Elektron, so daß sein Atomgewicht 2 beträgt. Seine Kernladung ist 1 und es hat 1 äußeres Elektron, genau wie der gewöhnliche Wasserstoff. Nach der üblichen Regel hätten die beiden Isotope keinen Anspruch auf verschiedene chemische Bezeichnungen. Aber hier liegen ziemlich außergewöhnliche Umstände vor, und man hat daher den schweren Wasserstoff als Deuterium (oder nach manchen Autoren als Diplogonium) bezeichnet und ihm das Symbol D gegeben. Sein nackter Kern, ohne das äußere Elektron, heißt Deuton (oder Diplon). Der Unterschied zwischen dem gewöhnlichen und dem schweren Wasserstoff (mit den Atomgewichten 1 und 2) ist nicht so belanglos, wie der Unterschied zwischen den meisten Isotopen sonst, und das Deuterium und seine Verbindungen haben Eigenschaften, die von denen des gewöhnlichen Wasserstoffes und seiner Verbindungen merklich verschieden sind. Selbstverständlich hat die Verbindung D_2O , das schwere Wasser, besondere Beachtung gefunden; es ist um 11 % schwerer als das gewöhnliche Wasser (H_2O). Man hat auch einen noch schwereren Wasserstoff vom Atomgewicht 3 gefunden. Seine Kerne (Tritonen?) bestehen aus 3 Protonen und 2 Elektronen.

Eine weitere neue Entdeckung ist das Neutron. Dies scheint ein Kern zu sein, der aus 1 Proton und 1 Elektron besteht, so daß er den Ladungsüberschuß Null hat und keine äußeren Elektronen besitzt. Es ist daher ein Element von der Ordnungszahl 0. Wir könnten es als ein Isotop von Nichts beschreiben. Von einem anderen Gesichtspunkt aus ist das Neutron so etwas wie ein in sich zusammengestürztes Wasserstoffatom. Beide bestehen aus einem Proton und einem Elektron, und der Unterschied besteht darin, daß sie im Neutron durch Kernbindungskräfte sehr dicht beieinander gehalten werden, im Wasserstoffatom aber durch äußere Bindungskräfte in größerem Abstände voneinander. Eine der Fragen, die wir

uns stellen müssen, ist, ob je Wasserstoffatome plötzlich von selbst zu Neutronen zusammenbrechen *.

Ein anderes wohlbekanntes Teilchen ist das α -Teilchen **. Es ist der Kern des Heliumatoms (Ordnungszahl 2) und besteht aus 4 Protonen und 2 Elektronen. Dies scheint eine besonders stabile Verbindung zu sein, und daher glaubte man früher, daß in den komplizierteren Kernen ein großer Teil der Protonen und Elektronen zu α -Teilchen vereinigt seien. Doch sind jüngere Untersuchungen über den Kernbau dieser Hypothese nicht günstig. Es scheint jetzt, daß jedes Elektron an ein Proton gebunden ist und so mit ihm ein Neutron bildet. Daher kann der Kern als eine Anhäufung von Protonen und Neutronen angesehen werden.

Man vertritt jetzt häufig die Ansicht, daß das Neutron ein einfaches Elementarteilchen ist, und daß das Proton ein aus einem Neutron und einem Positron zusammengesetzter Körper ist. Ich glaube nicht, daß man das als grundsätzlich wahr ansehen kann. Zweifellos gibt es Erscheinungen, bei denen es vorteilhaft ist, die Gleichungen: Neutron = Proton + Elektron in die Gleichung: Proton = Neutron — Elektron umzuformen, oder, da ein fehlendes Elektron einem anwesenden Positron gleichwertig ist, in die Gleichung: Proton = Neutron + Positron. Aber ich glaube nicht, daß diesem Vorschlag irgendeine tiefere Bedeutung zukommt.

II.

Sowohl das System der äußeren Elektronen wie die Kerne selbst können durch ausreichend kräftige äußere Störungen verändert oder zerbrochen werden. Zur Abtrennung der äußersten Elektronen ist nicht viel Energie nötig. So treffen wir im Laboratorium, und sehr viel häufiger in den Sternen, Atome ohne ihre volle Zahl von äußeren Elektronen an. Sie haben daher einen positiven Ladungsüberschuß. Diese unvollständigen Atome heißen Ionen. Die Ionisation bedeutet keinerlei dauernde Veränderung am Atom — keine „Umwandlung der Elemente“. Denn sobald die Störung der äußeren

* Nach einigen Forschern ist die Masse eines Neutrons ein wenig größer als die Masse eines Wasserstoffatoms. In diesem Fall ist es energiereicher, so daß seine Bildung eine Absorption von Energie erfordert und nicht von der Art eines plötzlichen Zusammenbruchs ist.

** Das β -Teilchen ist lediglich ein sehr schnell bewegtes Elektron.

Bedingungen nachläßt, wird die Kernladung, die unversehrt geblieben ist, so viele Elektronen anziehen, wie zu ihrem Ausgleich nötig sind.

Die Energie, die erforderlich ist, um eine Veränderung am Kern zu erzeugen, ist sehr viel größer. Aber dem Physiker steht eine Anzahl schneller Geschosse zur Verfügung — Elektronen, Protonen, Neutronen, Deutonen, Tritonen, α -Teilchen —, die entweder beim Zerfall radioaktiver Elemente von selbst ausgeschleudert werden, oder die mit Hilfe einer hohen elektrischen Spannung künstlich beschleunigt werden. Mit einer Art von Maschinengewehrfeuer dieser Geschosse kann der Experimentator hier und da einen Kern mit einer Energie treffen, die genügt, damit das Geschloß eindringt und den Bau des Kernes ändert, indem es entweder in ihm steckenbleibt oder Teile von ihm abtrennt. Das Atom ist dann in ein anderes Element verwandelt.

Häufig ist das durch eine solche Beschießung zunächst gebildete Element instabil. Dann tritt nach einer gewissen kurzen mittleren Lebensdauer eine Neuordnung des inneren Gefüges ein, und ein Teilchen von irgendeiner Art wird ausgeschleudert. So folgt der ursprünglichen Umwandlung eine zweite, spontane Umwandlung. Die gewöhnlichen radioaktiven Atome, Uran, Radium, Thorium, Aktinium, sind ebenfalls instabile Atome. Nur sind sie verhältnismäßig langlebig. Ihre wohlbekannten spontanen Umwandlungen, die im allgemeinen von der Ausschleuderung von α -Teilchen oder von Elektronen begleitet werden, sind die Nachgeburt einer Entwicklung komplizierter instabiler Kerne, die vermutlich einige tausend Millionen Jahre, ehe sich die Erde von der Sonnenmasse trennte, unter den heftig gestörten Bedingungen im Innern der Sonne vor sich ging.

Die Masse eines Kernes ist der Summe der Massen der Protonen und Elektronen, die ihn bilden, nicht genau gleich; sie ist immer ein wenig kleiner. Dieser Massendefekt ist von großer Bedeutung, denn er zeigt uns die Bildungsenergie des Kernes an. Die Protonen und Elektronen neigen natürlich dazu, in eine Anordnung möglichst kleiner Energie überzugehen; und ihre Neigung, Kerne zu bilden, bedingt offenbar, daß ihre Gesamtenergie, indem sie sich so dicht zusammenpacken, kleiner ist, als vorher im getrennten Zustande. So wird bei der Bildung eines Kernes Energie frei. Tatsächlich wird sie als hochfrequente Strahlung ausgestrahlt oder von sehr schnellen Teilchen, die während der einzelnen Bildungsstufen ausgeschleudert werden, als kinetische Energie mit fortgeführt. Man weiß genau,

daß Energie und Masse zwei Seiten der gleichen Wesenheit sind, und wenn der Kern Energie verliert, so verliert er auch den entsprechenden Betrag an Masse. So ist der Massendefekt ein Maß für die von dem System abgegebene Energie.

III.

Die chemischen, optischen und magnetischen Eigenschaften eines Atoms werden fast völlig durch die Struktur des Systems seiner äußeren Elektronen bestimmt. Gemäß der Erkenntnisstufe, auf die wir uns jetzt stellen, beschreiben diese Elektronen bestimmte Bahnen um den Kern. Ich muß aber eindringlicher als sonst darauf hinweisen, daß das, was ich euch hier vorführe, ein Modell ist, das Bohrsche Atommodell. Denn ich werde euch später auf eine Stufe der Darstellung führen, in der das Elektron nicht auf einen bestimmten Ort beschränkt, sondern wie eine Art von Wahrscheinlichkeitsdunst über das ganze Atom verteilt ist. Es erfordert ein eingehendes Studium der mathematischen Gleichungen, um zu erkennen, daß die zwei Darstellungsarten irgend etwas miteinander gemeinsam haben. Es ist zweifellos verwirrend, wenn man in dem einen Kapitel erfährt, daß ein Elektron sozusagen an eine Führungsrinne gebunden ist und nur durch einen unstetigen Sprung auf eine andere Rinne übergehen kann, und in einem anderen Kapitel, daß einem Elektron an einem Atom gar kein bestimmter Ort zugeschrieben werden kann. Aber ich glaube, wir waren einst auch verwirrt, als wir auf Seite 1 eines Atlas die Welt als zwei Halbkugeln und auf Seite 2 in Mercator-Projektion dargestellt fanden.

Im Bohrschen Modell steht den Elektronen eine beschränkte Zahl von Bahnen zur Verfügung. Diese Bahnen sind durch ein eigenartiges System von Gesetzen gegeben, die die Quantentheorie liefert. Es ist, als werde das Feld, das den Kern umgibt, von einer Anzahl von Pfaden durchschnitten, und als seien die Elektronen, die sich in dem Felde umhertreiben, angewiesen, sich auf den Wegen zu halten. Die Bahnen sind in Gruppen geordnet. Am nächsten zum Kern gibt es zwei kleine Bahnen, die die K -Gruppe bilden. Dann folgen acht größere Bahnen (6 Kreise und 2 Ellipsen), die die L -Gruppe bilden, dann die M -Gruppe mit 18 noch größeren Bahnen usw. Gedanklich setzt sich die Reihe der Bahnen bis zu der durch die Größe des Weltalls gesetzten Grenze fort. Aber in Wirklichkeit werden die territorialen Ansprüche eines Kerns durch die

jenigen der Nachbarkerne begrenzt. Die größeren Bahngruppen teilen sich nach ihren Exzentrizitäten in Untergruppen, indem einige von ihnen kreisförmig, andere mehr oder weniger ausgeprägt elliptisch sind.

Es gibt ein Gesetz (das Pauli-Verbot), nach dem die gleiche Bahn niemals von mehr als einem Elektron besetzt sein kann. Befindet sich das Atom in seinem normalen ungestörten Zustand, so ordnen sich seine äußeren Elektronen so an, daß das System die kleinste mögliche Energie besitzt. Das heißt, daß sie gewöhnlich diejenigen Bahnen besetzen, die dem anziehenden Kern am nächsten sind. Wenn wir uns aber daran erinnern, daß sich die Elektronen gegenseitig abstoßen, so ist das Problem, die Anordnung kleinster Energie zu finden, keineswegs einfach. Und wenn die Zahl der äußeren Elektronen groß ist, so macht es sich oft bezahlt, die stärker exzentrischen Bahnen einer höheren Gruppe eher zu besetzen als die Kreisbahnen einer niedrigeren Gruppe. Durch die Erforschung dieser Anordnungen ist es möglich geworden, sowohl die Regelmäßigkeiten als auch die augenscheinlichen Unregelmäßigkeiten in der Aufeinanderfolge der chemischen Eigenschaften, die sich im periodischen System der Elemente zeigen, im einzelnen zu erklären.

Grob gesagt besteht das Grundgesetz der Chemie darin, daß ein äußeres Elektron am liebsten einer vollständigen Gruppe oder Untergruppe angehört. Es ist nicht gern das „fünfte Rad am Wagen“. Helium kann mit 2 Satellitelektronen die K -Gruppe gerade voll besetzen, Neon mit 10 Satellitelektronen gerade die K - und L -Gruppe. Argon (18) hat eine vollständige K - und L -Gruppe und 8 Elektronen in der M -Gruppe. Wenn damit diese Gruppe auch nicht vollständig besetzt ist, so ist damit doch die der Symmetrie nächste Untergruppe der M -Gruppe vollständig. Diese Atome sind so selbstzufrieden, daß sie „Edelgase“ bilden und es ablehnen, sich mit anderen Atomen zu verbinden. Wenn wir jedem dieser Edelgase ein Elektron hinzufügen, erhalten wir Lithium (3), Natrium (11) und Kalium (19); sie haben demgemäß ein überzähliges Elektron, das den Anfang mit einer neuen Gruppe oder Untergruppe machen muß. Dieses bedauernswerte Elektron heißt das Valenzelektron und ist für die chemische Aktivität und das alkalische Verhalten von Lithium, Natrium und Kalium verantwortlich. Indem wir entsprechend einen Schritt rückwärts machen, kommen wir zum Chlor (17), das in seiner M -Gruppe 7 Elektronen besitzt. Diese sind so ärgerlich und unbefriedigt wie eine Gruppe von 7 Bridgespielern. Es wäre eine vortreffliche Lösung für beide

Teile, wenn das Chlor sich das einsame Elektron des Natriums ausleihen würde, um seine Gruppe zu vervollständigen. Dem steht nichts im Wege, und die beiden Atome verbinden sich zur Bildung eines Kochsalzmoleküls (NaCl).

Neben der Materie, die wir in Protonen und Elektronen aufteilen können, ist der zweite Hauptdarsteller im Drama der Physik die Strahlung. Strahlung ist der allgemeine Name für elektromagnetische Wellen oder Wellen im Äther, der den kontinuierlichen Untergrund zwischen Protonen und Elektronen bildet. Diese Wellen können (von Scheitel zu Scheitel gemessen) jede beliebige Länge und entsprechend jede beliebige Schwingungszahl haben. Eine ganz bestimmte Oktave vermag unsere Augennerven zu reizen, und in diesem Schwingungsbereich bilden die elektromagnetischen Wellen das Licht. Andere Schwingungsbereiche haben wieder andere charakteristische Wirkungen. Ordnet man die Wellen nach abnehmender Wellenlänge oder zunehmender Schwingungszahl, so bezeichnet man die einzelnen Bereiche als Hertzsche oder elektrische Wellen, ultrarote Strahlen, Licht, ultraviolette Strahlen, Röntgenstrahlen, γ -Strahlen. Sofern die primären kosmischen Ultrastrahlen elektromagnetische Wellen sind, so haben sie eine noch größere Schwingungszahl als die γ -Strahlen, aber man hält es jetzt für wahrscheinlicher, daß sie überaus schnelle Teilchen sind.

Wir wollen jetzt kurz betrachten, wie Atome und Strahlung miteinander in Wechselwirkung treten. Wenn Energie in Form von Strahlung im Raum umherirrt, oder wenn die Atome miteinander mit der Energie, die von ihrer Temperatur herrührt, zusammenstoßen, so werden die äußeren Elektronen nicht unbedingt die Bahnen besetzen, welche dem Energieminimum entsprechen. Das Atom ist, wie man sagt, „angeregt“. Aber das Atom kann nicht jeden beliebigen Energiebetrag aufnehmen. Der Betrag muß so groß sein wie derjenige, der nötig ist, um ein Elektron von einer Bahn auf eine andere, unbesetzte Bahn zu heben. So gibt es für jedes Atom eine Anzahl von charakteristischen Energiebeträgen, die den verschiedenen möglichen Übergängen von einer Bahn zur anderen entsprechen. Diese — und nur diese — Beträge können absorbiert werden. Wenn aber das Atom schon angeregt ist, können gerade diese Beträge bei der Rückkehr in den Normalzustand wieder abgegeben werden. Hier greift die charakteristische Regel der Quantentheorie ein. Wenn ein Atom einen Energieklumpen in den Äther hinausschleudert, so formt sich die Energie stets zu einem Quantum. Das heißt, die Energie nimmt die Gestalt einer perio-

dischen Schwingung oder Welle an, derart, daß der Energiebetrag, durch die Zahl der Schwingungen in einer Sekunde geteilt, der Planckschen Konstanten $h = 6,55 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$ gleich ist.

Wenn man die Tonhöhe, also die Schwingungszahl einer Glocke bestimmen will, so wäre es ein müßiges Beginnen, den Betrag der von ihr ausgesandten Energie zu untersuchen. Zwischen den beiden Messungen besteht keine Beziehung, denn der gleiche Ton kann laut oder leise angeschlagen werden. Aber in der Atommechanik liegen die Dinge anders; der Betrag der ausgesandten Energie bestimmt auch die Schwingungszahl der entstehenden Strahlung. Entsprechend bestimmt, wenn Licht auf ein Atom trifft, seine Schwingungszahl auch den Energiebetrag, der dem Atom zur Absorption angeboten wird. Das Atom nimmt ihn nur dann auf, wenn dieser Betrag mit einer der Übergangsenergien zwischen zwei Bahnen übereinstimmt. Demnach entspricht die Folge der charakteristischen Übergangsenergien des Atoms einer Folge von charakteristischen Schwingungszahlen seiner Strahlung. Wenn man die Strahlung mit einem Spektrometer untersucht und sie so nach ihren verschiedenen Schwingungszahlen zerlegt, so ergeben diese charakteristischen Schwingungszahlen das wohlbekannte Bild eines Linienspektrums.

Im allgemeinen beruht die Absorption und Emission von sichtbarem oder ultraviolettem Licht auf Sprüngen des Valenzelektrons in der äußersten besetzten Bahn. Die Absorption und Emission von Röntgenstrahlen hingegen beruht auf Sprüngen zwischen den inneren Bahnen, z. B. denen der K - oder L -Gruppe.

Es gibt noch eine andere Art von Strahlungsabsorption, die lichtelektrische Absorption, bei der das Elektron, statt auf eine höhere Bahn zu springen, das Atom ganz verläßt. Das erfordert natürlich mehr Energie als der größte Bahnsprung, und das Licht muß eine entsprechend höhere Schwingungszahl haben. Aber sofern sie nur einen gewissen Mindestbetrag überschreitet, ist ein bestimmter Energiebetrag nicht erforderlich. Das Elektron kann jeden Überschuß als kinetische Energie seiner Bewegung mit sich fortführen. Eine solche Absorption führt demnach zu einem kontinuierlichen Spektrum, welches genau dort beginnt, wo das Linienspektrum abbricht. Eine entsprechende Strahlungsemission erfolgt, wenn freie Elektronen durch Ionen eingefangen werden.

Die Strahlungsquanten, die bei der Emission von den Atomen in den Äther ausgesandt oder bei der Absorption von ihnen eingefangen werden, nennt man heute meist Photonen. Inwiefern man sagen kann, daß sie ihr individuelles Dasein in der Zeit zwischen

ihrer Emission durch ein Atom und ihrer Absorption durch ein anderes Atom bewahren, das ist eine höchst dunkle Frage. Doch verhält sich jedenfalls jedes Photon bei der Emission und Absorption wie ein unteilbares Atom von Strahlungsenergie. Da der Energiebetrag, der ein Photon bildet, von der Schwingungszahl abhängt, so muß man Strahlung von hoher Schwingungszahl (Röntgen- oder γ -Strahlen) anwenden, wenn an irgendeiner Stelle, z. B. innerhalb eines Atoms, ein hoher Betrag geballter Strahlungsenergie wirksam werden soll.

IV.

Bis zu den entferntesten Sternen und darüber hinaus ist die Welt mit Äther erfüllt. Er durchdringt die Zwischenräume der Atome. Der Äther ist allgegenwärtig.

Wie dicht ist der Äther? Ist er flüssig wie Wasser oder starr wie Stahl? Wie schnell bewegt sich unsere Erde in ihm? In welcher Richtung schwingen die Ätherteilchen, wenn eine elektromagnetische Welle über sie hinwegstreicht? Es gab einmal eine Zeit, wo man dies zu den brennendsten Fragen der Physik zählte. Aber nach einem Jahrhundert Forschungsarbeit hat man auf keine dieser Fragen eine Antwort gefunden. Wir sind jedoch überzeugt, daß die Unmöglichkeit der Beantwortung dieser Fragen nicht als ein Nichtwissen, sondern als ein positives Wissen zu betrachten ist. Denn wir haben erkannt, daß der Äther ein Ding ist, auf das solche Fragen nicht anwendbar sind. Der Äther ist keine Art von Stoff. Fragen wie die obigen könnten über stoffliche Dinge gestellt werden, aber beispielsweise nicht über die *Zeit*, und wir müssen den Äther als eine der Wesenheiten ansehen, denen sie nicht angemessen sind. Da der Äther nicht stofflich ist, so besitzt er keine der üblichen Eigenschaften der Stoffe — Masse, Starrheit usw. Aber er hat dafür seine eigenen, wohldefinierten Eigenschaften. Wir beschreiben den Zustand des Äthers durch Symbole und seine charakteristischen Eigenschaften durch mathematische Gleichungen, denen diese Symbole gehorchen.

Es gibt keinen Raum ohne Äther und keinen Äther, der nicht Raum erfüllt. Einige namhafte Physiker behaupten, daß die heutige Theorie den Äther nicht mehr braucht, daß der Äther abgeschafft ist. Ich glaube, sie meinen lediglich folgendes: Da wir es nie mit Raum und Äther einzeln zu tun haben, so können wir ein Wort für

beides gelten lassen, und sie bevorzugen das Wort „Raum“. Vermutlich argwöhnen sie, daß das Wort Äther immer noch die Vorstellung von etwas Stofflichem erwecken könnte. Aber ebenso könnte das Wort Raum die Vorstellung eines vollkommenen Nichts erwecken. Auf jeden Fall stimmen sie mit uns darin überein, daß sie ein Heer von mathematischen Symbolen aufbieten, um zu beschreiben, was sich an irgendeinem Ort ereignet, wo es einen Äther gibt — oder nach ihrer Meinung nicht gibt. „Wo ein Aas ist, da sammeln sich die Geier“, und wo sich die Symbole der theoretischen Physik zusammenrotten, da ist vermutlich eine Beute für sie in Sicht. Und diese möchte wenigstens der schlichte Mensch gern mit einem Namen bezeichnen, der etwas mehr ausdrückt als ein leeres Nichts.

Die Zahl derer, denen das Wort Raum die Vorstellung eines merkmallösen leeren Nichts vermittelt, ist wahrscheinlich größer als die Zahl derer, denen das Wort Äther die Vorstellung einer stofflichen Gallerte vermittelt, so daß Äther wohl der weniger anfechtbare Ausdruck sein dürfte. Aber wir können einen Vergleich schließen, indem wir das Wort „Feld“ gebrauchen. Das Feld umfaßt sowohl das elektromagnetische Feld als auch das Gravitationsfeld oder metrische Feld, und das erwähnte Heer von Symbolen beschreibt diese beiden Felder. Der Raum (in seiner gewöhnlichen physikalischen Bedeutung) ist das gleiche wie das metrische Feld. Denn die Symbole, die das metrische Feld beschreiben, kennzeichnen das einzige Merkmal, das wir dem Raum zuzuschreiben gewohnt sind, nämlich seine Geometrie (euklidisch oder nicht-euklidisch). Zugleich mit der Geometrie kennzeichnen sie auch das Gravitationsfeld, wie Einstein in seiner bekannten Theorie gezeigt hat. Wir wissen heute, daß das elektromagnetische und das metrische (Gravitations-) Feld ein einheitliches Feld bilden, und ich glaube, daß wir schon recht gut verstehen, wie das eine, einheitliche Feld in diese zwei Teilfelder aufspaltet *.

Den Wandel in unserer Vorstellung von der Welt, den die Äther- oder Feldtheorie herbeiführte, beleuchtet ein Vorfall, der auf Sternwarten nichts Ungewöhnliches ist. Einem Besucher wird die Aufnahme irgendeines interessanten Himmelsobjekts überreicht. Er stutzt, er dreht das Bild hierhin und dorthin, aber er kann nicht aus ihm klug werden. Schließlich sieht der Astronom, wo ihn der Schuh

* The Nature of the Physical World, S. 236. Das Weltbild der Physik, S. 233 u. 234.

drückt. „Ich hätte es Ihnen erklären sollen. Dies ist ein N e g a t i v. Die dunklen Marken bilden das Objekt, das Helle ist nichts als Untergrund.“ Der Besucher stülpt in Gedanken das Bild um, und sofort bekommt es einen Sinn. Es ist tatsächlich eine Umstülpung unseres Alltagsbildes der Welt, deren sich die Äthertheorie anheischig macht. Ältere Theorien der Elektrizität lenkten die Aufmerksamkeit nur auf einen elektrischen Strom, der längs eines Drahtes fließt, und behandelten den Raum außerhalb des Drahtes als bloßen Untergrund. Faraday aber lehrte uns, daß dasjenige, was wir beachten müssen, wenn wir die Erscheinungen der Elektrizität verstehen wollten, der vermeintliche Untergrund, das Feld außerhalb des Drahtes ist. Wenn ihr es fertigbringt, diese Umkehrung des Bildes zu vollziehen, indem ihr den Raum aus einem Negativ in ein Positiv verwandelt, so daß er nicht mehr ein bloßer Untergrund ist, auf dem wir die räumliche Ausdehnung und die Bewegung stofflicher Dinge beobachten, sondern auch ein Mitwirkender im Welt-drama, nicht minder als der Stoff, wenn ihr das fertigbringt, dann habt ihr den Kern der Äthertheorie, ob ihr nun das Wort „Äther“ benutzt oder nicht.

Es besteht die Gefahr, daß man die Umkehrung des Bildes zu weit treibt. Nach der großartigen Entwicklung der Feldtheorie des Elektromagnetismus durch Faraday und Maxwell wurde die Aufmerksamkeit durch die Entdeckung des Elektrons und die Entwicklung der Elektronentheorie durch Lorentz und Larmor wieder auf die mehr materielle Seite gelenkt. Dieser Rückschlag ist wahrscheinlich wiederum zu weit gegangen, und es wäre ein Gewinn, wenn man die Feldanschauung mehr betonen würde. Indem wir aber die Übertreibungen allmählich abklingen lassen, nähern wir uns einer einheitlichen Feld-Stoff-Theorie, in der weder das Feld noch der Stoff bloßer Untergrund ist, und die in dem einen die notwendige Ergänzung des anderen erkennt.

V.

Bis hierher habe ich die letzte Stufe der physikalischen Gedankenwelt noch nicht betreten. Hinter den Bildern und Modellen, die ich beschrieben habe, verbirgt sich aber eine tiefergehende Vorstellung von den Geschehnissen, in der die Protonen und Elektronen durch Wellen ersetzt sind. Diese neue Form der Quantentheorie ging von einer wichtigen Arbeit von W. Heisenberg im Jahre 1925 aus. Die

in ihr verkörperte Wellenvorstellung verdanken wir insbesondere L. de Broglie und E. Schrödinger. Die neue Theorie wird gewöhnlich Wellenmechanik genannt, aber man muß unter dem allgemeinen Ausdruck Quantentheorie die neue Entwicklung mit verstehen.

Wir wollen zuerst die Beziehung zwischen einem Teilchen in der alten und einer Welle in der neuen Theorie zu verstehen suchen. Wir haben gesehen, daß das Elektron (als ein Teilchen) keine Größe hat. Der Begriff der Größe ist auf ein Teilchen nicht anwendbar. Geometrisch betrachtet ist das Elektron ein Punkt, dessen einziges Merkmal sein Ort ist. Aber es hat auch mechanische Merkmale, nämlich Impuls und Energie (oder Masse) und eine verborgenere Eigenschaft, den „spin“ (Drall). Für unseren Zweck genügt es, den Ort zu betrachten, weil genau die gleichen Gedankengänge auf die anderen Merkmale zutreffen.

Wenn wir also den jeweiligen Ort als das einzige Merkmal betrachten, so gibt es nichts, was wir über das Elektron aussagen können, sofern wir nicht seinen Ort kennen. Diesen Ort aber können wir bis zu einem gewissen Grade kennen. Wir können wissen, daß das Elektron sich im einen oder anderen von zwei Raumbereichen befindet, oder daß es sich (infolge der anziehenden und abstoßenden Kräfte) wahrscheinlich einem Proton näher befindet als einem anderen Elektron. Um dieses unscharfe Wissen zu beschreiben, wollen wir uns einen Nebel vorstellen, dessen Dichte an jeder Stelle proportional der Wahrscheinlichkeit ist, daß wir das Elektron dort antreffen. Die Masse des Nebels in einem bestimmten Raumteil stellt dann die Wahrscheinlichkeit dafür dar, daß sich das Elektron in dem Raumteil befindet. Der Nebel erstreckt sich bis in jeden Winkel des Weltalls, in dem nach unserer Kenntnis eine Wahrscheinlichkeit dafür besteht, daß das Elektron dort Unterschlupf finden könnte. Wenn es uns glückt, ein genaues Wissen über den Ort des Elektrons zu erlangen, so können wir es im gleichen Bilde darstellen. Der Nebel ist aus allen anderen Teilen des Raumes verschwunden und hat sich in einen einzelnen Tropfen an jenem Ort verdichtet.

Wir können diesen „Tropfen“ mit dem Elektron identifizieren; das ist dann sozusagen unsere bildliche Darstellung des Elektrons. Denn wir haben als Elektron die Wesenheit bezeichnet, die den betreffenden Platz einnimmt, und in unserem Bilde ist der Tropfen der Platzinhaber. Wenn wir aber zu unserem unscharfen Wissen zurückkehren, so wird ein Unterschied deutlich. Im neuen Bilde vergeht der Tropfen in Nebel. Im alten Bilde bleibt ein konzentrierter

Tropfen bestehen, nur wissen wir nicht genau, an welchem Ort wir ihn darzustellen haben.

Wir wollen jedoch mit der Untersuchung des Nebels fortfahren. Im Laufe der Zeit ändert sich der Ort des Elektrons und ebenso die Lage der Orte, an denen es sich am wahrscheinlichsten befindet. Das bedeutet, daß sich die Dichteverteilung des Nebels ändert. In einem wirklichen Stoff pflanzen sich Dichteänderungen in Gestalt von Wellen fort. So kommen wir dazu, uns mit „Wellenmechanik“ zu befassen. Die Wellenmechanik untersucht die Gesetze der Wellenfortpflanzung durch unseren Nebel und gestattet uns demnach zu berechnen, wie sich die Nebeldichte an den einzelnen Orten ändert. Daher können wir feststellen, wo sich jeweils die dichteste Stelle des Nebels befindet. Man erinnert sich, daß der dichteste Teil des Nebels die Stelle bezeichnet, wo das Elektron am wahrscheinlichsten angetroffen wird. So kommt die Wellenmechanik wesentlich zu dem gleichen Ziel wie die gewöhnliche Dynamik, die die Bewegung des Elektrons als Teilchen feststellt. Nur tut sie es auf eine Art und Weise, die einem *u n s c h a r f e n* *W i s s e n* angepaßt ist. Sie ist in den Fällen von Vorteil, wo unsere Gegebenheiten in Gestalt von Wahrscheinlichkeiten oder, was auf das gleiche herauskommt, als Mittelwerte vorhanden sind.

Die Nebelwellen dürfen nicht mit den elektromagnetischen oder Ätherwellen verwechselt werden, die die Strahlung bilden. Sie sind von durchaus anderer Art.

Wenn ihr mir bis hierher gefolgt seid, werdet ihr vielleicht sagen, daß ich in Wirklichkeit noch keine höhere Gedankenstufe erreicht habe. Ich habe zwar eine zweite mögliche Methode zur Behandlung des Problems der Elektronenbewegungen beschrieben, die sich in der Anwendung als wirksamer erwiesen hat. Aber ich habe keinen wirklichen Wandel der Begriffe eingeführt. Was den Nebel betrifft, so ist es klar, daß, wenn unser Wissen unscharf ist, auch unser Bild unscharf sein muß. Zugegeben. Der eigentliche Wandel der Begriffe kommt erst jetzt.

Der Kernpunkt ist dieser. Wir haben die Gesetze der Wellenfortpflanzung im Nebel entdeckt; die Bewegungsgesetze des Elektrons als Teilchen aber haben wir nicht entdeckt. Was darum auch immer die letzte Wahrheit sei, die Wellen, nicht die Teilchen, sind es, die die Welt bilden, mit der sich der Physiker von heute beschäftigt.

Die ältere Quantentheorie, die das Elektron als ein Teilchen behandelte, war bis zu einem bestimmten Punkt erfolgreich. Sie konnte

aber nie dahin kommen, ein System von Bewegungsgesetzen aufzustellen, das die Elektronensprünge von einer Bahn zur anderen mit umfaßt hätte. Sie war mehr eine Sammlung von merkwürdigen empirischen Regeln als eine systematische Theorie. Kein Mensch konnte voraussehen, was der nächste Schritt in ihrer Entwicklung sein werde, welche neue Regel hinzugefügt werden müsse. Die Wellenmechanik ist eine viel einheitlichere Theorie. Ihre ganze Entwicklung schreitet vollkommen natürlich vom Wellenbegriff her fort, und wir brauchen im Fortschreiten keine Regeln ad hoc zu erfinden. Aber ihre allgemeine Anerkennung verdankt sie nicht ihren ästhetischen Vorzügen, sondern ihren praktischen Erfolgen. Sie hat Erfolg, weil sie weniger beansprucht. Sie beansprucht nicht, uns sagen zu können, wohin sich das Elektron demnächst begeben wird. Wohl aber beansprucht sie, uns so viel über seinen künftigen Ort zu sagen, wie in den Wiederholungen unserer sinnlichen Erfahrung tatsächlich enthalten ist. „Irrtum vorbehalten“, versetzt die Wellenmechanik uns in den Stand, sinnliche Erfahrungen in dem Umfange vorherzusagen, in dem wir überhaupt einen triftigen Grund haben, anzunehmen, daß sinnliche Erfahrungen vorhergesagt werden können. Sie sagt aber über die Zukunft der Welt nicht mehr voraus, als für diesen besonderen Zweck erforderlich ist.

Wie sollen wir nun das physikalische Weltall beschreiben oder „das Weltall, wie es in der modernen Physik begriffen wird“? Es ist schwer, sich folgerichtig auszudrücken. Ich denke, wir sollten darunter diejenige Vorstellung oder Formulierung verstehen, die nach der heute allgemein herrschenden Überzeugung die vollständigste Übereinstimmung mit den Beobachtungen ergibt. Diese Formulierung verleiht der Welt einen bestimmten Inhalt und stellt bestimmte Gesetze auf. Wir begnügen uns damit, daß wir die Mannigfaltigkeit der Geschehnisse oder genauer die Wiederholungen in unserer Erfahrung richtig wiedergeben können, wenn wir aus diesen Gesetzen mathematische Schlüsse ziehen. Es ist ja auch gerade die Aufgabe der Physik, diese Wiederholungen zu analysieren. Oder wir trösten uns wenigstens damit, daß gewisse Fehlschläge noch kein Grund zur Beunruhigung sind, indem wir daran denken, daß die Entwicklung der Theorie ständig fortschreitet. Wenn wir uns hierüber einig sind, so kann man nicht sagen, daß der Inhalt der Welt, wie er in der modernen Physik begriffen wird, aus einer Anzahl von Teilchen, genannt Protonen und Elektronen, sowie Strahlungswellen besteht. Es hat keinen Sinn, Inhalte anzugeben ohne Gesetze, die sie beherrschen, und es ist uns

ja nicht gelungen, auf dieser Grundlage Gesetze aufzustellen. In der Formulierung, die anerkanntermaßen den größten Erfolg in der naturwissenschaftlichen Voraussage hat, ist der Inhalt des Weltalls der „Nebel“, und die Grundgesetze der Physik sind die Gesetze der Ausbreitung von Nebelwellen — die Wellengleichungen. Nachdem nunmehr der Nebel der eigentliche Stoff des Weltalls, wie es in der Physik begriffen wird, geworden ist, ist es untunlich, ihn mit dem Wort Nebel der Umgangssprache zu bezeichnen. Ich werde ihn manchmal „ ψ “ nennen, denn mit diesem Symbol geht er in unsere Gleichungen ein, obgleich strenggenommen ψ mehr ein Maß für den Nebel ist, als daß es diesen selbst bezeichnet. Häufiger werde ich ihn „Wahrscheinlichkeit“ nennen, d. h. die Wahrscheinlichkeit für die Anwesenheit eines Teilchens. Doch enthält das die Vorstellung, daß es ein Weltall von Teilchen gibt, die im Hintergrunde unserer Gedanken schweben, obgleich wir gesehen haben, daß ein solches Weltall nicht gut als das Weltall beschrieben werden kann, wie es sich die moderne Physik vorstellt.

Wir sollten deshalb sagen, daß vom gegenwärtigen Standpunkt aus der Inhalt des Weltalls nicht aus Teilchen, sondern aus ψ -Wellen besteht. Aber gleichzeitig muß man sich darüber klar sein, daß ein aus ψ -Wellen zusammengesetztes Weltall notwendig ein stark subjektives Element enthält. Seine Bestandteile sammeln sich in Tropfen oder lösen sich in Nebel auf, je nachdem unser Wissen von ihnen zufällig genau oder verschwommen ist. Es ist eine Bühne, auf der gespenstische Darsteller sich materialisieren oder in Dunst auflösen, je nachdem wir unsere Aufmerksamkeit hierhin oder dorthin richten. Es ist in der Natur so eingerichtet (Heisenbergs Unschärferelation, S. 91), daß sich die mechanischen Merkmale eines ihrer Bestandteile in Dunst auflösen, wenn sich seine geometrischen Merkmale verdichten, so daß der Darsteller nie ganz und gar in das volle Rampenlicht tritt.

Daher müssen wir zugeben, daß „das Weltall, wie es in der modernen Physik begriffen wird“, nicht mit dem identisch ist, was ein Philosoph „das objektive physikalische Weltall“ nennen würde. Wenn wir das einmal genauer überlegen, so liegt auch kein Grund vor, daß das so sein müßte. Es ist die Aufgabe der Physik, das Schema der Wiederholungen in der vereinigten Erfahrung bewußter Wesen zu enträtseln. Wir haben gesehen, daß das Weltall, welches die Lösung dieses Problems ausmacht, notwendig die Merkmale der Regelmäßigkeit und des Außerunsseins besitzen muß; wir haben kein Wort von Objektivität gesagt. Und so kommt es, daß das

Streben der Naturwissenschaft und die Suche nach einem objektiven Weltall zwar bis zu einem bestimmten Punkt den gleichen Weg verfolgen, sich aber dann Lebewohl sagen. Der Naturforscher hat keine Wahl, welchen Weg er einschlagen soll. Er kann nur dasjenige Problem lösen, für das ihm unsere Erfahrung die Grundlagen liefert.

Wenn ich also sage, daß die Wellenmechanik einer höheren Erkenntnisstufe entspricht, so meine ich damit nicht, daß sie uns der objektiven Welt hinter den Erscheinungen näherbringt. Was ich meine, ist, daß sie uns die Quelle der Regelmäßigkeiten in unserer Erfahrung vollständiger enthüllt, welche durch die Art und Weise unserer Bekanntschaft mit der objektiven Welt nicht minder bedingt sind als durch die Beschaffenheit dieser Welt selbst. Vor sechs Jahren* sagte ich, die Wellenmechanik sei „keine physikalische Theorie, sondern ein mathematischer Kniff, und ein ausgezeichnete Kniff obendrein“. Wenn ich seitdem meine Ansicht überhaupt geändert habe, so geschah es im Hinblick auf das Ziel der physikalischen Theorie. Bleibt man aber dabei, daß das Ziel der Physik die Beschreibung der objektiven Wirklichkeit ist, so ist die Wellenmechanik keine physikalische Theorie in diesem Sinne.

Die größte Annäherung an die objektive Wirklichkeit bildet die Welt der Protonen und Elektronen. Das heißt, eine solche Welt entspricht der Stufe des Begreifens, die die Physik erreicht hatte, ehe sie sich genötigt sah, sich einem anderen Ziel zuzuwenden. Zwischen das Weltall unserer Erfahrung und das Weltall der objektiven Wirklichkeit schiebt sich vermutlich die Wahrscheinlichkeit wie eine Nebelwand.

Ich will ein Beispiel geben, um zu zeigen, daß für manche Zwecke ein aus Nebel (oder ψ) gebautes Atom ein zweckmäßigerer Begriff ist als ein aus Teilchen bestehendes Atom. Wir wissen, daß die von einem Atom ausgesandten Lichtwellen eine Periodizität haben, die für das Atom charakteristisch ist. Es ist eine natürliche Annahme, daß diese Periodizität im Atom selbst vorhanden ist und daß irgend etwas, was an der Struktur des Atoms beteiligt ist, mit dieser Periode schwingt. In dem aus Teilchen aufgebauten Atom (dem Bohrschen Atommodell) ist keine Spur der Periode zu finden. Es gibt dort keine Zustandsgröße und keine Konfiguration, die mit der Periode der Lichtwellen schwingt. Aber in dem aus ψ gebauten

* The Nature of the Physical World, S. 219. Das Weltbild der Physik, S. 218.

Atom tritt die Periode ganz klar zutage. Es ist die Periode der „Schwebungen“ zweier Züge von ψ -Wellen. Ich will die Bedeutung dieser Tatsache nicht überspannen. Ich erwähne sie nur, um zu zeigen, daß sogar vom Standpunkt des natürlichen Menschenverstandes aus der Begriffswandel nicht ganz und gar ein Wandel zum Schlechteren hin ist. Wie Heisenberg betont hat, müssen wir auf das Wesen des Atominnern aus dem schließen, was an Beobachtbarem aus ihm herauskommt. Und da unter allem, was aus ihm herauskommt, das am besten definierte gewisse Periodizitäten sind, die die Spektrallinien zeigen, so scheint die größte Logik dem Schluß zuzukommen, daß — was auch immer sonst im Atom stecken mag — ganz gewiß diese Periodizität in ihm steckt *.

VI.

Ich habe oben gesagt, daß der Äther (Feld, Raum) keine Masse besitzt. Aber es könnte doch scheinen, daß dies von einer höheren Erkenntnisstufe aus nicht streng wahr ist. Durch die allgemeine Relativitätstheorie werden Masse, Impuls und Schwere mit gewissen Komponenten der Krümmung der Raum-Zeit-Welt — oder des metrischen Feldes — identifiziert. Nun besteht in den Bereichen, wo es weder etwas anerkannt Stoffliches noch ein elektromagnetisches Feld gibt, doch noch eine gewisse schwache natürliche Krümmung, nämlich diejenige, die durch die bekannte „kosmologische Konstante“ bestimmt wird. Die Masse, der Impuls und die Schwere, die dieser Krümmung äquivalent sind, sollten deshalb allem zugeschrieben werden, von dem wir annehmen, daß es sich in einem solchen Bereich befindet, d. h. dem Raum, Feld oder Äther — welchen Ausdruck wir auch gebrauchen mögen.

Es scheint zweckmäßig, den Ausdruck Äther wieder zu beleben, um die Tatsache auszudrücken, daß wir es in keinem Bereich streng mit der Dichte Null zu tun haben. Dies erweist sich als eine entscheidende Überlegung bei der Herstellung einer Verbindung zwischen der Relativitätstheorie und der Quantentheorie. Denn die Operationen der Quantentheorie sind multiplikativ. Die Theorie befaßt sich mit Wahrscheinlichkeiten, die durch Multi-

* Ich habe von diesem Argument keine hohe Meinung (denn schließlich steckte das Bohrsche Modell nichts in das Atom, das man nicht hätte aus ihm herauskommen sehen). Aber es sollte denen ans Gewissen klopfen, die das überspannen, was man den „gesunden Menschenverstand“ nennt.

plikation, nicht durch Addition, miteinander verknüpft werden. Nun ist aber die Null eine Zahl, die bei multiplikativen Operationen sehr unbequem ist, und so ist auch der leere Raum eine Abstraktion, deren Einführung in die Quantentheorie sehr unbequem ist. Daher macht die Allgegenwart einer restlichen Dichte, wie sie durch die natürliche kosmische Raumkrümmung geliefert wird, das Weltall zu einem geeigneten Feld für die Anwendung der Quantentheorie.

Gemeiniglich betrachten wir den leeren Raum (bar aller Massen und selbst der allerwinzigsten Wahrscheinlichkeit, Massen zu enthalten) als das den beiden Theorien gemeinsame Fachwerk. In dies leere Fachwerk fügt dann jede Theorie ihre charakteristischen Wesenheiten. Die Quantentheorie fügt eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von Protonen und Elektronen ein, und die Relativitätstheorie fügt ihren makroskopisch gemittelten Energietensor der Materie und die elektromagnetischen Felder ein. Doch ist tatsächlich der Begriff eines leeren Fachwerks beiden Theorien fremd und kann nur durch einen Grenzübergang eingeführt werden. Wenn wir das normale Fachwerk, dessen sich die Theorien bedienen, genauer betrachten — nicht das, von dem man sich für gewöhnlich einbildet, daß sie es benutzen sollten —, so ist der Zusammenhang augenfällig. In der Relativitätstheorie ist die Norm: nicht die Dichte Null, sondern die der natürlichen kosmischen Raumkrümmung entsprechende Dichte. In der Quantentheorie ist die Norm: nicht ein von Teilchen zweifellos freier Bereich, sondern ein solcher, in dem eine gleichförmige und isotrope „Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori“ der Teilchen und ihrer Impulse besteht. Der Zusammenhang der beiden Theorien liegt in der Identifizierung dieser beiden Normen. Die Masse, der Impuls und die Schwere der Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori in der Quantentheorie ist die Masse, der Impuls und die Schwere, die in der Relativitätstheorie durch die natürliche kosmische Raumkrümmung bestimmt werden. Wir werden hieraus später wichtige Folgerungen ziehen.

Whitehead hat einmal gesagt: „Man kann ebensowenig zuerst einen Raum haben und erst dann die Dinge, die hinein sollen, wie man zuerst ein Zähnefletschen haben kann und erst dann eine Cheshirekatze, der es zu Gesicht stehen soll“ *. Um den Vergleich dem gegenwärtigen Stande der Physik anzupassen, müssen wir ihn

* Vgl. das bekannte Märchenbuch „Alice in Wonderland“, wo es heißt: „Die Katze verschwand sehr langsam, zuerst der Schwanz, bis schließlich nur das Zähnefletschen übrig war.“ D. Übers.

ein wenig abändern. Wir müssen das Zähnefletschen zulassen, sofern eine (nicht verschwindende) Wahrscheinlichkeit für eine dazu passende Katze besteht. Doch ungeachtet dieser kleinen Abwandlung bleibt der wesentliche Wahrheitskern bestehen. Man kann keinen Raum ohne Dinge und keine Dinge ohne Raum haben. Die Annahme eines dinglosen Raumes (Vakuum) als eines Normalzustandes in der Mehrzahl unserer physikalischen Denkvorgänge ist ein entscheidendes Hindernis für den Fortschritt der Physik. Durch diesen in sich widerspruchsvollen und untauglichen Begriff haben wir in unserer landläufigen Physik eine abstrakte Trennung zwischen der Theorie des Raumes (Feld) und der Theorie der körperlichen Dinge (Materie) geschaffen; und jetzt haben diejenigen, die nach einer einheitlichen Feld-Materie-Theorie suchen, Schwierigkeiten, sie wieder zu verknüpfen. Wie ich oben ausgeführt habe, besteht das Heilmittel darin, eine (beiden Theorien gemeinsame) Norm oder Grundlage zu benutzen, die nicht einem völligen Fehlen von Materie entspricht.

„Die Natur haßt das Vakuum.“ Ich glaube, die theoretische Physik täte gut, ihrem Beispiel zu folgen.

3. Kapitel

DAS ENDE DER WELT

Weit besser ist es,
Den jubelnden Tod zu sterben,
Als einsam, in eisiger Würde,
In der Höhe zu leben.

Besser ist es, an der Welt zerschmettert,
Im lodernnden Opfer zu vergehen,
Als ewig, ein unfruchtbarer Stein,
Den Himmel zu umkreisen.

Die Sternschnuppe*.

I.

Die Überschrift dieses Kapitels ist doppelsinnig. Sie verspricht eine Auseinandersetzung über das Ende der Welt, sie sagt aber nicht, w e l c h e s E n d e gemeint ist. Die Welt — oder Raum-Zeit-Welt — ist vierdimensional und läßt daher die Wahl der Richtung, in der wir bei der Suche nach einem Ende fortschreiten könnten, offen. Und es ist keineswegs leicht, von einem rein physikalischen Standpunkt aus die Richtung zu beschreiben, in der ich euch zu führen beabsichtige. Wir werden in der Tat unsere größte Aufmerksamkeit auf diese einleitende Frage zu richten haben: „Welches Ende?“

Wir halten nicht mehr Ausblick nach einem Ende der Welt in ihren räumlichen Dimensionen. Wir haben Grund zu glauben, daß, soweit räumliche Dimensionen in Frage kommen, die Welt sphärisch und geschlossen ist. Schreiten wir in beliebiger Richtung im Raume fort, so kommen wir nicht an ein Ende des Raumes, aber wir schreiten auch nicht in Ewigkeit weiter und weiter. Sondern nachdem wir eine Strecke fortgeschritten sind, die zwar groß, aber nicht unmeßbar groß ist, befinden wir uns wieder an unserem Ausgangspunkt, indem wir eine „Reise um die Welt“ gemacht haben. Von einem Raum, der diese Wiederkehreigenschaft hat, sagt man, er sei endlich, aber unbegrenzt. Die Oberfläche einer Kugel ist ein Beispiel eines endlichen, aber unbegrenzten zweidimensionalen Raumes. Wir müssen uns im Weltall einen entsprechenden Zusammenhang denken, aber mit einer Dimension mehr. Selbst wenn wir bis zu einem gewissen Grade eine solche Blasenwelt ver-sinnbildlichen können — bei der Länge, Breite, Dicke alle in der Blasenhaut liegen —, können wir uns wohl nur schwer davon über-

* Freie Übersetzung eines Gedichtes eines unbekannten Verfassers, abgedruckt in der „Nature“, 26. August 1933.

zeugen, daß das Bild als eine Darstellung des Raumes unserer tatsächlichen Erfahrung sinnvoll ist. Aber bedenkt, daß die uns geläufige Vorstellung vom Raum die des Geschichtenerzählers ist, der in unserem Geiste lebt. Er ist nie über die Schwelle seines Hauses hinausgekommen; er kann nicht bis zu den Nervenenden hinlaufen und sich in der Außenwelt umhertreiben, um zu sehen, was denn da in Wirklichkeit unsere sinnlichen Wahrnehmungen erregt. Wenn ich sage, daß ein endlicher und unbegrenzter Raum der Erfahrung nicht widerspricht, so meine ich damit, daß er nicht unvereinbar damit ist, daß unsere Nervenenden durch äußere Geschehnisse so gereizt werden, wie es erforderlich ist, um die tatsächliche Folge unserer Wahrnehmungen hervorzurufen. Wenn also der endliche, aber unbegrenzte Raum die am besten befriedigende Lösung des Kryptogramms bietet, so sehe ich keinen vernünftigen Grund, warum wir ihn nicht anerkennen sollten — als die Lösung des Kryptogramms.

Der sphärische Raum wird uns im 10. Kapitel beschäftigen, und wir werden deshalb hier nicht bei ihm verweilen. Wenden wir uns zur Zeit. Die Welt ist in ihren drei räumlichen Dimensionen geschlossen, aber sie ist offen an den beiden Enden ihrer einen zeitlichen Dimension. Schreiten wir vom „hier“ in irgendeiner räumlichen Richtung fort, so kommen wir schließlich zum „hier“ wieder zurück. Schreiten wir aber vom „jetzt“ weiter in die Zukunft oder in die Vergangenheit, so kehren wir nie wieder zum „jetzt“ zurück. Es gibt kein Umbiegen der Zeit, das uns zu dem Augenblick zurückbrächte, von dem wir ausgingen. In der Mathematik erweist es sich als zweckmäßig, diesem Unterschied zwischen dem geschlossenen Charakter des Raumes und dem offenen Charakter der Zeit mit Hilfe des Symbols $\sqrt{-1}$ Rechnung zu tragen. Wer mit der analytischen Geometrie vertraut ist, wird sich erinnern, daß das gleiche Symbol bei der Unterscheidung zwischen einer geschlossenen Ellipse und einer offenen Hyperbel auftaucht.

Wenn wir also ein Ende der Welt — oder eine endlose Fortsetzung in alle Ewigkeit — suchen, so müssen wir in einer der beiden Zeitrichtungen fortschreiten. Wie sollen wir entscheiden, welche der beiden Richtungen wir einschlagen? Stellt euch vor, ihr machtet in irgendeiner gänzlich unbekannten Gegend in der Raum-Zeit-Welt — Billionen Meilen von hier und Billionen Jahre von jetzt — Erfahrungen, denen ihr nie vorher unterworfen gewesen seid. Wie würdet ihr wissen, was die früheren und was die späteren

Ereignisse in jenen Erfahrungen sind? Man sagt, daß ein Flieger im Nebel zuweilen kopfüber fliegt, ohne es zu wissen. Könnte man ähnlich in der Zeit umgedreht werden, wenn keines der gewohnten Kennzeichen erkennbar wäre? Oder gibt es irgendwo oder irgendwann im physikalischen Weltall einen Wegweiser, dessen einer Arm die Aufschrift trägt: „In die Zukunft“ und der andere die Aufschrift: „In die Vergangenheit“? Es ist meine erste Aufgabe, auf die Suche nach diesem Wegweiser zu gehen. Denn wenn ich den Weg verfehle, werde ich euch zwar ohne Zweifel auch bis an ein Ende der Welt führen, aber es wird das Ende sein, daß man für gewöhnlich „den Anfang“ nennt.

Für den täglichen Bedarf entdeckt man den Wegweiser mit dem Bewußtsein. Man könnte vielleicht sagen, daß das Bewußtsein sich nicht um Wegweiser kümmert. Aber wo es auch weilt, da eilt es in emsiger Geschäftigkeit in einer Richtung, und der Physiker folgt gehorsam seiner Führung und etikettiert den Kurs, den es nimmt: „In die Zukunft“. Es ist eine wichtige Frage, ob das Bewußtsein bei der Wahl seiner Richtung durch irgend etwas in der physikalischen Welt gelenkt wird. Wird es auf diese Weise gelenkt, so sollten wir instande sein, das besondere Merkmal der physikalischen Welt zu finden, das sie zu einer Einbahnstraße für bewußte Wesen macht. Als Naturforscher sind wir darauf bedacht, das Schema des physikalischen Weltalls so geschlossen wie möglich zu machen. Wir wünschen bei einer so grundlegenden Unterscheidung wie der zwischen Vergangenheit und Zukunft nicht vom Bewußtsein abhängig zu sein, das doch außerhalb des Gesichtskreises der Physik liegt. Gäbe es nichts außerhalb unseres Bewußtseins, was zwischen der Zukunft und der Vergangenheit unterscheidet, so müßten wir die Unterscheidung als rein subjektiv ansehen.

Es handelt sich hier um zwei ziemlich verschiedene Fragen. Indem ich ein wenig vorgreife, kann ich sagen, daß ein Wegweiser für die Zeit im physikalischen Weltall wirklich gefunden worden ist, so daß wir von der Eingebung des Bewußtseins nicht völlig abhängig sind. Soweit ist die Unterscheidung zwischen Vergangenheit und Zukunft objektiv. Aber unser Bewußtsein besteht auch darauf, daß diese Unterscheidung von besonderer Art ist. Sie hat etwas Dynamisches an sich, das wir fühlen können, obgleich wir es nicht definieren können. Da wir diese Eigentümlichkeit nicht in mathematischen Symbolen beschreiben können, so dürfen wir nicht erwarten, daß der Physiker sie in der Außenwelt entdeckt. Jedoch ist die dynamische Natur der Zeit — der Begriff

des „Werdens“ — ein so wesentlicher Bestandteil unserer Einstellung zur Erfahrung, daß das rein physikalische Merkmal zur Unterscheidung von Vergangenheit und Zukunft immer nur als ein sehr wenig entsprechender Ersatz für den Lauf der Zeit erscheint, den wir in unserem Bewußtsein empfinden. Die Feststellung, daß die Dinge im Zuge der Zeit von der Vergangenheit zur Zukunft „werden“, vermittelt uns erheblich mehr als die Feststellung, daß es eine Möglichkeit gibt, Vergangenheit und Zukunft zu unterscheiden.

Man hört manchmal die Ansicht, daß das eigentümlich Dynamische der Zeit im physikalischen Weltall nicht existiert und ein durchaus subjektiver Eindruck ist. Die Erfahrung führt uns die Welt als einen Kinofilm vor, der in einer bestimmten Richtung abgerollt wird. Aber es wird unterstellt, daß das nur eine Folge der Art und Weise ist, wie der Film in den Bildwerfer des Bewußtseins eingeschoben wird, und daß es im Film selbst nichts gibt, was zu entscheiden gestattet, in welcher Richtung er abrollen sollte *. Wenn diese Ansicht richtig wäre, so dürfte der „Lauf der Zeit“ in unserem Bilde der Außenwelt nicht auftreten. Genau wie wir die alte geozentrische Vorstellung von der Außenwelt haben fallen lassen, indem wir sie als eine aus unserer eigenen Stellung als Beobachter geborene Wahnvorstellung erkannten, so müßten wir auch die dynamische Darstellung der Zeit — das Werden der Dinge — fallen lassen, indem wir sie als eine Besonderheit des Vorganges behandeln, durch den wir die Welt in unser Bewußtsein aufnehmen. In diesem Falle müssen wir uns allerdings davor hüten, daß wir nicht eine Darstellung der physikalischen Weltallgeschichte von der Vergangenheit zur Zukunft für wahrer und bedeutsamer halten als eine Darstellung von der Zukunft zur Vergangenheit. Insbesondere müssen wir die Entwicklungstheorie fallen lassen oder ihr wenigstens eine Rückentwicklungstheorie als gleicherweise wahr und gleicherweise bedeutsam zur Seite stellen.

Wenn jemand diesen Standpunkt einnimmt, kann ich ihm nicht mit Beweisgründen antworten. Ich kann nur seinen Charakter verachten. Ist er ein Naturforscher von Beruf, so sage ich ihm: „Du willst ein Lehrer und Führer sein, dessen Pflicht es ist, eine wahrheitsgemäße und abgewogene Anschauung zu lehren. Aber du lehrst eine einseitige Entwicklungslehre oder erlaubst deinen Berufsgenossen widerspruchslös, eine solche zu lehren. Du lehrst sie nicht

* Die beiden Enden sind, wie wir oben festgestellt haben, verschieden bezeichnet, aber das läßt immer noch die Frage offen, welche Bezeichnung diejenige für den Anfang ist.

als einen farblosen Katalog der Ereignisse, sondern so, als liege etwas Bedeutsames, vielleicht sogar etwas sittlich Erhebendes in der Entwicklung des Reichtums und der Zweckmäßigkeit unserer gegenwärtigen Umwelt aus dem Chaos. Warum unterdrückst du jeden Hinweis auf die Folge von der Zukunft zur Vergangenheit, die zu verfolgen nach deiner Meinung ebenso bedeutsam ist? Warum erzählst du uns nicht die Geschichte der Rückentwicklung? Zeige uns, wie die Natur aus den verschiedenen heute lebenden Arten plumpere Formen rückentwickelt, die zum Leben immer weniger tauglich sind, bis sie zur Unfertigkeit des paläozoischen Lebens gelangt. Zeige uns, wie die Natur aus dem System der Fixsterne und Planeten chaotische Nebel rückentwickelt. Erzähle die ganze Geschichte der Rückentwicklung von der Zukunft zur Vergangenheit und male das Wirken der Natur als eine Kraft, die den großen Wunderbau um uns hernimmt, — um daraus Hackfleisch zu machen.“

II.

Indem wir die Führung des Bewußtseins außer Betracht lassen, entdecken wir in der physikalischen Welt selbst einen Wegweiser für die Zeit. Es ist ein recht merkwürdiger Wegweiser, und ich wage die Behauptung, daß die Entdeckung des Wegweisers auf das gleiche hinausläuft, wie die Entdeckung eines objektiven „Laufs der Zeit“ im Weltall. Aber jedenfalls liefert er ein einzigartiges Merkmal zur Unterscheidung zwischen Vergangenheit und Gegenwart, während es keine entsprechende absolute Unterscheidung zwischen rechts und links gibt. Der Wegweiser beruht auf einer bestimmten meßbaren physikalischen Größe, der Entropie. Nimm ein nach außen abgeschlossenes System und miß seine Entropie in zwei Augenblicken t_1 und t_2 . Die Merkregel ist, daß der Augenblick, der der größeren Entropie entspricht, der spätere ist. Wir können so durch eine rein physikalische Messung entscheiden, ob t_1 früher oder später als t_2 ist, ohne uns auf die instinktive Wahrnehmung des Fortschritts der Zeit in unserem Bewußtsein zu verlassen. In mathematischem Gewande lautet die Merkregel, daß die Entropie S dem Gesetz gehorcht

$$\frac{dS}{dt} > 0, \text{ d. h. } \frac{dS}{dt} \text{ ist stets positiv.}$$

Das ist der bekannte zweite Hauptsatz der Wärmelehre.

Die Entropie wird meist als ein Maß für den Mangel an Ordnung eines Systems beschrieben. Ich meine nicht, daß das als eine Definition gelten soll, denn Ordnung und Unordnung sind dehnbare Begriffe, die in gewissem Grade von dem Standpunkt abhängen, den wir einnehmen. Aber bei allen Vorgängen, durch die die Entropie eines Systems vermehrt wird, sehen wir den Zufall einschleichen, wo er früher ausgeschlossen war, so daß Zustände, die vorher geordnet und systematisiert waren, nunmehr ungeordnet, chaotisch werden. Es gibt viele Beispiele von Naturvorgängen, bei denen ein organisiertes, geordnetes System in eine ungeordnete Verteilung aufbricht. Ebene Wellen von Sonnenlicht, die alle in der gleichen Richtung fortschreiten, fallen auf ein Blatt Papier und werden nach allen Richtungen zerstreut. Die Richtung der Wellen wird ihrer Ordnung beraubt, und dementsprechend erfolgt ein Zuwachs der Entropie. Bewegt sich ein fester Körper als Ganzes, so wandern seine Moleküle einträchtig daher; wird er, indem er gegen irgend etwas stößt, gebremst, so beginnen seine Moleküle sich unterschiedslos nach allen möglichen Richtungen zu bewegen. Es ist, wie wenn der disziplinierte Marsch eines Regiments plötzlich stockt und es sich in eine tobende Schar von Einzelwesen verwandelt, die alle nach verschiedenen Richtungen zu gehen versuchen. Diese ungeordnete Bewegung der Moleküle identifizieren wir mit der Wärmeenergie des Körpers. Quantitativ ist die beim Stoß eines Körpers erzeugte Wärme der verlorenen Bewegungsenergie des Körpers als Ganzes genau äquivalent, aber sie hat eine weniger geordnete Form. Die Natur hält streng Rechenschaft über alle diese ständigen kleinen Ordnungsvergeudungen. Eine jede wird von dem großen Vorrat an Ordnung, den die Welt enthält, abgebucht. Die Waage sinkt ohne Unterlaß. Eines Tages wird alles verbraucht sein.

Wenn Wärme auf eine Stelle konzentriert ist, so ist sie keine gänzlich ungeordnete Energie. Eine weitere Minderung der Ordnung tritt ein, wenn die Wärme sich rings gleichmäßig verteilt, so daß der Körper und seine Umgebung auf gleiche Temperatur kommen. Mit anderen Worten, die Wärmeenergie erleidet einen Verlust an Ordnung, wenn sie von einem wärmeren auf einen kälteren Körper übergeht. Das ist einer der gewöhnlichsten Fälle einer Entropiezunahme (eines Verlustes an Ordnung), denn sofern nicht überall die gleiche Temperatur herrscht, entweicht stets Wärme von wärmeren zu kälteren Bezirken. Die Tatsache, daß in einem konzentrierten Wärmevorrat immer noch ein gewisser Betrag an Ordnung enthalten ist, erlaubt es uns, Wärme teilweise in sicht-

bare Bewegung zu verwandeln — das Umgekehrte dessen, was beim Stoß geschieht. Aber nur teilweise. Um einen Zug zu treiben, müssen wir der Maschine mehr Wärme zuführen, als dann in Gestalt von Bewegungsenergie des Zuges in Erscheinung tritt. Der Rest ist gezwungen, sich in einen Zustand minderer Ordnung zu begeben. Auf diese Weise beschaffen wir, ohne irgend neue Ordnung aus dem Nichts zu schaffen, dem Zuge genügend geordnete Energie. Die überschüssige Energie, die der Ordnung soweit wie möglich beraubt wurde, wird als Abfall in den Kondensator der Maschine gekippt.

Wenn wir die Entropie als Wegweiser für die Zeit benutzen, müssen wir dafür sorgen, daß wir es mit einem wirklich *nach außen abgeschlossenem* System zu tun haben. Die Abschließung ist nötig, denn ein System könnte sonst an Ordnung zunehmen, indem es anderen Nachbarsystemen solche entzieht. Die Entwicklungsgeschichte zeigt uns, daß höher organisierte Systeme sich im Laufe der Zeit weiter entwickeln. Das mag zum Teil eine Frage der Definition sein, denn es steht nicht fest, daß die Organisation oder Ordnung vom entwicklungsgeschichtlichen Standpunkt aus mit dem gleichen Maß gemessen werden darf, wie die Organisation oder Ordnung, wenn man sie vom Standpunkt der Entropie betrachtet. Aber jedenfalls dürften diese hochentwickelten Systeme ihre Organisation durch einen Sammlungsvorgang erhalten, nicht durch einen Schöpfungsakt. Ein menschliches Wesen wird bei seinem Wachstum von der Vergangenheit in die Zukunft höher und und höher organisiert — oder es bildet sich das wenigstens gern ein. Auf den ersten Blick scheint dies dem Wegweisergesetz zu widersprechen, nach dem der spätere Zeitpunkt der fortgeschritteneren Unordnung entspricht. Um aber das Gesetz anwenden zu können, müssen wir das Wesen zu einem abgeschlossenen System machen. Hindern wir es, Organisation aus äußeren Quellen zu beziehen, schneiden wir ihm seinen Verzehr an Essen, Trinken und Luft ab, so wird es binnen kurzem in einen Zustand geraten, den jedermann als einen Zustand äußerster Zerrüttung anerkennen wird.

Es ist möglich, daß die Unordnung eines abgeschlossenen Systems eine vollständige wird. Der dann erreichte Zustand heißt thermodynamisches Gleichgewicht. Weiter kann die Entropie nicht wachsen, und da der zweite Hauptsatz der Wärmelehre ihre Abnahme untersagt, so bleibt sie konstant. Dann verschwindet unser Wegweiser für die Zeit, und soweit es das System angeht, hört der Lauf der Zeit auf. Das heißt nicht, daß die Zeit zu existieren aufhört. Sie existiert und erstreckt sich, genau wie der

Raum existiert und sich erstreckt, aber sie hat nichts Dynamisches mehr in sich. Ein Zustand thermodynamischen Gleichgewichts ist notwendig ein Zustand des Todes, so daß kein Bewußtsein gegenwärtig sein wird, um einen Ersatz für den „Pfeil der Zeit“ zu liefern.

Es gibt keinen weiteren unabhängigen Wegweiser für die Zeit in der physikalischen Welt, wenigstens keinen weiteren örtlichen Wegweiser. Daher verschwindet die Unterscheidung zwischen Vergangenheit und Zukunft vollkommen, wenn wir diese Eigenschaft der Entropie in Verruf bringen oder wegerklären. Ich gründe diese Feststellung auf ein Gesetz, das in der Atomphysik allgemein gilt und das den Namen „Umkehrprinzip“ oder „Satz von der Umkehrbarkeit molekularer Vorgänge“ hat *.

III.

Nachdem wir so unseren Wegweiser gefunden haben, wollen wir Umschau halten. Vor uns sehen wir die unablässig zunehmende Unordnung der Welt. Obgleich der Gesamtbetrag der Organisation abnimmt, tragen gewisse örtliche Strukturen auf Kosten des Restes eine höher und höher verfeinerte Organisation zur Schau. Das ist das Phänomen der Entwicklung. Aber schließlich müssen sie von der schwellenden Flut von Zufall und Chaos verschlungen werden, und das ganze Weltall wird den Endzustand erreichen, bei dem es keine Organisation mehr zu verlieren gibt. Noch vor einigen Jahren würden wir gesagt haben, daß es als eine einförmige, jeder besonderen Merkmale bare Masse im thermodynamischen Gleichgewicht enden werde. Aber dabei ist nicht berücksichtigt, was wir jüngst über die Expansion des Weltalls hinzugelernt haben. Die Theorie des sich ausdehnenden Weltalls bringt einige Änderungen in der Beschreibung mit sich, jedoch, wie ich glaube, keine großen prinzipiellen Änderungen, und es wird zweckmäßig sein, sie weiter unten in diesem Kapitel zu betrachten, zunächst aber bei den älteren Vorstellungen zu bleiben. Wenn der endgültige Wärmetod über das Weltall kommt, wird sich die Zeit weiter und weiter ausdehnen, vermutlich bis ins Unendliche, aber man wird in keinem definierbaren Sinn von ihr sagen können, sie s c h r e i t e f o r t. Schon bevor dieser Zustand erreicht ist, muß bereits jedes Bewußtsein aus der Welt der Physik verschwunden sein, und da dS/dt sich verflüchtigt

* The Nature of the Physical World, S. 79. Das Weltbild der Physik, S. 83.

hat, wird nichts bleiben, was den Weg des zeitlichen Fortschreitens weist. Dies ist das Ende der Welt.

Jetzt laßt uns in der umgekehrten Richtung in die Vergangenheit blicken. Folgen wir der Zeit rückwärts, so treffen wir in der Welt mehr und mehr Organisation an. Wird uns nicht schon vorher Halt geboten, so gelangen wir zurück bis in eine Zeit, in der die Materie und die Energie der Welt den höchsten möglichen Grad von Ordnung besaßen. Weiter zurückzugehen ist unmöglich. Wir sind an ein anderes Ende der Raum-Zeit-Welt gekommen — an ein jähes Ende. Nur nennen wir es auf Grund unserer Orientierung den „Anfang“.

Ich will bei dieser Erörterung kein philosophisches Garn spinnen. Ich stelle einfach die Ergebnisse fest, zu denen unsere gegenwärtigen Grundvorstellungen von den physikalischen Gesetzen führen. Weit mehr bewegt mich die Frage, ob das derzeit geltende Schema der Naturwissenschaft auf ausreichend festen Grundmauern ruht, um die Beanspruchung durch eine Extrapolation über die ganze Zeit und den ganzen Raum zu ertragen, als irgendwelche Prophezeiungen über das letzte Schicksal materieller Dinge oder Beweise zugunsten eines Schöpfungsaktes. Ich sehe keine Schwierigkeit in der Annahme der Folgerungen aus der derzeitigen naturwissenschaftlichen Theorie, die die Zukunft betreffen, — den Wärmetod des Weltalls. Es mögen noch Billionen von Jahren bis dahin sein, aber langsam und unerbittlich läuft die Uhr ab. Ich schrecke vor dieser Folgerung keineswegs zurück. Vom sittlichen Standpunkt aus scheint mir der Begriff eines zyklischen Weltalls, das ständig wie eine Uhr abläuft und sich ständig wieder aufzieht, gänzlich rückständig. Muß Sisyphos ewig seinen Stein den Hügel hinaufwälzen, nur damit er immer wieder herabrollt, sobald er sich dem Gipfel nähert? Das wäre das Bild einer Hölle. Sofern wir irgendeinen Begriff von einem Fortschritt als Ganzes haben, der weiter reicht als die physikalischen Symbole der Außenwelt, so sollte wohl der Weg dazu geschützt liegen vor dem Wirbelwind der Dinge. Es ist merkwürdig, daß die Lehre von dem Ablaufen des physikalischen Weltalls so oft geringschätzig betrachtet wird, als sei sie pessimistisch oder den Zielen der Religion zuwider. Seit wann ist denn die Lehre, daß „Himmel und Erde werden vergehn“, im kirchlichen Sinne eine Ketzerei?

Die Extrapolation in die Vergangenheit bereitet viel ernstere Schwierigkeiten. Philosophisch ist für mich die Vorstellung eines plötzlichen Beginns der gegenwärtigen Ordnung in der Natur ab-

stoßend, so wie sie es wohl für die meisten Menschen sein muß. Und sogar diejenigen, die einen Beweis für das Eingreifen eines Schöpfers begrüßen würden, werden sich doch vermutlich sagen, daß ein einziges Aufziehen der Weltenuhr zu einer längst vergangenen Zeit eigentlich doch nicht gerade eine Beziehung zwischen Gott und seiner Welt ist, die das Gemüt befriedigt. Aber ich sehe keinen Ausweg aus dieser Schwierigkeit. Ich kann nicht endgültig sagen, ob nicht vielleicht die künftige Entwicklung der Naturwissenschaft einen Ausweg schaffen wird. Aber die Schwierigkeit dürfte nicht so sehr von einem Mangel im gegenwärtigen System physikalischer Gesetze herrühren, als vielmehr in dem ganzen Verhältnis liegen, in dem die in der Physik angewandte Methode zur Analyse der Erfahrung zu den Sachverhalten steht, mit denen sie sich befaßt. Die Schwierigkeit ist folgende: Wenn wir unsere Umwelt überschauen, so finden wir, daß sie weit davon entfernt ist, eine „zufällige Anhäufung von Atomen“ zu sein. Das Bild der Welt, wie es in den geltenden physikalischen Theorien gezeichnet ist, zeigt eine Anordnung der individuellen Atome und Protonen, welche überaus unwahrscheinlich wäre, wenn sie durch ein zufälliges Zusammentreffen entstanden wäre. Die Wette dagegen steht Multillionen gegen eins. (Ich benutze „Multillionen“ als einen allgemeinen Ausdruck für eine Zahl, die alle Bücher in einer großen Bibliothek ausfüllen würde, wenn man sie in der üblichen dezimalen Schreibweise vollständig hinschreiben würde.) Dieser Zug von Ordnung in der Welt könnte vielleicht als Absicht oder Plan gedeutet werden. Wir wollen ihn indessen unverbindlich Antizufall nennen. Wir sind in der Physik nicht bereit, zuzugeben, daß es in dem anorganischen System, das wir erforschen, irgendeinen Antizufall in den Wechselwirkungen zwischen den Billionen von Atomen und Quanten gibt. Und in der Tat weist auch unser gesamtes experimentelles Tatsachenmaterial dahin, daß diese Wechselwirkungen von Zufallsgesetzen beherrscht werden. Dementsprechend erkennen wir den Antizufall in den Gesetzen der Physik nicht an, sondern nur in den Gegebenheiten, auf die diese Gesetze angewandt werden. In der entsprechenden mathematischen Behandlung schließen wir den Antizufall aus den Differentialgleichungen der Physik aus und verbannen ihn in die Grenzbedingungen, denn irgendwo muß er ja hineingebracht werden. Man kann sich des Gefühls nicht erwehren, daß diese verschiedenartige Behandlung von Zufall und Antizufall eher ein Kennzeichen unserer Methode, das Problem anzugreifen, ist, als ein solches des objektiven Weltalls selbst. Es ist, als ob wir

einen Bereich, der groß genug ist, um unsere unmittelbare Erfahrung in sich zu enthalten, glattbügelten und auf seine Kosten die Außenbezirke kraus machten. Wir haben den Antizufall aus dem Bereich unserer laufenden physikalischen Probleme ausgekehrt, aber wir sind ihn nicht losgeworden. Sollte jemand so vermessen sein, daß er versucht, Billionen von Jahren zurück in die Vergangenheit zu gelangen, so wird er den Müll wie eine hohe Mauer aufgetürmt finden. Er bildet eine Grenze — einen Beginn der Zeit —, die wir nicht überschreiten können.

Ohne dogmatisch auf der Endgültigkeit des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre zu bestehen, müssen wir doch nachdrücklich betonen, daß er in der Physik sehr tief verankert ist. Der Ingenieur, der sich mit praktischen Problemen der Wärmekraftmaschinen abgibt, der Quantenphysiker, der die Strahlungsgesetze erörtert, der Astronom, der das Innere eines Sterns erforscht, der Erforscher der kosmischen Ultrastrahlung, der vielleicht dem Zerfall von Atomen im Raum jenseits der Milchstraße nachspürt, sie alle haben ihr Vertrauen an die Regel geknüpft, daß die Zerrüttung oder das Element der Unordnung wohl zunehmen, aber nie abnehmen kann. Dieses Vertrauen ist nicht unvernünftig, wenn wir uns dessen erinnern, daß die Abschaffung des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre bedeutet, daß man den Wegweiser der Zeit aus dem Boden reißt.

Ich bin gelegentlich zur Ordnung gerufen worden, weil ich in meinen Auslassungen über diese Fragen nicht nachdrücklich genug betont hätte, daß die die Entropie betreffenden Gesetze eine Angelgenheit der Wahrscheinlichkeit, nicht der Gewißheit sind. Ich sagte oben, daß, wenn wir ein System von zwei Zeitpunkten beobachten, derjenige Zeitpunkt der spätere ist, der der größeren Entropie entspricht. Genauer hätte ich (für ein ziemlich kleines System) so sagen sollen, daß die Wahrscheinlichkeit z. B. $10^{20} : 1$ beträgt, daß es der spätere ist. Denn infolge eines höchst unwahrscheinlichen Zusammentreffens könnten sich die zahlreichen Teilchen im späteren Zeitpunkt zufällig in einer Verteilung anordnen, die ebenso viel Ordnung aufweist, wie in einem früheren Zeitpunkt. Genau wie es beim Mischen eines Kartenhaufens immerhin möglich ist, daß wir die Karten zufällig in der richtigen Folge oder in Sequenzen ordnen. Einige Kritiker scheinen über mein laxes Gewissen sehr empört gewesen zu sein, weil ich die obige Behauptung aufstellte, obgleich ich mir doch auf Grund der Wahrscheinlichkeit $1 : 10^{20}$ darüber klar war, daß sie falsch ist. Laßt mich ein Geständnis machen. Ich habe in den letzten 25 Jahren eine

Anzahl wissenschaftlicher Abhandlungen und Bücher geschrieben und ein gut Teil Behauptungen über die physikalische Welt unter die Leute gebracht. Ich fürchte, es sind unter diesen Behauptungen wenige, für die ich den Anspruch erheben darf, daß die Wahrscheinlichkeit, sie seien falsch, nicht größer als $1 : 10^{20}$ ist. Mein durchschnittliches Risiko liegt mehr bei $1 : 10$, oder ist auch diese Schätzung noch zu überheblich? Wenn es sich herausstellt, daß $\frac{9}{10}$ dessen, was ich euch in diesem Buch erzähle, richtig ist, so habe ich entweder eine glückliche Hand, oder was ich sage, sind Plattheiten. Ich meine, wenn es uns nicht gestattet wäre, Behauptungen aufzustellen, denen die Wahrscheinlichkeit $1 : 10^{20}$ zukommt, daß sie unwahr sind, so würde jede Unterhaltung einigermaßen langweilig werden. Vermutlich wären die reinen Mathematiker die einzigen Menschen, die noch ihren Mund auftun dürften.

IV.

Ich muß hier einen Weg aus den Schwierigkeiten erwähnen, der gelegentlich Anklang gefunden hat. Ich muß ihm widersprechen, aber nicht deshalb, weil es irgend mein Wunsch wäre, die gegenwärtige Schwierigkeit aufrechtzuerhalten, sondern weil ich ihn nicht für einen wirklichen Ausweg halte. Er beruht auf dem Auftreten von Wahrscheinlichkeitsschwankungen. Wenn sich eine Anzahl von Dingen ganz ungeordnet bewegen, so werden sie im Laufe der Zeit jede mögliche Anordnung durchlaufen, so daß sogar die bestgeordnete, die zufallswidrigste Anordnung irgendwann einmal zufällig auftreten wird, wenn wir nur lange genug warten. Es ist wie in dem Lied von jenem Pavian, der unermüdlich in ein Fagott hauchte, weil er meinte, im Laufe von Billionen Jahren würde doch sicher einmal ein Ton kommen:

There once was a brainy baboon
Who always breathed down a bassoon.
For he said "It appears
That in billions of years
I shall certainly hit on an tune".

Wenn die Welt den Zustand vollständiger Unordnung (thermodynamisches Gleichgewicht) erreicht hat, so liegt dahinter immer noch eine unendliche Zeit, und ihre elementaren Bausteine werden Gelegenheit haben, jede beliebige Anordnung wieder und wieder zu bilden. Wenn wir lange genug warten, wird sich eine Anzahl Atome,

gänzlich zufällig, so anordnen, wie die Atome jetzt in diesem Raum. Und es werden, ebenso zufällig, dieselben Schallwellen von einem der Atomsysteme kommen, wie sie jetzt aus meinem Munde kommen. Sie werden, wieder gänzlich zufällig, andere Atome treffen, die so geordnet sind, daß sie euch ähneln und euch in dem gleichen Zustand von Aufmerksamkeit oder schläfriger Langeweile zeigen. Diese gespenstische Veranstaltung unseres gegenwärtigen Kurses von Messenger Lectures wird sich viele Male wiederholen — tatsächlich unendlich oft —, bevor die Zeit den Wert unendlich erreicht. Fragt mich bitte nicht, ob ich wirklich glaube, daß dies sich ereignen wird, oder ob ich von euch erwarte, daß ihr es glaubt (vgl. S. 64).

Logik ist Logik. Mehr sage ich nicht.

Nachdem so die Welt thermodynamisches Gleichgewicht erlangt hat, bleibt die Entropie konstant auf ihrem Höchstwert, außer daß irgendwann einmal aus heiterem Himmel ein lächerlich kleiner Zufall eintritt und die Entropie merklich unter ihren Höchstwert sinkt. Wenn diese Schwankung abgeklungen ist, wird man wieder sehr lange warten müssen, bis ein neues Zusammentreffen von Umständen eine neue Schwankung erzeugt. Es wird Multimillionen Jahre dauern, aber wir haben ja noch die ganze Ewigkeit vor uns. Es gibt keine Grenze für den möglichen Betrag der Schwankung; und wenn wir lange genug warten, so wird auch einmal eine Schwankung kommen, die das Weltall so weit vom thermodynamischen Gleichgewicht entfernt, wie es im gegenwärtigen Augenblick von ihm entfernt ist.

Die Vermutung geht nun dahin, daß wir uns jetzt auf dem absteigenden Ast einer dieser Schwankungen befinden. Ist es ein Zufall, daß wir uns gerade im Abstieg, nicht im Aufstieg befinden? Keineswegs. Was das physikalische Weltall betrifft, so ist die Richtung der Zeit so d e f i n i e r t, daß sie die ist, in der die Unordnung zunimmt. So zeigt der Wegweiser „In die Zukunft“ immer abwärts, auf welchem Hang des Berges wir auch stehen mögen. In dieser Theorie ist tatsächlich der Lauf der Zeit keine Eigenschaft der Zeit im allgemeinen, sondern eine Eigenschaft des Schwankungshanges, auf dem wir stehen.

Wir können stets beweisen, daß alles, was auf Grund eines Planes oder als Folge einer ganz bestimmten Ursache eintreten kann, auch durch Zufall eintreten kann, vorausgesetzt, daß wir überkommen, die Fehlschläge nicht zu zählen. In diesem Falle postu-

liert die Theorie zwar einen Zustand der Dinge, der ein nur sehr seltenes Zusammentreffen bestimmter Umstände voraussetzt, aber sie stellt auch eine unendliche Zeit zur Verfügung, während derer ein solches Zusammentreffen eintreten kann (oder, wie man vermutet, eintreten muß). Trotzdem bin ich sicher, daß der Beweis ein Loch hat.

Wenn wir einen Kessel mit Wasser aufs Feuer stellen, besteht eine leise Möglichkeit, daß das Wasser gefriert. Denn die physikalische Theorie der Wärmeströmung zeigt, daß zwar eine sehr große Wahrscheinlichkeit besteht, daß die Wärme vom Feuer zum Kessel fließt, aber auch eine winzig kleine Möglichkeit, daß sie umgekehrt fließt. Wenn ein Mensch lange genug fortfährt, Kessel auf das Feuer zu setzen, wird diese Möglichkeit eines Tages einmal wirklich werden, und der betreffende Mensch wird zu seinem Staunen ein Stück Eis in seinem Kessel finden. Aber mir wird das nicht passieren. So gewiß bin ich dessen, daß ich es gar nicht so erklären werde, wenn ich morgen Eis statt kochendem Wasser in meinem Kessel finde. Wahrscheinlich werde ich ausrufen: „Da steckt der Teufel drin!“ Das wäre wirklich eine vernünftigere Erklärung. Zur Zeit glaube ich nicht, daß der Teufel sich mit Kochgeschirren oder anderen experimentellen Dingen abgibt, weil ich durch die Erfahrung überzeugt bin, daß in der Natur eine gewisse Einheitlichkeit waltet, die wir Gesetze nennen. Ich bin davon überzeugt, weil diese Gesetze wieder und wieder geprüft worden sind, aber es ist möglich, daß jede einzelne Beobachtung seit den Anfängen der Wissenschaft nur infolge eines zufälligen Zusammentreffens von Umständen zu den Gesetzen gepaßt hat. Das wäre natürlich ein höchst unwahrscheinliches Zusammentreffen. Aber ich halte es nicht für ganz so unwahrscheinlich, wie das Zusammentreffen von Umständen bei meinem Kessel mit gefrierendem Wasser. Wenn also das Ereignis eintritt und ich mir keine andere Erklärung ausdenken kann, so habe ich die Wahl zwischen zwei höchst unwahrscheinlichen Annahmen: a) daß es keine Begründung für das von der Wissenschaft angenommene System physikalischer Gesetze gibt, und daß die scheinbare Einheitlichkeit der Natur, die bislang beobachtet wurde, nur ein zufälliges Zusammentreffen von Umständen ist; b) daß die geltenden Naturgesetze zwar wahr sind, daß ich aber an ein Phänomen geraten bin, das einem unwahrscheinlichen Zusammentreffen von Umständen zu verdanken ist. Beide Erklärungen tun der Wahrscheinlichkeit schwer Gewalt an, aber ich glaube, daß die erste zahlenmäßig die weniger unwahrscheinliche ist.

Ihr werdet sehen, daß, wenn die Wahrscheinlichkeit für das Gegenteil auf das Multimillionenfache anwächst, eine neue Beziehung entsteht zwischen dem, was wir gewöhnlich „unwahrscheinlich“, und dem, was wir „unmöglich“ nennen. Ich erachte ein ausreichend unwahrscheinliches Zusammentreffen von Umständen, daß sich im Rahmen der angenommenen Naturgesetze ereignet, als vernichtender, als eine wirkliche Verletzung der Gesetze. Denn mein ganzer Grund zur Annahme der Naturgesetze beruht auf der Voraussetzung, daß ein Zusammentreffen sehr unwahrscheinlicher Umstände sich nicht ereignet oder sich wenigstens in meinem Erfahrungsbereich nicht ereignet. Zweifellos begegnen uns allen Ereignisse, die man als „äußerst unwahrscheinlich“ bezeichnet, aber die Unwahrscheinlichkeit ist von einer völlig anderen Größenordnung als die, um die es sich in dieser Auseinandersetzung handelt.

Wenn mir daher die Logik versichert, daß eine gespenstische Wiederholung dieser Vorträge sich irgendwann vor der Zeit $t = \infty$ infolge einer ganz zufälligen Anordnung von Atomen ereignen wird, so würde ich ihr antworten, daß ich die gleiche Erklärung unmöglich für die Abhaltung der Vorträge zur Zeit $t = 1934$ hinnehmen kann. Wir müssen hier ein wenig aufpassen, denn hier kann man leicht auf Glatteis geraten. Es könnte zunächst scheinen, daß in einer einzelnen Epoche (1934) die Wahrscheinlichkeit für eine zufällige Abweichung der Entropie von ihrem Höchstwert, die genügt, um das Phänomen hervorzurufen, zu gering ist, um ernstlich in Betracht gezogen zu werden, und daß die Schwankung daher dem Antizufall zuzuschreiben sei. Aber das Jahr 1934 ist kein zufälliges Datum zwischen $t = -\infty$ und $t = +\infty$. Wir dürfen nicht den Schluß ziehen, daß die Wahrscheinlichkeit für eine solche Schwankung wie $x : 1$ steht, weil die derzeitige Schwankung nur $1/x$ der Zeit zwischen $t = -\infty$ und $t = +\infty$ umfaßt. Für uns besteht im Augenblick das wichtige Merkmal des Jahres 1934 darin, daß es durch seine Zugehörigkeit zu einer Zeitspanne ausgezeichnet ist, in der es im Weltall Wesen gibt, die fähig sind, Betrachtungen über das Weltall und seine Schwankungen anzustellen. Es ist klar, daß solche Geschöpfe nicht unter Bedingungen bestehen könnten, die dem thermodynamischen Gleichgewicht nahe sind. Darum handeln die Verfechter dieser Ansicht ganz ehrlich, wenn sie in ihrer Rechnung die ganzen Multimillionen von Jahren streichen, während derer die Schwankungen kleiner sind als der Mindestbetrag, der für eine Entwicklung und ein Dasein theoretischer Physiker erforderlich ist. Das verkleinert x beträchtlich, aber die Übermacht ist immer noch über-

wältigend. Die r o h e Behauptung wäre, daß es praktisch gewiß ist, daß das Weltbild nahezu in einem Zustand maximaler Unordnung angetroffen wird (es sei denn, wir ließen im Bau des Weltalls etwas zu, was kein Zufall ist). Die v e r b e s s e r t e Behauptung ist, daß es praktisch gewiß ist, daß ein Weltall, das theoretische Physiker beherbergt, nahezu in demjenigen Zustand maximaler Unordnung angetroffen wird, der mit der Existenz solcher Geschöpfe noch nicht unvereinbar ist (es sei denn, wir ließen im Bau des Weltalls etwas zu, was kein Zufall ist). Es ist wohl klar, daß weder die rohe, noch die verbesserte Behauptung brauchbar ist. Daher scheint es notwendig, den Antizufall zuzulassen; und von unserem heutigen wissenschaftlichen Standpunkt aus ist das beste, was wir tun können, daß wir ihn im Anbeginn der Zeit zu einem großen Haufen zusammenkehren, wie ich das bereits beschrieben habe.

V.

Die nicht umkehrbare Zerstreuung der Energie im Weltall ist geltende Lehre der Naturwissenschaft gewesen, seit sie 1852 von Lord Kelvin klar ausgesprochen wurde. Kelvin zog dieselben Schlüsse über den Anfang und das Ende der Dinge, die wir hier gezogen haben, ausgenommen daß er, weil man zu jener Zeit dem Weltall weniger Beachtung schenkte, nur die Erde und das Sonnensystem in Betracht zog. Die allgemeinen Vorstellungen haben sich seit 80 Jahren nicht verändert. Aber die Erkenntnis von der Endlichkeit des Raumes und die jüngste Theorie des expandierenden Weltalls führen zu einigen ergänzenden Schlüssen.

Der Schluß, daß die gesamte Entropie des Weltalls in jedem Augenblick größer ist als in jedem früheren Augenblick, stammt aus einer Zeit, wo man unter einem „Augenblick“ ein absolutes Zeitelement verstand, das sich über das ganze Weltall erstreckt. Wir müssen jetzt daran denken, daß Einstein diese absoluten Augenblicke beseitigt hat, aber es scheint, daß eine Änderung darum nicht erforderlich ist. Ich glaube recht zu haben, wenn ich sage, daß die Augenblicke nicht notwendig etwas Absolutes sein müssen, oder daß die Zeit t , auf die sich dS/dt bezieht, eine absolute Zeit sein muß. Für den ersten Augenblick können wir irgendeinen willkürlichen raumartigen Querschnitt der Raum-Zeit-Welt (glatt oder kraus) wählen, und für den zweiten Augenblick irgendeinen anderen raum-

artigen Querschnitt, der den ersten nicht schneidet. Der eine dieser Augenblicke wird durchweg später sein als der andere *, und das Integral über die gesamte Entropie des Weltalls wird im zweiten Augenblick größer sein als im ersten. Diese Verallgemeinerung wird durch die Tatsache ermöglicht, daß die Energie oder die Materie, welche die Unordnung mit sich führt, nicht schneller als das Licht von Ort zu Ort wandern kann.

Die Folgen, die sich aus der Einführung der Expansion des Weltalls ergeben, sind schwieriger zu übersehen. Es erheben sich grundsätzliche Fragen bezüglich der richtigen Art, die Entropie zu definieren, wenn die Bedingungen des Untergrundes nicht mehr unveränderlich sind. Ich glaube, daß der Fortschritt der Theorie in anderen Richtungen uns in den allernächsten Jahren besser in den Stand setzen wird, das thermodynamische Problem, das sie aufwirft, zu behandeln, und ich will lieber nicht versuchen, ihre Folgerungen vorwegzunehmen.

Inzwischen ist es wichtig, zu bemerken, daß die Expansion des Weltalls ein weiterer nicht umkehrbarer Vorgang ist. Sie verleiht der Welt den Charakter einer Einbahnstraße, ebenso wie die Zunahme der Unordnung. Genau wie die Entropie des Weltalls niemals zu ihrem heutigen Betrage zurückkehren wird, so wird auch der Rauminhalt des Weltalls nie wieder zu seinem heutigen Betrage zurückkehren. Durch die Expansion des Weltalls gelangen wir auf einem unabhängigen Wege auf den gleichen Standpunkt zum Anfang und Ende der Dinge, den wir durch die Betrachtung der Entropiezunahme erreicht haben. Im besonderen scheint der Schluß unumgänglich, daß es einen wohldefinierten Anfang der gegenwärtigen Weltordnung gegeben haben muß. Die Theorie des expandierenden Weltalls fügt etwas Neues hinzu, nämlich eine Schätzung des Zeitpunktes dieses Anfangs. Wir werden im 10. Kapitel sehen, daß dieser Zeitpunkt uns vom naturwissenschaftlichen Gesichtspunkt aus beängstigend nahe liegt, er liegt kaum mehr als 10000 Millionen Jahre zurück.

In der expandierenden Welt können wir entscheiden, welcher von zwei Augenblicken der spätere ist, nämlich durch das Merkmal, daß der spätere Augenblick dem größeren Rauminhalt des Weltalls entspricht. (Die Augenblicke werden wie oben definiert als zwei sich nicht schneidende Querschnitte der Raum-Zeit-Welt.) Dies liefert

* Das heißt, sämtliche Beobachter werden ihnen unabhängig von ihrem Ort und ihrer Geschwindigkeit in der gleichen Reihenfolge begegnen.

uns einen zweiten Wegweiser für die Zeit. Aber er ist nur auf die über die Welt als Ganzes genommene Zeit anwendbar. Die Stellung der Entropie als einziger örtlicher Wegweiser bleibt unangefochten. Die Tatsache, daß die Richtung der Zeit für das als ein einziges System betrachtete Weltall sowohl durch den zunehmenden Rauminhalt als auch durch die zunehmende Entropie angezeigt wird, legt nahe, daß es zwischen diesen beiden Merkmalen irgendeine noch nicht entdeckte Beziehung gibt. Das ist einer der Punkte, von denen wir in den allernächsten Jahren eine weitere Aufklärung erwarten dürfen.

Durch die Annahme der Theorie des expandierenden Weltalls werden wir von einer Schlußfolgerung erlöst, die wir als wirklich sinnwidrig empfunden hatten. Wir hatten geschlossen (S. 59), daß sich jede mögliche Anordnung von Atomen in irgendeinem entfernten Zeitpunkt einmal wiederholen muß. Aber das geschah unter der Voraussetzung, daß die Atome in der Zukunft nur die gleiche Auswahl von Anordnungen haben werden, die sie jetzt haben. In einem sich ausdehnenden Raum wird jedes bestimmte Zusammentreffen von Umständen immer unwahrscheinlicher. Die Expansion des Weltalls schafft schneller neue Verteilungsmöglichkeiten, als die Atome sie durchmachen können, und es gibt nun keine Wahrscheinlichkeit mehr dafür, daß eine bestimmte Verteilung sich wiederholt. Wenn wir unablässig einen Stoß Karten mischen, so werden wir sie unvermeidlich eines Tages auch einmal wieder in ihre ursprüngliche Reihenfolge bringen, aber nicht, wenn es Bedingung ist, daß jeden Morgen eine weitere Karte zu dem Stoß hinzugefügt wird.

Daher werden diese Messenger Lectures auf dieser Seite der Ewigkeit wohl kaum ein zweites Mal (zufällig) noch einmal abgehalten werden.

VI.

In welchem Umfange sind bewußte Wesen dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik unterworfen? Die Art, in der bewußte Absicht eingreifen könnte, zeigte Clerk Maxwell, als er seinen bekannten „Maxwellschen Teufel“ ersann. Zwei aneinandergrenzende Gefäße enthalten Gas von der gleichen einheitlichen Temperatur. Dazwischen ist eine sehr kleine Klappe. An der Klappe steht der Teufel. Sobald er in dem linken Gefäß ein ungewöhnlich schnelles Molekül erspährt, das sich der Klappe nähert, öffnet er sie, so daß

das Molekül in das rechte Gefäß gelangt. Gegen langsame Moleküle hält er die Klappe verschlossen, und sie werden in das linke Gefäß zurückgeworfen. Entsprechend läßt er langsame Moleküle aus dem rechten Gefäß in das linke übergehen. Das Ergebnis ist, daß er im rechten Gefäß schnelle Bewegungen und im linken Gefäß langsame Bewegungen anhäuft. Da aber die Geschwindigkeit der Molekularbewegung der Temperatur entspricht, so wird das rechte Gefäß warm und das linke Gefäß kalt. Man kann sich vorstellen, daß dies ohne Arbeitsleistung geschieht, denn die Klappe könnte ausbalanciert sein, so daß sie durch eine unendlich kleine Kraft geöffnet oder geschlossen wird. Aber die Schaffung eines solchen Temperaturunterschiedes bedeutet einen Gewinn an Ordnung. Sie ist das Gegenteil des Naturvorganges der Ordnungszerstörung durch das Strömen von Wärme von einem warmen nach einem kalten Bereich. Der Maxwellsche Teufel setzt sich über den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik hinweg.

Wenn in der Natur ein heißer und ein kalter Körper einander berühren, so finden wir, daß sich mit fortschreitender Zeit der heiße Körper abkühlt und der kalte erwärmt, bis die Temperaturen ausgeglichen sind. Jedenfalls dann, wenn wir den Wegweiser der Zeit nicht mißverstanden haben. Aber wenn wir nun zufällig unsere Orientierung verloren hätten und die Zeit rückwärts betrachteten, so würden wir die beiden Körper zunächst auf gleicher Temperatur sehen und dann bemerken, daß der eine wärmer und der andere kälter wird, genau das, was der Maxwellsche Teufel bewirkt. So kehrt der Teufel wirklich den Wegweiser der Zeit um. Da er auswählend wirkt, ist er die Verkörperung des Antizufalls und in seinem Reich scheint die Zeit gerade umgekehrt zu verlaufen wie unter der Herrschaft des Zufalls in einem gewöhnlichen System.

Der menschliche Geist muß wohl vermöge seiner bewußten Absicht in gewissem Umfange die Rolle des auswählenden Maxwellschen Teufels spielen. Aber wir dürfen nicht vergessen, daß der Geist seine Absichten in der physikalischen Welt nur durch seine Verknüpfung mit einem Leib in die Tat umsetzen kann. Und während der Geist vielleicht (oder vielleicht auch nicht) die Ordnung vermehrt, vermehrt der Körper immer die Unordnung. Es ist augenscheinlich, daß die von unserer bewußten Absicht hervorbrachte Ordnung (nach physikalischem Maße gemessen) sehr klein ist verglichen mit derjenigen, die wir beim Essen und Atmen verbrauchen, so daß wir im ganzen genommen nicht gegen den Strom der wachsenden Unordnung schwimmen. Man könnte viel-

leicht vermuten, daß dies keine zufällige Grenzsetzung ist, sondern daß auch die zweckbewußte Tätigkeit menschlicher Wesen dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik unterworfen ist, indem die Beziehung zwischen Geist und Leib derart ist, daß mit Notwendigkeit der Betrag an Ordnung, den der eine in die Welt setzen kann, durch den Betrag begrenzt ist, den der andere der Welt entzieht.

Ich habe mich manchmal gefragt, ob es nicht möglich wäre, Maxwells auswählendem Teufel mit einer der neuen Entdeckungen der Atomphysik ein Bein zu stellen, nämlich mit Heisenbergs Unschärferelation (S. 92). Diese sagt aus, daß eine genaue Kenntnis des Ortes eines Teilchens unvereinbar ist mit einer genauen Kenntnis seiner Geschwindigkeit. Ich stelle mir den Teufel vor, wie er unter den herankommenden Molekülen nach denen von großer Geschwindigkeit ausspäht. Da er für seinen Zweck ihre Geschwindigkeiten kennen muß, so muß er nach dem genannten Gesetz über ihren Ort im Ungewissen sein. Er weiß nicht, wie weit weg sie sind und wie bald sie die Klappe erreichen werden; so muß er den Zeitpunkt des Öffnens auf gut Glück abpassen; und wenn er sie für ein schnelles Molekül öffnet, ist es leicht möglich, daß statt dessen ein langsames Molekül hindurchschlüpft. Aber ich fürchte, daß der Teufel zu gerissen für mich ist. Jedenfalls würde in manchen Fällen seine Kenntnis sowohl des Ortes wie der Geschwindigkeit, wenn sie auch ungenau ist, für seinen Zweck ausreichen. Und seine Fehlschläge würden nicht so häufig sein, daß sie eine fortschreitende Trennung von langsamen und schnellen Molekülen verhindern könnten. Offenbar besteht die einzige Möglichkeit, dem Teufel sein Handwerk zu legen, darin, daß man ihm Fleisch und Blut verleiht, so daß sein Leib den Antizufall wieder aufzehrt, den sein Geist erzeugt.

Ich glaube, daß ich zur Rechtfertigung der Überschrift dieses Kapitels mit einer Weissagung schließen sollte, wie das Ende der Welt aussehen wird. Natürlich ist es nicht der Zweck unserer Untersuchung, solche Weissagungen zu machen. Indessen dürfen wir nach unseren ernsthaften Anstrengungen vielleicht ein wenig locker lassen. Man pflegte zu glauben, daß sich schließlich der gesamte Stoff des Weltalls in einen dichten Ball von gleichförmiger Temperatur sammeln würde. Aber die Lehre vom sphärischen Raum und insbesondere die jüngsten Ergebnisse über die Expansion des Weltalls haben das alles geändert. Es bleiben ungeklärte Fragen, die eine endgültige Schlußfolgerung verhindern. Und daher will ich mich damit begnügen, eine von mehreren Möglichkeiten

festzustellen. Man hat im allgemeinen angenommen, daß das endgültige Schicksal der Protonen und Elektronen darin besteht, einander zu vernichten und ihre Bildungsenergie in Gestalt von Strahlung frei zu machen. Wenn das so ist, so müßte wohl das Weltall schließlich eine Kugel von Strahlung werden, die immer verdünnter wird und in Strahlung von immer größerer Wellenlänge übergeht. Die längsten Strahlungswellen sind Hertzsche Wellen von der Art der Rundfunkwellen. Je nach 1500 Millionen Jahren wird diese Kugel von Radiowellen ihren Durchmesser verdoppelt haben, und sie wird sich in geometrischer Progression ewig weiter ausdehnen. Dann kann ich vielleicht das Ende der physikalischen Welt beschreiben als — eine einigermaßen staunenswerte Rundfunksendung.

4. Kapitel

DER NIEDERGANG DES DETERMINISMUS

Hieraus folgt für uns das wichtige Resultat, daß sich über die Gültigkeit des Kausalgesetzes in der wirklichen Welt auf rein logischem Wege sicherlich nichts entscheiden läßt.

Max Planck, Wege zur physikalischen Erkenntnis, S. 91.

Scheint also die neue Theorie in der Erfahrung wohl fundiert, so kann man doch die Frage aufwerfen, ob sie nicht in Zukunft durch Ausbau oder Verfeinerung wieder deterministisch gemacht werden kann. Hierzu ist zu sagen: Es läßt sich mathematisch exakt beweisen, daß der anerkannte Formalismus der Quantentheorie keine solche Ergänzung erlaubt. Will man also an der Hoffnung festhalten, daß der Determinismus einmal wiederkehren wird, so muß man die jetzt vorhandene Theorie für inhaltlich falsch halten; bestimmte Aussagen dieser Theorie müssen experimentell widerlegbar sein. Der Determinist sollte also nicht protestieren, sondern experimentieren, um die Anhänger der statistischen Lehre zu bekehren.

Max Born, Naturwissenschaften 1929, S. 117/118.

Während das Gefühl der Willensfreiheit das Geistesleben beherrscht, liegt die Forderung der Kausalität der Einordnung der Sinnesbeobachtungen zugrunde. Gleichzeitig handelt es sich aber auf beiden Gebieten um Idealisierungen, deren natürliche Begrenzung näher untersucht werden kann, und die einander in dem Sinn bedingen, daß Willensgefühl und Kausalitätsforderung gleich unentbehrlich sind in dem Verhältnis zwischen Subjekt und Objekt, das den Kern des Erkenntnisproblems bildet.

Niels Bohr, Naturwissenschaften 1930, S. 55.

Wir müssen die weitere Entwicklung der Wissenschaft abwarten, vielleicht noch Hunderte von Jahren, ehe wir ein wahres und in den Einzelheiten getreues Bild von dem verwobenen Gefüge von Stoff, Leben und Seele zeichnen können. Aber der alte klassische Determinismus von Hobbes und Laplace braucht uns jetzt nicht mehr zu bedrücken.

Hermann Weyl, The Open World, S. 55.

I.

Vor zehn Jahren war praktisch jeder Physiker, der etwas auf sich hielt, Determinist — oder hielt sich wenigstens dafür —, jedenfalls soweit es die anorganischen Erscheinungen angeht. Er glaubte einem Schema von strenger Kausalität gegenüberzustehen, das die Folge der Erscheinungen regelt. Man sah das vornehmste Ziel der Wissenschaft darin, einen möglichst großen Teil des Weltalls einem solchen Schema einzupassen. So hielt man das kausale Schema für eine Arbeitshypothese, wenn nicht gar für eine philosophische Überzeugung, die stets angewendet werden dürfe, da es an einem schlagenden Beweis des Gegenteils fehlte. Tatsächlich waren die Methoden, Definitionen und Begriffe der Physik mit der Hypothese der strengen Kausalität so eng verknüpft, daß die Grenzen des kausalen Gesetzesschemas (wenn es sie überhaupt gab) als die

Grenzen der Physik überhaupt betrachtet wurden. Es bestand kein ernsthafter Zweifel, daß der Determinismus das ganze organische Geschehen umfaßte. Wie weit er für lebenden oder bewußten Stoff selbst zutraf, war Ansichtssache des einzelnen. Aber man hegte einen natürlichen Widerwillen gegen die Annahme irgendeiner Einschränkung eines Standpunktes, der sich in einem weiten Bereich so gut bewährt hatte.

Ziemlich plötzlich aber verschwand dann der Determinismus aus der theoretischen Physik. Man hat sein Ende recht verschieden aufgenommen. Manche sind ungläubig und können sich nicht davon überzeugen, daß der Determinismus aus den Grundlagen der physikalischen Theorie wirklich ausgemerzt ist. Andere meinen, daß es sich lediglich um eine häusliche Angelegenheit der Physik handelt, die keine Rückwirkungen auf das allgemeine philosophische Denken hat. Wieder andere sind entschlossen, schadenfroh zu warten, bis der Determinismus wieder auftaucht.

Die Verwerfung des Determinismus bedeutet in keinem Sinne eine Abdankung der naturwissenschaftlichen Methode. Eher ist sie die reife Frucht einer naturwissenschaftlichen Methode, die im Schatten der alten kausalen Methode gewachsen ist, und deren Tragweite sich jetzt als die größere erweist. Sie hat die Kraft und die Genauigkeit der mathematischen Theorie der Beobachtungstatsachen außerordentlich erhöht. Andererseits kann ich denen nicht beistimmen, die die philosophische Bedeutung des Wandels verkleinern wollen. Der Rückzug der Physik von einer Haltung, die sie mehr als 200 Jahre lang beharrlich angenommen hat, darf nicht leicht genommen werden, und er reizt zu einer Überprüfung unserer Ansichten über eines der erstaunlichsten Probleme unseres Daseins.

Bei einer Frage, die so viel Staub aufwirbelt, ist es wohl gut, gleich zu Beginn einige Fragen über den Umfang des Wandels zu klären, über den es viele Mißverständnisse gegeben hat. Zunächst wird nicht etwa behauptet, daß der Determinismus widerlegt ist. Was wir behaupten ist, daß die Physik sich nicht mehr auf den Determinismus gründet. Ist dieser Unterschied schwer zu begreifen? Wenn man mich fragen würde, ob die Astronomie die Lehre widerlegt hat, daß „der Mond ein grüner Käse“ ist, so würde es mir ein wenig schwer fallen, dafür einen wirklich schlüssigen Beweis anzugeben. Aber ich könnte ohne Zaudern antworten, daß diese Lehre heute nicht die Grundlage der Mondkunde bildet. Zweitens bedeutet die Leugnung des Determinismus oder, wie man

oft sagt, des „Kausalitätsgesetzes“, nicht, daß man leugnet, daß Wirkungen aus Ursachen entstehen können. Die übliche gedankliche Verknüpfung von Ursache und Wirkung ist eine Sache der Erfahrung. Das Kausalitätsgesetz ist eine durch diese Erfahrung nahegelegte äußerste Verallgemeinerung. Solche Verallgemeinerungen sind immer gewagt. Die Unterstellung, daß wir mit dem Zweifel an der Verallgemeinerung die Erfahrung leugnen, würde der Unterstellung entsprechen, daß ein Mensch, der Newtons (oder Einsteins) Gravitationsgesetz anzweifelt, leugnet, daß Äpfel zu Boden fallen. Der erste Maßstab, den man an eine Theorie legen muß, sie sei deterministisch oder nicht, ist, daß sie über die Regelmäßigkeiten in unserer sinnlichen Erfahrung Rechenschaft ablegen muß — wohl gemerkt unserer Erfahrung, daß auf bestimmte Ursachen regelmäßig bestimmte Wirkungen folgen. Drittens werden dadurch, daß wir dem Indeterminismus Einlaß in die physikalische Welt gewähren, keineswegs sofort alle Schwierigkeiten — nicht einmal alle physikalischen Schwierigkeiten — behoben, die sich an die Frage der Willensfreiheit knüpfen. Aber die Fragestellung wird dadurch doch so geändert, daß die Tür nicht für eine Lösung gänzlich versperrt ist, die unserem tiefsten Empfinden weniger zuwider ist, als diejenige, die sich uns bislang aufzudrängen schien.

Wir wollen uns vergewissern, daß wir uns darüber einig sind, welchen Sinn wir dem Begriff Determinismus beilegen. Ich gebe euch drei Definitionen oder Umschreibungen zur Erwägung.

Die erste stammt von einem Mathematiker (Laplace):

Wir müssen also den heutigen Zustand des Weltalls als eine Wirkung seines vorhergehenden Zustandes betrachten und als die Ursache des Zustandes, der folgen wird. Ein Verstand, der in einem gegebenen Augenblick aller Kräfte, durch die die Natur belebt ist, und der einzelnen Orte der Wesenheiten, aus denen sie besteht, inne wäre, und dessen Einsicht umfassend genug wäre, um diese Tatsachen einer Analyse zu unterwerfen, ein solcher Verstand könnte mit einer einzigen Gleichung die Bewegung der größten Körper im Weltall und der leichtesten Atome umfassen. Nichts wäre für ihn ungewiß; die Zukunft und die Vergangenheit ständen mit gleicher Deutlichkeit vor seinem Auge. Der menschliche Geist zeigt in der Vollkommenheit, die er der Astronomie zu verleihen gewußt hat, die schwachen Umriss eines solchen Verstandes. ... Alle seine Bemühungen auf der Suche nach der Wahrheit gehen dahin, sich dem Verstande, den wir uns eben vorgestellt haben, unbegrenzt zu nähern.

Die zweite stammt von einem Philosophen (C. D. Broad):

„Determinismus“ ist der Name für folgende Lehre: Es sei S irgendein Stoff, ψ irgendein Merkmal und t ein bestimmter Zeitpunkt. Angenommen, S sei zur Zeit t bezüglich ψ im Zustande σ . Dann ist die zu-

sammengesetzte Annahme, daß alles in der Welt sonst so sein solle, wie es wirklich ist, daß sich aber S in einem der beiden sonst noch möglichen Zustände bezüglich ψ befinden solle, eine unmögliche Annahme. (Die drei möglichen Zustände, von denen σ der eine ist, sind: S hat das Merkmal ψ , S hat das Merkmal nicht, oder es ändert seinen Zustand.)

Das dritte stammt von einem Dichter (Omar Khayyan):

Der Erde erster Urlehm trug in sich des letzten Menschen Bild.
Schon damals senkte sich die Saat der letzten Ernte ins Gefild.
Glaubt mir, am ersten Schöpfungstag ist schon die Schrift bestimmt ge-
Die in der letzten Dämmerung des jüngsten Tages wird gelesen. [wesen,

Ich halte mich an die Definition des Dichters. Ohne Zweifel drücken seine Worte das aus, was wir im Sinn haben, wenn wir an Determinismus denken. Wenn wir sagen, daß das physikalische Weltall in unserem heutigen Bilde kein Weltall ist, in dem „am ersten Schöpfungstag schon die Schrift bestimmt war, die man am jüngsten Tage lesen wird“, so machen wir es deutlich, daß die Abkehr vom Determinismus keine künstliche Ausflucht ist, sondern ein vollkommener Wechsel des Standpunktes. Die beiden anderen Definitionen bedürfen einer argwöhnischen Prüfung, denn sie könnten einen Haken haben. Ich glaube in der Tat, daß sie einen Haken haben *.

Es ist wichtig, anzumerken, daß alle drei Definitionen das Element der Zeit einführen. Der Determinismus fordert nicht Ursachen schlechthin, sondern zeitlich vorhergehende Ursachen. Determinismus bedeutet Vorbestimmung. Daher ist bei jeder Auseinandersetzung über Determinismus die zeitliche Festlegung der behaupteten Ursache von ausschlaggebender Wichtigkeit. Wir müssen von ihnen ihre Geburtsurkunde verlangen.

In der angeführten Stelle von Laplace ist der Wissenschaft ein ganz bestimmtes Ziel gesteckt. Ihre Bemühungen „gehen dahin, sich dem Verstande, den wir uns eben vorgestellt haben, unbegrenzt zu nähern“, d. h. einem Verstande, der von dem heutigen Zustande des Weltalls auf die gesamte künftige Entwicklung bis hinab zu den leichtesten Atomen schließen könnte. Dieses Ziel wurde bis

* Der Haken, den ich in Broads Definition argwöhne, besteht darin, daß sie ohne weitere Aufklärung kein Verständnis dafür vermittelt, was darunter zu verstehen ist, daß die Annahme eine unmögliche ist. Er meint nicht, daß sie unmöglich ist, weil sie einen logischen Widerspruch enthält. Die Annahme wird nicht verworfen, weil sie der Logik oder weil sie den Tatsachen widerspräche, sondern aus einem dritten unbestimmten Grunde.

in die jüngste Zeit unbesehen anerkannt. Aber die tatsächliche Entwicklung der Wissenschaft bewegt sich nicht immer in gerader Linie auf das letzte Ziel hin, und um die Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelte sich ein neuer Zweig der Physik (die Thermodynamik), der in eine neue Richtung einbog. Mitten in dem Bestreben nach einem vollkommenen Gesetzssystem, das voraussagt, was gewiß geschehen wird, bekamen die Physiker ein Interesse an einem System, das voraussagt, was wahrscheinlich geschehen wird. An die Seite des Überverstandes eines Laplace, für den „nichts ungewiß wäre“, setzte man einen Verstand, für den nichts gewiß wäre, einige Sachverhalte aber von überwältigender Wahrscheinlichkeit. Könnten wir von diesem Wesen sagen, daß ihm alle Ereignisse der Zukunft mit einer überwältigenden Wahrscheinlichkeit bekannt seien, so wäre es eine reine Wortklauberei, ihn von dem Laplaceschen Wesen zu unterscheiden, das sie mit Gewißheit kennen soll. Tatsächlich soll aber das neue Wesen Blicke in die Zukunft tun können, die einen verschiedenen Grad von Wahrscheinlichkeit haben, von praktischer Gewißheit bis zu vollkommener Unbestimmtheit, je nach dem besonderen Bereich seines Forschens, Allgemein gesagt nähern sich seine Voraussagen nur dann der Gewißheit, wenn sie sich auf Mittelwerte über eine sehr große Zahl von individuellen Wesenheiten beziehen. So ist das Ziel der Wissenschaft, sich dieser letzteren Art von Einsicht zu nähern, dem Ziel eines Laplace keineswegs ebenbürtig. Ich werde das von Laplace definierte Ziel das primäre Ziel und das in der Thermodynamik neu eingeführte Ziel das sekundäre Ziel nennen.

Wir müssen uns darüber klar sein, daß die beiden Ziele verschieden sind. Die Voraussage dessen, was wahrscheinlich geschehen wird, ist nicht etwa ein halber Schritt auf dem Wege zur Voraussage dessen, was bestimmt geschehen wird. Oft lösen wir ein Problem zuerst angenähert, schreiten dann zur zweiten und dritten Näherung und erzielen so schließlich vielleicht eine strenge Lösung. Aber hier ist die Voraussage einer Wahrscheinlichkeit schon an sich das Ende; sie ist nicht der Versuch einer Annäherung an die Voraussage einer Gewißheit. Diese Methoden sind grundsätzlich ebenso verschieden, wie sich die diagnostische Methode eines Arztes, der euch sagt, daß ihr noch gerade drei Wochen zu leben habt, von der Methode einer Lebensversicherung unterscheidet, die euch mitteilt, daß eure Lebenserwartung 18,7 Jahre beträgt. Natürlich können wir uns mit dem sekundären System befassen, ohne darum das primäre Ziel als letztes Endziel auf-

zugeben. Aber bei der Überprüfung des Entwicklungsstandes bezüglich der beiden Ziele machen wir eine erstaunliche Entdeckung.

Die Gleichungen, die wir in modernen Lehrbüchern der Quantentheorie finden — und die ständig an der Erfahrung geprüft werden und dazu dienen, neue Forschungsgebiete zu erschließen —, betreffen ausschließlich Wahrscheinlichkeiten und Mittelwerte. Das ist vollkommen deutlich. Die „unbekannte Größe“, die von Gleichung zu Gleichung gehetzt wird, ist eine Wahrscheinlichkeit oder ein Mittelwert. Die Quantentheorie fördert also das sekundäre Ziel, sie trägt aber nichts zu dem Laplaceschen Ziel bei, das die kausale Gewißheit betrifft. Es ist ferner jetzt anerkannt, daß die Gesetze der klassischen Mechanik und Elektrodynamik (einschließlich ihrer relativistischen Erweiterungen) nichts als Grenzformen sind, die die Gleichungen der Quantentheorie annehmen, wenn die Zahl der betreffenden individuellen Quanten oder Teilchen sehr groß ist. Dieser Zusammenhang ist als das Bohrsche Korrespondenzprinzip bekannt. Die klassischen Gesetze sind keine ursprünglichen Gesetze, sondern eine besondere Anwendung der Quantengesetze. Sie gehen also auch aus dem sekundären Schema hervor. Wir haben schon erwähnt, daß die Aussagen des sekundären Schemas dann einen der Gewißheit nahen Grad von Wahrscheinlichkeit haben, wenn es sich um eine sehr große Zahl von Individuen handelt. Folglich ist der Bereich der klassischen Gesetze gerade derjenige Bereich der sekundären Gesetze, in dem die Wahrscheinlichkeit so groß ist, daß sie der Gewißheit praktisch gleichkommt. So ist es gekommen, daß man sie irrtümlich für kausale Gesetze hielt, deren Aussagen endgültig gewiß seien. Nachdem nunmehr ihr statistisches Wesen erkannt ist, sind sie für das primäre Schema verloren. Als Laplace sein Ideal eines vollkommen deterministischen Schemas aufstellte, vermeinte er den Kern eines solchen Schemas in den Gesetzen der Mechanik und Astronomie in der Hand zu haben. Dieser Kern ist jetzt aber in das sekundäre Schema übergegangen. Nichts ist von dem alten Schema der kausalen Gesetze übriggeblieben, und wir haben noch nicht einmal den ersten Ansatz zu einem neuen gefunden.

Nach der Annäherung an das sekundäre Ziel beurteilt, hat sich der Fortschritt der Naturwissenschaft überraschend schnell vollzogen. Nach der Annäherung an das Laplacesche Ziel beurteilt, ist ihr Fortschritt genau Null.

Laplace's Ziel ist in die Stellung anderer älterer Ziele der Naturwissenschaft hinabgesunken — der Entdeckung des Lebenselixiers, des Steins der Weisen, der nordwestlichen Durchfahrt —, Ziele, die zu ihrer Zeit sehr fruchtbar gewesen sind. Wir gleichen Seeleuten, denen es schließlich dämmerte, daß es außer der Entdeckung der nordwestlichen Durchfahrt noch andere Ziele gibt, die des Schweißes der Edlen wert sind. Ich brauche kaum zu sagen, daß es noch einige alte Seebären gibt, die diese neuen Unternehmungen als eine vorübergehende Abweichung vom geraden Kurs betrachten und eine baldige Rückkehr zu den „wahren Zielen der erdkundlichen Forschung“ vorhersagen.

II.

Wir wollen untersuchen, woraus das neue Ziel der Physik entsprang. Wir beobachten gewisse Regelmäßigkeiten im Laufe der Geschehnisse und formulieren sie als Naturgesetze. Gesetze können positiv oder negativ ausgesprochen werden, „du sollst“ oder „du sollst nicht“. Für unseren jetzigen Zweck wollen wir sie negativ formulieren. Zwei Regelmäßigkeiten in der sinnlichen Erfahrung der meisten unter uns sind die folgenden:

a) Wir begegnen niemals einem gleichseitigen Dreieck, das ungleiche Winkel hat.

b) Es passiert uns niemals, daß wir beim Bridgespiel 13 Karten der gleichen Farbe auf einmal in der Hand haben.

Von unserem gewöhnlichen Standpunkt aus erklären wir diese Regelmäßigkeiten auf grundsätzlich verschiedene Weise. Wir sagen, daß die erste zutrifft, weil eine gegenteilige Erfahrung unmöglich ist, die zweite, weil eine gegenteilige Erfahrung allzu unwahrscheinlich ist.

Die Unterscheidung ist rein theoretisch. Die Beobachtungen selbst enthalten nichts, was uns mutmaßen lassen könnte, welchem Typus eine beobachtete Regelmäßigkeit angehört. Wir müssen anerkennen, daß „unmöglich“ und „allzu unwahrscheinlich“ ebenbürtige Erklärungen für jede beobachtete Einförmigkeit der Erfahrung sind, und die Physik hat früher ziemlich auf gut Glück einige Einförmigkeiten so, die anderen so erklärt. Jetzt aber weiß man, daß die Gesamtheit der physikalischen Gesetze (soweit sie entdeckt sind) in dem zweiten Schema enthalten ist, das nur Wahr-

scheinlichkeiten kennt, und der einzige Grund, der für eine Regelmäßigkeit angegeben werden kann, ist, daß das Gegenteil allzu unwahrscheinlich ist. Unser Unvermögen, gleichseitige Dreiecke mit ungleichen Winkeln zu finden, kommt daher, daß solche Dreiecke allzu unwahrscheinlich sind. Natürlich rede ich hier nicht von dem Lehrsatz der reinen Geometrie. Ich spreche hier nur von einer Regelmäßigkeit in unserer sinnlichen Erfahrung und berufe mich daher nur auf jede Art von Messungen, von denen man annimmt, daß sie diese Eigenschaft der gleichseitigen Dreiecke als im Sinne der wirklichen Erfahrung wahr bestätigen. Unsere Messungen bestätigen sie regelmäßig mit dem höchsten erreichbaren Grade von Genauigkeit und werden das ohne Zweifel immer tun. Aber nach der heutigen physikalischen Theorie verhält sich das nur deshalb so, weil eine Abweichung nur als Folge eines überaus unwahrscheinlichen Zusammentreffens von Umständen im Verhalten der ungeheuren Zahl von Teilchen auftreten könnte, die unser Meßgerät ausmachen.

Wie ich gesagt habe, kannte die ältere Ansicht zwei Typen von Naturgesetzen. Die Erde hört nicht auf, um die Sonne zu laufen, weil es ihr unmöglich ist, davonzulaufen. Das ist der primäre oder deterministische Typ. Die Wärme fließt vom warmen zum kälteren Körper, weil es zu unwahrscheinlich ist, daß sie umgekehrt fließt. Das ist der sekundäre oder statistische Typ. Nach der heutigen Theorie gehören beide Regelmäßigkeiten zum statistischen Typ — es ist allzu unwahrscheinlich, daß die Erde der Sonne davonläuft*.

So lange es das Ziel der Physik ist, ein deterministisches Schema zutage zu fördern, führt die Verfolgung der sekundären Gesetze in eine Sackgasse, denn sie führt uns nur zu Wahrscheinlichkeiten. Der Determinist ist nicht zufrieden mit einem Gesetz, das verordnet, daß ein Feuer mich bei einigem guten Glück erwärmen wird. Er gibt zu, daß dies das wahrscheinliche Ereignis ist, aber er fügt hinzu, daß es irgendwo in der tiefsten Tiefe der Physik andere Gesetze gibt, die ganz genau das verordnen, was das Feuer an mir verrichten wird, Glück hin, Glück her.

Mit einer Anleihe bei der Vererbungslehre können wir sagen, daß der Determinismus einen dominanten Charakter hat. Nehmen wir ein System primärer Gesetze als gegeben, so können

* Das Wort „unmöglich“ verschwindet daher aus unserem Wortschatz, außer im Sinne eines logischen Widerspruchs. Aber der logische Widerspruch oder die Unmöglichkeit liegt in der Beschreibung, nicht in der Erscheinung, deren Beschreibung (eben wegen des Widerspruchs) mißlingt.

wir (ja, so müssen wir) sekundäre, nicht deterministische Gesetze haben, die aus ihm ableitbar sind, und die feststellen, was sich unter der Herrschaft jenes Systems wahrscheinlich ereignen wird. So sah der Determinismus lange Zeit mit Gleichmut zu, wie sich in seinem eigenen Leibe ein subsidiäres, nicht deterministisches System entwickelte. Warum auch nicht. Das deterministische Gesetz bleibt ja dominant. Man sah nicht voraus, daß das Kind seinen Eltern über den Kopf wachsen würde. Es gibt ein Spiel, das „Zahlenraten“. Nachdem man eine gedachte Zahl verdoppelt und Additionen und andere Rechnungen vorgenommen hat, kommt der Befehl: „Jetzt ziehe die Zahl ab, die du dir zuerst gedacht hast.“ Der Determinismus ist jetzt in der Lage der zuerst gedachten Zahl.

Das Wachstum des sekundären Gesetzes, als es noch unter der Obhut des dominanten deterministischen Schemas stand, war bemerkenswert, und ganze Abschnitte der Physik wurden ihm übertragen. Es kam eine Zeit, wo es in den fortschrittlichen Zweigen der Physik ausschließlich angewendet wurde. Mochte der Physiker dem primären Gesetz auch noch weiter seine Ergebenheit versichern, er hörte auf, sich seiner zu bedienen. Das primäre Gesetz war das in den Gewölben gehortete Gold, das sekundäre Gesetz die wirklich umlaufenden Banknoten. Aber jedermann hing noch an dem althergebrachten Glauben, daß Banknoten eine Golddeckung haben müssen. Mit dem Fortschritt der Physik wurden die Gelegenheiten, bei denen das Gold hervorgeholt wurde, immer seltener und hörten schließlich ganz auf. Dann fiel es einigen von uns ein, zu fragen, ob es immer noch einen Goldschatz im Gewölbe gäbe, oder ob das nur eine sagenhafte Überlieferung sei. Das dramatische Ende dieser Geschichte wäre, das die Gewölbe geöffnet und leer befunden wurden. Das wirkliche Ende ist nicht ganz so einfach. Es stellt sich heraus, daß die Schlüssel verloren sind, und es kann niemand bestimmt sagen, ob es im Gewölbe irgendwelches Gold gibt oder nicht. Aber eines ist wohl klar — wie immer das Ende auch sei —: die heutige Physik hat den Goldstandard verlassen.

III.

Das Wesen des Indeterminismus, dem man jetzt Einlaß in die physikalische Welt gewährt hat, wird im nächsten Kapitel eingehender besprochen werden. Ich will mich hier mit einem Beispiel begnügen, um seine Größenordnung zu zeigen. Laplaces idealer

Verstand konnte die künftigen Orte der Dinge von den schwersten Körpern bis zu den leichtesten Atomen voraussehen. Wir wollen nunmehr das leichteste uns bekannte Teilchen betrachten, nämlich das Elektron. Angenommen, wir geben einem Elektron freie Bahn (so daß es nicht durch irgendeinen unvorhergesehenen Zusammenstoß abgelenkt wird), und wir wissen über das Elektron alles, was man von ihm im gegenwärtigen Augenblick wissen kann. Wie genau können wir den Ort vorhersagen, an dem es sich eine Sekunde später befinden wird? Die Antwort lautet, daß wir ihn (unter den allgünstigsten Umständen) auf rund 4 cm voraussagen können, genauer nicht. Um mehr können wir uns dem Laplaceschen Überverstande nicht nähern. Der Fehler ist nicht groß, wenn wir uns zu Bewußtsein bringen, daß das Elektron während der einen Sekunde einen Weg von 10 000 km oder mehr zurückgelegt haben kann.

Die Ungewißheit wäre aber ernst, wenn wir berechnen sollten, ob das Elektron eine kleine Zielscheibe, wie z. B. einen Atomkern, treffen oder verfehlen wird. Prof. Born sagt einmal: „Hätte Geßler Wilhelm Tell befohlen, ein Wasserstoffatom vom Haupte seines Sohnes mit einem α -Teilchen herabzuschießen, und hätte er ihm statt einer Armbrust die besten Laboratoriumsgeräte der Welt gegeben, so hätte Tells Geschicklichkeit ihm nichts geholfen. Treffer oder Fehlschuß wären in gleicher Weise Sache des Zufalls gewesen.“

Nehmt zum Gegensatz eine Masse von 0,001 mg. Das wird etwa die kleinste Masse sein, die man makroskopisch handhaben kann. Die Unbestimmtheit ist hier viel kleiner, weil die Masse größer ist. Unter ähnlichen Bedingungen wie oben könnten wir den Ort, den diese Masse nach 1000 Jahren einnehmen wird, innerhalb von $\frac{1}{5000}$ mm vorhersagen.

Dies zeigt, wie die Unbestimmtheit, die den kleinsten Bausteinen der Materie anhaftet, bei den gewöhnlichen mechanischen Problemen bedeutungslos wird, obgleich keine Änderung in der Grundlage der Gesetze vorliegt. Es mag zunächst auch nicht ersichtlich sein, daß die Unbestimmtheit von 4 cm im Ort des Elektrons nach Verlauf einer Sekunde irgendwie von großer praktischer Wichtigkeit ist. Sie wird nicht oft wichtig sein bei einem Elektron, das eine gerade Bahn durch den leeren Raum verfolgt. Aber die gleiche Unbestimmtheit kommt ins Spiel, was auch immer das Elektron sonst tut. Wenn es seinen Umlauf um ein Atom vollführt, hat die Unbestimmtheit schon lange vor Ablauf einer Sekunde atomare Dimensionen erreicht; das heißt, wir haben die Spur des Elektronenortes im Atom vollkommen verloren. Alles was von der relativen Orts-

bestimmung von Elektronen an einem Atom abhängt, kann nur für den allerwinzigsten Bruchteil einer Sekunde vorhergesagt werden.

Aus diesem Grunde ist der Zerfall eines Atomkerns, wie er bei der Radioaktivität erfolgt, durch nichts im bestehenden Schema der Physik vorbestimmt. Auch die vollständigste Theorie kann nicht mehr vorschreiben, als wie häufig Umstände, die einer Explosion günstig sind, im Durchschnitt vorkommen werden. Das individuelle Auftreten solcher Umstände kann nicht vorhergesagt werden. Im Sonnensystem können wir ganz genau vorhersagen, wie viele Sonnenfinsternisse (d. h. Wiederholungen einer bestimmten gegenseitigen Stellung von Erde, Sonne und Mond) sich in 1000 Jahren ereignen werden, oder wir können ganz genau den Zeitpunkt einer bestimmten Finsternis vorhersagen. Die Theorie der zweiten Art von Vorhersage ist keine Verfeinerung der Theorie der ersten. Das Eintreten einer bestimmten Verfinsterung hängt von der Himmelsmechanik ab, während die Häufigkeit der Verfinsterungen ein rein geometrisches Problem ist. Im Atom, das wir einem winzigen Sonnensystem verglichen haben (S. 28), gibt es nichts, was der Himmelsmechanik entspricht — oder vielmehr ist die Mechanik bei der Geburt an der Größe der Unbestimmtheit erstickt —, aber die geometrische Theorie der Häufigkeit bestimmter Anordnungen bleibt ganz analog.

Die Zukunft ist niemals durch die Vergangenheit gänzlich vorbestimmt, aber sie ist von ihr auch nicht gänzlich unabhängig. Wir haben auf mehrere Erscheinungen Bezug genommen, bei denen die Zukunft praktisch determiniert ist. Der Zerfall eines Radiumkerns ist ein Beispiel für eine Erscheinung, bei der die Zukunft von der Vergangenheit praktisch unabhängig ist.

Nun werdet ihr aber sagen, die Tatsache, daß die Physik dem Radiumkern kein Merkmal zuschreibt, das den Zeitpunkt seines Zerfalls vorschreibt, bedeute nur, daß dieses Merkmal noch nicht entdeckt wurde. Ihr gebt bereitwillig zu, daß wir die Zukunft nicht in allen Fällen vorhersagen können; doch warum sollen wir die Schuld der Natur zuschieben und nicht unserer eigenen Unwissenheit? Ja, wenn das Radium eine Ausnahme bildete, dann wäre es das gegebene, anzunehmen, daß es ein vorbestimmendes Merkmal gibt, das es nach seiner Auffindung in die gleiche Reihe mit den anderen Erscheinungen bringen wird. Aber das radioaktive Atom wurde hier gar nicht als eine Ausnahme angeführt. Ich habe es als ein krasses Beispiel dessen angeführt, was in höherem oder min-

derem Grade auf alle Arten von Erscheinungen zutrifft. Es ist ein Unterschied, ob man eine Ausnahme wegerklärt oder eine Regel.

Der hartnäckige Kritiker fährt fort: „Du umgehst den springenden Punkt. Ich behaupte, daß es Merkmale gibt, die du nicht kennst, und die nicht nur den Zeitpunkt des Zerfalls radioaktiver Atome vollkommen vorherbestimmen, sondern auch alle anderen physikalischen Erscheinungen. Woher weißt du, daß es sie nicht gibt? Du bist doch nicht allwissend.“ Ich kann verstehen, wenn ein beliebiger Leser diese Frage erhebt. Wenn aber ein wissenschaftlich geschulter Mensch so etwas fragt, so verdient er bei den Ohren genommen zu werden. Wir wollen es mit einer Geschichte versuchen.

Um das Jahr 2000 entdeckte der bekannte Archäologe Prof. Dr. Lambda eine antike griechische Inschrift, die berichtete, daß ein fremder Fürst, der mit *Κανδείκλης* bezeichnet war, mit seiner Gefolgschaft nach Griechenland kam und sich mit seiner Sippe dort niederließ. Begierig, etwas Näheres über den Fürsten zu erfahren, begann der Professor, nachdem er alle anderen Quellen erschöpft hatte, die Buchstaben C und K der Encyclopaedia Athenica durchzusehen. Seine Aufmerksamkeit fiel auf einen Aufsatz über Canticles, der anscheinend ein Sohn Salomos war. Offenbar war das der Gesuchte; niemand konnte zweifeln, daß *Κανδείκλης* der jüdische Fürst Canticles war. Diese Theorie wurde weit und breit bekannt. Um jene Zeit schlossen die Großmächte Palästina und Griechenland eine Entente, und der griechische Premierminister nahm in einer schwungvollen Rede ergreifenden Bezug auf die jüngst entdeckten historischen Verwandtschaftsbande zwischen den beiden Nationen. Kurz darauf griff Prof. Lambda zufällig wieder einmal nach jenem Aufsatz und er entdeckte, daß er einem unseligen Versehen zum Opfer gefallen war. Er hatte „Son of Solomon“ (Sohn des Salomo) statt „Song of Solomo“ (Sang des Salomo, hohes Lied Salomonis) gelesen. Die Richtigstellung wurde allgemein verbreitet, und man hätte annehmen können, daß die Canticles-Theorie eines natürlichen Todes sterben würde. Weit entfernt! Die Griechen und die Palästinenser fuhren fort, an ihre Verwandtschaft zu glauben, und der griechische Minister fuhr fort, Reden zu halten. Professor Lambda wagte eines Tages, ihm Vorhaltungen zu machen. Der Minister fuhr ihn barsch an: „Woher weißt du, daß Salomo keinen Sohn namens Canticles hatte? Du bist doch nicht allwissend?“ Nachdem der Professor ein wenig über den Reichtum von Salomos ehelicher Ausstattung nachgedacht hatte, fand er es in der Tat schwer, eine Antwort zu geben.

Das merkwürdige ist, daß der Determinist, der sich auf einen solchen Standpunkt stellt, in dem Wahn befangen ist, daß er bezüglich unseres naturwissenschaftlichen Wissens eine bescheidenere Haltung einnimmt als der Indeterminist. Der Indeterminist wird beschuldigt, für sich Allwissenheit zu beanspruchen. Ich will es dem Deterministen nicht ganz so arg geben, aber sicherlich würde nur ein Mensch, der sich für *f a s t* allwissend hält, die Kühnheit haben, die Möglichkeiten aufzuzählen, die, von ihm nicht erkannt (denn das kann auch ihm passieren), existieren mögen. Ich argwöhne, daß man einige andere Kapitel dieses Buches bemängeln wird, weil sie Hypothesen und Schlußfolgerungen bringen, deren Beweiskraft als nicht ausreichend schlüssig angesehen wird. Das ist unvermeidlich für jemanden, der ein Bild der Physik im Zustande der Entwicklung geben und schwebende Fragen erörtern will, die unsere Gedanken beschäftigen. Ich zittere bei dem Gedanken, was die Kritiker sagen würden, wenn ich eine Mutmaßung nur mit der Begründung einflechten würde, daß ich, da ich nicht allwissend sei, nicht wisse, daß sie falsch ist.

Ich habe bereits gesagt, daß der Determinismus von der Physik nicht widerlegt wird. Aber es ist der Determinist, der eine positive Behauptung aufstellt, und er ist es, dem die Beweislast zufällt. Er möchte auf unsere gewöhnliche Erfahrung von der Folge von Ursache und Wirkung eine sehr weitgehende Verallgemeinerung gründen, genannt das Kausalitätsprinzip. Da die heutige Physik diese Erfahrung als das Ergebnis statistischer Gesetze ganz ohne Bezugnahme auf das Kausalitätsprinzip darstellt, so empfiehlt sich die Verallgemeinerung offenbar nicht, soweit es sich um Beobachtungserfahrungen handelt. Die Indeterministen stellen sie daher auf die gleiche Stufe, wie jede andere gänzlich unbegründete Hypothese. Es gehört zur Taktik der Anwälte des Determinismus, daß sie unseren Unglauben gegen ihre Behauptung in eine positive Behauptung unsererseits verdrehen — in eine Art von Akausalitätsprinzip. Man sagt dem Indeterministen manchmal nach, er schreibe den einzelnen Atomen „eine Art von Willensfreiheit“ zu. *E i n e A r t v o n* ist so schön dehnbar. Die verschiedenen Vorrichtungen, die im täglichen Leben gebraucht werden, haben ihre Nücken und Tücken, und man kann sagen, daß sie manchmal eine Art von freiem Willen, die „Tücke des Objekts“, zur Schau tragen. Wenn man uns aber unterstellt, daß wir in den einzelnen Atomen psychologische Merkmale derjenigen Art zu sehen behaupten, wie sie in unserem Geiste als freier Wille in die Erscheinung treten, so muß ich das auf das ent-

schiedenste abstreiten. Wir geben nicht einer übereilten Verallgemeinerung den Laufpaß, um ebenso übereilt einer neuen aufzusitzen.

IV.

Als man noch an die Vorherrschaft des Determinismus in der physikalischen Welt glaubte, erhob sich natürlich die Frage, inwieweit er das menschliche Handeln beherrscht. In diese Frage ist oft durch die Annahme Verwirrung getragen worden, daß das menschliche Handeln einem ganz abgetrennten Bereich angehöre, nämlich einem geistigen Bereich. Aber der Mensch hat sowohl einen Leib wie einen Geist. Die Bewegungen seiner Glieder, die Schallwellen, die von seinem Munde ausgehen, sein Augenblinzeln, alle sind sie Erscheinungen der physikalischen Welt, und sie würden, sofern sie nicht ausdrücklich ausgenommen sind, ebenso wie die übrigen physikalischen Erscheinungen vorherbestimmt sein. Wir können, wenn wir wollen, zwei Formen des Determinismus unterscheiden: 1. das Schema der kausalen Gesetze bestimmt alle Gedanken, Regungen und Willensakte vorher; 2. es bestimmt die menschlichen Taten vorher, aber nicht die Beweggründe und das Wollen des Menschen. Die zweite scheint weniger drastisch und empfiehlt sich wahrscheinlich dem aufgeklärten Denken, aber es kommt bei dem Zugeständnis herzlich wenig heraus. Sie erlaubt dem Menschen, zu denken was er will, aber er kann nur das sagen, was die Gesetze der Physik ihm von vornherein vorschreiben.

Der wesentliche Punkt ist dieser: Soll der Determinismus irgendeinen definierbaren Sinn haben, so muß der Bereich der deterministischen Gesetze ein abgeschlossenes System bilden. Das bedeutet, daß alle Tatsachen, die bei einer Vorhersage benutzt werden, auch ihrerseits voraussagungsfähig sind. Alles was die Zukunft vorbestimmt, muß selbst durch die Vergangenheit vorbestimmt sein. Die Bewegungen menschlicher Körper bilden einen Teil der vollständigen Gegebenheiten für die Vorhersage künftiger Zustände des stofflichen Weltalls, und wenn wir sie zu diesem Zweck mit einbegreifen, so müssen wir sie auch unter die Gegebenheiten mit einbegreifen, die (wie man versichert) vorhergesagt werden können.

Wir müssen auch noch eine halb-deterministische Anschauung anmerken, die einen Determinismus für anorganische Erscheinungen behauptet, aber annimmt, daß er durch das Hinzukommen des

Bewußtseins überwunden werden kann. Der Determinismus wäre danach im stofflichen Weltall nur auf solche Erscheinungen anwendbar, von denen feststeht, daß ein Bewußtsein weder mittelbar noch unmittelbar eingreift. Es ist heutzutage schwer, einer solchen Ansicht zuzustimmen. Ich vermute, daß die meisten, welche erwarten, daß der Determinismus schließlich in der Physik wieder auftauchen wird, das aus dem Gefühl heraus tun, daß dafür eine Art von logischer Notwendigkeit besteht. Es kann sich aber kaum um eine logische Notwendigkeit handeln, wenn es möglich ist, sie zu überwinden. Die Hypothese versetzt den Forscher in die peinliche Lage, daß er immer fürchten muß, zu viel zu beweisen. Er muß beweisen, daß die Wirkung mit der Ursache fest verknüpft ist, aber wiederum doch nicht so fest, daß das Bewußtsein die Verknüpfung nicht zerreißern könnte. Schließlich müssen wir uns daran erinnern, daß man zum physikalischen Gesetz durch die Analyse bewußter Erfahrung gelangt; es ist die Lösung des Kryptogramms, das in der Erzählung des Bewußtseins enthalten ist. Wie ist es dann möglich, das Bewußtsein so darzustellen, als stünde es nicht nur außerhalb des Gesetzes, sondern als sei es ihm sogar feind?

Die Umwälzung der Theorie, die den Determinismus aus der heutigen Physik verbannte, hat daher die wichtige Folge, daß wir nicht mehr anzunehmen brauchen, das menschliche Handeln sei vollkommen vorbestimmt. Wenn aber auch das Tor der menschlichen Freiheit sich geöffnet hat, so steht es doch nicht weit offen; nur ein Schimmer des Tageslichts dringt durch die Spalte. Aber das genügt wohl, um eine neue Ausrichtung unserer Einstellung gegenüber dieser Frage zu rechtfertigen. Ist unsere neugewonnene Freiheit nicht mehr, als die Freiheit der Masse von 0,001 Milligramm, die sich in 1000 Jahren nur innerhalb eines Umkreises von $\frac{1}{5000}$ mm bewegen darf, so gibt es da nicht viel zu rühmen. Die physikalischen Ergebnisse bewilligen von sich aus keinen höheren Grad von Freiheit als diesen. Aber mir scheint, daß philosophische und psychologische Gründe und tatsächlich auch Gründe des gesunden Menschenverstandes, die eine größere Freiheit fordern, so zwingend sind, daß wir gerechtfertigt sind, wenn wir versuchen, das Tor jetzt, wo es nicht mehr völlig verschlossen ist, noch weiter zu öffnen. Wie kann das geschehen, ohne der Physik Gewalt anzutun?

Könnten wir die weiträumigen Bewegungen unseres Körpers der „auslösenden Wirkung“ des nicht vorbestimmten Verhaltens einiger Schlüsselatome in unseren Gehirnzellen zuschreiben, so wäre die Frage sehr leicht zu erledigen; denn einzelne Atome zeigen in

ihrem Verhalten eine große Unbestimmtheit. Augenscheinlich gibt es die mannigfachsten auslösenden Wirkungen im Schaltwerk unseres Körpers, so wenn die verhaltene Energie eines Muskels durch eine winzige Änderung in einem Nerv ausgelöst wird. Aber es wäre übereilt, anzunehmen, daß die physikalische Ursache des Muskelzwanges in der Art der Anordnung von ein paar Dutzend Atomen beschlossen sei. Ich möchte schätzen, daß die kleinste Struktureinheit, aus der die physikalischen Wirkungen des Willens entspringen, viele Billionen Atome enthält. Verhielte sich eine solche Einheit wie ein anorganisches System von ähnlicher Masse, so würde die Unbestimmtheit nicht genügen, um ein merkliches Maß an Freiheit zuzulassen. Die Ansicht, mit der ich selbst es versuchen möchte, ist die, daß diese „bewußte Einheit“ sich in der Tat von einem anorganischen System dadurch unterscheidet, daß ihr eine weit größere Unbestimmtheit des Verhaltens zukommt, — einfach auf Grund des einheitlichen Wesens dessen, was sie in Wirklichkeit darstellt, nämlich meines Ich.

Wir müssen uns daran erinnern, daß die physikalische Welt der Atome, Elektronen, Quanten usw. die abstrakte, symbolische Darstellung eines Etwas ist. Im allgemeinen wissen wir nichts über den Untergrund der Symbole, — wir kennen nicht das innere Wesen dessen, was wir mit den Symbolen bezeichnen. Aber an einer Berührungsstelle der physikalischen Welt mit dem Bewußtsein machen wir Bekanntschaft mit der bewußten Wesenheit — dem Selbst oder Geist —, deren physikalisches Bild und Symbol die Hirnzelle ist. Unsere physikalische analytische Methode veranlaßt uns, diese Zelle in ebensolche Atome zu zerlegen, wie die Atome in irgendeinem unbewußten Bereich der Welt. Während aber in anderen Bereichen jedes Atom (sofern sein Verhalten nicht determiniert ist) ganz unabhängig von anderen durch den Zufall beherrscht wird, symbolisiert ihr Verhalten in der bewußten Zelle einen einzigen Willensakt des Geistes und nicht einen Wettstreit von Billionen von unabhängigen Impulsen. Mir scheint, daß wir der physikalischen Endstation des Bewußtseins eine Art von Einheitlichkeit zuschreiben müssen. Andernfalls ist der physikalische Symbolismus keine angemessene Darstellung derjenigen geistigen Einheit, die symbolisiert werden soll.

Wir ziehen also den Schluß, daß das Wirken des Bewußtseins die Gesetze der Physik nicht verletzt, weil in dem gegenwärtigen undeterministischen Schema eine gewisse Bewegungsfreiheit im Rahmen dieser Gesetze besteht. Aber auf den ersten Blick scheint

das etwas mit sich zu bringen, von dem wir früher gesagt haben (S. 61), es sei schlimmer als irgendeine Verletzung der physikalischen Gesetze, nämlich ein äußerst unwahrscheinliches Zusammentreffen von Umständen. Das bezog sich auf Umstände, die der Zufall herbeiführt. Hier aber glauben wir nicht, daß die Verschwörung der Atome in einer Gehirnzelle, mit der Absicht, ein bestimmtes physikalisches Ergebnis zu zeitigen, statt alle gegen alle zu kämpfen, einem zufälligen Zusammentreffen von Umständen zuzuschreiben ist. Diese Einmütigkeit ist vielmehr die Vorbedingung dafür, daß die Atome eine gesetzliche Vertretung dessen sind, was selbst eine Einheit in der geistigen Wirklichkeit hinter der Welt der Symbole ist.

Die zwei Seiten der menschlichen Freiheit, auf die ich den größten Nachdruck legen möchte, sind das Verantwortungsgefühl und das Selbstbewußtsein. Das Wesen des Verantwortungsgefühls führt uns auf eine wohlbekannte Schwierigkeit, die ich ebensowenig habe beseitigen können, wie hundert andere vor mir. Wie können wir für unsere eigene gute oder böse Veranlagung verantwortlich sein? Wir empfinden, daß wir in gewissem Umfange unsere Natur ändern können, wir können sie besser oder schlechter machen. Aber ist der Antrieb zum Besseren oder Schlechteren nicht auch ein Stück unseres Wesens? Kommt er aber nicht aus uns selbst, wie können wir dafür verantwortlich sein? Ich möchte zu den zahlreichen Erörterungen über diese Schwierigkeit nichts beitragen, denn ich vermag keine Lösung vorzuschlagen. Ich will nur sagen, daß ich die mehrfach vorgeschlagene Lösung nicht als befriedigend anerkennen kann, nach der das Verantwortungsgefühl eine in sich widerspruchsvolle Einbildung ist. Diese Lösung scheint mir den Tatsachen nicht zu entsprechen. Genau wie eine Theorie der Materie unseren Wahrnehmungen über die Materie zu entsprechen hat, so hat eine Theorie des menschlichen Geistes unserer inneren Wahrnehmung und unserer geistigen Beschaffenheit zu entsprechen. Und mir scheint, daß das Verantwortungsgefühl eine der grundlegenden Naturtatsachen ist. Wenn ich mich über eine solche Tatsache meines unmittelbaren Wissens zu täuschen vermag — über das eigentliche Wesen des Geschöpfes, das ich selbst bin —, so ist schwer einzusehen, wo dann überhaupt ein zuverlässiger Anfang des Wissens gefunden werden könnte.

Ich wende mich zu einer anderen Seite der durch die physikalische Unbestimmtheit gewährten Freiheit, die von der Frage der Willensfreiheit völlig verschieden zu sein scheint. Denkt euch, ich

sei auf eine mathematische Fragestellung gestoßen, die interessante Ergebnisse verspricht. Die Zuversicht, nach der mich am meisten verlangt, ist, daß das Ergebnis, das ich am Schluß niederschreibe, das Werk eines Geistes ist, der Ehrfurcht vor der Wahrheit und vor der Logik hat, nicht das Werk einer Hand, die den Maxwell'schen Gleichungen und dem Energieprinzip gehorcht. In diesem Falle scheue ich mich nicht, der Tatsache (sofern es eine solche ist) Rechnung zu tragen, daß die Wege, die mein Geist einschlägt, nicht vorhergesehen werden können. Tatsächlich benutze ich mit Vorliebe eine Rechenmaschine, deren Ergebnisse weniger unvorhersehbar sind, als die der Rechenkunst meines Geistes. Aber die Wahrheit des Ergebnisses $7 \times 11 = 77$ liegt in seinem Wesen als mögliche geistige Verrichtung, nicht darin, daß es aus einer besonderen Kombination von Kammrädern automatisch herauspringt. Ich lege Wert auf die physikalische Unmöglichkeit einer Vorhersage der Bewegungen meiner Schreibfeder, weil sie gestattet, den in meinem Gehirn auftauchenden Gedanken zu folgen, die vielleicht, oder vielleicht auch nicht, durch die geistigen Merkmale meines Wesens vorbestimmt sind. Wenn der mathematische Beweis in meinem Geiste auf Grund eines Zwanges zu dem Schluß führt, der meiner Hand von einem deterministischen physikalischen Gesetz niederzuschreiben verordnet wird, dann muß jedes Denken wegerklärt werden als ein Vorgang, der von dem, als was ich es empfinde, vollkommen verschieden ist. Aber meine ganze Ehrfurcht vor dem Denken beruht darauf, daß es das ist, als was ich es empfinde.

Ich glaube, wir dürfen uns mit jener unmittelbaren Selbstkenntnis des Bewußtseins, durch die wir uns selbst als verantwortlich erkennen, mit dem Streben nach der Wahrheit und nach dem Guten, mit unserem Denken, keine Freiheiten erlauben. Die Außenwelt ist nicht, was sie zu sein scheint. Wir können unsere Begriffe von ihr umformen wie wir wollen, sofern nur das System von Signalen, das von ihr auf unseren Geist übergeht, unberührt bleibt. Wenn wir uns aber dem Ursprung aller Erkenntnis nähern, so sollten die Wässer reiner fließen. Wenigstens ist das die Hypothese, die der Naturforscher machen muß, denn auf was soll er sich sonst stützen, um die Wahrheit zu erspüren? Das Problem der Erfahrung wird unverständlich, wenn man in ihm nicht das Forschen eines verantwortlichen, wahrheitsuchenden, denkenden Geistes erblickt. Diese Merkmale des Geistes werden so zu grundlegenden Gegebenheiten des Problems.

Die Begriffe der Physik werden allmählich schwer verständlich. Zuerst hat die Relativitätstheorie, dann die Quantentheorie, die Wellenmechanik das Weltall umgestaltet und ihm in unserem Geiste ein phantastisches Gewand verliehen. Und vielleicht sind wir noch nicht am Ende. Aber die Umgestaltung hat noch eine andere Seite. Naiver Realismus, Materialismus und mechanische Vorstellungen von den Erscheinungen waren leicht zu begreifen. Bedenkt aber, daß es nur dadurch, daß wir die Augen vor dem eigentlichen Wesen bewußter Erfahrungen schlossen, möglich wurde, sie glaubwürdig erscheinen zu lassen. Diese Umwälzungen des naturwissenschaftlichen Denkens bringen Licht in die tiefgehenden Widersprüche zwischen dem Leben und theoretischem Wissen. Die letzte Phase mit ihrer Befreiung vom Determinismus ist einer der größten Schritte zur Versöhnung. Ich möchte sogar sagen, daß wir mit der heutigen nicht deterministischen Theorie des physikalischen Weltalls etwas erreicht haben, was ein vernünftiger Mensch beinahe glauben kann.

5. Kapitel

INDETERMINISMUS UND QUANTENTHEORIE

Das ist Shell!! — gewesen*.

I.

Wir haben gesehen, daß jedes Wissen von physikalischen Dingen ein mittelbar gefolgertes ist. Die Außenwelt der Physik ist ein mit F o l g e r u n g e n erfülltes Weltall. Dinge, mit denen wir täglich umgehen, sind genau so gefolgert, wie ein ferner Stern, auf dessen Dasein wir aus einem Bilde auf einer photographischen Platte schließen, oder ein „unentdeckter“ Planet, auf dessen Dasein aus Unregelmäßigkeiten in der Bewegung des Uranus geschlossen wird. In diesem Weltall der Folgerungen treten Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft ganz unterschiedslos auf, und es bedarf der wissenschaftlichen Analyse, um sie auseinanderzuhalten. Aus einer bestimmten Folgerungsvorschrift, nämlich dem Gravitationsgesetz, schließen wir auf das gegenwärtige oder frühere Dasein eines unsichtbaren Begleiters eines Sterns. Durch eine Anwendung der gleichen Vorschrift schließen wir auf die Existenz einer gegenseitigen Stellung von Erde, Sonne und Mond am 11. August 1999, die einer totalen Sonnenfinsternis entspricht. Wir haben keinen triftigen Grund, der auf die Gegenwart bezüglichen Folgerung mehr zu vertrauen, als der auf die Zukunft bezüglichen Folgerung. Tatsächlich wäre man im allgemeinen geneigt, die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers bei der Finsternis für die kleinere zu halten. Beide sind von der gleichen Art wie die geläufige Folgerung, daß sich „da drüben“ ein Kraftwagen befindet — oder befand! —, die auf unserer Erfahrung beruht, daß das Licht sich für gewöhnlich geradlinig fortpflanzt, also auf einem Gesetz, das durchaus nicht so regelmäßig erfüllt ist, wie das Gravitationsgesetz. Der Schatten des Mondes über Cornwall im Jahre 1999 besteht in der Welt der Folgerungen schon jetzt. Er wird seinen Zustand nicht ändern, wenn das Jahr 1999 kommt und wir die Finsternis beobachten; wir werden dann lediglich die eine Methode, auf den Schatten zu

* That's Shell — that was! Ein in England sehr bekanntes Plakat der Shell Co., welches einen Straßenarbeiter zeigt, der einem sehr schnell vorbeifahrenden Kraftwagen nachschaut. D. Übers.

schließen, durch eine andere ersetzen. Der Schatten wird stets eine Folgerung bleiben. Unter dem Schatten verstehe ich hier die Wesenheit oder den Zustand der physikalischen Welt, nämlich einen verhältnismäßig störungsfreien Zustand des Äthers, nicht den sinnlichen Eindruck der Dunkelheit in einer Anzahl von menschlichen oder tierischen Geistern.

Für das Problem des Determinismus sind unsere Folgerungen über die Vergangenheit von besonderer Bedeutung. Wenn man es genau nimmt, so beziehen sich alle unsere unmittelbarsten Schlüsse aus Sicht, Schall oder Gefühl auf eine Zeit, die der Empfindung ein wenig vorausgeht. Um zu einem Schluß über den gegenwärtigen Zustand der Dinge zu kommen, müssen wir sie mit unserem allgemeinen gefolgerten Wissen von der Stetigkeit der Erscheinungen verbinden, das wir anderen Erfahrungen verdanken. Es gibt aber Fälle, in denen die Zeitspanne beträchtlicher ist oder in denen aus anderen Gründen die Annahme einer Stetigkeit nicht möglich ist. Wir wollen uns vorstellen, daß wir die chemische Zusammensetzung eines bestimmten Salzes ermitteln wollen. Wir bringen es in ein Reagensglas und lassen verschiedene Reagenzien wirken, und so kommen wir auf Grund der beobachteten Erscheinungen zu dem Schluß, daß es Silbernitrat war. Nach unserer Behandlung ist es kein Silbernitrat mehr. Die Eigenschaft, auf die wir schließen, ist nicht die, „X zu sein“, sondern „X gewesen zu sein“. Tatsächlich sagen wir: „Das ist einmal X gewesen!“ Ich will das einen rückwirkenden Schluß nennen.

Wir merkten früher an (S. 71), daß die behaupteten Ursachen aufgefordert werden müssen, ihre Geburtsurkunden vorzuweisen, damit wir wissen können, ob sie tatsächlich früher bestanden. In diesem Zusammenhang ist ein rückwirkendes Schließen besonders gefährlich, weil es bedeutet, daß man eine Urkunde zurückdatiert. Der oben erwähnte Versuch beurkundet die chemische Zusammensetzung eines Stoffes, aber das Datum, das wir in die Urkunde schreiben, liegt früher als das, an dem wir von der Art der Zusammensetzung etwas erfahren.

Um zu zeigen, wie sehr ein rückwirkender Schluß mißbraucht werden könnte, wollen wir einmal annehmen, es gäbe keinen anderen Weg, um etwas über die chemische Zusammensetzung eines Stoffes zu erfahren, als indem man ihn zerstört. Unter dieser Voraussetzung würde ein Chemiker immer erst nach dem Versuch die Zusammensetzung des Stoffes, mit dem er zu tun gehabt hat, kennen, so daß das Ergebnis eines jeden Versuchs unvorhersehbar

wäre. Muß er deshalb zugeben, daß die chemische Wissenschaft chaotisch ist? Ein Mensch, der sich zu helfen weiß, würde sich über ein so lächerliches Hindernis hinwegzusetzen wissen. Wenn er verschwiegen genug wäre, nie im voraus zu sagen, was sein Experiment beweisen wird, so könnte er erbauliche Vorlesungen über die Gesetzmäßigkeit in der Natur halten. Er steckt ein brennendes Zündholz in einen Zylinder mit Gas, und das Gas brennt: „Da seht ihr, daß Wasserstoff brennbar ist.“ Oder das Zündholz verlischt: „Dies beweist, daß der Stickstoff die Verbrennung nicht unterhält.“ Oder das Zündholz flammt heller auf: „Sauerstoff unterhält die Verbrennung.“ „Woher weißt du, daß es Sauerstoff war?“ „Durch einen rückwirkenden Schluß aus der Beobachtung, daß das Zündholz heller aufflammte.“ Und so geht der Experimentator von Zylinder zu Zylinder, das Zündholz tut bald dies, bald jenes, und er demonstriert so auf die schönste Art und Weise die Gesetzmäßigkeit in der Natur und den Determinismus der chemischen Gesetze!

Wenn wir durch rückwirkendes Schließen auf kausale Merkmale in einem früheren Zeitpunkt schließen und dann sagen, daß diese Merkmale in einem späteren Zeitpunkt unabweislich diejenigen Wirkungen hervorbringen werden, aus denen wir den Schluß gezogen haben, so bewegen wir uns auf einem Kreise. Der Zusammenhang besteht nicht in einer ursprünglichen Verknüpfung, sondern in einer Definition, und wir sind dann keine Propheten, sondern machen Tautologien. Wir dürfen die wahren Großtaten der naturwissenschaftlichen Vorhersage nicht mit solchen Taschenspielerereien vermengen und die beobachteten Einförmigkeiten in der Natur nicht mit denen, deren Erfindung unser gedachter Redner sich so leicht macht. Wenn wir es vermeiden wollen, uns im Kreise zu bewegen, so müssen wir es ablehnen, rein rückwirkende Merkmale anzuerkennen, d. h. solche, die man niemals als vorhanden, sondern immer nur als vorhanden gewesen feststellt. Wenn sie sich nicht vor dem Augenblick offenbaren, in dem sie zu bestehen aufhören, so können sie nie zu einer Vorhersage dienen, außer für solche, die prophezeien, wenn alles schon vorbei ist.

Die chemische Zusammensetzung gehört nicht zu den rückwirkenden Merkmalen, obgleich sie oft durch rückwirkendes Schließen ermittelt wird. Die Tatsache, daß Silbernitrat im Handel zu haben ist, zeigt, daß es die Eigenschaft, Silbernitrat zu sein, ebenso gut gibt wie die Eigenschaft, Silbernitrat gewesen zu sein. Wenn eine Eigenschaft einem Stoff rückwirkend zugeschrieben werden kann, so erlaubt uns das Verfahren, Stichproben zu nehmen, in der

Regel auch, diese Eigenschaft einem Stoff für den jeweiligen Augenblick zuzuschreiben. Wir teilen einen gegebenen Stoff in zwei Anteile, analysieren den einen Teil (wobei wir ihn, wenn nötig, zerstören) und zeigen, daß seine Zusammensetzung X gewesen ist. Dann ist im allgemeinen der Schluß erlaubt, daß die Zusammensetzung des anderen Teiles X ist. Wäre dies Verfahren allgemein anwendbar, so bestünde keine Gefahr, daß man in die Physik Merkmale einführt, die nur rückwirkend existieren. Aber das Verfahren des Stichprobennehmens versagt, wenn wir diejenigen Merkmale betrachten, von denen man vermutet, daß sie ein Atom vom anderen unterscheiden. Denn ein individuelles Atom kann nicht in zwei Proben aufgeteilt werden, eine zur Analyse und eine zur Aufbewahrung. So ist es auch der Bereich der Atomphysik, in dem die Verwirrung, die durch rückwirkende Schlüsse angerichtet wird, zuerst zutage getreten ist.

Man weiß, daß Kalium aus zwei Arten von Atomen besteht, von denen die eine radioaktiv und die andere stabil ist. Wir wollen die beiden Arten K_a und K_b nennen. Wenn wir beobachten, daß ein bestimmtes Atom radioaktiv zerfällt, so werden wir schließen, daß es ein K_a -Atom gewesen ist. Können wir sagen, daß der Zerfall durch die Tatsache vorbestimmt war, daß es ein K_a -Atom und nicht ein K_b -Atom war? Diese Aussage würde keinerlei Berechtigung haben. K_a ist nichts als ein zurückdatierter Zettel, den wir an das Atom kleben, wenn wir sehen, daß es zerfallen ist. So etwas können wir immer tun, wie wenig determiniert das Ereignis auch sei, das uns zur Anbringung des Zettels veranlaßt. Wenn ich auf dem Bahnhof von Cambridge eine Menge Gepäckstücke sehe, die aus verschiedenen Teilen des Landes kommen und die sämtlich einen mit „Cambridge“ bezeichneten Zettel tragen, so schließe ich auf eine wirkliche Organisation der Gepäckbeförderung. Aber das geschieht unter der Annahme, daß die Gepäckstücke schon beklebt wurden, als sie aufgegeben wurden. Ist aber jemand herumgegangen und hat auf alles, was zufällig in Cambridge ankam, Zettel mit der Aufschrift „Cambridge“ geklebt, so ist das kein Beweis für eine Organisation. Tatsächlich sind wir aber darüber unterrichtet, daß der Zerfall des Kaliumatoms nicht undeterminiert ist. Es hat sich herausgestellt, daß Kalium aus zwei Isotopen mit den Atomgewichten 39 und 41 besteht, und man nimmt an, daß K^{41} die radioaktive Art, K^{39} aber stabil ist. Man kann die beiden Isotopen trennen und die Atome aussuchen, von denen man weiß, daß sie K^{41} sind. Daher ist K^{41} ein augenblickliches Merkmal und kann mit Fug und

Recht den nachfolgenden radioaktiven Zerfall vorbestimmen. Es tritt an die Stelle des Merkmals K_a , das durch rückwirkenden Schluß gefunden wurde.

So viel über die reine Tatsache des Zerfalls. Jetzt betrachten wir den Zeitpunkt des Zerfalls. Über den Zeitpunkt, in dem ein bestimmtes K^{41}_2 -Atom zerfallen wird, ist nichts bekannt, außer daß es wahrscheinlich in den nächsten Billionen Jahren geschehen wird. Wenn wir indessen beobachten, daß es zur Zeit t zerfällt, so können wir dem Atom das rückwirkende Merkmal K_t zuschreiben, welches bedeutet, daß es (die ganze Zeit) die Eigenschaft besaß, daß es zur Zeit t zerfallen würde. Nun offenbart sich aber gemäß der heutigen Physik das Merkmal K_t vor dem Zeitpunkt t , in dem der Zerfall eintritt, in keiner Weise — es geht nicht einmal in unsere mathematische Beschreibung des Atoms ein —, und im Zeitpunkt t verschwindet das Merkmal K_t , weil es ausgespielt hat. Unter diesen Verhältnissen ist K_t keine vorbestimmende Ursache. Unser rückwirkender Klebzettel fügt nichts zu der einfachen Beobachtungstatsache hinzu, daß der Zerfall ohne vorhergehende Ankündigung in jenem Augenblick eintrat. Er ist nichts als eine Maßnahme, um eine eingetretene Änderung nachträglich zu beglaubigen.

Der Überverstand, den sich Laplace vorstellte, war fähig, die ganze Zukunft vorauszuschauen; aber mit dem Vorbehalt, daß er mit allen Bedingungen vertraut wäre, die in einem gegebenen Augenblick herrschen. Wie viel schließt dieser Vorbehalt in sich? Wenn er alle rückwirkenden Merkmale, die man einer Sache zuschreiben könnte, in sich schließt, das heißt alles, was durch rückwirkenden Schluß aus dem gefolgert werden könnte, was sich tatsächlich in der Zukunft ereignen wird, so benutzt jener Überverstand die Zukunft, um die Vergangenheit vorherzusagen. Er kann den genauen Zeitpunkt des Zerfalls des radioaktiven Atoms vorherzusagen, wenn man ihm das Merkmal K_t des Atoms nennt; das kommt aber genau auf das gleiche heraus, als wenn man ihm den Zeitpunkt des Zerfalls nennt. Daher müssen wir offensichtlich rückwirkende Merkmale ausschließen. Und wenn das Laplacesche Wesen die Zukunft nicht ohne sie vorhersagen kann, so wenden wir uns statt dessen lieber an das Wesen, bei dem das sekundäre Gesetz in Kraft getreten ist, dessen Zukunftsschau zwar unvollständig ist und die Gewißheit nie völlig erreicht, aber, so weit sie reicht, den Vorzug hat, ein echtes Vorauswissen zu sein.

Wir haben gesehen, daß ein rückwirkendes Merkmal ein Mittel ist, um eine Änderung nachträglich zu beglaubigen. Ein solches

Mittel mag nützlich sein zur Ordnung unseres Wissens. Indem wir die unbestimmten Ereignisse der Zukunft durch undeterminierte Merkmale ersetzen, die wir der Gegenwart zuschreiben, schachteln wir den ganzen Ablauf der Ereignisse in ein einziges, scheinbar einem einzigen Augenblick angehörendes Schema zusammen. Der Indeterminismus der Zukunft wird dem entsprechend durch eine Undeterminiertheit der Gegenwart zum Ausdruck gebracht. Vom rein philosophischen Standpunkt aus ist das eine verwirrende Art, die Dinge auszudrücken, aber das ist nicht von großem Belang für den Naturforscher, der bereit ist, jedes Mittel zu ergreifen, das ihm dazu verhelfen kann, in seiner Aufgabe weiterzukommen. Diese aber besteht darin, die Gesetze zu formulieren und anzuwenden, die über die erfahrungsmäßigen Wiederholungen in einer nicht deterministischen Welt entscheiden. Im nächsten Abschnitt werden wir sehen, wie dieses Mittel wirkt.

II.

Im Jahre 1927 sprach W. Heisenberg ein wichtiges Prinzip aus, das den Betrag der Undeterminiertheit im geltenden System der physikalischen Gesetze klar umreißt. Es heißt die Unbestimmtheitsrelation oder Unschärferelation. Diese gab zwar nicht den Anstoß zum Übergang der Physik vom Determinismus zum Indeterminismus, aber sie lenkte die Aufmerksamkeit derart auf den bestehenden Indeterminismus hin, daß er sogar von denen, die sich am wenigsten um Naturphilosophie kümmern, kaum übersehen werden konnte.

Laplace stellte sich einen Verstand vor, der die Bewegungen aller Körper im Weltall „mit einer einzigen Gleichung umfassen könnte“. Aber sie mit einer Gleichung zu umfassen ist nicht notwendig das gleiche, wie sie zu kennen. Ein algebraisches Symbol kann für eine bekannte oder für eine unbekannte Größe stehen. Wenn wir also eine Gleichung haben, die vorgibt, den künftigen Ort eines Dinges genau anzugeben, so erhebt sich die Frage, ob er durch bekannte oder durch unbekannte Symbole ausgedrückt wird. Heisenbergs Prinzip lehrt, daß genau die eine Hälfte der Symbole kennbare, die andere Hälfte unkennbare Größen darstellt. Die unkennbaren Größen entsprechen rückwirkenden Merkmalen. Indem wir solche Merkmale erfinden, geben wir der Zukunft den Anschein der Determiniertheit; aber sie determinieren die Zukunft in Wirklichkeit nicht, da sie selbst solange undeterminiert sind, als nicht die künftigen Ereignisse eingetreten sind.

Es mag ziemlich künstlich aussehen, wenn man den Indeterminismus der Zukunft so beschreibt, aber es zeigt, daß auch in der Undeterminiertheit Methode ist. Wenn wir unser Augenmerk zunächst auf die Auswirkungen der Undeterminiertheit richten, so finden wir, daß manche Erscheinungen mit praktischer Gewißheit vorausgesagt werden können, während andere fast völlig spontan eintreten, aber wir entdecken keinerlei einfache Regel. Wenn wir aber die Ursachen des Indeterminismus betrachten (sofern es erlaubt ist, „Ursachen“ und „Indeterminismus“ in einem Atem zu nennen), so finden wir, daß das, woran es zur Sicherstellung einer vollständigen und gewissen Vorhersage der gesamten Zukunft fehlt, immer genau die Hälfte der Gegebenheiten ist, die dazu nötig wären. Die Gegebenheiten sind derart gepaart, daß es zu jeder Gegebenheit oder jedem Merkmal, das bis zu einem gegebenen Augenblick aus Sachverhalten gefolgert werden kann, ein symmetrisches — rückwirkendes — Merkmal gibt, auf das man erst nach diesem Augenblick schließen kann; und ohne beide Gegebenheiten ist eine Vorhersage unmöglich. In diesem Sinne ist die Zukunft mit der Vergangenheit halb gekoppelt und halb von ihr losgelöst.

Man hat das oft in der Form ausgedrückt, daß unsere Versuche, die beiden Gegebenheiten zu bestimmen, einer gegenseitigen Beeinflussung unterliegen. Das hat den Nachteil, daß es die Frage nach unserer Geschicklichkeit und Erfindungsgabe aufwirft. Ich brauche die ganze Frage Determinismus gegen Indeterminismus, die wir im letzten Kapitel erörtert haben, nicht noch einmal aufzurollen. Es ist nicht meine Absicht, die in der derzeitigen physikalischen Theorie enthaltenen Folgerungen des Indeterminismus zu verteidigen, sondern sie zu prüfen. Gemäß jener Theorie besteht eine gegenseitige Unverträglichkeit der beiden Gegebenheiten, die auf ihrem eigenen Wesen beruht und die nicht von den Maßnahmen des beteiligten Experimentators herrührt.

Wir wollen ein abgeschlossenes System betrachten. Es ist ein Teil der Welt der Folgerungen, und alles, was wir uns in ihm vorhanden denken, muß aus den Wirkungen geschlossen werden, die es um sich verbreitet. Wenn wir die Eigenschaften eines Körpers mit Hilfe physikalischer Größen beschreiben, geben wir damit nur einem Wissen über die Antworten äußerer Anzeigevorrichtungen über das Vorhandensein oder Fehlen dieser Eigenschaften Ausdruck, und weiter nichts. Eine Kenntnis der Antworten aller möglichen Dinge würde die Beziehungen des Körpers zu seiner Umwelt vollständig determinieren, und es bliebe nur sein für uns unzugängliches

inneres Wesen, das außerhalb des Gesichtskreises der Physik liegt*. Ist also das System wirklich abgeschlossen, so daß es überhaupt in keiner Wechselwirkung mit seiner Umgebung steht, so hat es keine der Physik angehörenden Eigenschaften, sondern nur ein inneres Wesen, das jenseits aller Physik liegt. So müssen wir die Bedingungen ein wenig abändern. Es möge für einen Augenblick in einer gewissen Wechselwirkung mit der Welt da draußen stehen. Die Wechselwirkung löst eine Folge von Einflüssen aus, die die Nerven und das Gehirn eines Beobachters erreichen und in sinnliche Erfahrung umgesetzt werden können. Aus diesem einen Signal kann der Beobachter einen Schluß auf das System ziehen, d. h. er kann den Wert eines der Symbole bestimmen, die das System beschreiben, oder er kann eine Gleichung ermitteln, die mehrere solche Symbole verknüpft. Um weitere Symbole zu bestimmen, müssen weitere Wechselwirkungen folgen und zu sinnlicher Erfahrung führen, eine Wechselwirkung für jedes zu bestimmende Symbol.

Es könnte scheinen, daß wir so allmählich alle Symbole bestimmen könnten, so daß es in der Beschreibung des Systems keine nicht bestimmten Symbole mehr gäbe und keine unbekannten Größen in den Gleichungen, die vorgeben, die Zukunft vorherzusagen. Aber man muß sich daran erinnern, daß eine Wechselwirkung, die die Außenwelt stört, weil sie Signale durch sie hindurch sendet, auch auf das System zurückwirkt. Es ergibt sich also eine doppelte Wirkung. Die Wechselwirkung löst ein Signal aus, das uns davon in Kenntnis setzt, daß der Wert eines bestimmten Symbols q im System gleich q_1 ist, und zur gleichen Zeit ändert sie in unbekanntem Grade den Wert eines anderen Symbols p im System. Wenn wir aus früheren Signalen erfahren haben, daß der Wert von p gleich p_1 ist, so hört dieses Wissen auf, zu gelten, und wir müssen von vorn anfangen, um den neuen Wert von p zu finden. Im Augenblick findet eine weitere Wechselwirkung statt, die uns sagt, daß p nunmehr gleich p_2 ist; aber die gleiche Wechselwirkung beeinflußt q , so daß wir seinen Wert nicht mehr kennen. Der Beobachter gleicht dem Mann im Zirkus, der den ganzen Arm voll Paketen hat; jedesmal, wenn er eins aufhebt, läßt er ein anderes fallen.

Für die Vorhersage ist es von überragender Wichtigkeit, daß die Größe, die bei der Wechselwirkung gestört wird, nicht die Größe ist, auf die wir Schlüsse ziehen, sondern eine mit ihr gepaarte Größe.

* The Nature of the Physical World, S. 257. Das Weltbild der Physik, S. 253.

Wenn das Signal uns zwar dahin belehren würde, daß im Augenblick der Wechselwirkung q gleich q_1 ist, die Wechselwirkung aber das Ergebnis hat, daß es sich in einem unbekannten Grade geändert hat, so besäßen wir nie etwas anderes, als ein rückwirkendes Wissen, genau wie mein gedachter Chemieprofessor, der seine Stoffe bei der Ermittlung ihrer chemischen Zusammensetzung stets zerstört. Die Paarung erlaubt uns, über die Hälfte der Symbole ein im jeweiligen Augenblick gültiges Wissen zu erlangen, aber nie über mehr als die Hälfte. Dies ist natürlich keine Regel a priori der Undeterminiertheit. Heisenbergs Entdeckung bestand darin, daß es die Regel der Undeterminiertheit ist, die für das physikalische Weltall zutrifft.

Heisenbergs Prinzip enthält noch etwas mehr. Wir haben nur zwei Möglichkeiten betrachtet, nämlich die, daß das Symbol q entweder bekannt oder unbekannt ist. Aber es kann auch mit einer gewissen Unschärfe bekannt sein. Das heißt, wir können es innerhalb gewisser Grenzen der Genauigkeit und mit einem gewissen Grade von Wahrscheinlichkeit kennen. Ist eines von zwei gepaarten Symbolen mit Sicherheit und Genauigkeit bekannt, so muß das andere vollkommen unbekannt bleiben; ist aber das eine nur mit einer gewissen Unschärfe bekannt, so kann auch das andere mit einer gewissen Unschärfe bekannt sein. Für ein solches unscharfes Wissen gibt Heisenbergs Prinzip die Regel, daß die Unbestimmtheit (oder der Unsicherheitsbereich) der Größe q , multipliziert mit der Unbestimmtheit der mit ihr gepaarten Größe p , von der Größenordnung der Planckschen Konstanten h ist. Das Produkt der beiden Unbestimmtheiten ist von der Größenordnung eines elementaren Wirkungsquantums.

Die allgemeine Definition der gepaarten Symbole ist mehr eine rein wissenschaftliche Angelegenheit. Man nennt sie *Koordinaten* und *Impulse*, und zu jeder Koordinate gehört ein mit ihr gepaarter Impuls. Um die Auswirkungen des Prinzips zu zeigen, wollen wir den Ort und die Geschwindigkeit eines Elektrons betrachten. Wir können z. B. den Ort eines Elektrons auf etwa 0,001 mm genau bestimmen und (gleichzeitig) die Geschwindigkeit auf etwa 1 km/sec. Oder wir können den Ort auf 0,0001 mm genau bestimmen und die Geschwindigkeit auf 10 km/sec genau; oder den Ort auf 0,00001 mm und die Geschwindigkeit auf 100 km/sec genau, usw. Wir können die Unschärfe aufteilen, wie wir wollen, aber wir können sie nicht loswerden. Das Geheimnis besteht in folgendem: Wenn wir durch unsere experimentellen Maßnahmen das Elektron

dazu zwingen, uns ein sehr scharfes Signal über seinen Ort zu senden, so wird seine Geschwindigkeit (die es uns vorher signalisiert hatte) durch die Rückwirkung vollkommen verändert. Aber man kann ein Kompromiß machen. Wenn wir dem Elektron erlauben, eine weniger genaue Angabe über seinen Ort zu machen, so ist die Rückwirkung geringer und die Geschwindigkeit erfährt keine so heftige Störung.

Diese Kopplung der Unschärfen ist im heutigen theoretischen Bilde des Elektrons tatsächlich verkörpert. Heutzutage stellen wir ein Elektron nicht als ein Teilchen, sondern als ein Wellenpaket dar, und der Begriff eines genauen Ortes, gekoppelt mit einer genauen Geschwindigkeit, der sich für ein Teilchen schickt, schickt sich nicht für ein Wellenpaket. Wenn wir also etwas beschreiben, was einen genau bestimmten Ort und eine genau bestimmte Geschwindigkeit hat, so können wir damit kein Elektron meinen; genau so wenig wie wir (nach Bertrand Russel) einen reinen Mathematiker meinen können, wenn wir einen Menschen beschreiben, der weiß, worüber er redet, und ob das, was er sagt, wahr ist. Es geht daher gar nicht um die Frage eines Mangels an Geschicklichkeit unsererseits oder um eine zufällige Schwierigkeit in der experimentellen Handhabung so winziger Objekte oder um ein perverses Vergnügen der Natur daran, uns auf die Folter zu spannen. Wenn je der Tag kommt, an dem ein Forscher auf Grund einer verbesserten Experimentierkunst Ort und Geschwindigkeit eines Elektrons mit größerer Genauigkeit mißt, als Heisenbergs Prinzip es zuläßt, so wandert die gegenwärtige Quantentheorie in die Rumpelkammer der vergessenen Theorien.

Wir könnten viel Zeit damit verbringen, das Wirken dieser gepaarten Unschärfen im einzelnen zu bewundern, das uns davor bewahrt, mehr zu wissen, als wir sollen. Aber ich glaube, ihr solltet es nicht wie einen Kunstgriff der Natur ansehen, der dazu da ist, uns einen zu weiten Blick in die Zukunft zu verwehren. Die Zukunft ist nicht vorbestimmt, und die Natur hat es gar nicht nötig, sich vor dem Verrat von Plänen zu schützen, die sie noch gar nicht gemacht hat. Der Mathematiker hat aber seine Gleichungen davor zu bewahren, daß sie unmögliche Vorhersagen machen. Wenn wir dumme Fragen stellen, so ist es im allgemeinen so, daß die mathematische Theorie eine Antwort nicht unmittelbar verweigert, sondern sie gibt eine dunkle Antwort wie ein Orakel, etwa 0/0, aus der wir keinerlei Sinn zu erpressen vermögen. Ähnlich gibt uns die mathematische Theorie auf unsere Frage, wo sich das Elektron morgen befinden wird, nicht die gerade Antwort: „Das ist unmöglich zu sagen, weil

darüber noch nicht entschieden ist“, weil nämlich eine solche Antwort jenseits aller Möglichkeiten des mathematischen Sprachschatzes ist. Sie gibt uns eine ganz gewöhnliche Gleichung mit x und y , aber sie versichert, daß wir unmöglich herausbringen können, was die Gleichung bedeutet, — vor morgen.

III.

Die Unschärferelation hat in der Physik eine ähnliche Stellung wie das Relativitätsprinzip. Beide sind aus der Entdeckung eines Umstandes hervorgegangen, der zunächst unseren Beobachtungsmöglichkeiten unüberwindliche Schranken zu setzen schien. Die Relativitätstheorie entsprang aus der Entdeckung, daß wir weder unsere eigene Bewegung noch die Bewegung von irgend etwas sonst relativ zum Äther beobachten können. Das sah zuerst nur wie ein zufälliges Hindernis für unsere Suche nach der Wahrheit aus; jetzt hat man aber eingesehen, daß unser Mißerfolg davon herrührte, daß wir etwas suchten, was es gar nicht gibt. Seither sind wir auf der Hut vor anderen Fallstricken der gleichen Art gewesen. Wir müssen sicherstellen, daß die Größen oder Merkmale, von denen wir sprechen, unmittelbar oder mittelbar in der Sprache der Erfahrung definierbar sind, andernfalls vermitteln unsere Worte keinen Sinn. Man hat vermutet, daß ein Umstand dieser Art die Wurzel der Schwierigkeiten der alten Quantentheorie gebildet habe; aber der springende Punkt des Versagens unserer Definitionen entzog sich der Entdeckung. Die folgende Stelle, die kurz nach dem großen Grundlagenwandel geschrieben wurde, den die Relativitätstheorie herbeiführte, mag den Gedankengang jener Zeit beleuchten *.

Ich wäre in Verlegenheit, wenn ich aus dem Stegreif sagen sollte, was die Reihe der Operationen und Rechnungen ist, die zur Messung einer Länge von 10^{-15} cm gehören; trotzdem will ich mich, wenn es nötig ist, auf eine solche Länge so beziehen, als sei sie eine Größe, deren Definition augenscheinlich klar ist. . . . Ich könnte mich damit dem Angriff aussetzen, daß ich das gleiche tue, was ich an der alten Physik tadelte, indem ich Ausdrücke gebrauche, die keinen wohldefinierten, beobachtbaren Sinn haben, und daß ich mit meinen physikalischen Größen Dinge vermenge, die nicht das Ergebnis irgendeines denkbaren physikalischen Versuchs sind. Ich würde antworten: Untersucht diesen Einwand mit allen Mitteln, wenn ihr ihn für ein erfolgversprechendes Feld der Forschung haltet. Ich nehme hier an, daß ihr mir wahrscheinlich eine Rechtfertigung für meine 10^{-15} cm herausfinden werdet; aber es ist mög-

* Eddington, *Mathematical Theory of Relativity*, S. 7 (1923).

lich, daß ihr dabei die Entdeckung macht, daß ihre Definition durch eine unüberwindliche Zweideutigkeit verhindert wird. Im letzteren Fall mögt ihr auf der Spur eines Umstandes sein, der eine neue Einsicht in das grundsätzliche Wesen der Welt geben wird. In der Tat hat man vermutet, daß die Verworrenheiten der Quantenerscheinungen aus der stillschweigenden Annahme entspringen könnten, daß die Begriffe der Länge und der Dauer, die ursprünglich aus Erfahrungen gewonnen sind, bei denen die Mittelwerte über eine große Zahl von Quanten ins Spiel kommen, auf die Erforschung einzelner Quanten anwendbar seien. Vielleicht muß man sehr viel tiefer schürfen, bevor wir alles ans Licht gebracht haben, was in dieser kritischen Betrachtung unseres experimentellen Wissens von Wert ist. Inzwischen aber hege ich den Wunsch, euch das Kleinod vorzusetzen, das auf diesem Felde bereits ausgegraben worden ist.

Die Tiefe, bis zu der wir geschürft haben, ist größer geworden und hat nichts Verkehrtes an meinen 10^{-15} cm enthüllt, ebensowenig an anderen Messungen winziger Größen. Die Falle war nur ein wenig geschickter gestellt als die, welche die Relativitätstheorie aufgedeckt hatte. Es ist die Kombination von zwei genaueren Messungen, von der sich erwiesen hat, daß sie in der Sprache der Erfahrung keinen definierbaren Sinn hat, obgleich jede Messung für sich allein etwas ganz wohldefiniertes ausdrücken würde.

Das Heilmittel der Relativitätstheorie war einfach; sie merzte jene Größen, wie etwa „die Geschwindigkeit im Äther“, aus, von denen man gefunden hatte, daß ihnen kein Sinn zukommt. So gereinigt, wurde das Weltall mit dem Wißbaren gleichgesetzt. Aber die gleiche Behandlung kann nicht auf zwei Größen erstreckt werden, die „Bäumchenverwechseln“ spielen*. Wir haben den Versuch aufgeben müssen, eine objektive Welt zu definieren, die genau dem entspricht, was möglicherweise wißbar ist. Statt dessen haben wir ein Weltall, von dem gerade die Hälfte wißbar ist, und wir haben freie Wahl, welche Hälfte wir uns zu wissen vornehmen wollen. So wenigstens erscheint es, wenn wir es in der Sprache unserer gewöhnlichen erkenntnistheoretischen Betrachtungsweise beschreiben. Indem wir an die Stelle einer bekannten und einer zweiten unbekannten Größe zwei unscharf bekannte Größen setzen, gelangen wir entsprechend zur Betrachtungsweise der Wellenmechanik. Was wißbar ist, d. h. aus der Erfahrung geschlossen

* Im Original spielt hier der Verfasser auf „Box“ und „Cox“ an. Das sind zwei Männer, die bei der gleichen Wirtin wohnen, die sich aber nie kennenlernen, weil der eine bei Tage, der andere bei Nacht auf Arbeit ist, und die daher nicht bemerken, daß die Wirtin ihnen beiden das gleiche Zimmer vermietet hat. D. Übers.

werden kann, ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung; wir schließen nicht auf eine Folge von Ereignissen im objektiven Weltall, sondern auf den Grad der Wahrscheinlichkeit aller im objektiven Weltall möglichen Ereignisse. So schiebt sich zwischen das der Erfahrung zugängliche Weltall und das objektive Weltall der einigermaßen verwirrende Begriff der Wahrscheinlichkeit, den wir im nächsten Kapitel zu verstehen suchen wollen.

Ich habe gesagt, daß der Indeterminismus der Zukunft sich auf alle Erscheinungen bezieht, wenngleich er für einige praktisch bedeutungslos sein mag. Vielleicht scheint auch dies eine zu allgemeine Behauptung. Indem ich wieder an die Isotopen des Kaliums anknüpfe, bemerke ich, daß es nicht vorbestimmt ist, ob ein bestimmtes Atom des radioaktiven Isotops K^{41} nach Ablauf von einer Million Jahren zerfallen oder nicht zerfallen sein wird. Andererseits ist K^{39} nicht radioaktiv und besitzt nicht genug Energie, um zu zerfallen. Dann, wird man sagen, gibt es doch wenigstens eine vorbestimmte Tatsache über seine Zukunft; wir können ohne jeden Indeterminismus vorhersagen, daß es nach einer Million von Jahren nicht zerfallen sein wird. Ich will nicht einwenden, daß ihr meine Behauptung ungebührlich überspannt. Ich meinte genau, was ich sagte, — obgleich ich euch bitten muß, das nicht als einen Präzedenzfall zu betrachten (vgl. S. 265). Streng genommen gibt es gar kein solches Ding wie ein K^{39} -Atom, sondern nur ein Atom, das eine hohe Wahrscheinlichkeit besitzt, K^{39} zu sein. Ein solches Atom müßte innerhalb eines vergleichsweise kleinen Kerns 39 Protonen enthalten; aber in der heutigen Physik ist ein Proton (wie ein Elektron) nie ganz scharf an einem bestimmten Ort, obwohl eine größere Wahrscheinlichkeit dafür bestehen mag, daß es sich an dem einen und nicht an einem anderen Ort befindet. So gelangen wir nie zu mehr als zu einer großen Wahrscheinlichkeit dafür, daß sich 39 Protonen an einem Ort vereinigen. Es ist unmöglich, die heutige Physik dabei zu ertappen, daß sie irgend etwas mit absoluter Bestimmtheit vorhersagt, weil sie es von Anfang an mit Wahrscheinlichkeiten zu tun hat.

IV.

Heisenbergs Prinzip hat eine sehr seltsame Folge, wenn man es auf einen Drehwinkel und auf einen zugehörigen Drehimpuls anwendet. Dies sind gepaarte Größen, und das Produkt ihrer Unschärfen ist daher ein Quantum, nämlich die Plancksche Kon-

stante h . Wenn wir also den Drehimpuls eines Systems sehr genau kennen wollen, so muß eine sehr große Unbestimmtheit unserer Kenntnis über den Drehwinkel oder die räumliche Orientierung des Systems in den Kauf genommen werden. Aber es erhebt sich eine Schwierigkeit. So nachlässig wir auch sein mögen, wir können bei der Feststellung einer Orientierung keinen größeren Fehler als 360° machen, d. h. die größte mögliche Unbestimmtheit des Winkels beträgt im üblichen Bogenmaß 2π . Daher ist nach Heisenbergs Regel die kleinste mögliche Unbestimmtheit des Drehimpulses $h/2\pi$. Diese Größe bildet eine Art von diskreter Einheit des Drehimpulses. Wir können Unterschiede im Drall (Spin) nicht genauer unterscheiden als es diese Einheit zuläßt. Wenn wir Änderungen des Dralls eines Atoms beschreiben, so müssen die Änderungen eine oder mehrere dieser Einheiten betragen, denn eine kleinere Änderung hat keinen in der Sprache der Erfahrung definierbaren Sinn. Wir müssen uns daher die Änderungen so denken, daß sie nur in Gestalt von Sprüngen um eine solche Einheit vor sich gehen können. Dies ist eine Möglichkeit, sich den Ursprung der „Bahnsprünge“ eines Elektrons vorzustellen, die einen so rätselhaften Zug der älteren Quantentheorie bildeten. Ich möchte sagen, daß sie, auf diese Weise betrachtet, eigentlich sogar noch rätselhafter werden, aber sie erscheinen jetzt wenigstens als ein Sonderfall eines sehr allgemeinen Prinzips, das die ganze Undeterminiertheit der Physik beherrscht, nicht mehr als eine einmalige Erscheinung im Innern eines Atoms.

Es folgt ferner, daß wir in Systemen von sehr kleinen Abmessungen die Geometrie nicht von der Dynamik trennen können. Sobald wir in unser Weltbild irgend etwas einführen, was eine räumliche Orientierung besitzt, so fängt es von selbst an, sich in einen oder anderen Sinne zu drehen. Wenn man sagen wollte, daß bestimmt kein Drall vorhanden ist, so würde das bedeuten, daß man eine Genauigkeit des Wissens für sich beansprucht, die, wie wir gesehen haben, unmöglich ist. Das „geruhsamste“ System, das wir in Betracht ziehen können, ist eines, das irgendeinen Betrag an Drall in diesem oder jenem Drehsinn bis zu einer halben Einheit aufwärts besitzt. Wenn wir dann die Wahrscheinlichkeitsverteilung kennen, können wir den Mittelwert der Rotationsenergie einer großen Zahl dieser geruhsamen Atome berechnen. In der makroskopischen Physik ist es dieser Mittelwert, der uns angeht. Je komplizierter das System ist, um so größer wird die Zahl der Richtungen oder Orientierungen sein, die in dem Bilde, das wir

uns von ihm machen, definiert sind; und da jede von ihnen ihre eigene Unbestimmtheit des Dralls besitzt, so ist im Mittel ein erheblicher Betrag an Drehimpuls vorhanden, der diesen irreduziblen Charakter hat. Kurz, indem wir dem System eine Geometrie zuschreiben, werden wir durch die Unschärferelation gezwungen, ihm auch eine durch seinen Bau bedingte Energie zuzuschreiben. Die Beobachtung mag ergeben, daß mehr als dies Minimum an Energie vorhanden ist. Solche zusätzliche Energie heißt *A n r e g u n g s e n e r g i e* oder *A n r e g u n g s a r b e i t*. Sie kann aus Strahlungsenergie entstanden oder auf andere Weise von einem System auf ein anderes übertragen sein.

Diese Art von Anwendungen der Unschärferelation hat F. A. Lindemann * dazu benutzt, eine Anzahl auffälliger Ergebnisse und scheinbarer Widersprüche der Quantentheorie aufzuklären. Ich glaube, wir brauchen uns über die Beweiskraft oder Genauigkeit dieser Methode nicht den Kopf zu zerbrechen. Die Unschärferelation entspringt aus der Wellennatur der Elektronen und Protonen; und wer meint, daß „Vorsicht die Mutter der Weisheit“ ist, wird natürlich zu diesen Ergebnissen durch eine strenge Lösung der Wellengleichungen zu gelangen suchen. In diesem Buch haben wir uns nicht darauf eingerichtet, dem Vorgehen des Mathematikers in allen Einzelheiten zu folgen, der mit Bedacht seinen Weg durch das Labyrinth der Gänge im Bau der Wellenmechanik findet. Daher sind wir dankbar für ein Fenster, durch das wir einen Blick auf einen oder zwei der sehenswerten Räume werfen können.

Der Grundsatz, der uns dabei leitet, kann vielleicht folgendermaßen ausgesprochen werden. Es wäre unlogisch, wollte man als Bestandteil der Außenwelt ein Kohlenstoffatom zulassen, dessen Eigenschaften nicht mit der Tatsache vereinbar sind, daß m a n w e i ß , daß es ein Kohlenstoffatom ist, — unlogisch, weil sein Name sich nicht auf sein inneres Wesen bezieht (das außerhalb der Physik liegt), sondern auf seine äußeren Wirkungen. Wenn wir also von einem Kohlenstoffatom sprechen, so ist darin mit inbegriffen, daß es den Rückwirkungen ausgesetzt gewesen ist, welche damit verknüpft sind, daß es durch seine Umgebung hindurch das Signal ausgesandt hat: Ich bin ein solches System, wie es ein Kohlenstoffatom seiner Definition gemäß sein soll, nämlich ein Kern mit sechs äußeren Elektronen. So umfaßt die Erwähnung eines Kohlenstoffatoms u n t e r a n d e r e m die Aussage, daß es möglich gewesen ist, die Elektronen zu zählen und eine vernünftige Gewißheit dafür

* The Physical Significance of the Duantum Theory.

zu erlangen, daß die Anzahl sechs und nicht fünf ist. Wir wollen uns vorstellen, daß wir sie zählen: „Eins, zwei, drei, vier, fünf, — nun, ist das ein sechstes oder habe ich das schon gezählt?“ Ihr könnt nicht zählen, wenn die Dinge nicht einen gewissen Grad von Ortsfestigkeit haben. Das weiß jeder Mensch, der sich einschläfert, indem er Schafe auf grüner Weide zählt. Je genauer ihr aber die räumliche Lage festlegt, um so größer wird die Unbestimmtheit des Impulses. Wenn ihr also sechs Elektronen an einem Atom betrachtet, so müßt ihr ihnen (im Mittel) einen größeren Drehimpuls zuschreiben, als wenn ihr jedes einzeln mit dem Atom in Verbindung bringt. Dies ist eine Folge davon, daß man eine hinreichende Unterscheidbarkeit der Lage einführt, damit es nach außen hin offenbar sei, daß sechs Elektronen beteiligt sind und nicht weniger. Auf diese Weise gelangt Lindemann zum Pauliverbot, nach dem jedes Elektron im Atom seine eigene Quantenbahn haben muß, die sich von den Bahnen der anderen Elektronen hinreichend unterscheidet.

Mein eigenes Interesse an dieser Methode knüpft sich an ihre Anwendung auf den „endlichen aber unbegrenzten Raum“. Hier stützt sich der strenge Nachweis wiederum auf die Gleichungen der Wellenmechanik; aber die Unschärferelation ist nützlich für einen vorläufigen Einblick. Wir haben gesehen, daß die Raum-Zeit-Welt in der Relativitätstheorie eine natürliche Krümmung hat, so daß der dreidimensionale Raum umbiegt und sich schließt, analog zu einer zweidimensionalen Kugelfläche. Es ist offenbar, daß wir in einem derartigen endlichen Raum keinen so großen Fehler in bezug auf den Ort von irgend etwas machen können, wie im unendlichen, offenen Raum. Es ist unmöglich, um mehr als 20 000 km fehlzugehen, wenn wir den Ort eines Erdenbewohners feststellen. Und ähnlich gibt es auch eine obere Grenze (einige tausend Millionen Lichtjahre) des möglichen Fehlers bei der Ortsbestimmung eines Elektrons oder eines anderen Bewohners unseres mehr oder weniger sphärischen Weltalls. Genau wie oben bedingt diese obere Grenze der Unbestimmtheit des Ortes eine untere Grenze für die Unbestimmtheit des Impulses. Im günstigsten Fall also, wenn wir überhaupt nichts über den Ort des Elektrons wissen, außer daß es sich irgendwo befindet (d. h. innerhalb der Grenzen des Weltalls), muß es eine kleine Unbestimmtheit des Impulses besitzen. Eine größere Anzahl von Elektronen und Protonen wird daher einen gewissen irreduziblen mittleren Betrag an Impuls und Energie besitzen.

Dieses Ergebnis der Wellenmechanik wirft neues Licht auf den Punkt, in dem sich die Relativitätstheorie und die Quantentheorie treffen (S. 46). In der Relativitätstheorie sind Masse (oder Energie) und Impuls mit der Krümmung der Raum-Zeit-Welt verknüpft, und sie werden tatsächlich mit den Maßzahlen gewisser Komponenten der Krümmung identifiziert. Die Gesetze von der Erhaltung von Energie und Impuls, sowie die Gravitationswirkung, die eine Masse auf eine andere ausübt, können aus dieser Identifizierung abgeleitet werden. Andererseits hat die Quantentheorie die Energie und den Impuls eines Teilchens empirisch behandelt, ohne zu enthüllen, daß sie irgendeinen Zusammenhang mit der Krümmung haben. Wir sehen jetzt, daß Energie und Impuls sowohl gemäß den Prinzipien der Quantentheorie, als auch gemäß den Prinzipien der Relativitätstheorie aus der Krümmung des Raumes entspringen werden. Der Gedankengang ist der, daß die Krümmung der Größe des verfügbaren Raumes, in dem sich das Elektron tummeln kann und damit auch unserer Unkenntnis seines Ortes, eine Grenze setzt. Demnach führt Heisenbergs Prinzip zu einem Minimum der Unbestimmtheit und daher auch zu einem nicht verschwindenden mittleren Betrag von Energie und Impuls.

Die weitere Entwicklung dieser Theorie vom Ursprung der Masse muß dem 11. Kapitel vorbehalten bleiben.

6. Kapitel

WAHRSCHEINLICHKEIT

Es ist eine bemerkenswerte Tatsache, daß eine Wissenschaft, die mit der Betrachtung von Glücksspielen begann, der wichtigste Gegenstand des menschlichen Wissens zu werden bestimmt war.
Laplace, *Théorie Analytique des Probabilités*.

I.

Um den Beginn des 19. Jahrhunderts erhob sich die mathematische Theorie der Wahrscheinlichkeit durch die Schriften von Laplace, Gauß und anderen großen Mathematikern zu einem hohen Rang. Sie hat in der Physik viele Anwendungen gefunden. Zuerst war sie fast ganz auf die Behandlung der Beobachtungsfehler beschränkt, — besonders in der Astronomie, die den zweifelhaften Ruhm genossen zu haben scheint, daß sie einer Fehlertheorie den größten Spielraum gewährte. Mit dem Aufschwung der Thermodynamik und der Zerlegung der Materie in eine große Zahl von unabhängigen Teilchen, die sich ganz ungeordnet bewegen, ist die Wahrscheinlichkeit in eine engere Beziehung zu den Grundproblemen der Physik getreten. Heute wird das vornehmste Symbol der Wellenmechanik, das geheimnisvolle ψ , das der Quantenphysiker von Gleichung zu Gleichung verfolgt, mit einer Wahrscheinlichkeit identifiziert — soweit wir das undefinierbare definieren können. In den allerneuesten Theorien der Physik scheint die Wahrscheinlichkeit den Äther in seiner Rolle als „Hauptwort für das Zeitwort schwingen“ ersetzt zu haben.

Da in diesen Vorlesungen so oft von Wahrscheinlichkeit die Rede ist, hielt ich es für gut, diesem viel umstrittenen Gegenstand ein besonderes Kapitel zu widmen. Jedenfalls sollten wir mindestens unsere Gedanken genügend klären, um den Begriff der Wahrscheinlichkeit in seiner naturwissenschaftlichen Anwendung logisch und folgerichtig zu benutzen.

Wenn ein Wort der Umgangssprache als strenger wissenschaftlicher Ausdruck übernommen wird, so behält es nicht immer seine Alltagsbedeutung. So ist z. B. in der Mechanik *Arbeit* ein Fachausdruck, dessen Bedeutung sich mit unserem gewöhnlichen Begriff der Arbeit in keiner Weise deckt. Im wissenschaftlichen Sinne

wird keine Arbeit geleistet, wenn nicht irgend etwas bewegt wird. Der Akrobat, der die Basis einer lebenden Pyramide bildet und die übrigen Mitglieder der Truppe huldvoll auf seinen Schultern trägt, leistet keine Arbeit. Entsprechend darf man nicht erwarten, daß das Wort Wahrscheinlichkeit, wenn es in der Mathematik und Physik als strenger Fachausdruck gebraucht wird, alle Schattierungen der Bedeutung bewahren wird, die es in der gewöhnlichen Unterhaltung hat. Als ein wissenschaftlicher Fachausdruck bezeichnet es etwas, dem man eine bestimmte Maßzahl zuschreiben kann. Um diese Bestimmtheit zu gewährleisten, müssen wir einige der loseren Anhängsel der Wahrscheinlichkeit opfern.

Ehe wir uns der wissenschaftlichen und mathematischen Definition zuwenden, wollen wir den landläufigsten Gebrauch des Wortes untersuchen. Wir sprechen von der Wahrscheinlichkeit, daß ein Angeklagter schuldig ist, oder von der Wahrscheinlichkeit, daß ein Unternehmen Erfolg haben wird. Man schätzt die Wahrscheinlichkeit als „hoch“ oder „niedrig“ ein, aber es besteht für gewöhnlich kein triftiger Grund dafür, daß man ihr eine Maßzahl zuschreibt.

In diesem Fall bezieht sich die Wahrscheinlichkeit auf den Grad unserer Erwartung oder unseres Glaubens. Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses bezieht sich auf den Grad unserer Erwartung, daß es eintreffen wird; die Wahrscheinlichkeit einer Theorie bezieht sich auf den Grad des Vertrauens, das ein verständiger Mensch in sie setzt. Ich glaube nicht, daß zwischen den beiden folgenden Aussagen irgendein wesentlicher Unterschied besteht: a) nach dem Tatbestand ist es höchst wahrscheinlich, daß der Angeklagte schuldig ist, b) ein verständiger Mensch würde auf Grund des Tatbestandes mit einem hohen Grade von Bestimmtheit glauben, daß der Angeklagte schuldig ist. Man muß sich immer vergegenwärtigen, daß die Wahrscheinlichkeit — sowohl im gewöhnlichen wie im wissenschaftlichen Sprachgebrauch — abhängig von oder „relativ zu“ den Auskünften ist, über die man verfügt. Denn eine zusätzliche Auskunft kann möglicherweise unsere Erwartung eines Ereignisses oder die Zuversicht unseres Glaubens ändern. Unter keinen Umständen ist die Wahrscheinlichkeit ein absolutes Merkmal eines Ereignisses oder eines Glaubens.

Es erhebt sich die Frage, ob es möglich ist, daß wir den Grad eines Glaubens als ein Maß oder als die Grundlage einer Messung der Wahrscheinlichkeit benutzen können. Nach meiner Ansicht ist das unmöglich. Auf jeden Fall hat die Messung der Wahrschein-

lichkeit, wie sie in der Mathematik und Physik üblich ist, eine vollkommen andere Grundlage, wie wir noch sehen werden.

Eine Schwierigkeit bei der Benutzung des Grades eines Glaubens als Maß der Wahrscheinlichkeit liegt darin, daß eine Erwartung oder ein Glaube eine teilweise subjektive Grundlage hat. Wir waren uns einig, daß sie von den vorhandenen Auskünften oder den bekanntgewordenen Tatbeständen abhängt (oder abhängen sollte). Außerdem aber hängt der Grad der Erwartung von der Persönlichkeit des Menschen ab, der die Tatbestände beurteilt. Wir versuchen, das subjektive Element auszumerzen, indem wir sagen, daß die wirkliche Wahrscheinlichkeit dem Urteil eines „verständigen Menschen“ entspricht. Wie sollen wir aber diesen idealen Sachverständigen definieren? Wir meinen nicht einen vollkommen logisch denkenden Menschen, denn es handelt sich nicht darum, aus den Tatbeständen streng logische Schlüsse zu ziehen. Wäre das möglich, so wäre die Schlußfolgerung eine Sache der Gewißheit, nicht der Wahrscheinlichkeit. Wir meinen auch keinen Menschen mit zweitem Gesicht, denn wir wollen die Wahrscheinlichkeit relativ zu den gesicherten Tatbeständen erfahren, nicht relativ zu okkulten Auskünften. Wir meinen besonders auch nicht einen Menschen mit langjähriger Erfahrung in solchen Urteilen, denn er benutzt möglicherweise seine früheren Erfahrungen, um insgeheim die Tatbestände zu ergänzen, die angeblich die Grundlage des Urteils über die Wahrscheinlichkeit bilden. Außer der auf der Hand liegenden Definition des verständigen Menschen als eines solchen, „der so denkt wie ich“ (der Definition, die wohl bei uns allen in der Tiefe unseres Gemütes lebt), scheint es keine Möglichkeit zu geben, seine Eigenschaften zu definieren.

Natürlich gibt es Fälle, in denen alle vernünftigen Menschen übereinstimmend die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses als hoch und die eines anderen als viel niedriger einschätzen. Wenn wir also keine allzu genaue Einstufung anstreben, so erhebt sich die Frage der Subjektivität des Urteils nicht. Aber es besteht kein Grund, anzunehmen, daß diese Wahrscheinlichkeiten wirklich systematisch nach der Reihenfolge ihrer Größe abgestuft werden könnten. Einige Autoren haben zwar behauptet, daß die Wahrscheinlichkeit stets eine bestimmte Maßzahl hat, auch wenn das Wort in diesem elementaren Sinne gebraucht wird, und daß die Erwartungen eines verständigen Menschen gedanklich in eine eindeutige Folge ihrer Grade geordnet werden können. Ich glaube aber, daß das auf der gleichen Ebene steht wie die Ansicht, daß

für einen Menschen, der den richtigen Sinn für Humor hat, alle Witze nach dem Grade ihrer Witzigkeit in eine eindeutige Folge geordnet werden könnten.

Wir schließen also, daß der elementarste Gebrauch des Wortes Wahrscheinlichkeit sich auf den Grad einer Erwartung oder eines Glaubens bezieht, der mit keinerlei Maßzahl verknüpft ist. Es kann keine exakte Wissenschaft von diesen nichtnumerischen Wahrscheinlichkeiten geben, die persönliche Urteile widerspiegeln. Sie bilden ein wichtiges Element in unserem Verhältnis zur Welt, wie es auch viele andere Dinge tun, die exakten Messungen nicht zugänglich sind. Wir richten unser Handeln nach solchen Wahrscheinlichkeiten, und wir haben allen Grund, es zu tun. Der Mensch ist ja nicht gerade eine logische Maschine. Er ist ein Abenteurer, und Wagnisse sind sein Lebenselement. Erwartungen werden einmal erfüllt, ein anderes Mal nicht. Aber der Mensch läßt nicht von seiner Erwartung.

II.

Wir wenden uns nun zu Wahrscheinlichkeiten, die eine numerische Messung zulassen. In der täglichen Unterhaltung macht man oft numerische Schätzungen der Wahrscheinlichkeit: „Es steht 5 gegen 1, daß der Angeklagte schuldig ist.“ Hier liegt die Absicht vor, einen allgemeinen Eindruck von dem Grade des eigenen Glaubens zu geben. Aber man kann keine begründete Erklärung dafür geben, weshalb man die Zahl 5 wählte. Manchmal bezieht sich ein derartiger Ausdruck in Wirklichkeit gar nicht auf etwas, das eine Wahrscheinlichkeit genannt werden dürfte, sondern auf das Angebot eines Geldgeschäftes. Aber man kann andere Beispiele anführen, bei denen die numerische Wahrscheinlichkeit auf systematische Weise berechnet werden kann, und von diesen lassen wir uns leiten, wenn wir die wissenschaftliche Definition der Wahrscheinlichkeit formulieren. Als Beispiel einer Wahrscheinlichkeit, die ein bestimmtes und allgemein anerkanntes Maß besitzt, nehmen wir die Behauptung: „Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ich beim Würfeln das nächste Mal eine Eins würfeln werde, ist $1/6$.“

Wir wollen zunächst genau ermitteln, was diese Aussage bedeutet. Wie bei vielen landläufigen Aussagen, so kann man auch hier die Bedeutung nicht dadurch entdecken, daß man den grammatischen Aufbau des Satzes untersucht. Die beste Art, uns

die Bedeutung klarzumachen, ist, daß wir überlegen, was wir wohl als einen Beweis oder eine Stütze für die Aussage anerkennen würden. Dem Wortlaut nach ist sie eine Aussage über meinen nächsten Wurf; daher könnte es am nächsten liegen, wenn ich ihre Wahrheit dadurch prüfe, daß ich meinen nächsten Wurf mache. Aber es ist wohl bekannt, daß das keinen Beweis liefern kann, weder in der einen noch in der anderen Richtung. Die Eins mag oben liegen oder nicht, in keinem Falle besteht ein Grund, daß wir unsere Meinung darüber ändern, ob die Möglichkeiten richtig abgeschätzt wurden.

Eine anerkannt gültige Probe wäre es, wenn man den Würfel 6000 mal würfe. Wenn dann die Zahl der Würfe mit dem Ergebnis Eins einigermaßen nahe an 1000 ist, so betrachtet man das als eine befriedigende Bestätigung dafür, daß die Wahrscheinlichkeit $1/6$ ist. Ist sie aber zum Beispiel 1230, so ist das eine nahezu schlüssige Widerlegung.

Obgleich sich also die Aussage auf meinen nächsten Wurf bezieht, so ist doch ihre Bedeutung mit meinem nächsten Wurf nicht irgendwie besonders verknüpft.

Wörtlich bezieht sich die Aussage auf ein einzelnes Ereignis. Aber ihre Bedeutung bezieht sich auf eine Klasse von Ereignissen, von der das einzelne Ereignis ein Glied ist. So ist die numerische Wahrscheinlichkeit eine Gemeinschaftseigenschaft, die durch die Zugehörigkeit zu einer Klasse erworben wird. Die Aussage:

Die Wahrscheinlichkeit ist p , daß der Ausfall eines Ereignisses gleich e ist,

muß übersetzt werden:

Das Ereignis ist ein Glied einer gewissen Klasse von Ereignissen A , und der Bruchteil der Ereignisse in der Klasse A , der den Ausfall e hat, beträgt p .

Der Bruchteil der Ereignisse in einer bestimmten Klasse, der den Ausfall e hat, wird im allgemeinen die Häufigkeit von e in jener Klasse genannt. So wird ein numerisches Maß, das einer Klasse angehört, die Häufigkeit, wörtlich auf ein einzelnes Glied jener Klasse übertragen und erhält den neuen Namen Wahrscheinlichkeit.

Mit dieser Definition führen wir eine Wahrscheinlichkeit ein, die nicht auf den Grad eines Glaubens gegründet ist. Sie bezeichnet

einfach den Bruchteil der Ereignisse mit einem gegebenen Ausfall in einer bestimmten Klasse. Wir behaupten nicht, daß zwischen dieser Art von Wahrscheinlichkeit und dem Grade des Glaubens kein Zusammenhang besteht; denn die Häufigkeit des Erfolges wird, wie jede andere wichtige Auskunft, in Betracht gezogen werden, wenn wir uns eine Meinung auf die ziemlich unbestimmte Weise bilden, auf die Meinungen gebildet werden. Gewisse Meinungen können in der Hauptsache oder sogar ganz auf eine numerische Wahrscheinlichkeit gegründet sein. Aber es besteht kein mathematischer Zusammenhang zwischen der Wahrscheinlichkeit und der Meinung oder dem Glauben, denn der Übergang von den Tatbeständen zum Glauben vollzieht sich nicht auf mathematischem Wege.

Wir haben zwei landläufige Gebrauchsweisen des Wortes Wahrscheinlichkeit betrachtet. Die eine ist eine nicht numerische Wahrscheinlichkeit und mit dem Grade des Glaubens oder der Erwartung verknüpft, die andere eine numerische Wahrscheinlichkeit und mit der Häufigkeit in einer Klasse verknüpft. Beide sind im Sprachgebrauch gut verankert, und wir können füglich auf keine von beiden verzichten. In einem einzigen Satz können sie beide vorkommen. Ist der Würfel nicht vorher geprüft, so sind wir nicht sicher, daß er richtig ist, und deshalb sind wir auch nicht sicher, daß die Häufigkeit, mit der eine Eins oben liegt, $1/6$ ist. Je nach den Umständen mögen wir es für ziemlich wahrscheinlich, für höchst wahrscheinlich, für fast gewiß usw. halten, daß der Würfel richtig ist. Dann wird unsere Aussage sein: „Ziemlich wahrscheinlich ist die Wahrscheinlichkeit $1/6$, daß ich bei meinem nächsten Wurf eine Eins werfe.“ Hier ist das erste eine nicht-numerische Wahrscheinlichkeit, die sich auf den Grad meines Glaubens bezieht. Das zweite ist eine numerische Wahrscheinlichkeit oder Häufigkeit. Das zweite ist die Wahrscheinlichkeit, die von der Wissenschaft übernommen worden ist, in der sie als Fachausdruck benutzt wird. Aber die Wissenschaft kann die Sprache nicht für sich allein in Anspruch nehmen, und sie muß zuweilen das Wort auch in der anderen, nichtfachlichen Bedeutung gebrauchen.

Eine unzureichende Unterscheidung der beiden Anwendungsarten hat oft zur Unklarheit bei der Behandlung dieses Gegenstandes geführt. Man denkt oft, da Wahrscheinlichkeit Ungewißheit bedeute, so müsse eine Aussage wie die obige, die zwei Ungewißheiten enthält, auf eine einfachere Ausdrucksform zurück-

föhrbar sein. Aber eine numerische Wahrscheinlichkeit ist keine Ungewißheit, sie ist eine ganz gewöhnliche physikalische Gegebenheit — die Häufigkeit eines bestimmten Merkmals in einer Klasse. Unsere Kenntnis von ihr mag ungewiß sein, aber unsere Kenntnis von vielen anderen physikalischen Daten ist das auch. Die Aussage: „Es ist ziemlich wahrscheinlich, daß die Wahrscheinlichkeit . . . ist“, ist nicht anfechtbarer als die Aussage: „Es ist ziemlich wahrscheinlich, daß die Sonnenparallaxe . . . ist.“

Für gewöhnlich besteht die Klasse von Ereignissen A aus solchen Ereignissen oder enthält wenigstens solche Ereignisse, die noch nicht eingetreten sind, und die Häufigkeit des Ergebnisses e wird aus der Theorie abgeleitet, nicht aus einer wirklichen Statistik. Diese theoretische Auskunft über die Klasse wird nicht von der Wahrscheinlichkeitstheorie geliefert. So nimmt man z. B. an, daß gewisse Maßnahmen, wie etwa Kartenmischen, bestimmte Ergebnisse mit gleicher Häufigkeit zeitigen. Außerdem wird oft angenommen, daß bestimmte Ereignisse in der Zukunft mit der gleichen Häufigkeit eintreten werden, mit der sie in der Vergangenheit beobachtet wurden. Die Untersuchung der Wahrscheinlichkeit wird oft durch eine Erörterung darüber, ob wir irgendeine Beweismöglichkeit für diese Annahme haben, auf ein falsches Gleis geschoben. Aber die Wahrscheinlichkeitstheorie hat nur die Aufgabe, solche Auskünfte zu verwerten, nicht sie zu liefern. Wenn man einmal festgestellt hat, daß nichts Unlogisches in einer numerischen Wahrscheinlichkeit liegt, die selbst lediglich wahrscheinlich ist, so können wir uns auf jeden vernünftigen Glauben über die Häufigkeit von Ereignissen stützen und so eine „ziemlich wahrscheinliche Wahrscheinlichkeit“ bestimmen; genau so wie wir einen vernünftigen Glauben über die Ursache des Zurückweichens der Spiralnebel hegen dürfen und so einen ziemlich wahrscheinlichen Wert der kosmologischen Konstanten bestimmen können.

Ihr seht, daß ich mich auf keine Erörterung darüber einlasse, warum wir, wenn wir uns überzeugt haben, daß ein Ereignis zu einer Klasse gehört, die auf neun Erfolge eine Niete enthält, im allgemeinen zu der ziemlich zuversichtlichen Erwartung kommen, daß es auch eintreten wird. Ich glaube, dies kann nicht unabhängig von der Bildung von Erwartungen erörtert werden, die auf andere Arten von Auskünften gegründet sind. Dies ist ohne Zweifel eine wichtige Seite der Frage der Wahrscheinlichkeit, aber sie liegt kaum innerhalb unseres Bereichs. Wenn wir, wie es manche getan haben, behaupteten, daß die wissenschaftliche (numerische) Wahr-

scheinlichkeit die Grundlage alles vernunftgemäßen Glaubens ist, der etwas anderes ist als eine streng logische Schlußfolgerung *, und auf diese Weise die ganze Frage des Schließens der mathematischen Theorie der Wahrscheinlichkeit anhängen wollten, so müßten wir tiefer in den Stoff eindringen. Aber das ist nicht der Standpunkt, den wir hier einnehmen.

III.

Wir haben gesehen, daß die Wahrscheinlichkeit, die wir einem Ereignis zuschreiben, eine Eigenschaft einer Klasse von Ereignissen ist. Gewöhnlich wird die Klasse in unserer Aussage nicht unmittelbar genannt; aber es muß darüber ein unbedingtes Einverständnis bestehen, da anderenfalls die Wahrscheinlichkeit unbestimmt wäre. So könnte ich sagen, daß die Wahrscheinlichkeit, daß Mussolini an einem Freitag geboren ist, $1/7$ ist. Es besteht Einverständnis darüber, daß seine Geburt zu der Klasse aller menschlichen Geburten zu rechnen ist, und ich glaube (obgleich ich mich darin irren mag), daß menschliche Geburten an allen Tagen der Woche gleich häufig sind. Ihr habt vielleicht das Datum nachgeschlagen und etwa gefunden, daß es ein Dienstag ist. In diesem Falle werdet ihr das Ereignis der begrenzteren Klasse menschlicher Geburten zuordnen, die an einem Dienstag erfolgt sind, und ihr werdet sagen, daß die Wahrscheinlichkeit für einen Freitag 0 ist. Wir haben alle beide recht. Relativ zu der Auskunft, die ich besitze, ist die Wahrscheinlichkeit $1/7$, relativ zu der eingehenderen Auskunft, über die ihr verfügt, ist sie 0.

Dies zeigt, wie es kommt, daß die Wahrscheinlichkeit relativ ist zu der Auskunft, über die man verfügt. Die Auskunft dient dazu, die Klasse zu definieren, der das fragliche Ereignis zugeordnet ist; zusätzliche Auskünfte veranlassen uns, die Klasse neu zu definieren. Auf diese Weise kann dem gleichen Ereignis mehr als eine Wahrscheinlichkeit zukommen. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, daß es morgen (am 19. April) regnen wird? Das kann sich auf die Regenhäufigkeit in sämtlichen Jahren beziehen; oder auf die Häufigkeit, mit der eine der heutigen ähnliche Wetterlage am nächsten Tage Regen im Gefolge hat; oder auf eine Klasse, die beiden Bedingungen genügt. Es gibt drei oder mehr numerische

* Logische Schlußfolgerungen können als ein Sonderfall angesehen werden, der der Wahrscheinlichkeit 1, d. h. der Gewißheit, entspricht.

Wahrscheinlichkeiten, die an das gleiche Ereignis geknüpft sind, und das ist auch durchaus zulässig.

Es erhebt sich die Frage, welche von diesen die praktische Wahrscheinlichkeit ist — die, die uns leiten sollte, wenn wir unschlüssig vor dem Schirmständer stehen. Wären die Wahrscheinlichkeiten zuverlässig gewisse Wahrscheinlichkeiten und nicht nur wahrscheinliche Wahrscheinlichkeiten, so wäre ohne Zögern die dritte zu wählen — die, welche alle auftreibbare Auskunft umfaßt. Das kann man auf die folgende Weise sehen. Nehmt an, daß die Regenhäufigkeit am 19. April ganz zuverlässig $\frac{1}{3}$ ist. Jemand könnte 2 : 1 gegen Regen wetten; und wenn er das Angebot Jahr für Jahr wiederholte, so würden sich auf längere Sicht Gewinn und Verlust ausgleichen*, sofern er jedesmal einen Menschen findet, der seine Wette annimmt. Jemand anders aber, der die von der Wettervorhersage gelieferten Auskünfte in Rechnung setzt, könnte ihm Geld abgewinnen, indem er die Wette nur in den Jahren annimmt, wo die Vorhersage auf Regen lautet. Gedanklich ist also die Wahrscheinlichkeit, nach der wir unser Handeln einrichten sollten, diejenige, die relativ zu allen irgend erreichbaren Auskünften ist. Das heißt, die in Betracht kommende Klasse A besteht aus Ereignissen, die in jeder festgestellten Einzelheit gleich a sind. Aber das geht nur dann, wenn die Wahrscheinlichkeiten mit ziemlicher Gewißheit bekannt sind. Oft bestehen sie in ziemlich unbestimmten Verallgemeinerungen, die auf eine begrenzte Erfahrung in der Vergangenheit begründet sind. Ein jedes bißchen zusätzlicher Auskunft beschneidet den Umfang der Klasse und macht die Verallgemeinerung unzuverlässiger. Auskünfte, die wir aus theoretischen Gründen als belanglos ansehen müssen, z. B. ob der 19. April bei der fraglichen Gelegenheit in die Osterwoche fällt oder nicht, müssen ausgeschlossen werden; sie schaden nur, indem sie den Umfang der Klasse beschneiden. Die zu lösende Frage ist demnach die, ob man besser tut, sein Handeln nach einer sehr ungewissen Wahrscheinlichkeit einzurichten, die auf reichlichen Auskünften beruht, oder nach einer ziemlich gewissen Wahrscheinlichkeit, die auf spärlichen Auskünften beruht. Doch solche Fragen vermag die Mathematik nicht zu lösen.

Natürlich kann eine mathematische Theorie die Unsicherheit der Wesenheiten nicht berücksichtigen, mit denen sie umgeht, seien

* Dabei treten natürlich wachsende Schwankungen auf, von denen man annehmen muß, daß der Spieler gesonnen ist, sie auf sich zu nehmen.

diese Wesenheiten Wahrscheinlichkeiten oder andere numerische Größen. Unter Unsicherheiten verstehe ich hier solche, die aus zweifelhaften Voraussetzungen, Verallgemeinerungen usw. entspringen. Meßbare Ungewißheiten, wie z. B. wahrscheinliche Fehler, können (und sollten) mathematisch behandelt werden. Die Verlegenheit, zwei verschieden berechnete Wahrscheinlichkeiten zur Wahl zu haben, ist von derjenigen, die im Hinblick auf viele andere physikalische Größen auftritt, nicht verschieden. Nach der einen Methode bestimmen wir den Wert einer physikalischen Konstanten mit sehr großer Genauigkeit, nur bestehen Zweifel, ob die der Methode zugrunde liegende Theorie ganz in Ordnung ist; nach einer anderen Methode erhalten wir einen weit weniger genauen Wert, aber die zugrunde liegende Theorie flößt uns mehr Vertrauen ein. Die Entscheidung darüber, welches Ergebnis bei unserer Meinungsbildung schwerer wiegen sollte, ist ein Geschäft von der Art, wie wir es oben einem hypothetischen „verständigen Menschen“ zugeschoben haben. Der Mathematiker muß es ablehnen, sich um diesen Posten zu bewerben.

Der Einwand gegen eine Beschränkung des Umfanges der Klasse und gegen die damit verbundene Vermehrung der Unsicherheit der Verallgemeinerung trifft für die Wahrscheinlichkeiten des täglichen Lebens zu, und besonders für die, welche sich auf statistisch gesammelte Daten beziehen, aber er berührt nicht Wahrscheinlichkeiten (Häufigkeiten), die aus der reinen Theorie berechnet sind. Diese sind als zuverlässig gewisse Wahrscheinlichkeiten zu behandeln, nicht als bloß wahrscheinliche Wahrscheinlichkeiten. Ich meine nicht, daß die Theorie zuverlässig richtig ist, aber sie wird in ihrer Eigenschaft als Verhandlungsgrundlage als wahr unterstellt, und es besteht Einvernehmen darüber, daß unsere Ergebnisse davon abhängen, ob die Theorie richtig ist *. Die Theorie wird die Häufigkeit in einer engbegrenzten Klasse genau so bestimmt liefern wie in einer viel ausgedehnteren Klasse. Daher liegt in einer Beschneidung der Klasse kein Nachteil, und so verleihen wir der Wahrscheinlichkeit jeden Fetzen Auskunft ein, dessen wir habhaft werden können.

* Beispielsweise würde man die Wahrscheinlichkeit des Ortes eines Planeten nicht auf der Grundlage berechnen, daß die Einsteinsche Theorie die Wahrscheinlichkeit $\frac{3}{4}$ und die Newtonsche Theorie die Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{4}$ hat. Wenn das Ergebnis irgendeinen wissenschaftlichen Wert haben soll, so muß sich der Forscher der einen oder der anderen Theorie verschreiben.

Nehmt einmal an, daß wir nach der Wahrscheinlichkeit fragen, daß die Geschwindigkeit eines Atoms zwischen bestimmten Grenzen liegt. Wir beginnen mit einer Ausgangsklasse, von der man für gewöhnlich annimmt, daß sie die Klasse sämtlicher Atome ist, unter denen wir, mangels jeglicher Auskünfte, unser Atom aufs Geratewohl ausgesucht haben könnten. Die Häufigkeit der vorgegebenen Geschwindigkeit in dieser Klasse heißt die Wahrscheinlichkeit *a priori*. Ich will mich jetzt nicht damit aufhalten, diese Ausgangsklasse einer Erörterung zu unterziehen, denn so, wie sie dasteht, ist sie ein gänzlich unlogischer Begriff, und eine kritische Untersuchung darüber, wie man sie auf festere Füße stellen kann, hat sehr wichtige Folgen (S. 124). Als nächstes muß eine Mannigfaltigkeit von Auskünften mit einbegriffen werden. Das Atom befindet sich in der Erdatmosphäre; es befindet sich auf einer bestimmten Temperatur; es hat soeben einen Zusammenstoß mit einem α -Teilchen erlitten; es ist ein Sauerstoffatom usw. Jedes bißchen Auskunft beschneidet bei seiner Einführung die Klasse, indem es alle Glieder ausmerzt, die nicht mit ihm vereinbar sind. Nachdem schließlich jedes Stückchen Auskunft der dahinschmelzenden Klasse eins versetzt hat, berechnen wir die Häufigkeit der vorgegebenen Geschwindigkeit in dem, was von der Klasse übriggeblieben ist. Das ist dann die gesuchte Wahrscheinlichkeit — relativ zu allen unserem Wissen zugänglichen Auskünften.

Es muß wohl bemerkt werden, daß die Auskünfte dazu dienen, zu definieren, was ausgeschlossen wird, nicht das, was einbegriffen wird. Ereignisse, die mit irgendeiner Einzelheit unserer Auskünfte unverträglich sind, werden ausgeschlossen; Ereignisse, die mit ihr verträglich sind, werden nicht notwendig einbegriffen, denn sie können einer anderen Einzelheit widersprechen. Die Ausschließungsmethode ist das einzige systematische Verfahren, durch das wir eine Anzahl von unabhängigen Beobachtungsergebnissen einbegreifen können. Mir scheint, sie ist sehr bezeichnend für den Unterschied zwischen dem wissenschaftlichen und dem alltäglichen Standpunkt. Für gewöhnlich erwarten wir von unseren Sinnen, daß sie uns sagen sollen, was es in der Außenwelt gibt. Der Forscher bedient sich ihrer vielmehr dazu, sich von dem zu überzeugen, was es dort nicht gibt. Das heißt, er bildet sich zunächst eine möglichst allgemeine Vorstellung von den Möglichkeiten und versucht, sie durch entscheidende Versuche einzuengen. Es ist sein Ideal, seine Schlüsse über die Außenwelt in einer so allgemeinen

Form zu ziehen, daß sie fähig ist, alle Möglichkeiten zu umfassen, für deren Verwerfung er keinen guten Grund anzugeben vermag.

Um dieses Vorgehen durch Ausschließung zu beleuchten, erinnere ich an die Frage, die einmal in einer scherzhaften Prüfungsarbeit gestellt wurde. Zwar bezieht sie sich auf die Wahrscheinlichkeiten des täglichen Lebens statt auf die definierten Wahrscheinlichkeiten, wie sie in der wissenschaftlichen Theorie auftreten. Aber in einer Prüfungsarbeit werden die Wahrscheinlichkeiten des täglichen Lebens wohldefiniert — denn wie dürfte ein Prüfling eine Auskunft anzweifeln, für die sich ein Prüfender verbürgt. Die Frage lautete:

Wenn A, B, C, D (unabhängig voneinander) unter drei Malen einmal die Wahrheitsagen, und wenn A bestätigt, daß B leugnet, daß C erklärt, daß D ein Lügner ist, wie groß ist dann die Wahrscheinlichkeit, daß D die Wahrheit gesagt hat?

Erst viele Jahre nachdem ich davon gehört hatte, fiel es mir ein, daß es tatsächlich eine Antwort auf die Frage gibt, und daß sie obendrein ein lehrreiches Beispiel für die Ausschließungsmethode ist — für die Abänderung der zuerst festgestellten Wahrscheinlichkeit a priori durch Ausschluß jener Glieder der Klasse, die mit der zusätzlichen Auskunft unvereinbar sind*. Der Leser wird besser in der Lage sein, den ungeheuren Vorzug der Ausschließungsmethode zu würdigen, wenn er sich zunächst mit dem Versuch, das Problem ohne sie zu lösen, zur Verzweiflung gebracht hat.

Die Schwierigkeit bei der Anwendung der Ausschließungsmethode liegt darin, den Anfang zu finden. Die Methode ist gut für die Hinzufügung von Wissen zu Wissen, aber nicht für die Hinzufügung von Wissen zu Nichtwissen. Neu beigebrachte Auskünfte dienen dazu, die Klasse der betrachteten Ereignisse einzuengen; wenn wir aber ohne die geringsten Auskünfte beginnen,

* Ich verstehe das Problem dahin, daß D etwas bestimmtes behauptet hat, und daß A bestätigt, usw. wie oben. Dann sind die mit „ A bestätigt usw.“ nicht vereinbarten Kombinationen: Wahrheit—Lüge—Wahrheit—Wahrheit und Wahrheit—Lüge—Lüge—Lüge, die zweimal bzw. achtmal unter 81 Fällen vorkommen. Schließen wir sie aus, so bleibt D mit 27—2 Wahrheiten gegen 54—8 Lügen hängen, so daß die gesuchte Wahrscheinlichkeit $25/71$ ist. Natürlich nimmt die Lösung keine Rücksicht auf die psychologische Seite des Handels. Z. B. versuchen wir nicht, irgend etwas aus der Tatsache herzuleiten, daß A dazu veranlaßt wurde, zu reden, statt den Mund zu halten.

wie gelangen wir dann zu der Ausgangsklasse, die durch unser erstes bißchen Auskunft eingeengt werden soll? In dem obigen Problem von *A*, *B*, *C* und *D* gab unsere erste Auskunft die Häufigkeiten in den Klassen einzeln an, so daß sich keine Schwierigkeit ergab; das war aber nur dem Wohlwollen des Prüfers zu verdanken. Die Natur paßt ihre Probleme unseren geistigen Fähigkeiten nicht so freundlich an. So hat uns oft die Frage gequält: Welche Klasse von Ereignissen entspricht einem vollständigen Nichtwissen? Schon der Begriff einer solchen Klasse ist ein logischer Widerspruch. Der Gipfel des Unsinns wurde in dem berühmigten Indifferenzprinzip erreicht, welches aussagt, daß alle Möglichkeiten gleich wahrscheinlich sind, wenn gar keine Auskünfte vorliegen. Weiß der Himmel weshalb! Da es obendrein eine unendliche Zahl von Arten gibt, auf die man verschiedene Möglichkeiten in Klassen teilen kann, und da das Prinzip nichts darüber aussagt, welche dieser Arten zu wählen ist, so macht es uns um nichts klüger.

Es gibt aber zahlreiche Fälle, in denen es einleuchtend ist, anzunehmen, daß eine Anzahl von Möglichkeiten gleich wahrscheinlich sind. Es ist nicht immer leicht, zu sehen, daß das Einleuchten auf einem Wissen (oder einem bejahenden Schluß) beruht, niemals auf einem Nichtwissen. Die Aussage, daß die Wahrscheinlichkeit $1/6$ besteht, daß mein nächster Wurf eine Eins sein wird, ist in dem ursprünglich gemeinten Sinne nur dann wahr, wenn der Würfel nicht einseitig beschwert ist. Aber es gibt einen anderen Sinn, in dem die Wahrscheinlichkeit noch immer $1/6$ ist, auch wenn wir argwöhnen, daß der Würfel beschwert ist. Die beiden Auslegungen kommen daher, daß die Klasse der Ereignisse nicht ausdrücklich im einzelnen festgelegt ist. Im ersten Sinne bezieht sich die Wahrscheinlichkeit auf die Häufigkeit in der Klasse aller Würfe mit diesem besonderen Würfel, im zweiten Sinne auf alle Würfe mit allen möglichen Würfeln. Wir nehmen an, daß in der letzteren Klasse, obgleich es beschwerte Würfel gibt, diese gleich häufig nach allen Würfelseiten hin beschwert sind. Das bedeutet, wir nehmen an, daß die Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine bestimmte Würfelseite eine vorgegebene Zahl trägt, und die Wahrscheinlichkeit dafür, daß sie die dem Würfelschwerpunkt nächste Seite ist, unabhängige, in keiner gegenseitigen Beziehung stehende (nicht korrelierte) Wahrscheinlichkeiten sind. Diese Annahme erfordert einige Kenntnisse über die Art, wie man Würfel herstellt. Wir könnten leicht etwas dagegen sagen. Wenn es üblich ist, die Zahlen nach ihrer Reihenfolge einzuprägen, so daß die Zahl Eins auf die

Seite kommt, die zufällig oben liegt, wenn man den Würfel zum Prägen aus dem Haufen herausnimmt, so wird eine bevorzugte Beschwerde zugunsten der Zahl Eins die Folge sein. Das wirkliche Verfahren mag gänzlich anders aussehen, aber das, worauf es mir ankommt, ist, daß die Annahme für eine gleiche Wahrscheinlichkeit des Würfeln der sechs Zahlen auf Auskünfte über die Umstände bei der Herstellung gegründet ist, auf richtige oder auf falsche. Es stimmt nicht, daß die Wahrscheinlichkeit $1/6$ ist, wenn wir über keinerlei Auskünfte verfügen; wir müssen zum mindesten wissen, daß das übliche Herstellungsverfahren nicht das von uns beschriebene ist.

Man wird, wie ich glaube, im allgemeinen finden, daß, wenn aus völligem Nichtwissen auf ziemlich rätselhafte Weise numerische Wahrscheinlichkeiten entspringen, ihre wirkliche Grundlage die Annahme ist, daß zwischen verschiedenen Häufigkeiten keine Wechselbeziehung besteht, eine Annahme, welche — sie werde durch unsere Kenntnis der Umstände gerechtfertigt oder nicht — den Glauben darstellt, auf den wir uns stützen, wenn wir die Wahrscheinlichkeit behaupten. Es ist das ein positiver Glauben. Wir hegen ihn nicht nur aus dem Grunde, weil er die unverbindlichste Lösung eines uns durch unser Nichtwissen gestellten Problems wäre. Der Grad unseres Glaubens, daß die wirklichen Umstände derart beschaffen sind, daß sie keine Korrelation herbeiführen, bestimmt den Grad unseres Glaubens in die daraus folgende Wahrscheinlichkeitsverteilung.

IV.

Es ist allgemein bekannt, daß die Wahrscheinlichkeitstheorie oft in verhänglicher Weise angewandt worden ist. Der häufigste Fehler besteht darin, daß man die Koppelung zwischen zwei Wahrscheinlichkeiten vernachlässigt und sie durch Gleichungen miteinander verknüpft, die nur für unabhängige Wahrscheinlichkeiten gelten. In der Regel ist sich der Schuldige der Verruchtheit eines solchen Verbrechens wohl bewußt; er ist nur einfach nicht hell genug gewesen, um die Koppelung zu entdecken. Ich könnte aus der wissenschaftlichen Literatur, bis auf den heutigen Tag, viele Beispiele für diese Nichtbeachtung der Koppelung anführen; ich will aber ein früheres Beispiel wählen, das Bertrand in seinem *Calcul des Probabilités* mitteilt. Laßt euch also warnen durch die Geschichte von Condorcet und den Richtern.

In der Zeit des ersten Überschwangs wurde die Wahrscheinlichkeitstheorie von einigen großen Mathematikern, Condorcet, Poisson, Laplace und anderen, dazu benutzt, um Vorschläge für eine Minderung der Justizirrtümer zu machen. Der große Laplace ist für Übertreibungen verantwortlich, die kaum weniger haarsträubend sind als die, welche ich erzählen werde. Der Marquis de Condorcet, der den Gedanken zuerst in die Welt gesetzt zu haben scheint, war ein hervorragender Mathematiker seiner Zeit. Er überlegte sich die Frage, wie man eine Sicherheit dafür schaffen könne, daß kein Mensch eine größere Gefahr einer unschuldigen Verurteilung liefe, als er sie nach menschlicher Erwartung willig auf sich zu nehmen geneigt wäre. Nehmt einmal das Verhältnis derer, die zufällig an einem bestimmten Übergang über die Rhône ertranken, zu der Zahl derer, die heil hinüberkamen. Niemand hat sich über dieses Risiko aufgeregt; die Menschen würden daher freudig das gleiche Risiko auf sich nehmen, infolge eines Irrtums hingerichtet zu werden. Aus solchen Überlegungen entschied Condorcet, daß ein Justizirrtum unter 144 768 Verfahren eine passende und erstrebenswerte Zahl sei. Er hatte sich davon überzeugt, daß man wahrhaft erleuchtete Richter finden kann, die unter fünf Urteilen nur ein falsches fällen. Nun kommt aber die wunderbare neue Theorie. Nehmt fünfundsechzig solche Richter und verlangt eine Mehrheit von neun Stimmen für ein Urteil gegen den Angeklagten, und das Risiko eines Fehlurteils ist auf die obige Zahl vermindert.

Es scheint Condorcet entgangen zu sein, daß die wahrhaft erleuchteten Richter in gewissem Umfange durch die vorliegenden Tatbestände beeinflußt sein könnten — und daß, wenn ein Unschuldiger zu unrecht verurteilt wird, dies gewöhnlich daher kommt, daß die Tatsachen gegen ihn zu zeugen scheinen. In seiner Rechnung hat er angenommen, daß die richtigen oder falschen Entscheidungen von 65 Richtern sich unabhängig voneinander verteilen würden.

Condorcet machte sich einige Gedanken darüber, ob es, angesichts der notwendigen großen Vermehrung der Zahl der Richterstellen, wohl auch genug Richter von den gleichen hohen Fähigkeiten gäbe. Richter, die in einem Fall von dreien einen Fehler machen, waren noch brauchbar; nur war es dann nötig, ihre Zahl noch weiter zu vermehren. Er hatte nur den einen schwarzen Verdacht, daß nach der Erschöpfung der anderen Klassen seine Methode versagen würde, wenn es nötig wäre, auch diejenigen

heranzuziehen, die in zwei Fällen mehr als einen Fehler machen. („Keineswegs“, fügt Bertrand hinzu. „Eine hinreichend große Versammlung, in der jedes Mitglied sich öfter irrt als nicht, wird sicher gegen die Wahrheit stimmen und liefert daher ein untrügliches Mittel, um sie zu erfahren — wenigstens nach Condorcets Formeln.“)

Acht Jahre später kam die Revolution. Es wäre um den Marquis de Condorcet besser bestellt gewesen, wäre er eines einzigen wahrhaft erleuchteten Richters sicher gewesen. Er starb von eigener Hand, um dem Tribunal zu entgehen.

V.

Eine andere Quelle von Trugschlüssen ist die inverse Wahrscheinlichkeit oder die Wahrscheinlichkeit von Ursachen. In der Wissenschaft sind die „Ursachen“ gewöhnlich entweder Hypothesen, oder sie sind Erklärungen. Man schließt, daß, wenn ein Beobachtungsergebnis auf Grund der Hypothese *A* 100 000 mal wahrscheinlicher ist, als auf Grund der Hypothese *B*, die Hypothese *A* 100 000 mal wahrscheinlicher ist, als die Hypothese *B*. Wenn wir die Glaubwürdigkeit der beiden Hypothesen beurteilen, dürfen wir natürlich Auskünfte dieser Art als sehr zweckdienlich ansehen; aber die Umkehrung der Aussage ist ganz ungerechtfertigt. Nehmt an, daß ihr einen Pfennig aus eurer Tasche zieht und, nachdem ihr ihn fünfmal geworfen habt, bemerkt, daß jedesmal der Kopf oben gelegen hat. Die Wahrscheinlichkeit für eine Folge von fünf gleichen Würfeln mit einem gewöhnlichen Pfennig ist $1/16$; bei einem Pfennig mit zwei Kopfseiten beträgt sie 1. Ihr würdet aber nicht den Schluß ziehen, daß es nun 16 mal wahrscheinlicher ist, daß euer Pfennig zwei Kopfseiten hat, als daß es ein normaler Pfennig ist.

Wir dürfen indessen nicht vergessen, daß die Wahrscheinlichkeit immer relativ zu den gegebenen Auskünften ist. Wenn wir den Schluß verwerfen, daß der Pfennig höchstwahrscheinlich zwei Kopfseiten hat, so machen wir Gebrauch von unserer geheimen Auskunft, daß Pfennige mit zwei Kopfseiten selten sind. Wenn wir das und alle anderen Auskünfte beiseite lassen, die nicht offen festgestellt sind, so hätten wir keinen eigentlichen Grund gehabt, die Wahrscheinlichkeit 16 : 1 zu verwerfen, da sie die zur gegebenen Auskunft relative Wahrscheinlichkeit ist. Andererseits besteht aber auch kein Grund, sie anzunehmen. Wenn wir den Beweis unter die Lupe

nehmen, so stellt sich heraus, daß er voraussetzt, daß es vor dem Werfen ebensogut möglich war, daß der Pfennig, dessen wir gerade habhaft geworden waren, zwei Kopfseiten hatte, wie daß er normal war. Selbst wenn dies zuträfe, ist es für den Verteidiger der inversen Wahrscheinlichkeit ebenso unzulässig, seine geheimen Auskünfte zu diesem Zweck auszunutzen, wie es für uns unzulässig ist, wenn wir unsere geheimen Auskünfte für das Gegenteil ausnutzen. Die Ableitung der Wahrscheinlichkeit von Ursachen aus der Wahrscheinlichkeit ihrer Folgen ist ein Spiel, dessen Regeln derart sind, daß niemand sich an ihm beteiligen kann, ohne zu betrügen.

Wie können wir aber in der Physik ohne inverse Wahrscheinlichkeit weiterkommen? Unser gesamtes Wissen von der Außenwelt ist ein Rückschluß, ein Schluß von der Wirkung auf die Ursache. Wir beobachten Sinnesempfindungen und schreiben sie mehr oder weniger wahrscheinlichen Ursachen zu, die es in der Außenwelt gibt. Laßt euch zuerst gesagt sein, daß wir dem allgemeinen Schema der physikalischen Gesetze, wie es aus unserer Erfahrung geschlossen wird — dem geltenden Schlüssel zur Lösung des Kryptogramms —, keinerlei numerische Wahrscheinlichkeit zuschreiben. Der Tatbestand scheint uns zu einem starken Glauben an das Schema zu berechtigen, mehr können wir nicht sagen. Was aber seine beobachteten Einzelmerkmale angeht, so legen wir gewöhnlich unsere Schlüsse in Gestalt numerischer Wahrscheinlichkeiten nieder. Wir messen die Parallaxe des Sterns Capella und schließen auf eine Wahrscheinlichkeit $5/6$, daß Capella zwischen 13 und 16 parsec von uns entfernt ist. Das ist tatsächlich die Feststellung einer inversen Wahrscheinlichkeit, denn das wirkliche Ergebnis der Berechnung ist, daß die Meßreihe, die wir erhalten haben, eine solche ist, wie sie sich (ehe wir sie gemacht haben) mit fünfmal größerer Wahrscheinlichkeit dann ergeben wird, wenn sich Capella innerhalb dieser Entfernungsgrenzen befindet, als wenn sie außerhalb derselben ist.

Ich glaube, es gibt eine der Logik gemäßigere Art, unser Einzelwissen über das Weltall auszudrücken. Die astronomische Wissenschaft wird nicht zusammenbrechen, wenn es sich herausstellen sollte, daß wir bezüglich der Capella einen falschen Schluß gezogen haben. Einzelner Schlüsse können wir nie sicher sein. Wir sollten daher nach einem System des Schließens streben, das zu Schlüssen führt, von denen auf längere Sicht nicht mehr als ein ganz bestimmter Bruchteil, sagen wir $1/q$, falsch sein wird. Anstatt daß wir also den bestimmten Schluß ziehen, daß Capella wahrscheinlich zwischen 13 und 16 parsec von uns entfernt ist (Wahrscheinlichkeit

5/6), ziehen wir den wahrscheinlichen Schluß (Wahrscheinlichkeit 5/6), daß Capella bestimmt zwischen 13 und 16 parsec von uns entfernt ist. Indem wir die zweite Form annehmen, bedienen wir uns einer unmittelbaren statt einer inversen Wahrscheinlichkeit, und die logischen Schwierigkeiten der ersten Form sind damit vermieden.

Geltendes, aus der Beobachtung gewonnenes Wissen über das Weltall ist also eine Funktion von q — es gleicht einer Folge von Landkarten, die um so mehr ins einzelne gehen, je mehr q abnimmt. So setzen wir in der Karte, in der 99/100 der Einzelheiten richtig sind, Capella in eine Entfernung zwischen 12 und $18\frac{1}{2}$ parsec. In der Karte, in der 5/6 der Einzelheiten richtig sind, setzen wir sie in eine Entfernung zwischen 13 und 16 parsec. Wir können es uns leisten, in unseren Behauptungen präziser zu sein, da wir über ihre Wahrheit weniger besorgt sind. Die Reihe der Karten beginnt (bei $q = \infty$) mit einer Karte, die vollkommen richtig — aber unglücklicherweise ein einziger weißer Fleck ist. Sie endet (bei $q = 1$) mit einer Karte, die voll der winzigsten Einzelheiten ist, von denen nur ein unendlich kleiner Bruchteil richtig ist. Ich wage nicht zu sagen, was ein Philosoph mit einer solchen Karte anfangen soll; aber der Naturforscher versichert, daß einige der mittleren Karten (etwa zwischen $q = 5$ und $q = 20$), ein recht wertvolles Hilfsmittel für den Bewohner des Weltalls sein kann, der sich in ihm zurechtfinden muß.

Um zu erkennen, wie dieser Standpunkt die Frage einer inversen Wahrscheinlichkeit ganz umgeht, können wir uns wieder auf den Pfennig mit den zwei Kopfseiten beziehen. Ihr habt den Pfennig fünfmal geworfen, und er ist jedesmal mit dem Kopf (oder jedesmal mit der Kehrseite) nach oben gefallen. Es wird angenommen, daß ihr schließen solltet, die Wahrscheinlichkeit stehe 15 : 1, daß es ein Pfennig mit zwei Kopfseiten (bzw. zwei Kehrseiten) ist. Das ist offenbar nicht der richtige Schluß. Nehmt aber einmal an, daß ihr nicht den Anspruch erhebt, den „richtigen“ Schluß zu ziehen, sondern daß ihr ein System zum Ziehen von Schlüssen auf Sachverhalte (nicht auf zufällige Möglichkeiten, was unter den vorliegenden Umständen sinnlos wäre) benutzt, das euch nicht häufiger irreführen wird, als einmal in 16 Fällen. Ihr mögt dann kühn den Schluß ziehen, daß der Pfennig, der fünfmal hintereinander entweder mit dem Kopf oder jedesmal mit der Kehrseite nach oben gefallen ist, kein normaler Pfennig ist. Wir verfügen über ein geheimes Wissen, daß ihr diesmal auf falschem Wege seid. Aber ihr werdet euch nur bei einem von 16 Pfennigen, mit denen ihr es versucht, irren. Denn 15

von 16 Pfennigen werden euch ihres normalen Zustandes versichern, indem sie euch ihre beiden Seiten vorweisen. So erfüllt euer System, nach dem ihr Schlüsse zieht, alles was ihr von ihm verlangt.

VI.

Die Wahrscheinlichkeit ist bis an die Wurzeln der Physik gedungen. In die Thermodynamik, in die Quantentheorie, und wo immer die grobe Materie als eine Anhäufung einer ungeheuren Zahl von Teilchen behandelt wird, gehen die Gesetze des Zufalls ein. Die Wahrscheinlichkeit ist der Sauerteig des sekundären Schemas der physikalischen Gesetze, der Gesetze, die erfüllt werden, weil es „allzu unwahrscheinlich“ ist, daß sie verletzt werden. Diese Anwendung erfordert unsere besondere Beachtung.

Wir haben Beispiele für zwei Arten gesehen, auf die man eine Beobachtung auswerten kann. Wir können das betrachten, was aus jener Beobachtung allein gefolgert werden kann, und die unserem Schluß zukommende Wahrscheinlichkeit berechnen; oder wir können überlegen, wie die neue Auskunft, die in der Beobachtung enthalten ist, die Wahrscheinlichkeiten ändert, die dem vorherigen Stande unseres Wissens entsprachen. Letzteres ist die Ausschließungsmethode, die wir in Abschnitt III besprochen haben; sie erlaubt eine systematischere Behandlung und wird in der ganzen Thermodynamik und Quantentheorie angewendet. In der jüngsten Form der Quantentheorie, der Wellenmechanik, ist die Ausschließungsmethode zu einer hohen Kunst entwickelt worden. Jede Beobachtung wird in dem Sinne behandelt, daß sie eine Anzahl von Möglichkeiten ausschließt, die mit dem vorherigen Wissen nicht unvereinbar gewesen wären, und die deshalb in der Wahrscheinlichkeitsverteilung des „Nebels“, dessen Geschichte ermittelt wird, als vorhanden dargestellt waren.

Allgemein gesagt, malt die Wellenmechanik ein Weltall, dessen Substanz die Wahrscheinlichkeit ist, während die klassische Mechanik ein Weltall malt, dessen Substanz Masse, Energie, Impuls, elektrische und magnetische Kräfte usw. sind. In der Wellenmechanik untersuchen wir den Weg, auf dem sich die Wahrscheinlichkeit umherbewegt und ausbreitet; in der gewöhnlichen Mechanik ermitteln wir den Weg, auf dem sich Masse, Impuls und elektromagnetische Felder bewegen oder fortpflanzen. In jener sind die Wellen, die dem Gegenstand den Namen gegeben haben, Wahrscheinlichkeitswellen; in dieser behandeln wir Schallwellen, elektromagne-

tische Wellen und Gravitationswellen. Der Kürze halber mögen sie als die Welt der Wahrscheinlichkeiten und die Welt der Wesenheiten einander gegenübergestellt werden. Indessen sind sie beide nur verschiedene Seiten des gleichen Weltalls, dessen Beschreibung sowohl Wahrscheinlichkeiten wie Wesenheiten umfaßt. Der Unterschied des Standpunktes ist der, daß wir im ersten die Wesenheiten (Elektronen, Protonen, Photonen) mit den Wahrscheinlichkeiten verknüpfen, die wir erforschen; im zweiten knüpfen wir Wahrscheinlichkeiten an die Wesenheiten, die wir erforschen, nur sind auf Grund der Art der Wesenheiten, die in der klassischen Physik erforscht werden, die an sie geknüpften Wahrscheinlichkeiten alle praktisch Gewißheiten (S. 73). In der makroskopischen Physik liegt die Mannigfaltigkeit in den Wesenheiten — größere oder kleinere Masse, größere oder kleinere Feldstärke —, während die Wahrscheinlichkeiten sämtlich ähnliche Einheiten sind. In der mikroskopischen Physik ist die Lage die umgekehrte, und die Mannigfaltigkeit liegt in den Wahrscheinlichkeiten, während die Wesenheiten im allgemeinen alle die gleichen Einheiten sind, z. B. Elektronen. Man hat es daher als haushälterischer und praktischer erkannt, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu betrachten; und die an sie geknüpften Wesenheiten haben eine gewisse Neigung, bei unseren Rechnungen und Schlüssen außer Sicht zu geraten.

Wir haben gesehen, daß es zwecks Anwendung der Ausschließungsmethode nötig ist, mit einer Ausgangsklasse zu beginnen; und daher geht die Wellenmechanik von einer „Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori“ der Orte der Elektronen und anderer Wesenheiten aus. Eine Wahrscheinlichkeit a priori ist ihrem Wesen nach etwas *Unbeobachtbares*, denn wenn wir ein aus der Beobachtung abgeleitetes Wissen einführen, so erhalten wir eine abgeänderte Wahrscheinlichkeit relativ zu diesem Wissen. Scheinbar werden wir so zu dem alten Trugschluß des Indifferenzprinzips geführt, indem wir annehmen, daß es eine Wahrscheinlichkeit relativ zum völligen Nichtwissen geben kann. Dies ist ein sehr unbefriedigender Zug der Wellenmechanik, wenn man sie für sich allein betrachtet; die Schwierigkeit verschwindet aber, wenn man die Wellenmechanik mit der Relativitätstheorie verbindet. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori wird dann ebenso angesehen, wie alles andere Unbeobachtbare in der Relativitätstheorie angesehen wird, z. B. ein festes Gerüst von Raum und Zeit. Für den Zweck der Darstellung nehmen wir ein willkürlich gewähltes Gerüst von Raum und Zeit an; aber unsere Wahl hat keinen Einfluß auf das, was wir erhalten,

wenn wir schließlich unsere Ergebnisse in die Ausdrücke dessen übersetzen, was unmittelbar beobachtet werden kann. Ähnlich können wir eine willkürlich gewählte Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori annehmen; unsere Wahl hat keinen Einfluß auf das, was wir erhalten, wenn wir unsere Ergebnisse in die Ausdrücke dessen übersetzen, was unmittelbar beobachtet werden kann.

So ist die Wahrscheinlichkeit a priori, auf die man sich in der Quantentheorie und in der kinetischen Gastheorie bezieht, keine Wahrscheinlichkeit a priori im metaphysischen Sinne. Sie ist ein Teil eines willkürlich gewählten Bezugssystems; und es ist ebenso wenig nötig, zu entscheiden, ob die eine oder die andere Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori eher die wahre Schlußfolgerung aus unserem vollkommenen Nichtwissen ist, wie es nötig ist, zu entscheiden, ob das Yard oder das Meter die wahre Längeneinheit ist. Wir erkennen jede zweckmäßige Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori an, wie wir jedes zweckmäßige Gerüst von Raum und Zeit anerkennen, aber es folgt aus der Unbeobachtbarkeit dieser Bezugssysteme, daß die Gesetze der Physik gegenüber allen Transformationen derselben invariant sein müssen. Die Erkenntnis dieser Invarianz ist ein weiterer wichtiger Schritt auf dem Wege zu einer Zusammenfassung der Relativitätstheorie und der Quantentheorie *.

Wenn ihr einen Wechsel eures Bezugssystems vornehmt, sei es ein Wechsel des Raum-Zeit-Gerüsts oder der Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori, auf die alle aus der Beobachtung gezogenen Auskünfte bezogen werden, so müßt ihr den Wechsel bis zum bitteren Ende durchführen. Wenn ihr euer Bezugssystem in der Mechanik wechselt, so müßt ihr es auch in der Optik ändern, andernfalls werdet ihr zu irrigen Schlüssen hinsichtlich von Versuchen kommen, wie der Michelson-Versuch einer ist, in den sowohl die Optik wie die Mechanik verwickelt ist. Genau wie man früher den Michelson-Morley-Versuch mißverstanden hat, indem man die optischen und die mechanischen (oder metrischen) Faktoren des Versuches voneinander trennte, so werden heutigen Tages unsere Versuche über Atome und Elektronen sehr allgemein mißverstanden, indem man die mikroskopischen (Quantentheorie) und die makroskopischen Faktoren (Relativitätstheorie) des Versuches voneinander trennt. Wenn man insbesondere bei der Betrachtung eines Versuches mit einem Elektron die angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori des Ortes und der Geschwindigkeit ändert, so muß man

* Frühere Schritte sind auf S. 45 und 103 erörtert.

nicht nur die Änderungen der Gleichungen in Betracht ziehen, die das Verhalten des Elektrons selbst beschreiben, sondern die Änderungen aller Teilchen, die die für den Versuch benutzten Meßgeräte ausmachen. Denn das Ergebnis des Versuches wird ebenso sehr durch einen Wechsel im Verhalten der Meßgeräte beeinflusst, wie durch einen Wechsel im Verhalten des Elektrons.

Seitdem sich die Physik in zwei Zweige gegabelt hat, die Quantentheorie und die Relativitätstheorie, wobei das Elektron durch die erstere, die grobe Materie durch die letztere erforscht wird, ist das Experiment unter der Obhut zweier Teilhaber gewesen, von denen keiner weiß, was der andere tut. Die Relativitätstheorie, die sich mit der Materie und dem Felde in großem Maßstabe beschäftigt, behandelt Mittelwerte, die mit einer großen Zahl von Teilchen verknüpft sind. Von elektrischen Merkmalen abgesehen, behandelt sie insbesondere die mittlere Energie der Teilchen und die damit verknüpften Größen, den mittleren Impuls und das mittlere Kräftesystem. Diese sind zu einer Gruppe vereinigt, die das bildet, was man einen mittleren Energietensor nennt. So wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori der Quantentheorie in der Relativitätstheorie durch ihren mittleren Energietensor dargestellt. Wenn sie aber in die Relativitätstheorie eingeht, erhält sie einen neuen Namen; sie wird jetzt der Fundamentale oder metrische Tensor ($g^{\mu\nu}$) genannt. Dies ist das Merkmal des Raumes (oder Äthers), welches bestimmt, wie groß die Maßzahl des Abstandes zwischen zwei bestimmten einzelnen Punkten oder der Zeitspanne zwischen zwei bestimmten einzelnen Ereignissen ist.

Jetzt wollen wir uns zur quantentheoretischen Seite der Teilhaberschaft wenden. Der Quantenphysiker erforscht beispielsweise ein System von zwei oder drei Elektronen, deren Orte er vorläufig in gewissen Symbolen, Koordinaten genannt, niedergeschrieben hat. Aber er kann nicht sagen, was diese Symbole im Sinne der Beobachtung bedeuten — er kann den Abstand zwischen den Teilchen nicht angeben —, ohne sich an seinen Teilhaber zu wenden, er möge ihm den metrischen Tensor $g^{\mu\nu}$ verschaffen, der den Schlüssel für die Übersetzung der Symbole in Abstände bildet. Genau wie er sich für einen wirklichen Versuch grobe Apparate, die der makroskopischen Physik gehören, ausleihen muß, um die Abstände zu messen, so muß er sich in der Theorie einen makroskopischen Tensor ausleihen, um sie zu berechnen. So borgt er sich von dem relativistischen Physiker den Tensor $g^{\mu\nu}$. Was er gewöhnlich zu erkennen versäumt, ist, daß dieser ganz einfach der Mittelwert

der Merkmale seiner eigenen Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori ist, der ihm wieder zurückerstattet wird.

Dieser Identität nicht bewußt, wendet der Quantenphysiker die Metrik $g^{\mu\nu}$ auf die Orte und Bewegungsrichtungen seiner Teilchen an und führt sie von da an in die Beschreibung seiner Wahrscheinlichkeitsverteilung ein. Insbesondere geschieht es, daß er mit Bezug auf diese Metrik die Wahrscheinlichkeit a priori beschreibt, das Gerüst, in das das aus Beobachtungen gewonnene Wissen durch die Ausschließungsmethode einverleibt wird. Dabei macht er eine bemerkenswerte Entdeckung! Er findet, daß die Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori in der Raum-Zeit-Welt gleichförmig und isotrop sein muß. Das ist nicht allzu überraschend, wenn wir bedenken, daß die Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori die Metrik $g^{\mu\nu}$ liefert, die dann dazu dient, die Verteilung a priori zu messen.

Ich sehe ihn, wie er sich an mich wendet und sagt: „Du warst im Unrecht, als du sagtest, daß es mir freistand, die Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori willkürlich zu wählen. Die Natur selbst hat eine gleichförmige und isotrope Verteilung gewählt und zwingt mir ihre Wahl auf. Keine andere Wahl würde mich auf die Gleichungen führen, die ich durch den Versuch bestätigt habe.“ Ich könnte antworten, indem ich ihn daran erinnerte, daß die Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori infolge der Art und Weise, in der sie in Verbindung mit aus der Beobachtung abgeleitetem Wissen benutzt wird, notwendig außerhalb jeder Beobachtung liegt, so daß in seiner Folgerung ein Trugschluß liegen muß. Aber das Wesentliche ist, daß man die Quelle des Trugschlusses sieht. Indem er als Metrik in seiner Beschreibung $g^{\mu\nu}$ benutzt, benutzt er die Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori, um die Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori zu beschreiben. Wie willkürlich sie auch sein mag, wenn man sie mit einem fremden Maßstab mißt, mit sich selbst verglichen entpuppt sie sich notwendig als gleichförmig und isotrop.

Diese scheinbaren Naturgesetze, die Gleichförmigkeit und Isotropie ausdrücken, treten auf, weil wir die Welt mit Werkzeugen messen, die selbst ein Teil der Welt sind. Das Meßgerät und das, was gemessen wird, sind letzten Endes aus der gleichen Art von Elementarteilchen aufgebaut. So muß jede Asymmetrie des Verhaltens auf beiden Seiten des Vergleichs erscheinen und in allen unseren Messungen ausgemerzt sein. Ich habe an anderer Stelle *

* The Nature of the Physical World, S. 138—145. Das Weltbild der Physik, S. 141—149.

erklärt, wie auf diese Weise das Einsteinsche Gravitationsgesetz zustande kommt, welches besagt, daß die Krümmung der Welt im leeren Raum oder Äther gleichförmig und isotrop ist. Die Gleichförmigkeit und Symmetrie der Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori ist von ähnlicher Art und tatsächlich eine nahe verwandte Seite der gleichen Überlegung.

Wir wenden uns der allgemeinen Wahrscheinlichkeitstheorie wieder zu, die der Gegenstand dieses Kapitels ist. Wir haben uns bemüht, zu zeigen, daß die Wahrscheinlichkeit immer relativ zum (wirklichen oder vermuteten) Wissen ist, und daß es keine Wahrscheinlichkeit a priori der Dinge im metaphysischen Sinne gibt, d. h. eine Wahrscheinlichkeit relativ zum vollständigen Nichtwissen. Wir haben zwei Fälle untersucht, die zuerst Ausnahmefälle zu sein schienen. Bei dem Beispiel des beschwerten Würfels haben wir betont, daß unsere Grundlage kein Nichtwissen ist, sondern ein Wissen davon, daß nach den Umständen bei der Herstellung der Würfel zwei in dem Problem vorkommende Wahrscheinlichkeiten voneinander unabhängig sind. Das zweite Beispiel ist die in der Wellenmechanik und anderen statistischen Zweigen der Physik angenommene Wahrscheinlichkeit a priori. So wird z. B. angenommen, daß die Wahrscheinlichkeit a priori, ein Teilchen in einem gegebenen Bereich zu finden, dem Rauminhalt des Bereiches proportional ist; mit anderen Worten, allen gleich großen Raumteilen kommt ein gleich großer Betrag an Wahrscheinlichkeit dafür zu, daß sie das Teilchen enthalten. Dies wird oft als ein Beispiel für das Indifferenzprinzip betrachtet, nämlich dafür, daß im Anbeginn (d. h. wenn gar keine Auskünfte vorliegen), alle verschiedenen Möglichkeiten gleich wahrscheinlich sind. Aber das hat mit dem Prinzip nichts zu tun. Die Proportionalität des Rauminhalts mit der Wahrscheinlichkeit a priori ist ein physikalisches Gesetz von genau der gleichen Art, wie die Proportionalität der Energie und der Masse. Solche Gesetze entstehen, weil es zwei Arten gibt, auf die die gleiche Natureinheit unsere Erfahrung beeinflussen kann. Abgesehen davon, daß sie in einer anderen Maßeinheit gemessen wird, ist Masse nur ein anderer Name für Energie. Ähnlich ist der Rauminhalt eines Bereiches nur ein anderer Name für die Wahrscheinlichkeit a priori, daß er ein Teilchen enthält, wobei der eine Name in der makroskopischen Theorie, der andere in der mikroskopischen Theorie benutzt wird.

7. Kapitel

DER BAU DER STERNE

Die Forschung gleicht des Himmels hehrer Sonne,
Die dreistem Blick verwehrt, sie anzuschauen.
Shakespeare, Verlorene Liebesmüh.

I.

Die Geschichte der Erforschung des Innern der Sterne beginnt im Jahre 1869, in dem J. Homer Lane eine bekannte Abhandlung schrieb, die die Überschrift trägt: „Über die theoretische Temperatur der Sonne auf Grund der Hypothese einer gasförmigen Masse, die ihr Volumen infolge ihrer inneren Wärme aufrechterhält, und die den Gasgesetzen gehorcht, wie sie aus irdischen Versuchen bekannt sind.“ Er hätte vielleicht eine nicht ganz so pompöse Überschrift wählen können. Aber die Fülle hat den Vorzug, daß sie eine Anzahl von wichtigen Gedanken herausstellt. Jeder der einzelnen Ausdrücke verdient genaue Beachtung, und wir werden hier jeden von ihnen genau besprechen. Wir werden außer der Sonne noch andere Sterne betrachten, und außer der Temperatur noch andere innere Bedingungen; aber der Kernpunkt von allem ist die Temperatur. Wie hoch ist die Temperatur tief drunten im Innern dieser riesigen himmlischen Öfen?

Ich möchte den Ausdruck: „die den Gasgesetzen gehorcht, wie sie aus irdischen Versuchen bekannt sind“, besonders unterstreichen. Unsere Untersuchungen über das Innere eines Sterns verfolgen keine spekulative Absicht. Wir wollen lediglich ermitteln, inwieweit die Erscheinungen, die wir am Himmel beobachten, mit den Gesetzen übereinstimmen — oder aus ihnen folgen —, die man der Materie auf Grund von Laboratoriumsversuchen zuschreibt. Wir begegnen dabei der Materie unter Bedingungen, die von denen im Laboratorium höchst verschieden sind, und sie könnte uns etwas ganz Neues zu sagen haben, — etwas gänzlich Unerwartetes. Aber alles wirklich wesentlich Neue muß scharf von dem getrennt werden, was aus dem, was wir schon wissen oder zu wissen glauben, unmittelbar folgt. Wenn die Sterne irgendwelche umwälzenden Gedanken zu verkünden haben, so werden sie es uns durch einen Mangel an Übereinstimmung mit den Ergebnissen zeigen, die wir auf der Grundlage der geltenden physikalischen Gesetze berechnen.

Ehe wir in das Innere tauchen, muß ich auf unser allgemeines Wissen von den Sternen eingehen, das wir aus ihrem äußeren Anblick gewonnen haben. Die Anzahl der Sterne in der Reichweite unserer mächtigsten Fernrohre ist von der Größenordnung von tausend Millionen, d. h. es kommt rund einer auf jeden Erdbewohner. Diese und viele andere Sterne, die zu schwach sind, als daß wir sie entdecken könnten, bilden ein großes System, das wir unsere Milchstraße nennen. Dieses System ist nicht das ganze Weltall; aber das, was jenseits von ihm liegt, wird uns erst im 10. Kapitel beschäftigen. Die Sterne zeigen eine sehr große Mannigfaltigkeit. Manche sind sehr dicht und kompakt, andere aus äußerst dünnem Stoff. Manche senden millionenmal mehr Licht und Wärme aus als andere. Manche haben eine Oberflächentemperatur bis zu $20\,000^{\circ}$ oder vielleicht gar bis $30\,000^{\circ}$, andere nicht mehr als 3000° . Einige Sterne scheinen zu pulsieren, indem sie mit einer Periode von wenigen Stunden oder Tagen anschwellen und sich wieder zusammenziehen. Ein beträchtlicher Bruchteil tritt als Doppelsterne paarweise auf, als zwei Sterne, die einander umkreisen. Einige ballen sich zu Haufen zusammen; die Mitglieder eines solchen Haufens haben zwar große Abstände voneinander, aber sie sind miteinander zum mindesten durch einen gemeinsamen Ursprung verbunden. Ein Stern hat bekanntlich ein Planetensystem, und von einem dieser Planeten aus betrachten wir ihn. Ob noch irgendein anderer Stern ein solches System besitzt, kann nur vermutet werden. Nach Jeans gibt es theoretische Gründe für die Annahme, daß die Entwicklung eines Planetensystems ein seltenes Ereignis ist.

Das gleichförmigste Merkmal der Sterne ist ihre Masse, d. h. der Betrag an Materie, aus der sie aufgebaut sind. Mit Ausnahme der ausgefallensten Gebilde liegen sie alle in einem Bereich von $1/5$ bis zum zehnfachen der Sonnenmasse. Die meisten Massen aber liegen in einem viel engeren Bereich. Die massigsten Sterne drängen sich unserer Beachtung besonders auf, weil sie am hellsten sind; wenn wir aber diese auswählende Wirkung unschädlich machen, ist die Mannigfaltigkeit der Massen unter hundert Sternen, die wir wahllos herausgreifen, wahrscheinlich nicht viel größer als unter hundert wahllos aus einer Menge gegriffenen Männern, Frauen und Kindern.

Als zuerst das Spektroskop zum Nachweis der verschiedenen Elemente auf den Himmelskörpern angewendet wurde, war der erste Eindruck, daß die Sterne sich in ihrer chemischen Zusammensetzung außerordentlich stark unterscheiden. Elemente, die in dem einen Stern sehr stark hervortreten, fehlen in einem anderen. Manche

Sterne, wie der Sirius, haben ein Spektrum, das fast ausschließlich dem Wasserstoff angehört; in der Sonne tritt Eisen stark hervor; einige von den kälteren Sternen, in denen die chemischen Verbindungen nicht durch die Temperatur vollständig zerlegt sind, zeigen Kohlenstoffverbindungen, und andere haben sich merkwürdigerweise auf Titanoxyd spezialisiert. Aber dies bedeutet keine wirkliche Verschiedenheit der chemischen Zusammensetzung. Ein bestimmtes Spektrum kann nur dann auftreten, wenn die physikalischen Bedingungen für seine Anregung vorhanden sind. Die Mannigfaltigkeit der Sternspektren ist also in erster Linie eine Folge der Mannigfaltigkeit der physikalischen Bedingungen, der Temperatur- und Druckunterschiede in den Schichten, in die das Spektroskop vordringt. Wir können nicht sicher sagen, daß alle Sterne die gleiche chemische Zusammensetzung haben; wenn es aber Unterschiede gibt, so ist das Problem, sie festzustellen, nicht auf geradem Wege zu lösen.

Jedenfalls kann die Zusammensetzung der Schichten, die an der Oberfläche der Sternöfen sieden, nicht als ein zuverlässiges Anzeichen für ihre Zusammensetzung im Innern dienen. Wir beginnen daher mit unserer Untersuchung des Sterninnern praktisch ohne jede Kenntnis von seiner Zusammensetzung. Wenn wir von möglichen Unterschieden in der chemischen Zusammensetzung absehen, so kann man erwarten, daß die Sterne eine zweifache Folge bilden. Wir können einen Stern durch seine Masse und seinen Radius kennzeichnen, also durch den Gesamtbetrag an Materie und durch den Raum, in den diese zusammengepfercht ist. Wir nehmen vorweg, daß diese beiden Daten alle übrigen Merkmale des Sternes bestimmen, wieviel Licht und Wärme er ausstrahlt, welche Temperatur seine Oberfläche annimmt, welches die Periode seiner Pulsation ist, wenn eine solche möglich ist, usw. Das sind vermutlich notwendige Eigenschaften eines Materials, das eine Kugel von gegebenen Ausmaßen bildet, und es sollte möglich sein, sie auf Grund einer Untersuchung der physikalischen Bedingungen zu berechnen. Auf jeden Fall ist das eine Richtung, in der wir an die Arbeit gehen können, und wenn es weitere Verwicklungen gibt, so werden sie sich schon zu gegebener Zeit bemerkbar machen.

Es wäre ebenso schwer, einen „typischen Stern“ auszuwählen, wie es schwer wäre, ein typisches Tier als Vertreter des gesamten Königreiches der Tiere auszuwählen. Aber die Sonne ist etwa so typisch wie irgendein anderer Stern. Ihre Merkmale fallen in keiner Weise aus dem allgemeinen Rahmen, und es gibt rund um uns herum zahlreiche Sterne, die praktisch ein Abklatsch der Sonne

sind. Die Masse der Sonne ist 330 000 mal größer als die Masse der Erde, ihr Volumen 1 300 000 mal größer als das Volumen der Erde. Ihr Durchmesser beträgt 1 383 000 km, ihre Masse 2000 Quatrillionen ($2 \cdot 10^{27}$) Tonnen. Ihre mittlere Dichte ist ein wenig größer als die des Wassers.

II.

Wenn wir die Sonne von außen betrachten, so blicken wir durch die halbdurchsichtige äußerste Schicht hindurch. Das Niveau, das ungefähr die Grenze bildet, bis zu der wir hinabsehen können, heißt die Photosphäre. Auf Grund recht genauer Beobachtungsmethoden weiß man, daß die Temperatur in jenem Niveau nahezu 6000° beträgt. Wenn wir von der Photosphäre aus nach innen fortschreiten, wird die Temperatur höher und höher, bis sie im Mittelpunkt der Sonne ihren Höchstwert erreicht; dieser Zunahme können wir aber nur in der Theorie folgen. Es hat sich ergeben, daß der weitaus größte Teil der inneren Masse auf einer Temperatur von mehr als einer Million Grad ist. Nach einem beliebten theoretischen Modell beträgt die Temperatur im Sonnenmittelpunkt 21 Millionen Grad und die mittlere Temperatur der ganzen Masse 12 Millionen Grad. Diese Angaben sind wahrscheinlich falsch und dann jedenfalls allzu hoch.

Der Faden, dem wir folgen, um die Innentemperatur zu finden, ist in der Überschrift von Lanes Abhandlung enthalten: „eine gasförmige Masse, die ihr Volumen aufrechterhält“. Die Masse von $2 \cdot 10^{27}$ Tonnen, aus der die Sonne besteht, muß einen ungeheuren inneren Druck erzeugen. Wenn sie keine Wärme besäße, so würde die Materie durch diesen Druck in jenen seltsamen Zustand zusammengequetscht werden, den wir beim Siriusbegleiter und anderen weißen Zwergsternen vorfinden, in denen die Dichte Tausende von Malen größer ist als diejenige irgendeines auf der Erde bekannten Stoffes. Die Wärme ist nötig, um die Materie so auszudehnen, daß sie das wirkliche Volumen der Sonne einnimmt. Unter Wärme verstehen wir die Energie der ungeordneten Molekularbewegung. Wenn die Planeten ihrer Bewegung beraubt würden, so würden sie alle in die Sonne fallen; wir können daher sagen, daß das Sonnensystem seine Ausdehnung infolge der Planetenbewegungen aufrechterhält. Auf die gleiche Weise wird die räumliche Ausdehnung der Sonne durch die Wärmebewegung der Teilchen, aus denen sie besteht, aufrechterhalten. Dadurch,

daß wir die verschiedenen physikalischen Gesetze, die sich auf diesen Gegenstand beziehen, heranzogen, waren wir imstande, eine erträglich zuverlässige Berechnung des Betrages an Wärme anzustellen, der nötig ist, um die beobachtete räumliche Ausdehnung zu ergeben, und auch festzustellen, dies aber nur in roherer Annäherung, wie die Wärme über die Sonne verteilt sein muß, damit ein stationärer Zustand bestehen kann.

Die sehr hohe Temperatur hat eine Wirkung, die anfänglich nicht erkannt wurde. Es gibt zwei Arten von Wärme, — stoffgebundene Wärme, welche in der Energie der Teilchen besteht, und strahlende Wärme oder Wärmestrahlung, die in der Energie der Ätherwellen besteht. Bei irdischen Temperaturen, z. B. in einer weißglühenden Metallmasse, ist die Wärmestrahlung gegenüber der stoffgebundenen Wärme ganz bedeutungslos. Wenn wir uns der weißglühenden Masse nähern, so fühlen wir, daß von ihr eine beträchtliche Wärmestrahlung ausgeht, aber diese wird im Augenblick der Ausstrahlung erzeugt, indem sich stoffgebundene Wärme im Eisen in Strahlung umwandelt; sie wird nach Bedarf erzeugt, und eine Vorratswirtschaft wird praktisch nicht getrieben. Mit steigender Temperatur wächst die stoffgebundene Wärme ungefähr proportional der absoluten Temperatur, aber die Wärmestrahlung, die in dem Körper enthalten ist, wächst mit der vierten Potenz der Temperatur, so daß sie die stoffgebundene Wärme Schritt für Schritt einholt. Zwar ist selbst bei der Temperatur der Sonne noch mehr stoffgebundene Wärme als Wärmestrahlung vorhanden, und die stoffgebundene Wärme hat, einige der mächtigsten Sterne vielleicht ausgenommen, immer einen Vorsprung. Aber sehr groß ist der Unterschied nicht mehr.

Ich hege kaum Zweifel, daß dieses ungefähre Gleichgewicht der zwei Formen der Wärme in irgendeinem frühen Stadium der Entwicklung eines Sterns die Ursache gewesen ist, die die normale Masse bestimmte, der die Sterne mehr oder weniger genau entsprechen. Es muß irgend etwas dafür maßgebend gewesen sein, daß die Materie, die unsere Milchstraße bildet, sich nicht in eine einzige Masse verdichtet, sondern in Tausende von Millionen Sternen aufgeteilt hat, von denen die meisten im Betrage des Materials, das sie enthalten, überraschend übereinstimmen. Die Masse des Mustersterns kann keine beliebige gewesen sein. Es scheint doch etwas zu bedeuten, daß die Masse etwa so groß ist, daß (besonders in den ersten Stadien der Verdichtung) die Wärmestrahlung der stoffgebundenen Wärme fast gleich ist. Bei 50 mal

größerer oder 50 mal kleinerer Masse wäre von einer auch nur angenäherten Gleichheit keine Rede.

In Lanes Überlegungen und auch noch eine lange Zeit nachher war das Dasein dieses großen Betrages an strahlender Wärme noch nicht erkannt. Wenn man sich die Wärme des Sterns ausschließlich als stoffgebundene Wärme dachte, so mußte man irgend einen Vorgang ersinnen, durch den sie aus dem Innern des Sternes an die Oberfläche befördert wird, von der die Wärme abstrahlt. Man nahm an, daß sich die Materie an der Oberfläche abkühlt und dann absinkt, und daß an ihrer Stelle heiße Materie von unten heraufquillt, so daß überall in der Sonne Konvektionsströme bestehen, die die Wärme gleichsam körperlich an die Stellen befördern, wo Wärme abgegeben wird, und die hierbei das Material ständig gut durcheinander rühren. Doch jetzt sind die Rollen vertauscht. Seitdem man erkannt hat, daß der Stern einen ungeheuren Betrag an Wärmestrahlung enthält, hat das Problem nicht mehr darin bestanden, einen Vorgang ausfindig zu machen, durch den Wärme an die Oberfläche gebracht wird, sondern festzustellen, wie diese flüchtige Energieform von der Oberfläche ferngehalten wird, — d. h. wie sie durch die Materie wie in einem Käfig gefangen gehalten wird, so daß sie nicht schneller entweicht als wir es wirklich beobachten.

Bei einer Temperatur von einigen Millionen Grad besteht die Wärmestrahlung aus Röntgenstrahlen. Daher haben wir im Sterninnern Röntgenstrahlen von hoher Dichte, die sich nach allen Richtungen fortpflanzen. Würden die Atome und Elektronen in der Sonne plötzlich zum Verschwinden gebracht, so würden sich die bis dahin auf das Innere beschränkten Röntgenstrahlen mit Lichtgeschwindigkeit im Raum ausbreiten. Ein Strahlungsvorrat für 300 000 Jahre wäre in einem Augenblick verpufft. Die Atome dämmen diese Flut ab, indem sie die Ätherwellen abfangen und abbiegen, wenn sie auszubrechen versuchen, und indem sie sie absorbieren und in einer neuen Richtung wieder ausstrahlen, so daß sie ziellos hierhin und dorthin in die Irre gehen. So tröpfelt nur ein ganz klein wenig Strahlung nach außen, auf daß sie die Erde und die anderen Planeten erleuchte und erwärme.

Dies führt uns auf das Hauptziel der Erforschung des Sterninnern. Wenn wir die Temperaturverteilung im Sterninnern ermittelt haben und daher die Menge und Beschaffenheit der eingeschlossenen Strahlungsenergie kennen (denn diese wird allein durch die Temperatur bestimmt), wenn wir also die Dichte der

Materie und daher auch die Zahl der Atome kennen, die an der Zurückhaltung der Strahlungsenergie beteiligt sind, so sollten wir berechnen können, wieviel von ihr entweicht. Es ist wie die Berechnung des Wasserstroms in einem Rohr, wenn wir die Druckhöhe des Wassers, die den Strom verursacht, und den Strömungswiderstand kennen. Hier liefert die von der nach innen zunehmenden Temperatur verursachte Intensitätszunahme der Röntgenstrahlen das Druckgefälle, die Trübheit der Materie, die den Durchgang der Röntgenstrahlen hemmt, den Widerstand. Unser Ziel besteht also darin, aus den bekannten Absorptionsgesetzen der Röntgenstrahlen zu berechnen, wieviel Strahlung hindurchtreten wird, und so auf theoretischem Wege den Energiestrom zu ermitteln, der langsam durch den Stern entweicht. Wenn unsere Rechnung richtig ist, wird sie mit dem Betrage übereinstimmen, der an der Oberfläche ausströmt, und der die Licht- und Wärmestrahlung des Sternes ausmacht. Die Rechnung ergibt uns also die Helligkeit des Sternes, oder richtiger die „Wärmehelligkeit“ oder „bolometrische Helligkeit“, die die gesamte ausgesandte Strahlungsenergie ohne Rücksicht auf ihre Lichtwirkung mißt. Bei vielen Sternen ist die Wärme, die von ihnen zu uns gelangt, unmittelbar gemessen worden; aber in jedem Fall kann die Wärme-Größe eines Sternes leicht aus seiner Licht-Größe berechnet werden, indem man eine gut bekannte Korrektur anbringt, die von der Farbe oder dem Spektraltypus abhängt.

In der Tat sollten wir imstande sein, nach der hier umrissenen Methode aus der Masse und dem Radius eines Sternes seine theoretische Leuchtkraft zu berechnen*. Wir können dann diese berechnete Leuchtkraft mit der beobachteten Leuchtkraft vergleichen. Bevor ich die Ergebnisse dieser Vergleichung beschreibe, müssen einige Punkte näher betrachtet werden.

Wenn die entweichende Strahlung sich aus dem heißen Innern nach der verhältnismäßig kühlen Oberfläche hin fortpflanzt, wird

* Man muß unterscheiden zwischen der „Helligkeit“ oder „Größe“ eines Sternes und seiner „Leuchtkraft“. Die Helligkeit oder Sterngröße ist ein Maß für den Lichteindruck, den ein irdischer Beobachter von einem Stern empfängt. Sie hängt also, außer von der tatsächlich ausgesandten Lichtmenge, noch von der Entfernung des Sternes ab. Die Leuchtkraft dagegen ist die Helligkeit, die der Stern für einen Beobachter zeigen würde, von dem er sich in einer bestimmten Entfernung befände, die im allgemeinen als 10 parsec gewählt wird. Die Leuchtkraft eines Sternes kann also aus seiner Helligkeit dann berechnet werden, wenn man seine Entfernung kennt. D. Übers.

sie Schritt für Schritt aus Röntgenstrahlen in Strahlung von größerer Wellenlänge oder kleinerer Frequenz verwandelt. So besteht die schließlich austretende Strahlung aus sichtbarem Licht mit etwas ultravioletter und ultraroter Strahlung, wie es das Sternspektrum zeigt. Jede Einheit der Strahlungsenergie — jedes Photon — wird auf seiner Reise nach außen alle paar Zentimeter absorbiert und wieder ausgestrahlt. Es ergibt sich auf diese Weise reichlich Gelegenheit, die Zusammensetzung der Strahlung der jeweiligen Temperatur der Gegend anzupassen, durch die gerade die Reise geht. Wenn wir den letzten Stadien der Reise folgten, so hätten wir es mit der Absorption von Licht, nicht von Röntgenstrahlen, zu tun. Zum Glück brauchen wir uns aber darüber keine Sorgen zu machen. Wenn wir den ausfließenden Strom sozusagen durch $\frac{99}{100}$ der Sternmaterie begleitet haben, so können wir es ihm überlassen, seinen Weg ins Freie allein zu finden. Ich sage zum Glück, denn es ist viel leichter, mit Temperaturen über eine Million Grad umzugehen. Es ist die hohe Temperatur des Sternes, die unser Problem lösbar macht. Zweifellos könnten wir kältere Materie auf die gleiche Weise behandeln, wenn wir über die nötigen Unterlagen verfügten. Aber wir befinden uns nicht in einem Laboratorium, wo wir alle Unterlagen beschaffen können, die wir brauchen; wir befinden uns im Innern eines Sternes und sind mit so gut wie keinen Unterlagen versehen.

In diesem Teil unserer Erörterung beschäftigen wir uns nicht mit der eigentlichen Quelle der Wärme des Sternes. Wir nehmen den Stern in dem Zustande, in dem er jetzt ist, und berechnen, daß durch ihn hindurch und aus ihm heraus ein bestimmter Betrag an Strahlung fließt. Natürlich wird eine schrittweise Änderung im Zustande des Sternes eintreten, wenn die innere Wärme nicht aus einer Quelle im Innern wieder aufgefüllt wird. Wir müssen annehmen, daß eine solche Auffüllung stattfindet, denn ohne sie würde sich der Stern viel schneller abkühlen als es irgendeine mögliche Zeitdauer seiner Entwicklung erlaubt. Aber „schnell“ bedeutet hier so schnell, daß es in tausend oder einer Million Jahren merkbar würde; es ist keine derartige Veränderlichkeit, daß sie unsere Rechnung über den Haufen werfen würde. Bei der Berechnung der Leuchtkraft kümmern wir uns nicht darum, ob der Wärmeverrat des Sternes wieder aufgefüllt wird oder nicht.

Es gibt nur einen Punkt, in dem unser Problem von der Frage, aus welcher Quelle ein Stern seine Wärme aufrechterhält, nicht ganz unabhängig ist. Um ein genaues Ergebnis zu erzielen, müssen

wir wissen, wie die Quelle im Innern des Sternes verteilt ist, — ob sie auf die heißesten Kernbezirke beschränkt oder durch die ganze Masse gleichmäßig verteilt ist. Wir begegnen dieser Schwierigkeit, indem wir beide Grenzfälle der Verteilung nacheinander in Betracht ziehen und die Leuchtkraft auf beide Weisen berechnen; die Wahrheit muß in der Mitte liegen. Auf diese Weise hat sich herausgestellt, daß die äußerste Unsicherheit, die von unserer Unkenntnis der Quellenverteilung herrührt, bei einem typischen Stern nicht mehr als $\pm 1/2$ Größenklassen beträgt. Wir werden höchst befriedigt sein, wenn unsere Berechnung eine Genauigkeit von dieser Größenordnung erreicht.

Es kann kaum bezweifelt werden, daß die Wärme der Sonne und anderer Sterne dadurch aufrechterhalten wird, daß im Innern inneratomare Energie in irgendeiner Form frei wird. Bis vor zwei oder drei Jahren wußte der Laboratoriumsphysiker nichts über die Bedingungen, unter denen inneratomare Energie frei wird; also konnte der Astronom auf dieser Seite des Gegenstandes von der Physik keine Hilfe erhalten. Demnach war bei der Entwicklung der Theorie vom Bau der Sterne in Abhängigkeit von den physikalischen Gesetzen, „wie sie aus irdischen Versuchen bekannt sind“, ein Fortschritt davon abhängig, daß wir in der Lage wären, ein unabhängiges Feld der Forschung abzutrennen, das der unbekannten Gesetze der inneratomaren Energie nicht bedurfte. Die in diesem Kapitel behandelten Probleme sind auf diese Weise von dem Problem der inneratomaren Energie abgetrennt, — wenn wir von dem unbedeutenden Einfluß absehen, den wir am Schluß des letzten Absatzes erwähnt haben. Jetzt aber ändert sich die Lage, und es werden zahlreiche Prozesse, die inneratomare Energie frei machen, in den Laboratorien untersucht. Man darf erwarten, daß in Kürze wichtige Fortschritte in der Anwendung auf die Quellen der Sternenergie folgen werden. Über diese Seite des Problems des Gleichgewichts der Sterne wird im 8. Kapitel einiges gesagt werden.

III.

Wir haben gesehen, daß ein Atom aus einem schweren Kern mit einer Anzahl von lose angehängten äußeren Elektronen besteht, die zu ihm gehören wie die Planeten zur Sonne. Durch verschiedenartige Eingriffe kann der Physiker eines oder mehrere der äußeren Elektronen abtrennen; diese Abtrennung von Elektronen heißt

Ionisation, und das verstümmelte Atom heißt ein Ion. Unter Laboratoriumsbedingungen ist es nicht schwierig, unter einer großen Zahl von Atomen einige Ionen zu erzeugen; wenn aber ein bestimmter Bruchteil ionisiert ist, so daß viele heimatlos umherirrende Elektronen vorhanden sind, so fangen die Ionen diese Umhertreiber ständig wieder ein, und wir erreichen bald einen Zustand, bei dem die Atome ebenso schnell wieder hergestellt werden, wie wir sie ionisieren können.

Bei einer Temperatur von 10 Millionen Grad sind die zerstörenden Kräfte ungeheuer stark. Die Ionisation ist nicht mehr eine gelegentliche Krankheit, sondern epidemisch. Die Steigerung liegt mehr in der Menge als in der Art. In einem Wettstreit zwischen der Sonne und dem Cavendish-Laboratorium, wer einem einzelnen Atom mehr Gewalt antun kann, würde ich es mit dem Cavendish-Laboratorium halten. Für elektrische Vorgänge ist auf der Sonne ein Überfluß an Energie vorhanden, aber die Isolation ist nur sehr mangelhaft. Die Wirksamkeit der Sonne liegt in ihrer Massenproduktion. Das hilft uns bei unserem Problem, denn wenn Massenproduktion der einzige neue Zug ist, so genügt die Multiplikationstabelle, um damit fertig zu werden.

Um ein bestimmtes Beispiel zu wählen, wollen wir ein Eisenatom tief im Innern der Sonne betrachten. Eigentlich sollte es 26 äußere Elektronen haben; aber 22 von ihnen sind abgerissen und wandern frei durch den Stoff. Leichtere Elemente wie Kohlenstoff sind bis auf den nackten Kern gerupft. Wandernde Elektronen versuchen immer, sich in den freien Bahnen an den Atomen festzusetzen, und das kann ihnen für einen Augenblick gelingen; aber sofort kommt ein Röntgenstrahl daher und schleudert das Elektron explosionsartig wieder fort. Ich könnte vielleicht hinzufügen, daß das Elektron mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von rund 20 000 km in der Sekunde „wandert“.

Ihr könnt euch den Aufruhr im Innern der Sonne bei 10 Millionen Grad vorstellen. Auf den Raum eines Kubikzentimeters sind mehr als eine Quatrillion (10^{24}) Atome zusammengepfercht, etwa zweimal so viel Elektronen und 20 600 Trillionen Röntgenstrahlen*. Wir dürfen von der Zahl der Röntgenstrahlen sprechen, denn die Quantentheorie gibt ihnen eine Art von atomarem Charakter; jedes von ihnen ist ein „Photon“, das

* Bei diesem Gegenstand ist die Gelegenheit, eine auf 1 % genaue Zahl anzugeben, ein so seltener Genuß, daß ich der Versuchung erliegen bin, es zu tun.

imstande ist, ein äußeres Elektron explosionsartig aus einem Atom hinauszuschleudern. Die Röntgenstrahlen wandern mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde (der Lichtgeschwindigkeit) und die Elektronen, wie schon gesagt, auf einer Geschwindigkeit von 20 000 km in der Sekunde. Die meisten Atome sind Wasserstoffatome, — oder vielmehr sind sie, da sie ihr äußeres Elektron verloren haben, einfach Wasserstoffkerne oder Protonen. Diese wandern mit 500 km in der Sekunde. Hier und da finden wir schwerere Atome, z. B. von Eisen, die mit 70 km in der Sekunde einherschleichen. Jetzt kennt ihr die Geschwindigkeiten und die Überfüllung auf der Straße, und ich will es euch überlassen, euch die Zusammenstöße selbst vorzustellen. Es ist kein Wunder, daß man die Atome mit etwas abgerissenem Elektronengewande oder gar splitternackt antrifft.

Das sind die Bewegungen, die wir schon als diejenigen erwähnt haben, die die räumliche Ausdehnung der Sonne aufrechterhalten. Wir bestimmen die inneren Temperaturen so, daß die entsprechenden Bewegungen gerade genügen, um die Sonne auf ihr beobachtetes Volumen ausgedehnt zu erhalten. Die Berechnung enthält manche Besonderheiten, die hier nicht erwähnt zu werden brauchen; aber eine Angabe ist wesentlich, nämlich das mittlere Gewicht der frei beweglichen Teilchen. Je höher das mittlere Gewicht ist, um so höher ist die berechnete Temperatur. Die Ergebnisse sind ziemlich empfindlich hiergegen, so daß die berechnete innere Temperatur und ganz besonders die berechnete Leuchtkraft sehr falsch ausfallen kann, wenn das mittlere Gewicht nicht recht genau bekannt ist. Wie aber können wir das mittlere Gewicht der Teilchen bestimmen, da wir ja die chemische Zusammensetzung des Stoffes im Innern nicht kennen? Hier spielt die Ionisation der Atome eine sehr wichtige Rolle. Wir können dies am besten durch eine Tabelle für eine Anzahl ausgewählter Elemente zeigen.

Element	Zahl der äußeren Elektronen	Atomgewicht	Mittleres Gewicht der Teilchen
Lithium	3	7	1,75
Sauerstoff	8	16	1,78
Kalzium	20	40	1,91
Eisen	26	56	2,07
Silber	47	108	2,25
Gold	79	197	2,46

Wenn z. B. die Sonne vollständig aus Sauerstoff bestünde, und wenn es keine Ionisation gäbe, so wäre das mittlere Gewicht der Teilchen gleich dem Atomgewicht des Sauerstoffs (16); aber die Ionisation spaltet jedes Atom in neun Teilchen, — acht Elektronen und einen Kern —, und das mittlere Gewicht beträgt daher $\frac{16}{9}$, oder 1,78. Der wichtige Zug ist die ungefähre Konstanz des mittleren Gewichts, wie sie die letzte Spalte der Tabelle zeigt. Es kommt kaum darauf an, welches Element von Lithium aufwärts oder was für eine Mischung von Elementen wir wählen; das mittlere Gewicht liegt immer in der Nähe von 2. Wie anders wäre das ohne Ionisation! Wir hätten dann einen Spielraum von 7 bis 197 gehabt statt des Spielraumes von 1,7 bis 2,5, und ohne eine genaue Kenntnis von der Zusammensetzung des Sternes wären wir dann nicht weit gekommen.

Es sieht fast so aus, als habe der Natur besonders daran gelegen, unsere Schwierigkeiten zu beheben, denn die Geringfügigkeit des Anwachsens in der letzten Spalte der Tabelle ist ein wahres Glück. Wenn die Sonne aus irgendeinem Zufall aus Gold besteht, so ist ihre Innentemperatur ein wenig höher als wenn sie aus Sauerstoff besteht (entsprechend dem Unterschied von 1,78 und 2,46). Aber wir sind nicht so sehr an dem genauen Wert der Innentemperatur interessiert als an dem Strom von Strahlung durch den Stern, den sie verursacht. Bei gleicher Masse leistet Gold dem Durchgang von Röntgenstrahlen einen größeren Widerstand als Sauerstoff, und das hebt den Einfluß der höheren Temperatur ziemlich genau wieder auf. Kurz, wenn wir die Leuchtkraft eines Sternes aus seiner Masse und seinem Radius berechnen, so ergibt sich praktisch das gleiche, ob nun das Material Sauerstoff oder Gold oder irgendein anderes Element in den Grenzen der obigen Tabelle ist.

Wasserstoff aber bildet eine Ausnahme. Das Wasserstoffatom vom Atomgewicht 1 zerbricht in zwei Teilchen, ein Proton und ein Elektron, so daß das mittlere Gewicht $\frac{1}{2}$ ist. Diese Abweichung vom Normalwert 2 ist zu groß, um übersehen zu werden. Besteht ein großer Teil der Sternmaterie aus Wasserstoff, so ist die Innentemperatur merklich niedriger, und die berechnete Leuchtkraft wird beträchtlich herabgesetzt. Allgemein gesagt müssen wir im Innern eines Sternes zwei Arten von Materie unterscheiden, nämlich Wasserstoff und Nicht-Wasserstoff.

Ich glaube, daß der besonders wichtige Wandel in der Theorie des Sterninnern in den letzten sieben Jahren in der Erkenntnis

besteht, daß Wasserstoff in großer Fülle vorhanden ist*. Ihr könnt z. B. in meinem Buch „Sterne und Atome“ (1927, deutsch 1928) noch lesen, daß die Schlüsse unter dem Vorbehalt gezogen sind, daß der Betrag an Wasserstoff nicht überragend groß ist (S. 22 u. 36). Wir glauben jetzt, daß dieser Vorbehalt nicht zutrifft. Man wußte seit zehn Jahren, daß (unter der damals üblichen Annahme, daß das Material aus Nicht-Wasserstoff besteht) die berechneten Leuchtkräfte der Sterne systematisch zu hoch ausfallen, und daß dieser Widerspruch behoben werden kann, wenn man eine genügende Menge Wasserstoff zuläßt. Man könnte vielleicht meinen, daß die Erklärung des Widerspruchs mit Hilfe des Wasserstoffes damals hätte aufgegriffen werden können. Aber bald danach lag die Atomphysik in den Geburtswehen einer Umwälzung, indem die ältere Theorie durch die Wellenmechanik ersetzt wurde; und bevor nicht das Absorptionsgesetz der Röntgenstrahlen auf Grund der neuen Theorie neu untersucht war, stand es nicht fest, ob der Widerspruch nicht aus dieser Quelle käme. Schrittweise scheinen alle Zweifel geklärt zu sein, und wir sind offenbar genötigt, die Erklärung durch den Wasserstoff gelten zu lassen. Es hat sich überdies auch aus der Deutung der spektroskopischen Beobachtungen ergeben, daß sich an der Oberfläche eines Sternes außerordentlich viel Wasserstoff befindet.

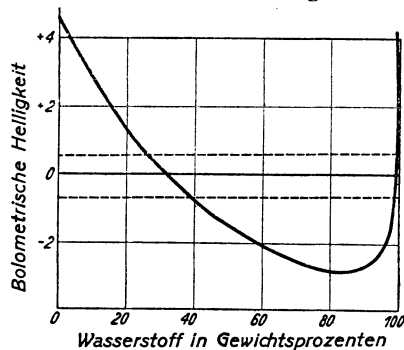
Doch es war in der Beweisführung noch ein zweiter Schritt nötig. Als das leichteste Element konnte der Wasserstoff vielleicht in die äußeren Schichten eines Sternes diffundieren; träte das aber zu, so würde er nicht die Rolle spielen, die er spielen muß, indem er die Temperaturen im tiefsten Innern herabsetzt. Bevor dieser Einwand nicht widerlegt war, konnte man nicht dafür einstehen, daß ein Überfluß an Wasserstoff den Widerspruch zwischen der berechneten und der beobachteten Leuchtkraft beseitigen würde. Wir wissen jetzt, daß der allmählichen Diffusion des Wasserstoffes an die Oberfläche eine ständige Durchmischung der Sternmaterie entgegenwirkt. Die frühere Theorie der Konvektionsströme im Innern hat man aufgegeben; aber man hat erkannt, daß die Rotation des Sternes eine aufwärts und abwärts gerichtete Kreisströmung verursachen muß, die zwar äußerst langsam erfolgt, aber die Sternmaterie schneller durchmischt, als der Wasserstoff seinen Weg zur Oberfläche zurücklegen kann. Man kann daher annehmen, daß der

* B. Strömgren, ZS. f. Astrophysik 4, S. 118, 1932; A. S. Eddington, Monthl. Not. of the R. A. S. Bd. 92, S. 471, 1932.

Stern ziemlich durch sein ganzes Inneres von gleichartiger Beschaffenheit ist *.

Es scheint jetzt möglich, den Betrag an Wasserstoff in einem Stern recht zuverlässig zu bestimmen, wenn wir seine Masse, seine Leuchtkraft und, wenigstens ungefähr, seinen Radius kennen. Wir finden dann, daß es nur eine Möglichkeit dafür gibt, daß eine solche Masse den beobachteten Betrag an Licht aussendet, nämlich er muß aus 30 % Wasserstoff und 70 % Nicht-Wasserstoff bestehen oder wie es sich sonst etwa aus der Berechnung ergibt. Das bezieht sich auf die Zusammensetzung des Innern — nicht auf irgendeinen sichtbaren Bereich —, und es ist beachtlich, daß es eine Möglichkeit gibt, etwas Tatsächliches über die chemische Zusammensetzung eines so unzugänglichen Gegenstandes zu entdecken.

Das zu dieser Bestimmung benutzte Verfahren wird durch die Abbildung erläutert. Die Kurve stellt die berechnete Helligkeit der Sonne (genauer ihre bolometrische Helligkeit) in Abhängigkeit von dem angenommenen Gewichtsanteil des Wasserstoffes an ihrer Gesamt-



Theoretische Helligkeit der Sonne bei verschiedenem Wasserstoffgehalt

masse dar. Die ausgezogene horizontale Gerade ist die beobachtete Helligkeit. Ihre Schnittpunkte mit der Kurve, in denen Beobachtung und Berechnung übereinstimmen, entsprechen also möglichen Bruchteilen an Wasserstoff in der Sonne. Es gibt zwei Schnittpunkte, einen bei 33 %, einen zweiten bei 99,5 %. Der erste Wert sieht wahrscheinlicher aus, besonders wenn man die entsprechenden Ergebnisse für andere Sterne mit heranzieht; einige Astronomen treten aber für die zweite Lösung ein, die die Sterne als Wasserstoffkugeln darstellt, die nur Spuren der übrigen Elemente enthalten. Die zweite Lösung fällt aber, wenn die Wärme des Sternes durch die Umwandlung von Wasserstoff in andere Elemente aufrechterhalten wird (S.158), denn dann würde

* Diese Behauptung soll nicht für die äußersten Schichten gelten, in denen die Bedingungen von den typischen Bedingungen des Innern sehr verschieden sind. Demnach dürfen wir nicht annehmen, daß die gleichförmige innere Zusammensetzung diejenige ist, die wir durch spektroskopische Untersuchung der Oberfläche ermitteln.

die Sonne während des vergangenen Teils ihrer Geschichte mehr als 0,5 % ihres Wasserstoffes umgesetzt haben müssen.

Die Abbildung zeigt ferner zwei gestrichelte horizontale Geraden. Diese bezeichnen die Grenzen der Unsicherheit der Berechnung, die davon herrührt, daß wir nicht wissen, wie die inneratomaren Quellen der Sonnenenergie im Innern verteilt sind. Sind sie lediglich auf den innersten Kern beschränkt, so müssen wir die Schnittpunkte mit der oberen gestrichelten Geraden wählen; wird aber die subatomare Energie, ohne Rücksicht auf die Temperatur, gleichmäßig überall innerhalb der Sonne frei, so gilt die untere gestrichelte Gerade. Es ist unwahrscheinlich, daß die Wirklichkeit einem dieser beiden Grenzfälle nahe liegt, und daher ist die aus dieser Frage entstehende Unsicherheit nicht ernst.

Ein Verhältnis von $\frac{1}{3}$ Wasserstoff zu $\frac{2}{3}$ Nicht-Wasserstoff* scheint für die meisten untersuchten Sterne gut zu passen. Einiges deutet darauf hin, daß Sterne von sehr großer Masse noch mehr Wasserstoff enthalten. Die Schwierigkeit liegt darin, ausreichend viele Sterne mit gut bekannter Masse zu finden, um diese Fragen befriedigend prüfen zu können. Eines aber scheint klar: Sterne der gleichen Masse enthalten einen bemerkenswert konstanten Bruchteil an Wasserstoff. Diese Konstanz ist schwer zu verstehen.

Wir können nicht zwei Fliegen mit einer Klappe schlagen; und wenn wir den Vergleich der beobachteten und der berechneten Leuchtkraftbeträge dazu benutzen, den (anderweitig nicht bekannten) Bruchteil an Wasserstoff zu berechnen, so dürfen wir nicht behaupten, daß die Übereinstimmung eine strenge Bestätigung der Theorie liefert. Wir haben jedoch einen wertvollen Prüfstein. Es war keineswegs vorweg sicher, daß überhaupt irgendein Bruchteil an Wasserstoff den Beobachtungen genügen würde. Man kann aus der Abbildung erkennen, daß wir, wenn wir den Bruchteil an Wasserstoff nicht kennen, eine Mindestleuchtkraft der Sonne berechnen können, die dem tiefsten Punkt der Kurve entspricht. Es ist sicher eine gute Stütze der Theorie, daß sich die beobachtete Leuchtkraft größer und nicht kleiner ergibt als die von der Theorie vorhergesagte Mindestleuchtkraft, daß sie aber auch nicht so hoch über dieser liegt, daß dieses Kennzeichen trivial wäre. Die gleiche Probe wird auch von anderen Sternen bestanden, die einen weiten Bereich der Leuchtkraft, Masse und Dichte um-

* Infolge der Leichtigkeit des Wasserstoffs gibt das Gewichtsverhältnis kaum ein richtiges Bild von seiner Menge. Das Verhältnis $\frac{1}{3}$ Wasserstoff zu $\frac{2}{3}$ Eisen bedeutet, daß 28 Wasserstoffatome auf ein Eisenatom entfallen.

fassen. Wenn man sich daran erinnert, daß die Mindestleuchtkraft der Sterne ohne Kenntnis ihrer chemischen Zusammensetzung berechnet ist, ohne daß wir wissen, wie ihre Wärme aufrecht erhalten wird, ohne weitere Grundlagen als ihre Masse und eine ungefähre Kenntnis ihres Radius, und nur auf Grund der Eigenschaften der Materie, die unter völlig anderen Bedingungen im Laboratorium ermittelt wurden, dann ist man schon sehr zufrieden, wenn man feststellen kann, daß die wirklichen Leuchtkräfte der Sterne ganz regelmäßig um eine bis zwei Größenklassen über dem Mindestbetrag liegen, den man für sie berechnet.

Das Schicksal hat es nicht gut mit uns gemeint. Nach zehn Jahren des Zweifels schienen wir mit dem aufregenden Element Wasserstoff endlich zu einem befriedigenden Schluß gekommen zu sein. Aber gerade dann mußten die Physiker ein neues Element entdecken, das Neutron, das nicht minder große Schwierigkeiten macht. Im Jahre 1924 mußte ich den Vorbehalt machen: „es sei denn, daß der Stern nicht einen übermäßig großen Bruchteil an Wasserstoff enthält“. Im Jahre 1934 muß ich offenbar den Vorbehalt machen: „es sei denn, daß der Stern keinen ins Gewicht fallenden Betrag an Neutronen enthält“. Das beunruhigende ist, daß Neutronen die Sternmaterie zu einem sehr guten Wärmeleiter machen würden. Bei jedem anderen Stoff kann man den Wärmeaustausch durch Wärmeleitung im Stern gegenüber dem Austausch durch Strahlung vernachlässigen. Aber es wird behauptet, daß 5 % Neutronengas die Leitfähigkeit schon so sehr erhöhen würden, daß man die gesamte Wärmeabgabe des Sternes der Wärmeleitung zuschreiben müßte. Ich zweifle, ob wir bereits genug über das Neutron wissen, um diese Schätzung zu rechtfertigen; aber wir müssen natürlich den neuen Ankömmling ein wenig im Auge behalten.

Unsere Schwierigkeit lag die ganze Zeit darin, einen Stern aufzubauen, der seine innere Wärme ausreichend gut bei sich behalten kann, d. h. der nicht zu hell ist. Wir haben gefunden, daß wir ihn weitgehend aus Wasserstoff aufbauen müssen, um die Temperatur niedrig zu halten. Ich habe mich bemüht, die Wärmestrahlung abzdämmen, aber meine Mühe ist vergebens, wenn sich hinterücks das Neutron einschleicht und die stoffgebundene Wärme entweichen läßt.

Es gibt aber ziemlich wahrscheinlich einen Rettungsanker. Das Neutronengas oder die Neutronenatome treten sehr leicht in Atomkerne ein, und vermutlich werden Neutronen, die in einem Stern

auftreten sollten, sich nur einer kurzen Freiheit erfreuen. Wir dürfen annehmen, daß sie von den anwesenden Atomkernen sehr schnell eingefangen werden, denn das ist einer von den bekannten Atomumwandlungsvorgängen. So darf man hoffen, daß der Stern von freien Neutronen verschont bleiben wird, und daß diese Gefahr von unseren Schlüssen abgewendet werden wird.

IV.

Indem wir wiederum auf die Überschrift der Laneschen Abhandlung Bezug nehmen, merken wir den Ausdruck an: „auf Grund der Hypothese einer gasförmigen Masse“. Lane wußte sehr wohl, daß die mittlere Dichte der Sonne 1,4 mal so groß wie die des Wassers ist; der Vorschlag, den Stoff wie ein Gas zu behandeln, war also ziemlich erstaunlich. Man konnte dem praktischen Astronomen kaum einen Vorwurf machen, wenn er einer Theorie, die sich mit den klaren Tatsachen des Problems solche Freiheiten erlaubte, kaum Beachtung schenkte. Lange nach Lane entdeckten Russel und Hertzsprung, daß es eine Klasse von Sternen gibt, die „Riesensterne“, auf die die Theorie mit Sicherheit angewendet werden kann, weil sie eine so geringe Dichte haben wie ein gewöhnliches Gas. Capella hat z. B. eine mittlere Dichte ungefähr gleich derjenigen der uns umgebenden Luft. Beteigeuze und Antares sind Beispiele für Sterne von viel geringerer Dichte. Nach irdischen Begriffen können wir Beteigeuze als „ein ziemlich hohes Vakuum“ bezeichnen. Würde man die Sonne bis zur Größe von Beteigeuze aufblähen, so würde sie die Erdbahn einschließen, und wir würden in ihrem Innern sein.

Man kam daher zu der Annahme, daß Lanes Theorie nur auf Riesensterne anwendbar sei. Die andere große Gruppe, die „Zwergsterne“, deren Dichten mit denen unserer irdischen festen und flüssigen Stoffe vergleichbar sind, wurde als außerhalb ihres Geltungsbereiches liegend angesehen. Dementsprechend setzen die ausgedehnteren Untersuchungen, die ich beschrieben habe, einschließlich der theoretischen Leuchtkraftberechnung, voraus, daß der Stern aus einem vollkommenen Gase besteht, und so erwartete man auch, daß sie nur für Riesensterne zutreffen. Bei diesen Sternen hängt die Leuchtkraft von der Masse, dem Radius und dem Anteil des Wasserstoffes ab; aber der Radius ist verhältnismäßig unwichtig, weil es sich ergibt, daß eine Änderung des Radius inner-

halb vernünftiger Grenzen das Ergebnis nur wenig beeinflusst. Da die Berücksichtigung des Wasserstoffanteils eine spätere Verfeinerung ist, so stellte sich die Berechnung ursprünglich als eine theoretische Beziehung zwischen der Masse und der Leuchtkraft eines Sternes dar.

Die Beziehung zwischen Masse und Leuchtkraft, das Masse-Leuchtkraft-Gesetz, wurde im Jahre 1924 berechnet, und es zeigte sich, daß die Riesensterne ihr befriedigend gehorchen. Aber die Übereinstimmung ging zu weit. Praktisch jeder Stern stimmte mit der Gleichung überein, — nicht nur die Sterne von geringer Dichte, bei denen man es erwartet hatte, sondern auch die dichten Sterne, bei denen man es nicht erwartet hatte.

Nehmen wir als Beispiel die Sonne. Wenn wir die ziemlich sonderbare Annahme machen, daß ihre Materie zusammendrückbar ist wie ein vollkommenes Gas, so sollte ihre Leuchtkraft diejenige sein, die die Gleichung ergibt. Ist die Materie aber weniger zusammendrückbar, so wird sie selbst etwas zum Gegendruck beitragen und nicht soviel Wärme brauchen, um ihre räumliche Ausdehnung aufrechtzuerhalten. Die Innentemperatur wird deshalb niedriger sein, als angenommen, und es wird nicht soviel Wärme entweichen. Nicht zusammendrückbare Sterne sollten deshalb eine geringere Leuchtkraft haben als sie aus Beziehung zwischen Masse und Leuchtkraft folgt. Finden wir aber, daß ein Stern dieser Beziehung gehorcht, so ist das umgekehrt ein Beweis dafür, daß seine Materie zusammendrückbar ist wie ein vollkommenes Gas.

Die Sonne und andere dichte Sterne gehorchen der für ein vollkommenes Gas berechneten Gleichung. Der klare Schluß ist, daß sie aus vollkommenem Gase bestehen. Irgend etwas im Zustande der Sternmaterie — die extreme Temperatur oder der Druck — muß bewirken, daß ein Stoff von der Dichte des Wassers oder des Eisens einem Druck in der gleichen Weise nachgibt wie ein gewöhnliches Gas.

Die Erklärung war nicht schwer zu finden. Wie kommt es, daß wir Luft zusammendrücken können, daß wir aber Wasser nicht merklich zusammendrücken können? Das kommt daher, daß in der Luft die kleinsten Teilchen — die Moleküle — weit voneinander entfernt sind und daß zwischen ihnen viel leerer Raum ist. Wenn wir also Luft zusammendrücken, so quetschen wir nur ihre Leerheit aus. Aber in Wasser sind die Moleküle praktisch in Berührung miteinander, und es gibt keine Leerheit, die ausgequetscht werden könnte. Bei allen zusammendrückbaren Stoffen

wird die Grenze der Zusammendrückbarkeit dann erreicht, wenn die Moleküle anfangen, sich zu drängeln. Wenn ein Gas mehr und mehr zusammengedrückt wird, kommt ein Augenblick, in dem fast der ganze leere Raum beseitigt ist und die Moleküle zu drängeln beginnen; es hat dann seine charakteristische Zusammendrückbarkeit verloren und ist ein „unvollkommenes Gas“ geworden. In diesem Zustand ist seine Dichte mehr oder weniger die eines gewöhnlichen festen oder flüssigen Stoffes. Das bezieht sich auf unsere irdische Erfahrung. In einem Stern gibt es aber die großen irdischen Atome und Moleküle nicht; die meisten äußeren Elektronen sind ihnen durch Ionisation entrissen. Die leichteren Atome sind zu nackten Kernen von fast unendlich kleinen Abmessungen geworden; die schweren Atome haben einige der dem Kern nächsten Elektronen behalten, die ein Gebilde darstellen, dessen Durchmesser vielleicht $\frac{1}{100}$ des Durchmessers eines vollständigen Atoms ist. Bei der Dichte des Wassers oder der Sonne, wo die vollständigen Atome (wenn es sie gäbe) sich in enger Berührung drängen würden, ist also noch eine Menge Platz zwischen diesen winzigen Gebilden; und ein Gedränge wird nicht eintreten, bevor nicht die Materie auf eine etwa 100 000 mal größere Dichte zusammengedrückt ist. Die Sonnenmaterie ist deshalb von der Grenze ihrer Zusammendrückbarkeit sehr weit entfernt, und es ist daher ganz in der Ordnung, wenn wir die Feststellung machen, daß sie sich wie ein vollkommenes Gas verhält.

Bevor es möglich war, diese Erklärung gelten zu lassen, mußte der Einfluß der elektrischen Ladungen der ionisierten Atome untersucht werden. Es ergab sich, daß der Einfluß gering ist und tatsächlich dahin wirkt, daß der Stoff ein wenig leichter zusammendrückbar wird als ein ideales Gas*. Das klingt paradox, denn

* Dies ist zum Teil eine Frage der Definition eines „vollkommenen“ Gases. Wenn ein ionisiertes Gas bei konstanter Temperatur zusammengedrückt wird, so nimmt die Ionisation ab. Wenn wir die elektrischen Kräfte vernachlässigen, so macht die Verminderung der Ionisation den Druck ein wenig kleiner, als er (bei der gleichen Dichte) gewesen wäre, wenn der Zustand des Gases unverändert geblieben wäre. Wir sollten daher finden, daß, verglichen mit einem idealen Gas von unveränderlicher Beschaffenheit, ein ionisiertes Gas ein wenig leichter zusammendrückbar ist; die gleiche Zunahme der Dichte entspricht einer geringeren Zunahme des Druckes. Die elektrischen Kräfte vermindern die übergroße Zusammendrückbarkeit, lassen den Stoff aber immer noch ein wenig leichter zusammendrückbar sein als ein ideales Gas von unveränderlicher Beschaffenheit.

man könnte glauben, daß es schwieriger sein müßte, Ionen, die sich gegenseitig abstoßen, eng aneinander zu quetschen, als vollständige Atome, die elektrisch neutral sind. Man muß aber daran denken, daß in dem Stoff auch noch die aus ihren Bahnen gerissenen Elektronen anwesend sind, und diese können die Kernladungen ebenso wirksam kompensieren, als wenn sie an die Atome gebunden wären.

Wir werden daher zu dem Schluß geführt, daß unter den in den Sternen herrschenden Bedingungen die Grenze der Zusammendrückbarkeit erst erreicht ist, wenn die Materie vielleicht 10 000 mal dichter ist als irgendein Stoff, den wir auf der Erde kennen. Die eindrucksvollste Bestätigung der Theorie würde es sein, wenn man so dichte Materie tatsächlich irgendwo entdecken würde. Zufällig wußten wir, wo wir danach zu suchen haben. Bei gewissen Sternen — zu jener Zeit waren drei Beispiele bekannt — schien die übliche Methode der Dichtebestimmung aus irgendeinem unerklärlichen Grunde zu versagen. Für den Siriusbegleiter ergab die Theorie die scheinbar ganz unmögliche Dichte von 60 kg auf das Kubikzentimeter oder 60 Tonnen auf 1 Liter. Wenn aber unsere Theorie richtig ist, so ist eine solche Dichte nicht notwendig unmöglich, und die Methode braucht darum nicht versagt zu haben. Aus diesem Grunde nahm W. S. Adams auf der Mount-Wilson-Sternwarte eine Nachprüfung der Abmessungen des Sternes nach einer auf der Einsteinschen Gravitationstheorie beruhenden Methode vor. Seine Ergebnisse, die die gleiche hohe Dichte ergaben, sind seitdem auf der Lick-Sternwarte bestätigt worden. Man nimmt jetzt allgemein an, daß der Siriusbegleiter ein Beispiel eines Sternes mit einer Dichte ist, die 2000 mal größer ist als die des Platins. Eine Zündholzschachtel mit diesem Stoff würde zu ihrer Hebung einen Kran erfordern, denn sie würde etwa 1 Tonne wiegen. Der dichte Stoff liegt in einer solchen Tiefe unter der Oberfläche, daß die darüber lagernde Materie einen ausreichenden Druck ausübt. An den Schichten, die wir tatsächlich sehen, ist nichts Ungewöhnliches.

Die überdichten Sterne sind als weiße Zwerge bekannt. Wahrscheinlich sind sie im Weltraum ziemlich weit verbreitet. Da sie aber eine geringe Leuchtkraft haben, so können wir nur diejenigen entdecken, die uns nahe benachbart sind. Mit Bestimmtheit sind nur drei erkannt, aber mehrere weitere Sterne werden dieser Klasse mit mehr oder weniger großer Sicherheit zugerechnet. Es gibt auch recht starke Gründe für die Annahme, daß die Kerne der planetarischen Nebel weiße Zwerge sind. In diesen Sternen

befindet sich die Materie zu nahe an der Grenze der Zusammendrückbarkeit, als daß sie als ein vollkommenes Gas behandelt werden könnte, und so gehorchen sie der Beziehung zwischen Masse und Leuchtkraft nicht. Da sie vom Standpunkt des praktischen Astronomen eine Ausnahmeklasse von großer Seltenheit bilden, so haben wir im allgemeinen nicht die bei den weißen Zwergen vorherrschenden Bedingungen im Sinn, wenn wir von den Sternen schlechthin sprechen; und man muß daher beachten, daß Aussagen, in denen ich die wichtigsten Züge des Baues der Sterne mitzuteilen versuche, auf die weißen Zwerge nicht immer zutreffen.

V.

Gerade um die Zeit, wo die überdichte Materie in den Sternen entdeckt wurde, lenkte ein wichtiger Fortschritt der Wellenmechanik die Gedanken der theoretischen Physiker in die gleiche Richtung. R. H. Fowler erkannte als erster, daß die weißen Zwerge ein Anwendungsgebiet für die „neue Statistik“ eröffnen, welche nach der Wellenmechanik an die Stelle der klassischen Statistik der gewöhnlichen Gastheorie tritt, wenn die Teilchen sehr dicht liegen. Seine Behandlung der dichten Materie in den weißen Zwergen ist von vielen Forschern weiter entwickelt und ausgedehnt worden. Die Theorie gründet sich hauptsächlich auf das bekannte, als Pauliverbot bezeichnete Gesetz der Quantentheorie. In seiner spezielleren Anwendungsform sagt es aus, daß zwei Elektronen an einem Atom nicht die gleiche Bahn besetzen können (S. 33). Allgemeiner verlangt es, daß zwischen einem Elektron und einem anderen stets ein gewisses Mindestmaß an Unterscheidbarkeit bestehen muß. Bezöge sich die Unterscheidbarkeit nur auf den Ort, so könnten wir den Raum in gleich große Zellen aufteilen, und das Gesetz so aussprechen, daß niemals zwei Elektronen in der gleichen Zelle sein können. Aber die Unterscheidbarkeit bezieht sich auch auf Energie und Impuls. Das liefert sozusagen eine weitere Dimension, in der eine Unterscheidung möglich ist, wenn die Unterscheidung nach dem Ort nicht genügt. In einem groben Bilde können wir uns vorstellen, daß die räumlichen Zellen das Erdgeschoß eines Wolkenkratzers bilden. Es kann nicht zwei Elektronen in der gleichen Erdgeschoßzelle geben, aber eins von ihnen kann die darüber liegende Zelle besetzen, wenn es die Energie besitzt, die der Hebung dorthin entspricht.

Wir stellen uns also vor, daß die Elektronen in einem Wolkenkratzer wohnen, dessen Erdgeschoß dem Raum entspricht. Das Gebäude ist in Zimmer von gleicher Größe eingeteilt, und eine Verordnung der Baupolizei gegen die Überfüllung von Wohnräumen sorgt dafür, daß niemals zwei Elektronen das gleiche Zimmer bewohnen. Die Elektronen bewegen sich und ziehen daher fortgesetzt in ein anderes Zimmer um. Um in ein höheres Stockwerk umzuziehen, braucht ein Elektron zusätzliche Energie, die es aus der in der Materie vorhandenen Strahlung beziehen muß*. Wenn es in ein tieferes Stockwerk hinabsteigt, so gibt es Energie ab. In einem kalten Körper ist beim absoluten Nullpunkt der Temperatur keine Strahlung vorhanden; daher können die Elektronen die Treppe zwar hinab-, aber nicht hinaufsteigen. Im Laufe der Zeit werden sie allmählich alle in das Erdgeschoß hinabkommen, vorausgesetzt, daß dort genug Zimmer vorhanden sind.

Das wesentlich Neue bei der sehr großen Dichte ist, daß dann möglicherweise nicht genug Platz im Erdgeschoß ist, so daß wegen des Platzmangels unten einige Elektronen in den oberen Zimmern bleiben müssen. Auch im gewöhnlichen Zustand geringer Dichte kann es Elektronen in den höheren Stockwerken geben; aber das ist dann reiner Überschwang der Geister, die Folge eines Überflusses an Energie. Wenn aber die Wohnungsnot im Erdgeschoß anhebt, so wächst der zur Zusammendrückung des Stoffes nötige Druck außerordentlich an, weil er nicht allein die Teilchen dichter packen, sondern sie auch bis in ein Stockwerk heben muß, wo noch Platz für sie ist.

Eine Eigentümlichkeit der Materie in diesem zusammengedrängten, oder wie man meist sagt, entarteten Zustande ist die, daß sie, obgleich sie einen erheblichen Betrag dessen enthält, was wir sonst Wärmeenergie nennen würden, vollkommen kalt ist. Die in die höheren Stockwerke verbannten Elektronen besitzen Energie; wir stellen sie uns so vor, als ob sie sich mit großen Geschwindigkeiten bewegen. Im Gegensatz aber zu den Elektronen, die im nichtentarteten Zustande mit einer entsprechenden Energie begabt sind, können sie ihre Energie nicht verausgaben; sie muß sozusagen auf ein Sperrkonto gelegt werden. Entartete Materie

* Dabei lassen wir den unmittelbaren Energieaustausch zwischen den Elektronen außer acht, durch den das eine sich auf Kosten eines zweiten, absteigenden Elektrons aufwärts bewegt.

besitzt demnach eine große latente Wärme, die für eine Ausstrahlung nicht verfügbar und am Temperatenausgleich nicht beteiligt ist. Die latente Energie kann nur dadurch frei gemacht werden, daß man dem Stoff gestattet, sich auszudehnen und in einen nichtentarteten Zustand überzugehen.

Wir können nicht alle Verästelungen der Theorie mit einem derartig künstlichen Bilde umfassen; aber die Vorstellung eines entarteten Zustandes der Materie, bei dem alle Zustände kleiner Energie besetzt sind, und bei dem jedes Teilchen, das infolge von Zusammendrückung neu hineingenötigt wird, mit einer ausreichenden Energie versorgt werden muß, um einen Zustand höherer Energie einzunehmen, diese Vorstellung spielt in der mathematischen Theorie der dichten Sterne eine große Rolle.

Es erhebt sich die Frage: Bedarf es einer hohen Temperatur, damit die Materie den Zustand der weißen Zwerge erreicht? Angenommen, wir könnten einen genügend hohen Druck ausüben, wäre es dann möglich, kalten irdischen Stoff bis zur tausendfachen Dichte des Platins zusammenzudrücken, oder wäre es nötig, die Atome durch eine Temperatur von 10 Millionen Grad erst gänzlich in Stücke zu schlagen? Wir wissen heute, daß Druck allein es tun würde. Die zarte äußere Elektronenschale, die unter der Wirkung der Röntgenstrahlen oder der heftigen Zusammenstöße im Innern eines Sternes brechen kann, kann auch brechen, indem sie unter dem Zwange eines Druckes einfach nachgibt. Das merkwürdigste ist vielleicht, daß die Zusammendrückbarkeit aller Arten von Stoffen — ob nun ihre Dichte die eines Gases oder die eines irdischen festen Körpers oder die des Siriusbegleiters ist —, von einigen leicht verständlichen Ausnahmen abgesehen, weitgehend die gleiche ist. Es gibt zwei Gesichtspunkte, nach denen man die Zusammendrückbarkeit eines Stoffes berechnen kann, je nachdem man vorschreibt, daß die durch die Zusammendrückung erzeugte Wärme abgeführt werden soll oder nicht. Wir finden die größte Ähnlichkeit, wenn wir den zweiten (adiabatischen) Weg einschlagen. Bei einem einatomigen Gase, z. B. Helium, ergibt eine 32 fache Erhöhung des Druckes eine 8 fache Zunahme der Dichte, sofern die durch die Zusammendrückung erzeugte Wärme im Gase verbleibt. Man hat berechnet, daß die dichte Materie des Siriusbegleiters mindestens die gleiche Zusammendrückbarkeit hat.

Warum stehen die irdischen festen und flüssigen Stoffe abseits von der allgemeinen Regel, daß die Materie eine Zusammendrück-

barkeit von der gleichen Größenordnung hat wie Helium? Das ist die oben erwähnte leicht verständliche Ausnahme. Auf längere Sicht ist ein dichter Stoff nicht weniger zusammendrückbar als ein dünner Stoff, nur geht seine Zusammendrückung mehr ruckweise vonstatten. Die Tatsache, daß die irdischen festen und flüssigen Stoffe kaum zusammendrückbar zu sein scheinen, verdanken sie dem Umstand, daß die lächerlich kleinen Drucke, die dem Menschen zur Verfügung stehen, nicht ausreichen, um auch nur den Schwellenwert des ersten Ruckes zu erreichen.

8. Kapitel

INNERATOMARE ENERGIE

Diese Leute leben in einem ewigen Zustande der Unruhe und erfreuen sich keines Augenblicks der Seelenruhe; und ihre Sorgen entspringen aus Ursachen, die die übrigen Sterblichen nur sehr wenig bekümmern. Ihre Besorgnisse sind in verschiedenen Veränderungen begründet, die sie an den Himmelskörpern befürchten. Zum Beispiel . . ., daß die Sonne, die täglich ihre Strahlen spendet, ohne daß sie Nahrung erhält, um sie zu ersetzen, schließlich vollkommen ausgezehrt und vernichtet sein wird. Das aber müßte zur Zerstörung dieser Erde und aller Planeten, die von der Sonne ihr Licht erhalten, führen.

Swift, Gullivers Reisen: Eine Reine nach Laputa.

Eine künstliche Umwandlung der Elemente gelang zuerst Cockcroft und Walton im Jahre 1932 *. Bis dahin hatten wir unser Wissen über das Freiwerden inneratomarer Energie fast ausschließlich aus astrophysikalischen Forschungsergebnissen beziehen müssen. In Bälde werden die nunmehr im Laboratorium erkannten Tatsachen von größtem Wert für die Astronomie sein; wir stehen an der Schwelle großer Fortschritte in der Theorie der Sternentwicklung und anderer Probleme, die von einer Kenntnis von den Quellen der Sternenergie abhängen. Ich möchte aber unseren ersten, hastigen Überlegungen über die neue Lage in dieser Darstellung keinen zu hohen Rang einräumen. Wir müssen abwarten, bis der zur Zeit durch die neuen Versuche erregte Sturm sich ein wenig gelegt hat. Ich will lieber die Fortschritte darstellen, die die Astronomie in dieser Frage aus eigener Kraft hat machen können, und mir die Frage, in wie weit ihre Ergebnisse durch die neuen Entdeckungen im Laboratorium gestützt werden, für den Schluß dieses Kapitels aufsparen. Es wäre verfrüht, zu behaupten, daß die astronomischen Schlüsse vollständig bestätigt werden; aber sie scheinen mit der heutigen Richtung der Physik übereinzustimmen, und der Widerstand, dem sie lange begegneten, ist erloschen.

* Die Umwandlung erfolgt durch eine Beschießung der Kerne mit sehr schnellen Teilchen. Unter einer künstlichen Umwandlung verstehen wir hier eine solche, bei der die Garbe von auftreffenden Teilchen künstlich erzeugt wird. Eine ganze Reihe von Jahren früher hat Rutherford Umwandlungen bereits halbkünstlich hervorgerufen, indem er die sehr schnellen Teilchen benutzte, die von radioaktiven Stoffen ausgeschleudert werden.

In diesem Sinne stellen die Abschnitte I bis III den Stand der Frage bis Ende 1932 dar *. Das erlaubt uns, im Abschnitt IV die neuen experimentellen Erfahrungen über die Umwandlungen der Atomkerne als ganz unabhängige Belege einzuführen, die sich auf die gleiche Frage beziehen. Insoweit es sich (jetzt oder künftig) ergibt, daß sie zu den gleichen Schlüssen führen, bilden sie eine willkommene Stütze der allgemeinen Gedankengänge und Methoden, die bei der Erforschung des Baues der Sterne angewandt werden.

I.

Ich werde euch jetzt mit der Vision eines ungeheuren Energievorrates verblüffen, eines Vorrates, der die ausschweifendsten Wünsche des Ingenieurs weit übersteigt — so unerschöpflicher Bezugsquellen, daß wir uns jedes Gedankens an ein sparsames Umgehen mit Betriebs- oder Brennstoffen völlig entschlagen dürfen. Wir brauchen nicht weit zu reisen, um dieses Land der Verheißung, dieses Paradies der Energie zu finden; die Energie, die ich meine, ist in jedem Gegenstand, den wir sehen oder berühren, in Hülle und Fülle enthalten. Nur ist sie so wohl verwahrt, daß sie sich, bei allem, was sie uns Gutes tun könnte, ebenso gut auf dem entferntesten Stern befinden könnte — es sei denn, daß wir den Schlüssel zum Schloß finden können. Wir wissen sehr wohl, daß die Speisekammer zugeschlossen ist, aber ein unwiderstehlicher Zwang treibt uns, durch das Schlüsselloch zu gucken, genau wie ein Kind, das weiß, wo der Honigtopf steht.

Wir bauen ein großes Kraftwerk, etwa mit einer Leistung von 100 000 Kilowatt, und statten es mit Ladeplätzen und Eisenbahnanschluß aus, um eine Ladung Betriebsstoff nach der anderen zur Fütterung des Untiers heranzuschaffen. Ich sehe im Geiste, daß diese Einrichtungen zur Versorgung mit Betriebsstoff eines Tages überflüssig sein werden; statt daß wir den Hunger der Maschine mit Leckerbissen wie Kohle und Öl stillen, werden wir

* Um mir die Gedankengänge jener Zeit möglichst gut wieder zu gegenwärtigen, habe ich mich in diesen Abschnitten möglichst eng an den Wortlaut eines Vortrages angeschlossen, den ich im Jahre 1930 vor der Weltkraftkonferenz in Berlin gehalten habe. Ich habe dabei diejenigen Teile ausgelassen oder gekürzt, die nur Ausführungen wiederholen würden, die an anderer Stelle dieses Buches zu finden sind, und ich habe nur diejenigen kleinen Änderungen angebracht, die nötig waren, um die astronomischen Angaben dem heutigen Stande anzupassen.

ihr eine einfache Kost von inneratomarer Energie verordnen. Wenn dieser Tag je erscheinen sollte, so werden die Lastkähne, die Güterwagen und Loren, die Kräne verschwinden, und der Jahresbedarf an Betriebsstoff für das Kraftwerk wird in einer Teetasse serviert werden, nämlich in Gestalt von 30 g Wasser — oder 30 g von irgend etwas anderem, wie es einem gerade in die Hände fällt.

Ich habe dies eine Vision genannt. Aber für den Astronomen bedeutet es sehr viel mehr als einen ausschweifenden Flug theoretischer Gedanken. Wir blicken zum Himmel auf, und unser Fernrohr zeigt uns tausend Millionen Sterne. Ein jeder von ihnen ist ein himmlischer Ofen, der ganz augenscheinlich des Gesetzes spottet, das unseren irdischen Unternehmungen Fesseln anlegt, — nämlich des Gesetzes, daß dein Ofen ausgeht, wenn du ihn nicht ständig nachfüllst. Geologische, physikalische, biologische Gründe sprechen mit Sicherheit dafür, daß die Sonne die Erde seit mehr als tausend Millionen Jahren erwärmt; aber die zuerst von Kelvin angestellte Berechnung, nach der die Sonnenwärme für höchstens zwanzig Millionen Jahre ausgereicht haben kann, wenn sie nicht aus einem geheimen Energievorrat gespeist wird, von dessen Art man zu jener Zeit keine Vorstellung hatte —, diese Berechnung steht auch heute noch unanfechtbar da. Nach allen sonst geltenden Regeln hätte das Sternenall, das wir im hellen Lichte strahlen sehen, schon seit langer Zeit kalt und tot sein müssen. Keine der Energiequellen, die unsere heutige Zivilisation sich zunutze macht, könnte es länger als einen kleinen Bruchteil der Zeit am Leben erhalten haben, während derer es nach allem, was wir wissen, bestanden hat. Es scheint daher ziemlich klar, daß das „Glas-Wasser-Verfahren“ in den Sternen tatsächlich in Betrieb ist, oder daß es dort wenigstens teilweise Anwendung findet. Für den Ingenieur ist die unbegrenzte Freimachung inneratomarer Energie ein utopischer Traum; für den Physiker ist sie eine amüsante Gedankenspielerlei; aber für den Astronomen ist sie eine allgemein verbreitete und wohlbekannte Erscheinung, die zu erforschen ihm obliegt.

Als Astronomen haben wir das Dasein von Quellen inneratomarer Energie nicht nur einfach zur Kenntnis zu nehmen; wir müssen Beobachtungen darüber anstellen, wie sie frei wird, indem wir nämlich untersuchen, wie sich der freiwerdende Betrag an inneratomarer Energie mit der Temperatur, der Dichte oder dem Alter des betreffenden Stoffes ändert. Wir müssen auch unter-

suchen, wie die Zufuhr geregelt wird, so daß ein auf diese Weise mit Wärme gespeister Stern nicht in tausend Stücke zerrissen oder in gewaltsame Schwingungen versetzt wird. Auf diese Weise hat man einige allgemeine Gesetze erkannt. Zwar bilden sie nur unzusammenhängende Bruchstücke eines vollständigen Schemas. Aber ich muß betonen, daß die Erforschung der inneratomaren Energie sich uns im normalen Fortgang der astronomischen Forschung aufgedrängt hat als etwas, ohne das wir keinerlei brauchbare Schlüsse über die Entwicklung und das allgemeine Verhalten der Sterne ziehen können. Wie viele Zweige der Forschung, die sich in schneller Entwicklung befinden, so ist auch dieser Zweig noch in einem unordentlichen und unbefriedigenden Zustande.

Während ich betone, daß dies ein Gegenstand der praktischen Arbeit der Astronomen ist, behaupte ich nicht, daß es für den Ingenieur mehr sein könnte als ein Traum für müßige Stunden. Ich komme um den Schluß nicht herum, daß inneratomare Energie der Brennstoff ist, der in den himmlischen Öfen verheizt wird; aber es wäre unrecht, die trügerische Hoffnung zu erwecken, daß der Astronom gleich Prometheus das himmlische Feuer stehlen und dem Menschen dienstbar machen könnte. Emersons Mahnung: „Hängt euren Wagen an die Sterne“ kann von unseren Verkehrsfachleuten nicht wörtlich befolgt werden.

Ich habe die praktische Nutzbarmachung inneratomarer Energie eine trügerische Hoffnung genannt, die zu ermutigen unrecht wäre; aber bei dem jetzigen Zustande der Welt ist sie eher eine Drohung, die man nicht verkleinern darf, wenn man nicht eine schwere Verantwortung auf sich laden will. Man kann nicht leugnen, daß für eine menschliche Gesellschaft, die Mangel schaffen muß, um ihre Glieder vor Hungersnot zu bewahren, für die Überfluß ein Unglück ist, und für die unerschöpfliche Energie unerschöpfliche Möglichkeiten für Krieg und Zerstörung bedeutet —, daß für eine solche menschliche Gesellschaft eine dunkle Wolke am fernen Horizont erscheint, obgleich sie vorläufig noch nicht größer ist als eines Menschen Hand.

II.

Bevor wir endgültig den Schluß ziehen, daß die Sterne inneratomare Energie verwerten, muß noch eine Vorfrage geklärt werden. Könnte es nicht so sein, daß ein Stern von außen her die Energie einfängt, die zur Aufrechterhaltung seiner Strahlung nötig ist? Man hat gelegentlich vermutet, daß die Sonne durch hinein-

stürzende Meteore warm gehalten wird; dann wieder, daß sie kosmische Ultrastrahlung oder noch subtilere Energiestrahlungen einfängt, die den Raum durchheilen. Kurz gesagt handelt es sich um die Frage: Lebt ein Stern wie eine Windmühle von äußerer Energie oder enthält er aufgespeicherte Energie wie eine Akkumulatorenbatterie? Ich glaube, daß man von allen Theorien, die eine äußere Energiequelle fordern, absehen kann, weil sie das Wesen des Problems verkennen. Was aufrechterhalten werden muß, ist die Temperatur von einigen Millionen Grad in den inneren Bezirken, und das erfordert die Erzeugung von Wärme tief im Innern. Meteore und kosmische Strahlen können nur dazu dienen, die Oberfläche warm zu erhalten. Das nützt uns gar nichts. Denn wenn die Sonnenoberfläche auf 6000° erhalten würde, so würde das den Energiestrom aus dem ungeheuer heißen Innern nicht aufhalten, und das ganze Innere würde sich sehr schnell auf die Temperatur der Oberfläche abkühlen. Wir haben gesehen, daß die innere Wärme nötig ist, um das beobachtete Volumen der Sonne aufrechtzuerhalten. Das Problem der Aufrechterhaltung der Sonnenstrahlung ist also untrennbar von dem allgemeineren Problem der Aufrechterhaltung des Volumens und anderer Merkmale der Sonne. Wir können das Innere des Sterns nur dann auf einer Temperatur von der Größenordnung von 10 Millionen Grad halten, wenn wir für eine Energiequelle tief im Inneren sorgen. So muß denn wohl der Stern in seinem Inneren den Betriebsstoff enthalten, mit dem er für sein ganzes Leben auskommen soll.

Der gesamte, im Innern der Sonne enthaltene Energiebetrag, ist leicht zu berechnen. Einstein hat gezeigt, daß zwischen Masse und Energie eine strenge Äquivalenz besteht, derart, daß die Masse 1 g eine Energie von $9 \cdot 10^{20}$ erg darstellt. (Die Zahl $9 \cdot 10^{20}$ ist das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit, $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec.) Wir brauchen nur mit Hilfe dieses Faktors die Masse der Sonne, $2 \cdot 10^{33}$ g, in erg umzurechnen; das Ergebnis, $1,8 \cdot 10^{54}$ erg, ist der gesamte Energievorrat der Sonne. Wir wissen durch die Beobachtung, daß die Sonne jährlich $1,2 \cdot 10^{41}$ erg verausgabt, die sie als Licht und Wärme in den Raum strahlt; demnach entspricht der ganze Vorrat dem Bedarf für genau 15 Billionen ($1,5 \cdot 10^{13}$) Jahre. Indem wir von den anderweitig bekannten Energiequellen zu diesem inneratomaren Energievorrat übergehen, verlängern wir die mögliche Lebensdauer der Sonne etwa auf das Millionenfache.

Das heißt nun nicht etwa, daß die Sonne 15 Billionen Jahre bestehen und dann verlöschen wird; ganz so einfach ist die Sache

nicht. Die Energie, die wir jetzt betrachten, ist Bildungsenergie der Materie; und wenn man Energie wegnimmt, die für den Bestand der Materie wesentlich ist, so wird natürlich die Materie zerbröckeln; sie wird sozusagen verzehrt. Und indem der Energievorrat der Sonne allmählich verschwindet, verschwindet damit allmählich auch die Materie oder Masse. Nach der Beziehung zwischen Masse und Leuchtkraft (S. 145) entspricht der kleineren Masse ein kleinerer Betrag an Strahlung. Wir müssen also die Tatsache hinnehmen, daß die Sonne auf ihre älteren Tage weniger freigiebig sein wird; und so kann sich ihr Leben als verfallender Stern weit länger als 15 Billionen Jahre hinziehen.

Auf ähnliche Weise können wir zeigen, daß die Sonne heute nicht älter als 5 Billionen Jahre sein kann. Große Massen strahlen sehr stark, und so groß auch ihre Masse einst gewesen sein mag, innerhalb von 5 Billionen Jahren hätte sie sich durch Strahlung auf ihre jetzige Masse heruntergewirtschaftet. Ich habe nie von einer Theorie gehört, die für die Sonne eine längere Vergangenheit verlangt hätte als diese; sollte aber doch jemand eine längere Dauer vorschlagen, so würden sich die Astronomen wohl mit Recht auf das äußerste dagegen wehren. Es ist wahrscheinlicher, daß wir uns mit einer Dauer der Sonnenvergangenheit werden begnügen müssen, die weit unter diesem geschätzten Höchstwert liegt.

Wir haben hier einen sehr wirksamen Freimachungsvorgang inneratomarer Energie angenommen, der mit einem völligen Aufgehen der Materie in Strahlung verbunden ist. Damit Materie verschwinden kann, muß man annehmen, daß die Protonen und Elektronen, aus denen sie besteht, die Fähigkeit haben, einander gegenseitig zu vernichten. Das Proton trägt eine positive, das Elektron eine negative Ladungseinheit, und es kann sein, daß zwei solche entgegengesetzt geladene Teilchen unter bestimmten Umständen miteinander verschmelzen und sich gegenseitig auslöschen können. Der Gedanke ist der, daß, wenn ein Proton und ein Elektron zusammenfließen und einander aufheben, nichts übrig bleibt, als ein Spritzer im Äther, der die jetzt frei gewordene Bildungsenergie darstellt. Der Spritzer breitet sich als elektromagnetische Welle aus, die zerstreut und absorbiert wird, bis sie in die gewöhnliche Wärme eines Sternes umgewandelt ist. Man kann sich zwar einen solchen Vorgang leicht denken, aber es ist eine offene Frage, ob er in der Natur wirklich vorkommt. Abgesehen von einem mittelbaren und heute sehr unwahrscheinlichen Schluß aus den Erscheinungen der kosmischen Strahlung, liefert die

Beobachtung keinerlei Beweise für sein Auftreten. Es kann auch nicht behauptet werden, daß eine theoretische Notwendigkeit für sein Auftreten vorliegt. Er ist nichts als eine Vermutung. Andererseits bin ich nicht sicher, daß es gewagter ist, anzunehmen, daß Protonen und Elektronen auf diese Weise ihrem Dasein ein Ende setzen können, als wenn man sich die gegenteilige Ansicht zu eigen macht, daß sie unsterblich sind *.

Es gibt eine weniger drastische Möglichkeit. Es ist denkbar, daß die Materie einen Teil der in ihr enthaltenen Energie freigibt, ohne zum völligen Selbstmord zu schreiten. Dieser zweite denkbare Vorgang ist die Umwandlung der Elemente. Durch Umordnung der Protonen und Elektronen in den Atomkernen kann ein sehr ansehnlicher Betrag an Energie geliefert werden. Das bekannteste Beispiel einer solchen Umwandlung ist die Radioaktivität. Aber keine der von selbst ablaufenden radioaktiven Umwandlungen — Uran in Radium, Radium in Blei usw. — liefert auch nur annähernd genug Energie für unseren Zweck. Überdies scheint es ziemlich sicher, daß ein Stern ein Ort ist, an dem radioaktive Elemente aufgebaut werden, kein Ort, an dem sie zerfallen. Wenn die Energie der Radioaktivität überhaupt mitspielt, so muß sie für den Stern eher als eine Ursache für einen Verlust als für einen Gewinn angesehen werden. Denn wahrscheinlich verläuft die Umwandlung dort in umgekehrter Richtung wie auf der Erde.

Diejenige Umwandlung, die eine genügende Energie zur Erhaltung der Wärme der Sterne zu liefern vermöchte, ist der Aufbau zusammengesetzter Elemente aus Wasserstoff, insbesondere die Bildung von Helium aus Wasserstoff. Ein Wasserstoffatom besteht aus einem Proton und einem Elektron; ein Heliumatom besteht aus vier Protonen und vier Elektronen, von denen die vier Protonen und zwei Elektronen eng miteinander verbunden sind und so den Heliumkern bilden. Vier Wasserstoffatome liefern also genau das Material für ein Heliumatom. Obgleich aber das Material das gleiche ist, ist die Masse nicht genau die gleiche; das Helium ist um etwa $\frac{1}{140}$ leichter. Nach dem Einsteinschen Gesetz von der Äquivalenz von Masse und Energie ist dieser Massendefekt ein Maß für die Energie, die frei werden muß, wenn Wasserstoff sich in Helium verwandelt.

Man sieht also, daß zwei Wege denkbar sind, auf denen man aus vier Wasserstoffatomen Energie beziehen kann. Entweder können sie völlig verschwinden, indem je ein Elektron ein Proton

* Vgl. indessen S. 172

vernichtet; in diesem Fall geht die ganze Masse verloren, und die gesamte Bildungsenergie wird frei, um den Sternofen in Glut zu halten. Oder sie können sich anders anordnen und ein Heliumatom bilden; in diesem Fall geht $\frac{1}{140}$ der Masse verloren und $\frac{1}{140}$ der gesamten Energie wird frei. Wenn Wasserstoff in schwerere Elemente umgewandelt wird, z. B. in Sauerstoff, statt in Helium, so wird noch ein klein wenig mehr Energie frei, aber der Gewinn ist recht dürftig. Dementsprechend ist auch die bei der Umwandlung von Helium in Sauerstoff freiwerdende Energie verhältnismäßig geringfügig. Wenn wir uns unserer früheren Einteilung der Sternmaterie in Wasserstoff und Nicht-Wasserstoff erinnern, so sehen wir, daß die einzige wirklich ergiebige Energiequelle die Verwandlung von Wasserstoff in Nicht-Wasserstoff ist, und diese macht nicht sehr viel weniger als 1 % der Gesamtenergie frei. Wenn wir uns also dahin entscheiden, die Umwandlungstheorie anzunehmen, so müssen wir den Sternofen so einrichten, daß er mit $\frac{1}{100}$ des Brennstoffs in Betrieb gehalten werden kann, der nach der Vernichtungstheorie verfügbar wäre. Dies reduziert alle Zeiten im Verhältnis 1 : 100 und verkürzt die Höchstdauer des Lebens der Sonne von der Geburt bis zum Tode auf 150 000 Millionen Jahre. Ich darf wohl sagen, daß wir uns damit begnügen können. Dieses Zugeständnis ist großmütiger als es nach den Ergebnissen des 10. Kapitels zu sein brauchte.

Ich habe von der Bildung von Helium und anderen Elementen aus Wasserstoff wie von einem gesicherten Sachverhalt gesprochen. Es ist wahr, daß bis jetzt (1932) eine solche Umwandlung noch niemandem gelungen ist; aber dieser Einwand scheint kaum stichhaltig. Es ist eine gesicherte Tatsache, daß wir in der Natur Zusammenballungen von Protonen und Elektronen in der besonderen Form vorfinden, die man Helium nennt, und wir stellen uns lediglich auf den üblichen naturwissenschaftlichen Standpunkt, wenn wir die Ansicht vertreten, daß ein solches Gebilde auf Grund physikalischer Gesetze entsteht und nicht durch einen besonderen Schöpfungsakt. Die Entwicklung unserer gewöhnlichen Atome aus den elektrisch geladenen Teilchen, von denen sie gebildet werden, muß irgendwo und irgendwie einmal stattgefunden haben. Welcher Ort ist hierfür mehr geeignet als das Innere eines Sternes, wo die durch den Vorgang freigemachte Energie dazu dienen kann, die Wärme des Sternes aufrechtzuerhalten? Wüßtet ihr einen wahrscheinlicheren Ort zu ersinnen für die Werkstatt der Natur, in der sie einen vielgestaltigen Werkstoff aus dem primitiven Rohstoff von

Protonen und Elektronen erzeugt? Ich bin oft Kritikern begegnet, die behaupten, daß die Sterne für diesen Zweck nicht heiß genug seien. Einmal habe ich mich soweit vergessen, daß ich dem Kritiker sagte, er solle sich aufmachen und einen heißeren Ort suchen.

Ich will zu erklären versuchen, warum es für die Astronomie so sehr viel ausmacht, welche der zwei möglichen Quellen inneratomarer Energie am Werk ist. Wir wollen uns zuerst auf den Standpunkt der weniger drastischen Umwandlungshypothese stellen. Dann ist im Höchstfall 1 % des gesamten Energievorrats im Stern für die Aufrechterhaltung seiner Wärme verfügbar. Unser Blick durch das Schlüsselloch zeigte uns 100 Honigtöpfe auf den Borten; aber es hat sich herausgestellt, daß 99 von ihnen für den Verzehr nicht geeignet sind. Sobald ein Stern zu scheinen beginnt, fängt er an, den zum Genuß freigegebenen Topf zu leeren, wobei er den entsprechenden Betrag an Masse verliert. Wenn er 1 % seiner ursprünglichen Masse abgestrahlt hat, ist der Vorrat erschöpft; der Ofen muß ausgehen, der Stern erkalten. Demnach bleibt die Masse des Sternes während der ganzen Dauer seiner Geschichte innerhalb von etwa 1 % konstant. Vergleicht damit die Hypothese der Vernichtung von Protonen und Elektronen. Nuncmehr kann die ganze Masse aufgebraucht werden. Das Erlöschen des Ofens ist vertagt, der Stern kann es erleben, daß er 50 %, 75 %, 90 % der Masse abstrahlt, mit der er begann. Wenn er als ein Stern von großer Masse ins Leben trat, wird er sich allmählich in einen Stern von kleiner Masse verwandeln. Auf Grund der Beziehung zwischen Masse und Leuchtkraft wird seine Leuchtkraft im gleichen Verhältnis wie seine Masse abnehmen. Es wird eine Entwicklung von großen Sternen in kleine, von hellen Sternen in lichtschwache Sterne vor sich gehen. Es ergeben sich viele interessante astronomische Ausblicke, wenn man die Folgerungen aus dieser Entwicklung zieht. Aber dies fällt alles in sich zusammen, wenn wir die Vernichtungshypothese verwerfen und nur Umwandlungen zulassen. Dann tritt keine ins Gewicht fallende Massenänderung ein, und kleine Sterne unterscheiden sich von großen deshalb, weil sie von Geburt an verschieden waren. Solange wir also keine Entscheidung zwischen den beiden Hypothesen fällen können, gleichen wir Kindern, die sich darüber den Kopf zerbrechen, ob aus Ponys Pferde werden, oder ob Ponys und Pferde immer etwas Verschiedenes gewesen sind.

Es liegt nahe, zu versuchen, durch Beobachtungen festzustellen, ob sich große Sterne in kleinere verwandeln. Es gibt dafür eine

zwar nicht ganz sichere, aber ziemlich unmittelbare Probe. Wir wollen die nagelneuesten Sterne nehmen, die wir finden können, und sehen, was für eine Masse sie haben. Es ist wohl richtig, anzunehmen, daß die erst vor kurzem entstandenen Sterne diejenigen mit geringer Dichte sind. Wir glauben, daß sich die Sterne aus nebelartigem Stoff verdichtet haben, und so sollte das erste Stadium eine gewaltige diffuse Kugel sein, ein Stern wie Beteigeuze und Antares. Wenn wir uns ein Verzeichnis von etwa 300 der diffusesten Sterne vornehmen und auf Grund der Beziehung zwischen Masse und Leuchtkraft aus ihrer Leuchtkraft ihre Masse berechnen, so ergibt sich, daß ihre durchschnittliche Masse 3,6 Sonnenmassen beträgt, und daß $\frac{9}{10}$ von ihnen zwischen der $5\frac{1}{2}$ fachen und der $2\frac{1}{2}$ fachen Sonnenmasse liegen. Daher scheint es, daß die Sterne bei ihrer Geburt selten oder niemals eine so kleine Masse haben wie die Sonne. Nehmen wir andererseits Sterne aller Altersklassen, so gibt es unter ihnen weit mehr Massen unterhalb der Sonnenmasse als oberhalb. Es könnte scheinen, als müßten diese einen großen Teil ihrer ursprünglichen Masse verloren haben, indem sie sie im Laufe von Billionen Jahren abgestrahlt haben, so wie es die Vernichtungshypothese verlangt.

Unglücklicherweise wird dies durch eine andere Tatsache aufgewogen, die dieser Hypothese nicht günstig ist. Wir finden oft Haufen (cluster) von nahe benachbarten Sternen, die augenscheinlich einen gemeinsamen Ursprung haben und etwa zur gleichen Zeit entstanden sein müssen. Ein wohl bekanntes Beispiel sind die Plejaden. Die Theorie verlangt, daß diese gleichaltrigen Sterne etwa die gleiche Masse und Leuchtkraft haben sollten. Denn wenn der Sternhaufen jung ist, so ist nicht genug Zeit verflossen, damit die großen ursprünglichen Massen durch Ausstrahlung bis auf die Masse der Sonne oder weniger gesunken sein können. Ist der Sternhaufen aber alt, so wird die ursprüngliche Spanne zwischen den Massen sich im Laufe der Zeit verkleinert haben, weil die großen Sterne ihre Massen sehr schnell abstrahlen und deshalb dazu neigen, die ihre Massen langsamer abstrahlenden kleineren Sterne einzuholen. Aber das steht in keinerlei Übereinstimmung mit der Erfahrung. In den Plejaden streuen die Sterne über mindestens zehn Größenklassen, und das weist auf eine große Massenverschiedenheit hin. Wir müssen also zulassen, daß, wenigstens bei den Plejaden, kleine Sterne klein geboren und nicht aus großen Sternen entwickelt worden sind. Solche Ausnahmen machen uns sehr mißtrauisch gegen den ganzen Gedanken.

Man könnte noch andere Überlegungen ähnlicher Art anführen, von denen einige der Vernichtungshypothese ziemlich günstig sind, während andere ihr ziemlich widersprechen. Es ist alles sehr wenig schlüssig. Wenn wir die Sterne als Einzelwesen untersuchen, so hat diese Hypothese und die außerordentlich lange Zeitspanne, die sich aus ihr ergibt, trotz mancher Schwierigkeiten vieles für sich. Wenn wir uns aber der Betrachtung von Sternsystemen — Sternhaufen, Milchstraßen — zuwenden, so spricht eigentlich alles und jedes gegen ein so hohes Alter. Man hält es jetzt für sehr unwahrscheinlich, daß wir um mehr als 10 000 Millionen Jahre zurückgehen müssen. Es tut mir leid, daß ich so unschlüssig bin, und daß ich einmal den Anfang der Dinge, so wie sie uns bekannt sind, in eine Zahl von Billionen von Jahren verlege und wenige Seiten später von dieser Zahl zwei oder drei Nullen abstreiche; es hängt aber alles davon ab, in welchem Umfange man den vorliegenden Beweisstücken traut.

Wir werden im 10. Kapitel sehen, daß die schnelle Expansion des Weltalls ganz eindringlich für die kürzere Zeitdauer spricht. Eine weitere Stütze liefert eine Untersuchung der Dynamik unserer eigenen Milchstraße. Man kann zeigen, daß die Rotation und die Verteilung der Sternbewegungen, die wir in unserer Milchstraße antreffen, mit einem genau stationären Zustand des Systems unvereinbar sind; und es scheint, daß die Veränderung und die Zerstreuung in den Raum sich ziemlich schnell vollziehen muß*. Während ein Stern, für sich allein betrachtet, soweit wir es sagen können, ein Ding ist, das mit geringen Veränderungen seit unvorstellbaren Zeiten bestanden haben könnte, haben es die ausgedehnten Systeme — die Sternhaufen, unsere Milchstraße und das ganze übergeordnete System von Milchstraßen — viel eiliger damit, in ihrer Entwicklung weiterzukommen. Sie sind noch nicht bis zum Ebenmaß abgeschliffen und tragen die Anzeichen eines verhältnismäßig jüngeren Ursprungs. Ich erinnere daran, daß „verhältnismäßig jung“ in diesem Zusammenhange etwas von der Größenordnung von 10 000 Millionen Jahren bedeutet, statt der zweiten denkbaren Annahme von 10 000 000 Millionen Jahren.

III.

Wir wollen jetzt auf die Entscheidung zwischen den beiden denkbaren Quellen inneratomarer Energie vorläufig verzichten und

* Dies ist in meiner Halley Lecture, „The Rotation of the Galaxy“ (Oxford 1930) erörtert.

die astronomischen Belege für die Bedingungen betrachten, die ihre Freimachung beherrschen. Auf dieser Seite des Problems scheinen wir über ganz bestimmte Auskünfte zu verfügen, — wenn sie nur nicht so unglaublich wären!

Wenn man einen wirklich großen Energievorrat abzäpfen will, so muß man die Materie bis auf eine Temperatur von etwa 20 Millionen Grad erhitzen. Ich will nicht dafür einstehen, daß 20 Millionen ganz genau die richtige Zahl ist; es können auch 15 Millionen oder noch etwas weniger sein. Aber der wesentliche Punkt ist, daß es eine Temperatur von etwa dieser Größenordnung gibt, bei der die Materie ihre Energie sehr reichlich hergibt, während sie bei einer um 1 bis 2 Millionen Grad tieferen Temperatur praktisch nichts hergibt. Es ist das etwas Ähnliches wie ein Siedepunkt.

Die Sterne werden jetzt in drei Gruppen geordnet, die Riesen, die Hauptgruppe (Hauptast) und die weißen Zwerge. Die Zahl der Riesen ist klein, und sie stellen vermutlich eine frühe und ziemlich schnell vergängliche Entwicklungsstufe dar. Die weißen Zwerge sind wahrscheinlich zahlreich, aber infolge ihrer geringen Helligkeit sind uns nur wenige tatsächlich bekannt. Die überwiegende Mehrzahl der von uns erforschten Sterne gehört dem Hauptast an. Dieser bildet eine stetige Folge, die sich von den hellsten bis zu den schwächsten bekannten Sternen erstreckt. Es zeigt sich, daß die (nach dem im 7. Kapitel besprochenen Verfahren berechnete) Mittelpunktstemperatur vom Anfang bis zum Ende der Reihe praktisch durchweg etwa 20 Millionen Grad beträgt. Am Anfang der Reihe stehen sehr helle und massige Sterne, die 10 000 mal mehr Energie ausstrahlen als die Sonne. Um diese Energieabgabe aufrechtzuerhalten, bedürfen sie eines dauernden Nachschubs an freigemachter inneratomarer Energie im Betrage von 1000 erg auf je 1 g ihrer Substanz in jeder Sekunde. Etwa in der Mitte der Reihe finden wir die Sonne, die 2 erg je Gramm und Sekunde benötigt. Am Ende stehen Sterne, die nur 0,01 erg je Gramm und Sekunde brauchen. Ob nun der erforderliche Betrag 1000 oder 2 oder 0,01 erg je Gramm und Sekunde ist, die Temperatur muß auf jeden Fall 20 Millionen Grad erreichen, um die Energie frei zu machen.

Solange die im Innern frei gewordene inneratomare Energie unter dem Energiebetrage bleibt, der als Strahlung verausgabt wird, muß der Stern sich mehr und mehr zusammenziehen; und wenn er ein gewöhnlicher Stern ist (kein weißer Zwerg), so wird dabei seine

Temperatur zunehmen. Diese Zunahme währt so lange, bis die Bedingungen sich so gestaltet haben, daß der erforderliche Betrag an inneratomarer Energie frei wird. Wenn dieses Gleichgewicht erreicht ist, bleibt der Stern während einer ungeheuer langen Zeit praktisch konstant, und wir sollten erwarten, daß wir die Mehrzahl der Sterne in diesem Zustand antreffen. Nach der Vernichtungshypothese wird die Masse allmählich kleiner, und der Stern wandert langsam den Hauptast abwärts. Nach der Umwandlungshypothese bleibt der Stern in einem stationären Zustande auf dem Hauptast, bis sein Wasserstoff zum größten Teil verbraucht ist; vermutlich wechselt er dann zu den weißen Zwergen über. In jedem Fall leuchtet ein, daß bei etwa 20 Millionen Grad ein sehr schneller Anstieg der Auslösung inneratomarer Energie einsetzen muß, denn Sterne, die einen sehr verschiedenen Energiebedarf haben, erreichen alle ihr Gleichgewicht etwa bei dieser Temperatur.

Ist dies der Schlüssel zur Speisekammer? Gesetzt, wir könnten es fertigbringen, irdische Materie bis auf 20 Millionen Grad aufzuheizen, würden wir ihr dann ihre Bindungsenergie entziehen? Im Vorbeigehen möchte ich bemerken, daß, wenn dies das geeignete Verfahren sein sollte, die Aussichten, daraus ein erfolgreiches Geschäft zu machen, für uns sehr gering sind. Wir würden einen ungeheuren Betrag an Energie darangeben müssen, um die hohe Temperatur aufrechtzuerhalten, während der Strom von inneratomarer Energie nur tropfenweise fließt. Ich glaube aber, daß das kaum der Schlüssel sein kann. Es muß in irgendeiner Beziehung zu dem Problem stehen; aber eine eingehendere Überprüfung der Schwierigkeiten, als ich sie hier vornehmen kann, überzeugt mich davon, daß wir noch sehr viel mehr werden lernen müssen, ehe wir diese astronomischen Ergebnisse in das richtige Blickfeld rücken können. 20 Millionen Grad liegen nicht außerhalb jeder Möglichkeit unserer Laboratorien. Im Cavendish Laboratorium erzeugt Prof. Kapitza für ganz kurze Augenblicke magnetische Felder, deren Energiedichte etwa 1 Million Grad entspricht. Nun, ich erwarte, wie gesagt, nicht, daß die inneratomare Energie wirklich in Strömen fließt; aber auf alle Fälle werde ich dem Laboratorium lieber nicht allzu nahe kommen, wenn der Versuch einmal gemacht wird *.

* Dies wurde geschrieben, als wir noch keine theoretische Kenntnis über die Ursache der kritischen Temperatur hatten und man mit der Möglichkeit rechnen mußte, daß es sich um einen echten „Siedepunkt“ handelt. Es besteht wohl kein Zweifel, daß ein Stoff, der Wasserstoff enthält, z. B. Wasser, hochexplosiv in dem Sinne ist, daß die plötzliche Erzeugung einer aus-

Es gibt noch eine weitere Bedingung für die Freimachung, die für die Astronomie sehr wichtig ist. Die Freimachung inneratomarer Energie muß durch eine Temperaturzunahme gesteigert werden; anderenfalls wird sie sich nicht selbsttätig so regeln, daß der Zustand des Sternes während einer sehr großen Zeitspanne konstant bleibt; denn dann würde die inneratomare Energie den Zweck verfehlen, für den wir sie eingeführt haben. Aber sie darf auch nicht zu schnell mit der Temperatur anwachsen, denn das würde zur Wirkung haben, daß der Stern in Schwingungen gerät. Es ist sehr wahrscheinlich, daß manche Sterne pulsieren, indem sie mit einer Periode von wenigen Stunden oder Tagen wechselweise anschwellen und sich wieder zusammenziehen; es ist dies die als Cepheiden bezeichnete Klasse von veränderlichen Sternen. In der einen Phase der Pulsation ist die Sternmaterie zusammengedrückt und heißer als im zeitlichen Mittel, in der anderen Phase ist sie gedehnt und kälter. Die Zufuhr inneratomarer Energie wird durch die erhöhte Temperatur bei der Zusammendrückung gesteigert und durch die erniedrigte Temperatur bei der Dehnung gedrosselt. Nun ist das genau die Art, wie die Wärmezufuhr einer Dampfmaschine geregelt werden muß, damit die Maschine in Gang kommt; bei der Kompression muß dem Zylinder Wärme zugeführt werden, bei der Expansion muß Wärme abgeführt werden. So wird der Stern zu einer selbsttätig wirkenden Maschine, die ihre eigene Pulsation aufrechtzuerhalten vermag oder die sich sogar auf Grund einer sehr kleinen anfänglichen Störung zu einer starken Pulsation aufschaukeln kann. Die Verlegenheit besteht nicht darin, die Cepheiden zu erklären, sondern zu erklären, warum sie eine Ausnahme und nicht die Regel sind.

Die Pulsation wird von einem gewissen Betrage an Energievergeudung begleitet sein, und so hängt das Auftreten der Pulsation davon ab, ob der beschriebene Maschineneffekt groß genug ist, um die Vergeudung wettzumachen. Wenn der Widerstand zu groß ist, wird die Maschine nicht anlaufen. Wir müssen annehmen, daß auf der Sonne und in den gewöhnlichen Sternen die Maschine nicht stark genug ist, um die Pulsation in Gang zu halten. Dies ist eine der Bedingungen, auf die wir achten müssen, wenn wir die Gesetze

reichend hohen Temperatur inneratomare Energie so schnell freimachen würde, daß die Temperatur aufrechterhalten bliebe und sich wie eine Detonation durch den ganzen Stoff ausbreiten würde; aber es scheint jetzt festzustehen, daß die Detonationstemperatur beträchtlich höher als 20 Millionen Grad ist. (Vgl. Abschnitt IV.)

der Freimachung inneratomarer Energie formulieren. Mit anderen Worten, die Freimachung darf durch einen Temperaturanstieg über die normale Temperatur im Stern nicht allzu stark gesteigert werden. Wir können angenähert berechnen, ein wie schneller Anstieg mit der Temperatur noch zulässig ist.

Dies aber setzt uns in Verlegenheit. Als wir die Temperaturen der verschiedenen Sterne auf dem Hauptast verglichen, haben wir gesehen, daß die Zunahme des Betrages der freigemachten inneratomaren Energie von 0,01 auf 1000 erg je Gramm und Sekunde sich innerhalb einer Temperaturspanne abspielt, die zu klein ist, als daß wir ihren Umfang genauer feststellen könnten, die aber etwa 2 oder 3 Millionen Grad betragen mag. Eine solche Zunahme ist aber viel zu schnell, als daß sie der von uns aufgefundenen neuen Bedingung genügen könnte.

Offenbar ist der einzige Ausweg aus dieser Schwierigkeit die Annahme, daß die anregende Wirkung einer Temperaturzunahme verzögert ist. Es muß ein Verzug — irgendwie zwischen wenigen Tagen bis zu tausend Jahren — zwischen dem Temperaturanstieg und der entsprechenden Energieabgabe liegen. Das heißt, wenn die Temperaturzunahme eintritt, so erfolgt nicht sofort eine Zunahme der erzeugten Energie, sondern es erfolgt die Bildung irgendeines aktiven Stoffes, der zu gegebener Zeit (nach einigen Tagen oder gar Jahren) eine spontane Umwandlung erfährt, die inneratomare Energie frei macht. Ein solcher Verzug würde die Wirkung der schnellen Temperaturänderungen während einer Pulsation weitgehend ausgleichen, denn er macht den Betrag der freigemachten Energie von der mittleren Temperatur während der Verzugsdauer abhängig. Er wird den Stern davor bewahren, in Pulsation zu geraten. Andererseits wird er für die dauernde Anpassung des Betrages der freigemachten Energie an den Betrag der ausgesandten Strahlung nichts ausmachen.

Wir können jetzt die astronomischen Unterlagen für die Freimachung inneratomarer Energie aufzählen:

1. Es erfolgt eine reichliche Freimachung irgendeiner Art von inneratomarer Energie bei einer verhältnismäßig niedrigen Temperatur von der Größenordnung von 20 Millionen Grad oder weniger.

2. Im Gegensatz zur gewöhnlichen Radioaktivität wird sie durch den physikalischen Zustand des Stoffes beeinflusst und steigt mit der Temperatur sehr schnell an.

3. Es besteht ein Verzug zwischen der Temperaturänderung und der entsprechenden Änderung des Betrages der freigemachten Energie. Das bedeutet, daß ein instabiler Stoff gebildet wird, der nach einigen Tagen oder Jahren spontan zerfällt. Dieser nachfolgende Zerfall ist es, bei dem der größere Teil der Energie frei wird.

4. Es gibt keinen schlüssigen Beweis dafür, ob die Energiequelle auf einer Umwandlung von Wasserstoff oder auf einer gegenseitigen Vernichtung von Protonen und Elektronen beruht; aber man ist neuerdings geneigt, der ersten Ansicht den Vorzug zu geben, die zu einer kürzeren Zeitdauer der Entwicklung führt.

IV.

Unter den Physikern bestand im allgemeinen eine große Abneigung gegen die Annahme der Folgerungen 1. und 2. in der vorstehenden Aufzählung. Auch in der Astronomie erhoben sich kritische Stimmen. Man wand immer wieder ein, daß inneratomare Vorgänge (Kernreaktionen) nur durch Temperaturen beeinflusst werden könnten, die tausend- oder gar millionenmal größer sind als die von uns gefundenen Innentemperaturen der Sterne. Das ist der Grund, warum ich 20 Millionen Grad eine „verhältnismäßig niedrige Temperatur“ genannt habe. Während der ganzen letzten 15 Jahre hat man versucht, einen Ausweg zu finden, um einem Stern eine höhere Mittelpunktstemperatur zuschreiben zu können, oder die Sternmaschine mit einer unbeeinflussbaren (radioaktiven) Energiequelle zu betreiben, die von der Temperatur und der Dichte unabhängig ist. Dabei hat man, wie mir scheint, eine oder mehrere wesentliche Bedingungen des Problems außer acht gelassen und die eine Seite des Gegenstandes — das mechanische und thermische Gleichgewicht des Sternes, das von recht gut bekannten physikalischen Gesetzen abhängt — gegenüber Spekulationen über Fragen zurückgesetzt, von denen der Physiker noch weniger weiß als der Astronom.

Nachdem kürzlich die künstliche Umwandlung der Elemente im Laboratorium gelungen war, schlug die Stimmung um, und seitdem werden die astronomisch bestimmten Sterntemperaturen nicht mehr als zu niedrig beanstandet. Die Umwandlung vollzieht sich, indem die Atomkerne einer Beschießung durch verschiedenartige Teilchen — Protonen, Elektronen, Neutronen, Deutonen, Heliumkerne (α -Teilchen) — ausgesetzt werden. Ein gewisser Bruchteil von diesen

trifft den Kern und tritt in ihn ein. Entweder kann das Teilchen einfach im Kern verbleiben, oder sein Eintritt stört das Gleichgewicht des Kernes derart, daß irgendein anderes Teilchen ausgeschleudert wird. In jedem Falle wird der Bau des Kernes geändert, und er verwandelt sich in ein neues Element. Uns interessiert hier vor allem der Eintritt von Protonen (Wasserstoffkernen) in die komplizierteren Kerne, denn wir haben gesehen, daß die astronomisch wichtige Freimachung von Energie (wenn sie tatsächlich vorkommt) von der Umwandlung von Wasserstoff herrührt. Es hat sich ergeben, daß es keiner großen Energie bedarf, damit ein Proton in den Kern eindringen kann. Es scheint die Experimentalphysiker überrascht zu haben, daß die Energie so klein ist. Der im Jahre 1933 erzielte Fortschritt in der künstlichen Umwandlung wurde nicht etwa durch die Verwendung von Spannungen von vorher nie angewandter Höhe herbeigeführt, sondern durch die große Steigerung der Empfindlichkeit der Nachweismethoden für die Umwandlungen.

Die durchschnittliche Energie der Teilchen (einschließlich der Protonen) ist in der Nähe des Sonnenmittelpunktes gleich derjenigen, die ein Proton nach Durchlaufen einer Spannung von etwa 2500 Volt besitzt. Es wird stets einige Protonen geben, deren Energie sehr viel größer ist als dieser Durchschnitt, also Protonen mit einer Energie, die mit derjenigen vergleichbar ist, die ein Proton bei der künstlichen Umwandlung benötigt. Die Bedingungen brauchen gar nicht derart zu sein, daß der Eintritt eines Protons in einen Kern sehr häufig vorkommt, denn der Wasserstoffvorrat der Sonne muß für wenigstens 10^{10} Jahre vorhalten. Ehe nicht ausführlichere Versuchsergebnisse vorliegen, ist es unmöglich, einen genauen Vergleich zu machen, aber eine allgemeine Schätzung ergibt, daß irgendwo bei einer Temperatur zwischen 10 Millionen und 20 Millionen Grad die Protonen (oder Wasserstoff) durchaus schnell genug in den Kernen verschwinden würden, um die zur Erhaltung der Sonnenwärme nötige Energie zu liefern. Die Umwandlung ist sehr empfindlich gegen eine Zunahme der Spannung und demnach auch gegen eine Zunahme der Temperatur. Daher werden Sterne, die eine sehr verschieden große Energiezufuhr brauchen, doch ihr Gleichgewicht innerhalb eines ziemlich engen Temperaturbereichs erreichen. So ist das Beobachtungsergebnis, das anfänglich so unglaublich zu sein schien, doch bestätigt worden.

Es muß bemerkt werden, daß wir, auch wenn wir die Hypothese der Vernichtung von Protonen und Elektronen als Hauptquelle der Sternenergie vorziehen, die Wirkungen der Wasserstoffumwand-

lung nicht übersehen dürfen. Die Wasserstoffumwandlung wird wie ein Puffer wirken, der verhindert, daß die Temperatur höher als etwa 20 Millionen Grad steigt — solange es noch einen merklichen Betrag an Wasserstoff im Stern gibt. Wenn sich nämlich der Stern zusammenzieht, so daß seine Temperatur steigt, so werden die Protonen die Atomkerne häufiger angreifen; es wird mehr Energie frei werden, und diese veranlaßt den Stern, sich wieder auszudehnen, wobei die Temperatur wieder fällt. Theorien, wie sie noch kürzlich verfochten wurden, nach denen die Sterne Temperaturen von Tausenden von Millionen oder Billionen Grad haben sollten, kommen heute überhaupt nicht mehr in Frage — außer wenn man annimmt, daß die Sterne in ihrem Innern so gut wie völlig frei von Wasserstoff sind. Bei solchen Temperaturen würde Materie, die Wasserstoff enthält, ein hochbrisanter Sprengstoff sein.

Über den Verzug bei der Freimachung der Energie (S. 166) besitzen wir vorläufig noch keine unmittelbare Kenntnis. Andererseits kann er uns nicht mehr überraschen; denn bei der Beschießung von Atomkernen mit verschiedenen Teilchen (aber bisher wohl noch nicht mit Protonen) hat sich oft gezeigt, daß zunächst instabile Kerne entstehen, die nach Ablauf einiger Minuten oder Stunden zerfallen und erst dann ihre Energie abgeben.

Die neuen Entdeckungen haben möglicherweise eine der Schwierigkeiten beseitigt, die sich bei der Vorstellung einer Entwicklung zusammengesetzter Elemente im Inneren eines Sternes ergeben hatten. Früher kannten wir keine Zwischenstufe zwischen einem Proton und einem Heliumkern. So schien der erste Schritt der Entwicklung der Zusammentritt von 4 Protonen und 2 Elektronen zu einem Heliumkern zu sein. Wie es vorkommen könnte, daß diese gleichzeitig genau am gleichen Ort zusammentreffen, entzog sich dem Verständnis. Wir konnten uns nur mit der Überlegung beruhigen, daß sie es offenbar in der Tat irgendwie fertigbringen, so zusammenzutreffen, und daß hierfür das Innere eines Sternes jedenfalls nicht weniger geeignet ist als irgendein anderer Ort. Nunmehr hat man aber Neutronen, Deutonen und Isotope sowohl des Wasserstoffs wie des Heliums vom Atomgewicht 3 entdeckt, die alle zwischen dem Proton und dem Heliumkern liegen. Helium kann also schrittweise ebenso aufgebaut werden, wie es bei der Entwicklung der höheren Elemente vorkommt.

Eine zweite Möglichkeit (die R. d'E. Atkinson im Jahre 1931 vorgeschlagen und entwickelt hat) besteht darin, daß das Helium innerhalb komplizierterer Kerne gebildet und dann ausgeschleudert

wird. Um ein einfaches gedachtes Beispiel zu wählen, können wir uns vorstellen, daß Protonen und Elektronen in einen komplizierteren Kern eins nach dem anderen eintreten, wo sie so weit wie möglich zu Heliumkernen zusammentreten. Dann und wann bricht das Gebilde zusammen und es wird ein α -Teilchen (Heliumkern) ausgeschleudert. Das kann in dem gleichen Kern immer wieder geschehen. Wenn man einen Heliumkern als gegeben ansieht und annimmt, daß nichts im Wege ist, daß er sich weiter in einen komplizierteren Kern umwandelt, so wird die Nachkommenschaft des Heliums nach einer ausreichenden Zeit weitere komplizierte Kerne hervorbringen, die das Werk fortsetzen. Auf diese Weise könnte ein einziges Heliumatom der Urahn des gesamten Nicht-Wasserstoffs in einem Stern sein.

Einmal schien es so, als ob die kosmische Strahlung in einer wichtigen Beziehung zum Problem der inneratomaren Energie stünde. Kosmische Strahlung oder Ultrastrahlung ist der Name einer äußerst durchdringenden Strahlung (die entweder aus elektromagnetischen Wellen oder aus Teilchen besteht), die von oben her durch die Erdatmosphäre dringt und augenscheinlich von außerhalb kommt. Man hat früher die Ansicht vertreten, daß sie ihren Ursprung in inneratomaren Vorgängen hat, die sich in den Sternnebeln oder kosmischen Wolken unserer eigenen Milchstraße oder anderer Milchstraßen ereignen; man hat sie entweder der Umwandlung von Wasserstoff in bestimmte andere Elemente oder der Vernichtung von Elektronen und Protonen zugeschrieben. Versuche, den Vorgang, durch den sie entstehen, im einzelnen festzustellen, sind davon abhängig, daß wir die Energie eines einzelnen Strahles kennen, und diese konnte bis vor kurzem nur aus Messungen ihrer Durchdringungsfähigkeit ermittelt werden. Es stellt sich jetzt heraus, daß die Energie der härtesten Strahlen weit unterschätzt wurde, so daß die früheren Berechnungen nachgeprüft werden müssen. Wenn ein kosmischer Strahl in einem Stoff gebremst wird, so erzeugt er manchmal einen ganzen Schauer von Elektronen und Positronen *. Diese können einzeln in einer Wilsonkammer sichtbar gemacht werden, und die Energie, mit der sie ausgeschleudert wurden, kann gemessen und ihre Summe gebildet werden. Die ursprüngliche Energie des Strahles kann nicht kleiner als diese Summe gewesen sein. Diese aber ergibt sich als sehr viel größer als die Energie irgendeines inneratomaren Einzelvorganges, der

* Siehe Tafel I.

nach der derzeitigen Theorie vorkommen kann. Die kosmischen Strahlen geben uns noch ein großes Rätsel auf; im Hinblick auf ihre außerordentliche Energie scheint es aber jetzt unmöglich, ihnen einen inneratomaren Ursprung zuzuschreiben.

Indem wir die kosmischen Strahlen aus dem Spiel lassen, müssen wir gleichzeitig gewisse Vorstellungen fallen lassen, für die sie verantwortlich waren. Es war klar, daß sie nicht aus dem heißen Sterninnern kommen können, denn sie könnten keinen erheblichen Teil der Dicke des Sternes durchlaufen. Sie müßten deshalb diffuser Materie zugeschrieben werden, durch die sie sich praktisch frei würden bewegen können. Die beobachtete Intensität der kosmischen Strahlung zeigte an, daß die verhältnismäßig kalte diffuse Materie des Weltalls Energie in kaum geringerer Fülle frei machen müßte als die Sterne selbst. Ganz im Gegensatz zu der natürlichen Folgerung aus der Beobachtung und der Theorie der Sterne, daß die Freimachung inneratomarer Energie auf der ziemlich hohen Innentemperatur der Sterne beruht, würde die kosmische Strahlung den klaren Beweis liefern, daß eine hohe Temperatur in keiner Weise wesentlich ist, da eine ähnliche Freimachung auch in Sternnebeln stattfindet. Diese Überlegung aber hat sich als unhaltbar erwiesen, und es liegt jetzt nichts mehr vor, was dafür spricht, daß wir mit den Sternen nicht auf dem richtigen Wege sind.

V.

Die Entdeckung des Positrons versetzt der Vernichtungshypothese einen Schlag. Wir wissen heute, daß nicht das Proton, sondern das Positron das wahre Gegenstück des Elektrons ist. Ein Positron und ein Elektron können sich gegenseitig vernichten. Der experimentelle Befund scheint klar zu beweisen, daß ein Zwillingsspaar, das aus einem Positron und einem Elektron besteht, erzeugt wird, wenn Strahlung von ausreichender Energie auf einen Stoff fällt, und daß das Positron nach einem kurzen Dasein durch Doppelselbstmord mit einem Elektron aus dem Leben scheidet. Natürlich beweist dies nicht, daß nicht ein Elektron in gleicher Weise auch sein Dasein beenden kann, indem es ein Proton beseitigt; aber diese Hypothese sieht allmählich einigermmaßen grundlos aus.

Auch die Entdeckung des Neutrons gibt der Sache ein anderes Gesicht. Man hat das Gefühl, als ob die Vereinigung eines Protons mit einem Elektron zu einem Neutron für sie den höchsten

möglichen Grad von gegenseitiger Auslöschung bedeutet. In gewissem Sinne ist dies von einer wirklichen Auslöschung nicht weit entfernt, denn das Neutron ist, wie wir gesehen haben, „ein Isotop von Nichts“. Ein Neutron ist so schwer faßbar und erfährt in dem Stoff, durch den es sich bewegt, so geringe Wechselwirkungen, daß es schwer festzustellen ist, daß da überhaupt etwas vorhanden ist. Nachdem wir diese Form inniger Vereinigung eines Protons und eines Elektrons entdeckt haben — einen Zustand mit der Ordnungszahl Null —, empfinden wir es als unwahrscheinlich, daß es noch eine andere Art von Verbindung geben sollte, die zur völligen Zerstörung führt.

Hierzu darf ich vielleicht eine persönliche Ansicht hinzufügen, die auf der Art beruht, wie sich die vereinigte Relativitätstheorie und Quantentheorie auswirkt, nämlich, daß es Bedingungen gibt, die die Anzahl * der Protonen und Elektronen im Weltall für alle Zeiten unverändert festlegen.

Wenn ich auch sonst in diesem Buch nicht gewagt habe, so weit zu gehen, so glaube ich doch, daß die Zeit gekommen ist, zu erwägen, ob nicht die Hypothese der gegenseitigen völligen Vernichtung von Protonen und Elektronen fallengelassen werden sollte. Ich kann das vielleicht um so ungehemmter anregen, weil die Hypothese meines Wissens als eine astronomische Hypothese zuerst in meinen eigenen Schriften auftritt **, obwohl der allgemeine Gedanke den Physikern damals geläufig genug war. Wie im Falle des Determinismus handelt es sich nicht darum, einen schlüssigen Gegenbeweis zu liefern, sondern um die Feststellung, daß die Hypothese ein Überbleibsel aus einer Zeit ist, in der der Stand unseres Wissens von dem heutigen verschieden war. Als die Hypothese zuerst vorgeschlagen wurde, kannte man kein anderes gleichwertiges Mittel zur Aufrechterhaltung der Energie eines Sternes. Erst im Jahre 1920 enthüllte Astons sehr genaue Messung des Atomgewichts des Wasserstoffs den hohen Energiebetrag, der durch die Umwandlung von Wasserstoff in Nicht-Wasserstoff gewonnen werden kann, und lieferte damit eine zweite Möglichkeit. Wir haben gesehen, daß eine Entscheidung zwischen den beiden Möglichkeiten nicht auf die leichte Schulter genommen werden darf, da sie einen tiefgehenden Einfluß auf unsere Ansichten über die Entwicklung der Sterne hat; und tatsächlich war die Vernichtungs-

* Dabei zähle ich ein Positron als „minus ein Elektron“ und ein Negatron als „minus ein Proton“.

** Monthl. Not. of the R. A. S. Bd. 77, S. 611, 1917.

hypothese damals die konservativere, da sie die herrschende Theorie weniger störte. Seitdem hat sich das gegenseitige Verhältnis der beiden Theorien in folgender Weise verändert:

1. Die Umwandlung der Elemente ist heute ein Bestandteil des praktischen Wissens und wird im Laboratorium bis ins einzelne erforscht. Man weiß, daß sie unter Bedingungen erfolgt, die der Sterntemperatur entsprechen. Auf jeden Fall müssen wir ihren Einfluß auf die Energiebilanz eines Sternes in Rechnung setzen, ob sie nun die einzige Quelle ist oder nicht. Auf der anderen Seite gibt es in der Erfahrung keinen Beweis für die Vernichtung; von den kosmischen Strahlen, von denen man manchmal vermutete, daß sie einen solchen Beweis lieferten, weiß man heute, daß sie einen anderen Ursprung haben müssen.

2. Es scheint heute unvermeidlich, daß wir uns der kürzeren Zeitdauer anpassen müssen, und damit entfällt der Hauptvorteil der Vernichtungshypothese. Wenn wir 10 000 Millionen Jahre als die obere Grenze für das Alter der Sterne annehmen, so würde die Wärme der Sonne während dieser Zeit durch die Umwandlung eines Betrages an Wasserstoff aufrechterhalten werden, der gleich 10 % ihrer Masse ist. In diesem Zusammenhang ist die Entdeckung des großen Wasserstoffgehalts der Sterne (S. 141) ein günstiger Umstand.

3. Vom Standpunkt der Theorie aus ist die gegenseitige Vernichtung eines Protons und eines Elektrons keine so natürliche Vorstellung, wie sie früher zu sein schien. Larmors Bild von der Erschaffung eines positiven und negativen Teilchens* durch Rotation der Wände eines Gefäßes gegenüber einem inneren Kern — mit der Möglichkeit, daß die Wände schließlich zurückweichen und dabei die beiden Teilchen vernichten — bezieht sich, wie man jetzt erkennt, eher auf das Elektron und das Positron, als auf das Elektron und das Proton.

Der gegenwärtige Zeitpunkt, in dem ein Schwall von erst halb verdauten neuen Entdeckungen auf uns einstürmt, ist nicht besonders dazu geeignet, einen Entschluß zu fassen, ob die Vernichtungshypothese der Erhaltung wert ist. Aus vielen Stellen in diesem Buch wird es deutlich geworden sein, daß ich den Schritt, sie mir ganz aus dem Kopf zu schlagen, noch nicht getan habe. Zweifellos ist es besser, man läßt die Frage noch ein Jahr oder länger in der Schwebe; aber es schien mir doch gut, die Aufmerksamkeit darauf zu lenken, daß sie noch nicht ganz erledigt ist.

* Aether and Matter, Appendix E, 1900.

9. Kapitel

KOSMISCHE WOLKEN UND NEBEL

Wenn auf dem Sternenangesicht der Nacht
Gewalt'ge Wolken, märchengleich, ich schaue.
Keats, Sonette

I.

Ich werde jetzt von einer sehr verdünnten Gaswolke sprechen, die den ganzen Raum zwischen den Sternen einnimmt. Zunächst erinnere ich an die ungeheure Weite dieses Raumes und an die außerordentlichen Entfernungen, in denen sich die Sterne voneinander befinden. Die Sterne sind kleine Oasen von Materie in einer leeren Wüste. Als Wanderer in dieser Wüste können wir uns einen Lichtstrahl denken. Seine Reise von einer Oase zur nächsten, z. B. vom nächsten Stern bis zu unserer Sonne, erfordert vier Jahre; er braucht nur elf Stunden, um die ganze Ausdehnung des Sonnensystems zu durchmessen; und dann geht die Reise wieder sechs Jahre lang oder so ähnlich durch leere Wüste. So ist es aber nur dann, wenn der Lichtstrahl im Zickzack von einem Stern zum anderen wandert; wenn er sich auf gerader Bahn unbeeinflusst durch das Weltall bewegt, wird er wahrscheinlich die Oasen gänzlich verfehlen, so wie es ein Wanderer in einer Wüste dann auch tun würde.

Aber der Raum zwischen den Sternen, den ich eine leere Wüste genannt habe, ist nicht völlig leer. Es sind überall Spuren von Materie vorhanden. An einigen Stellen des Himmels können wir eine dünne Wolke zwischen den Sternen tatsächlich sehen. Beispiele finden sich auf Tafel II und III. Auf der einen ist die Nebelmaterie hell, — Fäden von leuchtendem Gas, zu einem zarten Netzwerk verflochten. Auf der anderen sieht man außer heller Materie eine undurchdringliche schwarze Wolke, die alles, was dahinter ist, verdeckt. Nur in gewissen Gegenden sehen wir die kosmische Materie so deutlich, aber sie ist überall anwesend. Die erkennbaren Nebel sind Verdichtungen, — Stellen, an denen die Dichte manchmal das Tausend- oder Zehntausendfache des Normalen ist. Ich will zuerst von den normalen Bereichen sprechen, in denen natürlich die photographischen Aufnahmen die Anwesenheit von

Materie nicht anzeigen. Das unsichtbare Gas, das diese Bereiche erfüllt, wollen wir die „kosmische Wolke“ oder „interstellare Wolke“ nennen. Wir selbst befinden uns wahrscheinlich in einem normalen Bereich, in dem die Wolke mehr oder weniger ihre durchschnittliche Dichte hat.

Bis vor ungefähr zehn Jahren hatten die Astronomen noch keinen recht befriedigenden Beweis für das Dasein der kosmischen Wolke; trotzdem hat man sich über sie schon seit 40 oder mehr Jahren den Kopf zerbrochen. Unsere frühere Einstellung ihr gegenüber erinnert mich an den Gast, der sich sträubte, in dem Spukzimmer zu schlafen. „Aber ich dachte doch, daß du nicht an Geister glaubst!“ „Ich glaube nicht an Geister, aber ich habe Angst vor ihnen.“ Wahrscheinlich glaubten nicht viele Astronomen an die kosmische Wolke, aber manche von ihnen hatten Angst vor ihr. Angst, weil einige unserer grundlegendsten Schlüsse in der Astronomie über den Haufen fallen könnten, wenn es im Weltall der Sterne etwas Derartiges gäbe, was wir in unseren Rechnungen nicht berücksichtigt hatten. Wenn wir die scheinbare Größe und die Entfernung eines Sternes gemessen haben, können wir seine Leuchtkraft * berechnen, — sofern wir annehmen dürfen, daß er uns nicht durch einen dazwischengelagerten Nebel geschwächt erscheint. Wir können wichtige Schlüsse aus einer dynamischen Untersuchung der Sternbewegung ziehen, — aber wir nehmen an, daß die Bewegungen nicht durch ein widerstehendes Medium beeinflusst werden. Wir berechnen, daß im Laufe der Zeit die Massen der Sterne infolge des Massenverlustes durch Strahlung abnehmen müssen, — aber was geschieht, wenn in der gleichen Zeit die Sterne mehr Masse gewinnen, indem sie die kosmische Wolke bei ihrem Durchgang aufsaugen? So war die kosmische Wolke ein Schreckgespenst, das die Sicherheit vieler unserer Theorien über den Bau und den Mechanismus des Weltalls der Sterne bedrohte. Und so begann man, Theorien über die kosmische Wolke aufzustellen, und man versuchte, ihre wahrscheinlichen Eigenschaften abzuschätzen. Das war keine reine Spekulation, es war eine Vorsichtsmaßnahme. Nachdem sich aber das Schreckgespenst jetzt materialisiert hat, hat es seine Schrecken verloren; es erweist sich, daß die kosmische Wolke so spärlich ist, daß sie bei den erwähnten Problemen keine wirklich ernsthafte Rolle spielt, obgleich sie vielleicht nicht immer vernachlässigt werden kann.

* Vgl. S. 134 (Fußnote). D. Übers.

Es war wohl auf jeden Fall unwahrscheinlich, daß sich der interstellare Raum als völlig leer erweisen würde. Die Natur verabscheut das Leere; auch müssen wir erwarten, daß einzelne Atome von den Sternen und Nebeln entweichen und sich in den weiten Bereichen des Raumes verlieren, so wie sich in einem leeren Raume Staub sammelt. Wir nehmen im allgemeinen an, daß sich die Sterne aus einem Urnebel verdichtet haben, der die ganze Milchstraße umfaßte, und wir können berechnen, daß die Verdichtung den Raum zwischen ihnen nicht ganz von Stoff befreit haben kann. Daher ist zu erwarten, daß wir das Weltall ein wenig dunstig vorfinden, sei es durch allmähliche Ansammlung von Dunst, oder weil es zu Beginn nicht gründlich gereinigt worden ist. Allerdings wird ständig ein wenig reingemacht. Die Sterne laufen wie himmlische Zimmermädchen hin und her und saugen durch ihre Gravitation die umgebende Materie an. Aber im Vergleich mit der Größe des Raumes, der gereinigt werden soll, ist die Zahl der Staubsauger allzu gering, und wir können berechnen, daß es bei diesem Verfahren mindestens 10 000 Billionen Jahre dauern wird, bis das himmlische Großreinemachen beendet ist.

II.

Ich will sofort auf den unmittelbaren Beweis für das Dasein einer kosmischen Wolke kommen. Es ist wohl bekannt, daß die Atome dem Licht, das durch ein Gas hindurchtritt, ihre charakteristischen Zeichen aufprägen, so daß das Spektrum, in das das Licht mit Hilfe eines Prismas zerlegt wird, eine Anzahl von Lücken oder dunklen Linien aufweist. Diese Lücken, welche die Eingriffe der Atome darstellen, bezeugen nicht nur die chemische Natur des Gases, sondern geben auch an, wie schnell es sich auf uns zu oder von uns weg bewegt. Wenn wir etwa ein Spektroskop auf die eine Kante der Sonne richten, so sehen wir die Linien eines Gases, z. B. des Eisendampfes, in einer Lage, die anzeigt, daß sich das Gas auf uns zu bewegt; richten wir es auf die andere Kante der Sonne, so sehen wir die gleiche Linienfolge, aber die Linien sind jetzt in eine Lage verschoben, die anzeigt, daß das Gas sich von uns fortbewegt. Wenn die eine Kante sich auf uns zu- und die andere sich von uns wegbewegt, so heißt das, daß die Sonne rotiert, — eine Tatsache, die schon aus der Beobachtung der Sonnenflecke folgt, die von Zeit zu Zeit auf ihrer Oberfläche erscheinen. Aber es gibt im Sonnenspektrum eine Anzahl Linien, die diesen Rotationseffekt nicht

Tafel II



Mount Wilson Observatory

Gasförmiger Nebel. N. G. C. 6992 im Schwan

zeigen; sie liegen stets an der gleichen Stelle, ganz gleich, ob wir die Ost- oder die Westkante der Sonne betrachten. Es ist klar, daß sie nicht in der rotierenden Sonnenatmosphäre entstehen; sie müssen dem Licht aufgeprägt sein, nachdem es gänzlich von der Sonne freigekommen ist. Wir haben ein ruhendes Gas entdeckt, das sich irgendwo zwischen der Sonne und unserem Fernrohr befindet. Überdies haben wir seine chemische Zusammensetzung entdeckt; die ruhenden Linien gehören dem Sauerstoff und Stickstoff an. Ein ruhendes Medium, das aus Sauerstoff und Stickstoff besteht? Aber natürlich; es gibt ja ein aus Sauerstoff und Stickstoff bestehendes ruhendes Medium zwischen dem Fernrohr und der Sonne. Es ist ganz einfach unsere eigene Atmosphäre, die wir von neuem entdeckt haben.

Wendet man das gleiche Verfahren auf die Sterne an, so zeitigt es ein wichtigeres Ergebnis. Der Effekt wurde zuerst von J. Hartmann bei dem Stern δ Orionis entdeckt, einem der drei Sterne im Gürtel des Orion. Er ist ein Doppelstern, aber das weitaus meiste Licht kommt von der helleren Komponente, während das Spektrum der schwächeren Komponente nicht sichtbar ist. Wir können die Bewegung der helleren Komponente in ihrer Bahn verfolgen, indem wir die Linien ihres Spektrums beobachten. Drei Tage lang kommt die helle Komponente auf uns zu, dann sind die dunklen Linien nach Violett verschoben; die nächsten drei Tage bewegt sie sich von uns fort, und die dunklen Linien sind dann nach Rot verschoben. Das trifft für die meisten dunklen Linien zu. Aber zwei starke Linien, die H - und K -Linie, die dem Element Calcium angehören, verbleiben die ganze Zeit in der gleichen Lage. Offenbar haben sie einen anderen Ursprung als die übrigen Linien. Sie sind dem Licht erst aufgeprägt, nachdem es den bewegten Stern verlassen hat, und sie künden ein Medium an, das Calciumdampf enthält und das zwischen dem Stern und unserem Fernrohr liegt. Diesmal ist es nicht die Erdatmosphäre, denn sie enthält keinen Calciumdampf. Überdies können wir aus der Lage der Calciumlinien die Bewegung des Calciumdampfes feststellen, und wir finden dann, daß er mit der Erde ebensowenig verknüpft ist wie mit dem Stern.

Die einzige weitere „ruhende Linie“, die man beobachtet hat, ist die gelbe D -Linie des Natriums. Diese Linien des Natriums und des Calciums, die in den Sternspektren auftreten, die aber offensichtlich den Sternen selbst nicht angehören, hat man bei einer großen Zahl

von Sternen gefunden. Die natürliche Folgerung scheint zu sein, daß Calcium und Natrium eine durch den interstellaren Raum verstreute Wolke bilden, durch die das Licht auf ihrem Wege zu uns hindurchtritt. Diese Hypothese wurde auch von Hartmann vorgeschlagen, aber es dauerte lange, bis man sich zu ihr entschloß. Man wand ein, daß nur die allerheißesten Sterntypen (die Typen O und B) die ruhenden Linien zeigen. Man schloß, daß, wenn die Linien in einem den interstellaren Raum erfüllenden Medium entstünden, alle Sternklassen sie zeigen müßten. Wir werden noch sehen, wie man diesen Einwand widerlegt hat. Vorerst schien es, als müsse die hohe Temperatur der Sterne etwas mit der Erscheinung zu tun haben, und als müsse daher der Calcium- und Natriumdampf den Sternen verhältnismäßig nahe sein. Die gewöhnliche Meinung war, daß er eine Aureole um den Stern bildet, die den ganzen Doppelstern einhüllt; die beiden Sternkomponenten sollten ihre Bahnen innerhalb dieser Hülle beschreiben, ohne sie wesentlich zu stören. Das aber konnte unter Beweis gestellt werden. Insoweit die periodische Bahnbewegung in Frage kommt, braucht die Calcium-Natriumhülle dem Stern auf seiner Hin- und Herbewegung in ihr nicht zu folgen. Aber die durchschnittliche Bewegung über eine längere Zeit muß bei beiden die gleiche sein, denn sonst würden der Stern und seine Hülle sich voneinander trennen. Diese Prüfung ist bereits 1909 von V. M. Slipher sehr gründlich angestellt worden, und er kam zu Schlüssen, die mit den neueren Ergebnissen übereinstimmen; doch ist diese Arbeit offenbar nicht beachtet worden.

Im Jahre 1923 beseitigte eine Untersuchung von J. S. Plaskett mit dem 72 zölligen Reflektor der Dominion-Sternwarte, Britisch-Kolumbien, alle Zweifel über diesen Punkt. Auf Grund der Beobachtung von 40 Sternen, die ruhende Linien zeigen, fand er, daß beträchtliche (manchmal sogar sehr große) Unterschiede zwischen der Sternengeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Calciums bestehen. Wenn man dies nach der vorstehenden Ansicht deutet, so lassen die Sterne ihre Hüllen hinter sich zurück. Eine ebenso wichtige Tatsache war es, daß das Calcium stets als nahezu im Raum ruhend befunden wurde, während die Sterne eine Eigenbewegung haben, die bald groß, bald klein ist. Ruhend heißt natürlich nicht, gegenüber dem Sonnensystem ruhend, denn auch die Sonne hat eine Eigenbewegung. Vielmehr zeigt das Calcium nach den Stichproben in verschiedenen Gegenden des Himmels dann keine Bewegung, wenn man den viel maßgebenderen Ver-

gleich mit der „durchschnittlichen Bewegung der Sterne“ zieht. Das weist deutlich darauf hin, daß es eine zusammenhängende Wolke bildet.

Dies ist die erste Grundlage, auf der wir zur Vorstellung einer Wolke von Materie geführt werden, die das Sternsystem erfüllt, einer Wolke, in der es verhältnismäßig ruhig zugeht und durch die die Sterne sich mit großer Geschwindigkeit hindurchbewegen. Licht begibt sich von einem Stern aus auf die Reise zu uns und bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde. Es läuft weiter und weiter; in und auf seinem Wege sind die Atome dünn gesät. Ab und zu erlaubt sich ein Calcium- oder Natriumatom einen Eingriff. Sagen wir einmal, daß das Licht 1000 Jahre Spießruten laufen muß, bevor es die Erde erreicht. Wenn es ankommt, ist es derjenigen Bestandteile beraubt, die die Calcium- und Natriumatome verschluckt haben, und es zeigt deshalb jene Lücken (dunklen Linien) in seinem Spektrum, die es dem Astronomen erlauben, sich aus der Geschichte ein Bild zu machen.

Je länger die Reise des Lichtes dauert, um so größere Einbußen erleidet es durch diese Eingriffe. Daher sollte die Intensität — die Schwärze — der Calciumlinien von dem Abstände des Sternes abhängen. Das war das nächste, was man nachprüfen mußte. Daß die Vermutung zutrifft, hat zuerst Otto Struve gezeigt. Wir können kaum erwarten, daß diese Beziehung zwischen der Intensität und der Entfernung sehr genau erfüllt ist, denn die Wolke wird nicht überall gleich dicht sein; die Nebel z. B. sind Stellen, wo sie stark verdichtet ist. Wenn wir aber die Schwankungen ausgleichen, indem wir Mittelwerte für verschieden weit entfernte Sterne nehmen, so ist die Zunahme der Intensität mit der Entfernung ganz deutlich ausgeprägt. Überdies nimmt sie in dem Maße zu, wie es nach dem theoretischen Absorptionsgesetz erwartet werden muß.

Ein einzelnes Beispiel wird vielleicht eindrucksvoller sein als eine allgemeine statistische Bestätigung. Im Jahre 1910 hat man festgestellt, daß die sehr heißen Sterne in und um das Sternbild des Perseus sich nach ihren Eigenbewegungen in zwei Gruppen teilen. Im Vordergrund steht eine Gruppe von Sternen, die sich offenbar alle in der gleichen Richtung und gleich schnell über den Himmel bewegen und die augenscheinlich einen zusammengehörigen Sternhaufen bilden. Die scheinbare Bewegung ist groß für diese Sternklasse, so daß es ziemlich sicher ist, daß der Sternhaufen uns einigermaßen nahe ist. Die übrigen Sterne in diesem Bereich zeigen keine oder keine merkliche Bewegung und bilden

einen weit entfernten Hintergrund. Das ist eine gute Gelegenheit für die gedachte Nachprüfung, denn indem wir den Vordergrund und den Hintergrund beobachten, sehen wir in der gleichen Richtung durch die Wolke, und wir können nicht so leicht durch Ungleichheiten in der örtlichen Verteilung ihrer Dichte irregeführt werden. Man findet, daß die Sterne des Vordergrundes und die des Hintergrundes ohne weiteres nach der Intensität der ruhenden Linien unterschieden werden können; die Linien sind bei den Sternen des Hintergrundes sehr viel stärker, weil die Dicke der zwischen ihnen und uns liegenden Wolke viel größer ist.

Eine noch weit bemerkenswertere Prüfung haben Plaskett und Pearce durchgeführt. Sie beruht darauf, daß unsere gesamte Milchstraße mit ihren Sternen um einen Mittelpunkt rotiert, der weit von uns entfernt ist und in der Richtung des Sternbildes Ophiuchus liegt. Sie rotiert nicht wie ein starrer Körper, sondern die äußeren Teile rotieren (wie es das Gravitationsgesetz verlangt) langsamer als die inneren Teile, — so wie die äußeren Planeten im Sonnensystem langsamer rotieren als die inneren. Indem wir die beobachteten durchschnittlichen Bewegungen der Sterne in den verschiedenen Bereichen des Himmels vergleichen, sind wir imstande, die Geschwindigkeitsunterschiede der Rotation zu erkennen und zu messen. Die Größe des Effektes muß vom durchschnittlichen Abstände der untersuchten Sterne abhängen, denn in je größere Ferne sich unsere Untersuchung erstreckt, um so größer müssen die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den entferntesten und den nächsten erfaßten Sternen sein. Man kann diesen sogenannten Oort-Effekt benutzen, um den mittleren Abstand einer beliebigen Sternklasse zu messen, vorausgesetzt, daß die Sterne ziemlich gleichmäßig über den ganzen Himmel verteilt sind.

Die Sterne, die ruhende Calciumlinien zeigen, sind so weit entfernt, daß wir keines der einfacheren Verfahren zur Ermittlung ihrer Entfernung anwenden können. Aber wir verfügen jetzt über zwei Verfahren, um die durchschnittliche Entfernung einer Sternklasse zu finden, die sich besonders für große Entfernungen eignen: 1. aus der Intensität der ruhenden Calciumlinien, 2. aus dem Oortschen Rotationseffekt, und wir können das eine mit dem anderen vergleichen. Plaskett und Pearce ordneten zunächst ihre Sterne in drei Gruppen, je nachdem, ob ihre Calciumlinien schwach, mittelstark oder stark waren; demnach entsprechen diese Gruppen den Sternen von geringer, mittlerer und großer Entfernung. Aus den gemessenen Geschwindigkeiten bestimmten sie den Oorteffekt

und fanden so die mittleren Geschwindigkeiten der Gruppen. Diese ergaben sich in der erwarteten Reihenfolge. Das war der erste Vergleich.

Bei der Berechnung des Oorteffektes wurde die Geschwindigkeit aus den gewöhnlichen Spektrallinien der Sterne berechnet, — die der Wolke angehörigen Calciumlinien kamen hierbei nicht in Betracht. Aber Plaskett und Pearce stellten noch eine zweite, ähnliche Berechnung an, bei der sie die durch die ruhenden Calciumlinien gegebenen Geschwindigkeiten benutzten. Wir haben gesehen, daß die Calciumwolke sich gegenüber dem Durchschnitt der Sterne nahezu in Ruhe befindet, so daß sie offenbar an der allgemeinen Rotation des Milchstraßensystems teilnimmt. Dementsprechend fanden Plaskett und Pearce für jede ihrer Gruppen sowohl eine Entfernung für die Wolke, wie eine Entfernung für die Sterne. Ihre Messungen bezogen sich natürlich nicht auf die ganze Wolke, sondern auf den Teil der Wolke, der für die Absorption verantwortlich ist und die Spektrallinien erzeugt. Wenn die verschleiende Wolke zwischen uns und dem Stern gleichmäßig beschaffen ist, so wird ihre durchschnittliche Entfernung der halben Entfernung zwischen uns und dem Stern entsprechen. So müßte die für die Wolke ermittelte Entfernung immer gleich der Hälfte der dem Stern entsprechenden Entfernung sein. Es ergab sich, daß dies recht gut erfüllt ist. Die Ergebnisse, aus denen dies hervorgeht, sind die folgenden:

Calcium- absorption	Zahl der Sterne	Sterne		Wolken	
		Rotationseffekt in km/sec	Berechnete Entfernung in parsec	Rotationseffekt in km/sec	Berechnete Entfernung in parsec
Gering . . .	90	10,2	600	5,0	295
Mittel . . .	79	14,5	850	6,9	405
Stark . . .	43	27,5	1620	13,7	805

Wir wollen uns jetzt wieder der Schwierigkeit zuwenden, die die Astronomen lange Zeit irreführte, nämlich, daß nur gewisse Sterntypen diesen Effekt zeigen. Sie beruht tatsächlich nur auf einer unglücklichen Verkettung von Umständen. Natürlich können wir die Absorption nur dann bemerken, wenn die Schichtdicke der absorbierenden Wolke zwischen uns und dem Stern groß ist, und daher kommen nur weiter entfernte Sterne, etwa von 300 parsec an, in Betracht. Da die scheinbare Helligkeit dieser Sterne hinreichend groß sein muß, um eine Untersuchung des Spektrums zu ermöglichen, und da sie mehr als 300 parsec (1000 Lichtjahre) ent-

fernt sein müssen, so muß die wahre Leuchtkraft dieser Sterne sehr groß sein. Das schränkt die Zahl der in Frage kommenden Sternstypen sehr ein. Ferner muß der Stern einem Typus angehören, der nicht schon selbst die Calcium- und Natriumlinien zeigt; denn in den Sternatmosphären sind diese Linien stark und verbreitert, so daß sie die feinen, scharfen Linien, die die Wolke darüber lagert, meist völlig verdecken. Wenn man diese beiden Umstände in Betracht zieht, so ist die Beschränkung auf die wenigen genannten Sternklassen vollkommen verständlich.

Daß diese Erklärung zutrifft, ist kürzlich in verschiedenen Fällen bestätigt worden, wo es auf Grund ungewöhnlicher Umstände möglich gewesen ist, die ruhenden Linien bei Sternen des „falschen Typus“ aufzufinden. Wenn die Schwierigkeit im allgemeinen darauf beruht, daß die ruhende Linie durch die eigene Calcium- oder Natriumlinie des Sternes maskiert wird, so ist es doch gelegentlich möglich, ihr beizukommen. Bei einigen Doppeldoppelsternen haben die beiden Komponenten eine außerordentlich hohe Geschwindigkeit. In diesem Falle sind in einer bestimmten Phase die Calciumlinien der einen Komponente stark nach rechts, die der anderen Komponente stark nach links verschoben, so daß zwischen ihnen eine Lücke verbleibt, in der die ruhende oder interstellare Calciumlinie erscheinen kann. Und das ist, wie zu erwarten, auch beobachtet worden.

III.

Warum gerade Calcium und Natrium? Ich glaube nicht einen Augenblick daran, daß die Wolke ganz und gar oder auch nur in der Hauptsache aus diesen beiden Elementen besteht. Bei einer Überschau über die Reihe der Elemente stellen wir aber bald mit Befriedigung fest, daß Calcium und Natrium die einzigen einigermaßen häufigen Elemente sind, die unter den im interstellaren Raum herrschenden Anregungsbedingungen Spektrallinien zeigen können, die für uns beobachtbar sind. Es ist kein Zufall, daß die kosmische Wolke ihre Anwesenheit gerade durch drei bestimmte Linien, die $H\alpha$, $K\alpha$ und $D\alpha$ -Linie, verrät. Ein verdünnter Stoff, der so zusammengesetzt wäre, wie es die irdische Materie durchschnittlich ist, würde gerade diese und nur diese Linien zeigen.

Wenn wir auch über die Chemie der Himmelskörper recht viel erfahren können, so verfügen wir doch in keiner Weise über die gleichen Möglichkeiten, wie ein Laboratoriumschemiker. Wenn

dieser untersuchen will, ob ein bestimmtes Element in einer Stoffprobe enthalten ist, so sorgt er dafür, daß diejenigen Bedingungen der Temperatur und der elektrischen Anregung innegehalten sind, die für die Untersuchung am günstigsten sind. Wir aber müssen die Bedingungen so nehmen wie sie sind; und wenn sie für die Anregung eines bestimmten Spektrums nicht günstig sind, so entgeht uns das entsprechende Element. Das schwerste Hemmnis für den Astronomen besteht darin, daß die Spektren aller Himmelskörper bei einer Wellenlänge von etwa 3000 Å jäh abbrechen, an einer Stelle, wo die Spektren nach der Ansicht des Laboratoriumschemikers eigentlich gerade erst anfangen aufschlußreich zu werden. Wir befinden uns in der Lage eines Rundfunkhörers, der eine Musiksendung mit einem Lautsprecher zu empfangen versucht, der nur die tiefen Töne wiedergibt. Eine Ozonschicht hoch oben in unserer Atmosphäre ist für Strahlung jenseits der erwähnten Grenze undurchlässig; so gehen uns alle hohen Töne im Gesang der himmlischen Atome verloren. Calcium und Natrium aber haben tiefe Bruststimmen und vermögen sich hörbar zu machen.

Wir wollen uns jetzt Überlegungen von mehr theoretischer Art zuwenden. Wir möchten gern eine Vorstellung von der Dichte der kosmischen Wolke gewinnen. Mannigfache Gründe beweisen, daß sie sehr dünn sein muß. Eine Berechnungsmethode beruht auf der Einsteinschen Theorie. Bei jeder gegebenen Dichte gibt es eine obere Grenze für die größte mögliche Ausdehnung der Wolke. Z. B. kann eine Kugel von der Dichte des Wassers keinen größeren Durchmesser als etwa 700 Millionen km haben. Es ist vielleicht gut, wenn ich den Grund angebe. Aber Erklärungen haben oft den Fehler, daß sie mehr Fragen aufwerfen, als sie beantworten, und es sollte mich nicht wundern, wenn man meine Erklärung unglaublicher finden würde als die Behauptung selbst. Es handelt sich aber dennoch um eine durchaus vernünftige Berechnung, die ursprünglich auf Schwarzschild zurückgeht. Nach Einsteins Gravitationsgesetz ruft ein Stück Materie eine Krümmung des von ihm eingenommenen Raumes hervor. Wenn man das Stück vergrößert, so erzeugt man mehr Raum von der gleichen Krümmung. Man kann es so lange vergrößern, bis sich der Raum völlig umbogen und geschlossen hat; wenn es soweit ist, muß man notgedrungen aufhören. Das aber tritt bei der Wasserkugel dann ein, wenn sie bis auf einen Durchmesser von ungefähr 700 Millionen km vergrößert worden ist; denn dann schließt sich der Raum rund herum ganz dicht, und es ist nicht möglich, irgendwo sonst noch mehr Wasser oder irgend

etwas anderes unterzubringen. Wenn man nicht so vorsichtig gewesen ist, sich vorher in das Wasser zu begeben, so wird man sich selbst — nirgends befinden.

Ein anderer Weg, auf dem man zu der gleichen oberen Grenze gelangt, besteht in der Überlegung, daß, wenn die Kugel groß genug ist, ihre Gravitation so stark sein muß, daß weder Licht noch irgend etwas sonst von ihr entweichen kann, so daß sie ein Weltall für sich allein bildet. Um mich mit einiger Autorität zu bekleiden, will ich die folgende Stelle zitieren:

„Ein leuchtender Stern von der gleichen Dichte wie die Erde, dessen Durchmesser 250 mal größer wäre als der der Sonne, würde infolge seiner Anziehung von seinen Strahlen nichts zu uns gelangen lassen; es ist deshalb möglich, daß die größten Körper im Weltall aus diesem Grunde für uns unsichtbar sind.“

Vielleicht werdet ihr dies als eine weitere Bestätigung für den unheilvollen Einfluß der Einsteinschen Revolution auf die ehrbare wissenschaftliche Forschung ansehen und die gute, alte Zeit beweinen, in der die Lehren eines Newton, eines Laplace und anderer Geistesriesen der Vergangenheit die Wissenschaft auf dem richtigen Wege der Vernunft hielten. Aber beschuldigt Einstein nicht zu voreilig. Die angeführte Stelle findet sich in Laplaces *Système du Monde* (1796). Sogar Newton dachte daran, daß das Licht der Schwerkraft unterworfen sein könne, und zu Laplaces Zeit nahm man das sogar allgemein an. Nach Verlauf eines Jahrhunderts, während dessen man dann (auf Grund der Wellentheorie) allgemein annahm, daß das Licht der Schwerkraft nicht unterworfen sei, wurde im Jahre 1919 die Wirkung der Schwerkraft auf das Licht durch Beobachtungen zum erstenmal nachgewiesen.

Je kleiner die Dichte ist, um so größer kann die Kugel gebaut werden. Offenbar müssen wir die Dichte des kosmischen Gases gering genug annehmen, um eine Wolke zu bauen, die unser ganzes Milchstraßensystem in sich enthalten kann. Diese Bedingung erfordert, daß die Dichte kleiner als 10^{-18} ist, das heißt ein Milliontel eines Milliontel des millionten Teiles der Dichte des Wassers.

Einen noch niedrigeren Grenzwert findet man, wenn man die beobachteten Sternengeschwindigkeiten heranzieht. Je mehr schwere Materie es im Sternsystem gibt, um so größer sind die Kräfte, denen die Sterne unterworfen sind, und um so größer wird die durch-

schnittliche Geschwindigkeit der Sternbewegungen sein. Auf dieser Grundlage ergab sich, daß die Dichte der Wolke kaum größer als 10^{-23} sein kann. Aber es ist möglich, daß die Berechnung nicht ganz zuverlässig ist, denn die Grundgedanken, auf denen sie beruht, sind durch die Entdeckung der Rotation unserer Milchstraße ein wenig abgeändert worden.

Dies sind obere Grenzen. Eine genauere Schätzung der mittleren Dichte der kosmischen Wolke erhält man, wenn man die Art und Weise betrachtet, wie die Dichte eines Nebels in die normale, unverdichtete Wolke übergeht. Wir werden später sehen, daß sowohl die Wolke wie der Nebel eine ziemlich hohe Temperatur von der Größenordnung von 10 000 bis 20 000° haben. Wir können eine wahrscheinlich ausreichend genaue Schätzung der durchschnittlichen Masse der Teilchen machen; sie wird beträchtlich größer sein als die entsprechende Größe für das Innere eines Sternes (S. 139), weil die Atome weniger hoch ionisiert sind. Dann ist es möglich, für einen Nebel von gegebener Temperatur und gegebenem mittleren Molekulargewicht zu berechnen, nach welchem Gesetz die Dichte von der Mitte nach außen hin abfällt; und zu unserem Glück ergibt sich die Dichte in großem Abstand vom Mittelpunkt als nahezu unabhängig von der Dichte im Mittelpunkt (die wir völlig außerstande gewesen wären, zu schätzen).

Ein Nebel hat keine scharfe Grenze. Die Dichte fällt mit wachsendem Abstände stetig ab, bis wir an die Außenbezirke eines benachbarten Nebels gelangen. Wenn wir daher die mittlere Dichte des Gases in einem normalen Bereich des Raumes kennen wollen, so müssen wir uns die Frage vorlegen, wie weit das Gas im Durchschnitt vom Mittelpunkt des nächsten Nebels entfernt ist. Wir können dann die Dichte so berechnen, als bilde das Gas einen Teil jenes Nebels. Für die Berechnung brauchen wir, wie schon gesagt, außer dem Abstände nichts weiter als die Temperatur und das mittlere Molekulargewicht. Nach der beobachteten Verteilung der Nebel schätzt man, daß die Nebel im allgemeinen 100 bis 200 parsec voneinander entfernt sind. Das ergibt, in runder Zahl, die Dichte 10^{-24} für eine normale Gegend der kosmischen Wolke.

Wenn dies die richtige Größenordnung der Dichte ist, so ist der Betrag an Materie in der Wolke ungefähr ebenso groß wie der zu Sternen verdichtete Betrag. Das stimmt etwa mit einer theoretischen Untersuchung über die Bedingungen für die Bildung von Verdichtungen in einem überall gleichbeschaffenen Urnebel überein, welche

ergibt, daß $\frac{2}{3}$ der Materie Verdichtungen bilden, während $\frac{1}{3}$ unverdichtet bleiben wird.

Im Mittelpunkt eines typischen Nebels, z. B. des großen Orionnebels, muß die Dichte etwa 10 000 mal größer sein, also 10^{-20} . Das ist der millionte Teil der Dichte im höchsten Vakuum, das wir im Laboratorium erzeugen können. So spreche ich in diesem Kapitel von etwas, das — mit irdischen Augen gesehen — kaum mehr als ein Nichts ist.

Die Dichte wird für uns anschaulicher werden, wenn wir sie durch Atomzahlen ausdrücken. Eine Dichte 10^{-24} bedeutet, daß sich in jedem Kubikzentimeter ungefähr ein Atom befindet, wenn — wie in den Sternen — die Mehrzahl der Atome aus Wasserstoff besteht. Es ist wohl ziemlich überraschend, wenn man sich überlegt, daß demnach in der entferntesten Einsamkeit des interstellaren Raumes ein Atom immer noch Nachbarn in ungefähr 1 cm Entfernung hat. Ich hatte vor, euch einen Eindruck von der außerordentlichen Zartheit der kosmischen Wolke zu geben; aber meine letzte Behauptung könnte diesen Eindruck vielleicht ins Gegenteil verkehren, indem sie euch ein Bild von den Atomen gibt, in dem sie dicht gedrängt wie ein Mückenschwarm einhertanzen. Das Bild ist durchaus richtig; aber wir dürfen nicht vergessen, daß ein Atom ein höchst unbedeutendes Stück Materie ist. Ein mäßiger Raucher verpestet im Laufe eines Tages die Luft mit einer ungeheuren Menge von Atomen — mit so vielen, daß man nirgends einen Atemzug tun könnte, ohne ein Dutzend der Atome, die aus der lästigen Pfeife kamen, einzuatmen, vorausgesetzt, daß sie gleichmäßig über die Erdatmosphäre verteilt wären.

Nehmt ein Glas Wasser, bezeichnet alle Atome in ihm so, daß ihr sie wiedererkennen könnt, und gießt es in das Meer; laßt dann die Atome sich über alle Ozeane der Erde verteilen. Dann schöpft irgendwo ein Glas Meerwasser und ihr werdet finden, daß es einige Dutzend von den gezeichneten Atomen enthält. Wir können den Worten Macbeths einen wörtlichen Sinn beilegen:

Kann je das ganze Weltmeer dieses Blut
Mir waschen von der Hand? Nein, meine Hand
Wird eher alle Ozeane röten.

Ein Atom im Kubikzentimeter ist nicht viel. Ein Stück der kosmischen Wolke, so groß wie die Erde, könnte, genügend zusammengedrückt, in einen Handkoffer gepackt und mühelos fortgetragen werden.

IV.

Das Merkwürdigste an der kosmischen Wolke ist, daß sie außerordentlich warm ist. Man spricht oft von der außerordentlichen Kälte des interstellaren Raumes. Es trifft durchaus zu, daß in großer Entfernung von der Sonne in einer normalen Gegend unserer Milchstraße die Temperatur eines festen oder flüssigen Körpers nur -270°C betragen, also nur um 3° über dem absoluten Nullpunkt liegen würde. Das ist die Temperatur, die auch ein Thermometer anzeigen würde, und auch diejenige, die der menschliche Körper empfinden würde, wenn man sich unter solchen Bedingungen noch eine Empfindung vorstellen kann. Aber die diffuse Wolke bringt es auf Grund ihrer diffusen Beschaffenheit fertig, unter den gleichen Bedingungen warm zu bleiben.

Jeder Bezirk des Raumes ist mit einem gewissen Betrag von Wärmestrahlung erfüllt, die von den Sternen ausgestrahlt wird. Sie ist etwa der Wärme gleich, die eine Kerze in einem Abstände von 100 m erzeugt. Man kann sich vorstellen, daß man es ein wenig kühl hätte, wenn man es wagen wollte, da draußen im Weltraum zu sitzen und sich an einer 100 m entfernten Kerze zu wärmen. Wenn der menschliche Körper die gesamte Wärme aufspeichern könnte, die er Minute für Minute von der Kerze empfängt, so würde ihm schließlich warm werden; aber die Materie ist so beschaffen, daß sie jede in ihr enthaltene Wärme wieder von sich gibt, und Gewinn und Verlust gleichen sich aus, sobald die Temperatur auf 3° über dem absoluten Nullpunkt gestiegen ist.

Das diffuse kosmische Gas hat aber eine geringere Möglichkeit, die angesammelte Wärme wieder abzugeben, und aus diesem Grunde erreicht es eine höhere Temperatur. Die Wärme eines Gases besteht in der Bewegungsenergie seiner Teilchen (Moleküle, Atome oder freie Elektronen), und die Möglichkeit, von dieser Energie etwas zu verlieren, besteht nur während eines Zusammenstoßes zweier Teilchen. In der Luft erleidet jedes Teilchen unter den gewöhnlichen irdischen Bedingungen einige tausend Millionen Zusammenstöße in jeder Sekunde. In der kosmischen Wolke aber trifft ein Atom ein anderes nur etwa einmal in einem Jahr; es erfährt aber etwa alle fünf Tage eine sanftere Anregung durch einen Zusammenstoß mit einem Elektron. Da Zusammenstöße so selten erfolgen, ist ein Wärmeverlust, wie er bei gewöhnlichen festen Körpern auftritt, in der kosmischen Wolke praktisch ausgeschlossen.

Das ist aber noch nicht das ganze Geheimnis der hohen Temperatur der Wolke. Die Vorgänge, durch die ein Körper Wärme verliert, sind eng mit den Vorgängen verknüpft, durch die er Wärme aufnimmt, so daß die vorstehende Überlegung auch für die letzteren gilt. Die Zusammenstöße schaffen nicht nur die Gelegenheit für eine Wärmeabgabe, sondern auch für eine Wärmeaufnahme aus der umgebenden Strahlung; infolge seiner sehr kleinen Dichte läßt aber das Gas den größten Teil der Strahlung ungehindert hindurch, ohne von ihr erwärmt zu werden, d. h. es ist sehr durchscheinend. Wenn wir uns also vorstellen, daß sich ein Stück der kosmischen Wolke und ein handfester Meteor beide in 100 m Abstand von einer Kerze befinden, so ist es keineswegs sofort ersichtlich, wer es besser haben wird. Die kosmische Wolke fängt sehr wenig Wärme ein, aber sie läßt das, was sie einmal hat, nicht so leicht wieder fahren; der Meteor rafft alles an sich, was in seinen Weg kommt, gibt es aber auch leicht wieder aus. Das einzige was wir sagen können ist, daß der Mechanismus, der dafür maßgebend ist, welche Temperatur der Meteor annimmt, im kosmischen Gase praktisch überhaupt nicht wirksam ist; daher besteht auch kein Grund, daß sie beide die gleiche Temperatur haben sollten. Im kosmischen Gase ist aber freie Bahn für einen zweiten Mechanismus, der mit den Zusammenstößen nichts zu tun hat und der die Regelung der Temperatur besorgt.

Dieser zweite Mechanismus ist der „lichtelektrische Effekt“ (S. 35). Ein Lichtquant (von genügend hoher Frequenz), das auf ein Atom fällt, macht an ihm ein Elektron frei, das mit großer Geschwindigkeit fortgeschleudert wird. Im interstellaren Raum bewirkt das Sternenlicht ständig eine solche Ausschleuderung von sehr schnellen Elektronen. Man kann sagen, daß ein Elektronengas von sehr hoher Temperatur erzeugt wird, — von hoher Temperatur deshalb, weil die Geschwindigkeiten groß sind. Die Elektronen werden schließlich wieder eingefangen, so daß das Elektronengas ebenso schnell verschwindet wie es entsteht; da es aber bei seiner Bildung immer eine hohe Temperatur hat, so erwärmt es das Gas.

Wir können uns hier nicht gut weiter in die Theorie vertiefen; der wesentliche Punkt ist, daß die Geschwindigkeit, mit der die Elektronen ausgeschleudert werden, und daher auch die Anfangstemperatur des Elektronengases, nach den Gesetzen der Quantentheorie nicht von der Menge der Sternstrahlung abhängt, sondern von ihrer Art. Die Temperatur ist daher in der Tiefe des interstellaren

Raumes die gleiche wie in der nächsten Nachbarschaft der Sterne; und tatsächlich ist die Temperatur nur um ein geringes niedriger als die Oberflächentemperatur der heißesten Sterne, die die Strahlung verursachen. Aber auch die Quantentheorie schenkt uns nichts umsonst, und daher muß die Menge der Strahlung auf andere Weise mitspielen. Die Tatsache, daß das Sternenlicht im interstellaren Raum sehr schwach ist, führt zwar nicht zu einer niedrigen Temperatur des Elektronengases, aber sie bewirkt, daß ihre Erzeugung nur äußerst langsam vonstatten geht. Aber das ist in diesem Zusammenhange belanglos, denn andere Umstände, durch die die Wolke erwärmt oder abgekühlt werden könnte, gibt es praktisch nicht, so daß keine Konkurrenz aus dem Felde zu schlagen ist. So weit eine Schätzung möglich ist, muß die Wolke eine Temperatur von rund $15\,000^\circ$ annehmen.

Wir wollen jetzt die bisher erzielten Ergebnisse zusammenfassen. Wir begannen mit der aus der unmittelbaren Beobachtung gewonnenen Erkenntnis, daß es ein interstellares Gas gibt, welches die $H\gamma$ und K -Linie des Calciums und die D -Linie des Natriums zeigt, und daß diese Linien den Sternen selbst nicht zugeschrieben werden können, weil sie einer anderen Geschwindigkeit entsprechen. Wir haben uns dann dem Problem auf andere Weise genähert und gelangten aus unabhängigen theoretischen Gründen zu dem Schluß, daß es eine interstellare Materie von der ungefähren Dichte 10^{-24} und der ungefähren Temperatur $15\,000^\circ$ geben muß. Es verbleibt uns nun die Aufgabe, diese beiden Beweislinien miteinander zu verknüpfen und zu untersuchen, ob das in einer Wolke von dieser Dichte und Temperatur enthaltene Calcium und Natrium Absorptionslinien von solcher Stärke ergeben kann, wie wir sie wirklich beobachten. Das macht eine Untersuchung des Zustandes der Atome nötig; denn die Atome zeigen je nach ihrem Ionisationszustand verschiedene Spektrallinien. So ist beispielsweise das Calcium ein zweiwertiges Element mit zwei ziemlich lose gebundenen Elektronen. Unter den oben festgestellten Bedingungen muß die überwiegende Mehrzahl der Calciumatome diese beiden Elektronen verloren haben; sie haben sich selbständig gemacht und bilden einen Teil des erwähnten Elektronengases.

Nun besitzt ein Calciumatom, dem zwei Elektronen fehlen, kein sichtbares Spektrum; diese Atome gehen uns also hier nichts an. Die $H\gamma$ und K -Linie rühren von Calciumatomen her, denen nur ein Elektron fehlt. Von etwa 800 Calciumatomen wird sich eines in diesem Zustande befinden. Vollständige Calciumatome sind in der

Wolke äußerst selten, — etwa eines auf 50 Millionen; aus dieser Seltenheit erklärt es sich, warum wir im Spektrum der Wolke keine Linien des nicht ionisierten Calciums beobachten.

Calcium ist ein recht häufiges Element; es bildet etwa 1 % der Masse der Erde. Wenn wir das gleiche Verhältnis in der Wolke annehmen, und wenn wir uns daran erinnern, daß nur $\frac{1}{800}$ der Atome imstande sind, die $H\gamma$ und K -Linie zu absorbieren, so ergibt sich, daß etwa auf jeden Kubikmeter der kosmischen Wolke ein aktives Atom entfällt. Nun denkt euch einen 1000 Lichtjahre entfernten Stern. Wir sehen ihn durch einen 1000 Lichtjahre dicken Schleier, der je Kubikmeter ein absorbierendes Atom enthält. Wie groß ist die Absorption, die ein solcher Schleier erzeugen wird? Diese Frage kann der Physiker auf Grund seines experimentellen und theoretischen Wissens beantworten; und wenn wir seine Berechnung mit der Intensität (der Schwärze und Breite) der ruhenden $H\gamma$ und K -Linien vergleichen, die wir bei einem 1000 Lichtjahre entfernten Stern wirklich beobachten, so ist die Übereinstimmung so gut, wie wir irgend erwarten dürfen.

Leider wird unsere Freude an dieser Übereinstimmung durch einen völligen Mangel an Übereinstimmung beim Natrium getrübt, für den wir keine Erklärung haben. Die $D\gamma$ -Linie wird vom vollständigen Natriumatom erzeugt; aber unter den von uns für die Wolke errechneten Bedingungen sollte nahezu alles Natrium ionisiert sein, und vollständige Atome müßten viel zu selten sein, um die von uns beobachteten Absorptionslinien zu ergeben. Selbst wenn die Wolke ausschließlich aus Natrium bestände, so würde sie noch immer keine genügende Zahl von vollständigen Natriumatomen enthalten. Und so hat leider meine Geschichte keinen befriedigenden Schluß. Aber es ist vielleicht doch ein befriedigender Schluß, da er uns dazu anregt, in unseren Untersuchungen fortzufahren. Denn er zeigt, daß es hier noch eine grundsätzliche Entdeckung zu machen gibt.

V.

Die kosmische Wolke ist im allgemeinen unsichtbar; aber es gibt einige dichtere Stellen, die schwach leuchten. Das sind die gasförmigen Nebel, von denen Tafel II ein Beispiel zeigt. Das interessanteste Kapitel in der Untersuchung der gasförmigen Nebel betrifft den Ursprung und die Art ihres Leuchtens.

Wir kennen einerseits Körper wie die Sonne, die im eigenen Lichte leuchten, und andererseits Körper wie den Mond, die im erborgten Lichte leuchten. Ein gasförmiger Nebel ist in gewissem Sinne ein Mittelding. Das Leuchten des Nebels hängt von den Sternen ab, die sich in ihm befinden, aber er reflektiert nicht einfach ihr Licht. Ihre Strahlung fällt auf die Atome des Nebels und erregt sie zur Aussendung eines Lichtes von anderer Art. Wenn wir hierfür den sonst üblichen Ausdruck anwenden wollen, so können wir sagen, daß der Nebel fluoresziert. Nur Sterne von sehr hoher Temperatur können einen Nebel zum Leuchten anregen; die Sonne wäre dazu nicht imstande. So werden auch die dichtesten Teile des Nebels dunkel bleiben, wenn sich in der Nähe keine Sterne von hoher Temperatur befinden. Man könnte vermuten, daß die dunklen Nebel (Tafel III), die den ganzen Hintergrund verdecken, ähnlich beschaffen sind wie die hellen Nebel, daß ihnen aber die Sterne mangeln, die ihr Leuchten anregen könnten. Indessen kann man ihre Undurchsichtigkeit kaum verstehen, wenn sie lediglich aus Gas bestehen; daher betrachten die Astronomen sie heute im allgemeinen als Wolken von Staub oder meteorischem Stoff. Wie aber die Lösung sei, es besteht ein enger Zusammenhang zwischen den dunklen und den hellen Nebeln, denn man erkennt oft im gleichen Nebel helle Bereiche, die stetig in dunkle Bereiche übergehen.

Wenn wir bei den hellen Nebeln bleiben, so ist ihr Spektrum, wie zu erwarten, dasjenige einer praktisch durchsichtigen Gas-schicht, d. h. ihr Spektrum besteht aus hellen Linien. Das Spektrum des Wasserstoffs tritt sehr deutlich hervor, ist aber keineswegs das am meisten hervorstechende Merkmal des Spektrums. Auch ionisiertes Helium, d. h. Heliumatome, die ein äußeres Elektron verloren haben, ist zu erkennen. Im übrigen besteht das Spektrum aus Linien, die bei Laboratoriumsversuchen niemals beobachtet werden. Der größte Anteil des sichtbaren Lichtes rührt von zwei grünen Linien her, die man früher einem Element *Nebulium* zugeschrieben hat. Im Ultraviolett tritt eine weitere sehr starke Linie auf, deren Quelle keinen besonderen Namen erhalten hat. Ob benannt oder nicht, das Leuchten der Nebel gleicht zum größten Teil keiner auf der Erde bekannten Erscheinung.

Die heutige Theorie des periodischen Systems und der Ordnungszahlen der Elemente (S. 28) läßt für neue Elemente keinen Platz, außer im Bereich der sehr großen Ordnungszahlen. Wenn der Physiker ein neues Element innerhalb des Bereiches bis zur

ersten Lücke entdecken würde, so wäre er kaum weniger überrascht als ein Mathematiker, der eine neue ganze Zahl entdecken würde. Daher sind die Astronomen seit vielen Jahren überzeugt gewesen, daß sich hinter dem Namen Nebulium nur ein anderes sehr wohlbekanntes Element verbirgt, und daß auch die anderen unbekannten Linien ihren Ursprung wohlbekannten Stoffen verdanken. Die Frage war, wodurch ein bekannter Stoff dazu veranlaßt werden könne, das seltsame Leuchten zu zeigen, das er im Laboratorium durchaus zu zeigen verweigert. Im Laboratorium geht man mit den Atomen reichlich unsanft um. Das Verfahren, mit dem man die Atome in Gang setzt, besteht darin, daß man ihnen einen Puff gibt; und wenn sie dann noch nicht tun, was sie sollen, so gibt man ihnen noch einen derberen Puff.

Aber ist es denn überhaupt wahrscheinlich, daß man bei einer solchen Behandlung Licht von der Art erzeugen kann, wie es in den Nebeln ausgesandt wird? In den Nebeln führen die Atome ein sehr geruhames Dasein. Wir haben gesehen, daß die Einförmigkeit in einer kosmischen Wolke nur dadurch unterbrochen wird, daß etwa einmal in jeder Woche ein Zusammenstoß mit einem Elektron stattfindet. Bei der tausendfachen Dichte der Nebel spielen sich die Ereignisse entsprechend schneller ab; aber auch dann muß die Zeitspanne zwischen zwei Zusammenstößen einem Atom, dessen Periodizität von der Größenordnung von 10^{-9} Sekunden ist, wie eine wahre Ewigkeit vorkommen.

Wir wollen die Sache noch auf eine andere Weise betrachten. Wir können die Lichtmenge, die ein leuchtender Nebel, z. B. der Orionnebel, ausstrahlt, ungefähr messen und das Ergebnis durch die Zahl der in einer Sekunde ausgestrahlten Quanten (oder Photonen) ausdrücken. Wir kennen auch die Größe des Nebels, und die in diesem Kapitel beschriebene Theorie ergibt eine allgemeine Vorstellung von seiner Dichte. Wir können daher die Gesamtzahl der Atome im Nebel schätzen. Daraus können wir aber berechnen, wie oft im Durchschnitt ein Atom dazu kommt, ein Photon auszusenden. Dann ergibt sich, daß das etwa einmal in einem Jahrhundert der Fall ist.

Das Rätsel des Nebuliums hat I. S. Bowen im Jahre 1927 gelöst. Er fand, daß die seltsame Linie dem entspricht, was die Theorie als einen „verbotenen Übergang“ bezeichnet. Wir haben gesehen, daß einem äußeren Elektron eine Anzahl verschiedener Bahnen zur Verfügung steht, und daß Licht ausgestrahlt wird, wenn ein Elektron von einer Bahn höherer Energie auf eine Bahn geringerer



Mount Wilson Observatorium

Dunkler Nebel. Der Pferdekopf im Orion

Energie springt. Aber das Elektron führt seine Sprünge nicht wahllos aus. Es ist so, als seien die Bahnen durch Querwege verbunden; zwischen gewissen Bahnen gibt es Querwege, zwischen anderen fehlen sie. So kann es etwa vorkommen, daß ein Elektron von der 3. Bahn auf die 2. Bahn oder auf die noch tiefere 1. Bahn fallen kann, aber es fällt nicht von der 2. auf die 1. Bahn. In diesem Fall heißt der Übergang von der 2. zur 1. Bahn ein verbotener Übergang. Die Atomtheorie liefert uns die Regeln, die die verbotenen Übergänge angeben.

Man erkannte aber, daß die Übergänge nicht unbedingt verboten sind. Das Elektron im obigen Beispiel kann von der 2. auf die 1. Bahn springen, nur ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß es das in irgendeiner vernünftigen Zeit tut, klein; und wenn es nicht schnell handelt, so wird es durch die Zusammenstöße und Absorptionsvorgänge, die sich unter irdischen Bedingungen ständig ereignen, aus der 2. Bahn vorzeitig entfernt werden. Bowen erkannte, daß in einem Nebel ein Elektron, das auf die 2. Bahn gehoben ist, für das also als Bahn kleinerer Energie nur die 1. Bahn in Frage kommt, schließlich doch den verbotenen Übergang machen müssen. Da es nichts gibt, was es stören oder erlösen könnte, so würde es in der 2. Bahn gefangen bleiben, wenn es seinen Widerstand nicht aufgeben würde. Die unbekannten Linien in den Nebelspektren entsprechen verbotenen Übergängen, und aus diesem Grunde werden sie nur unter so friedlichen Verhältnissen ausgesandt, wie sie in den Nebeln herrschen.

Der Beweis beruht auf der Identifizierung der Linien. Nebulium ist doppelt ionisierter Sauerstoff. Alle übrigen verdächtigen Linien in den Nebeln, deren Ursprung früher unbekannt war, sind verbotene Linien, die teils vom einfach oder doppelt ionisierten Sauerstoff, teils vom einfach ionisierten Stickstoff herrühren.

Wieso kann man aber die verbotenen Linien des Sauerstoffs kennen, wenn wir es selbst nicht fertigbringen, den Sauerstoff zu ihrer Aussendung zu veranlassen? Außer in einem ganz besonders einfachen Fall können wir das Spektrum eines Atoms nicht auf rein theoretischem Wege berechnen, und wir sind darauf beschränkt, Wellenlängen experimentell zu messen. Es ist aber nicht nötig, daß wir die Wellenlängen sämtlicher Linien des Spektrums messen; wenn wir einen Teil von ihnen gemessen haben, können wir die übrigen berechnen. Die zur Berechnung erforderliche Regel, die sehr einfach ist, ist aus der Quantentheorie wohl bekannt. Wenn die berechnete Linie keine verbotene Linie ist,

so können wir sie beobachten und so die Regel bestätigen; aber die gleiche Regel erlaubt uns auch, die Wellenlängen der verbotenen Linien zu berechnen, die wir nicht beobachten können.

So erkannte Bowen das Nebuliumspektrum als ein Spektrum des Sauerstoffs, obgleich man es beim irdischen Sauerstoff niemals erblickt hat. Er erkannte es als dasjenige, aus der Theorie bekannte, Spektrum, dessen Auftreten unter gewöhnlichen Bedingungen verboten ist. Auch bis heute hat man es im Laboratorium noch nicht erzeugen können. Selbst wenn es uns möglich wäre, den Atomen die nötige Muße zu verschaffen, dürften wir kaum erwarten, dieses Leuchten zu entdecken. Denn die Atome lassen sich, wie wir gesehen haben, mit seiner Aussendung Zeit, und man kann sie nicht zwingen, schneller als etwa einmal in der Sekunde zu arbeiten. Das bedeutet aber, daß nur ein sehr schwaches Leuchten entsteht. Man braucht eben eine Lichtquelle von astronomischen Ausmaßen, damit eine beobachtbare Lichtmenge erzeugt wird.

So ist die Quelle „des Lichtes, das zu Wasser und zu Lande nie erblickt wurde“, ein sehr wohlbekannter Stoff. Es ist Sauerstoff und Stickstoff oder, wenn euch das lieber ist, ganz gewöhnliche Luft.

10. Kapitel

DIE EXPANSION DES WELTALLS

Wenn es, Gedanken sich zu machen,
Sie lüftet, hat des Himmels Werkstatt er
Zum Streiten hergegeben.
Milton, Das verlorene Paradies.

I.

Dieses Kapitel ist der Beschreibung des großräumigsten Systems, das je gedacht wurde, gewidmet, nämlich des Systems der Milchstraßen. Ein Rezept zur Zubereitung von Milchstraßen lautet: Man nehme etwa 10 000 Millionen Sterne und verteile sie so, daß das Licht im Durchschnitt vier bis fünf Jahre braucht, um von dem einen bis zum nächsten zu kommen. Dann mische man etwa die gleiche Menge Materie in Gestalt eines diffusen Gases unter die Sterne, rolle das Ganze flach aus und versetze es in seiner eigenen Ebene in Drehung. Man erhält dann ein Gebilde, das, aus genügender Entfernung betrachtet, wahrscheinlich dem auf Tafel IV dargestellten Spiralnebel mehr oder weniger ähnlich ist.

Es gilt jetzt als ausgemacht, daß die Spiralnebel ungeheure Sternsysteme sind*. Wahrscheinlich bilden sie diejenigen Einheiten, mit denen wir es bei einer Betrachtung des Weltalls als Ganzes zu tun haben. Natürlich leben wir selbst in einer dieser Milchstraßen, zu der die Sonne und alle dem bloßen Auge sichtbaren Sterne gehören. Wir nennen sie unsere Milchstraße. Da wir uns in ihrem Inneren befinden, so können wir nur schlecht einen allgemeinen Überblick über sie gewinnen, und es ist schwer, sie mit anderen Milchstraßen zu vergleichen. Die Beobachtungen machen es ein wenig zweifelhaft, ob unsere Milchstraße ein ganz normales Exemplar ist; sie scheint ungewöhnlich groß zu sein. Aber neuere Untersuchungen führen mehr und mehr zu einem Ausgleich und lassen unsere Milchstraße nicht mehr als so besonders ungewöhnlich erscheinen.

* Die Spiralnebel dürfen nicht mit den im 9. Kapitel behandelten gasförmigen Nebeln verwechselt werden. Diese gehören unserer Milchstraße an und werden deshalb oft als galaktische Nebel bezeichnet. Die Spiralnebel hingegen sind selbst Milchstraßen und werden auch als außer-galaktische Nebel bezeichnet. D. Übers.

Nach Stichzählungen in verschiedenen Gegenden des Himmels geschätzt, sind einige Millionen solcher Milchstraßen in unseren stärksten Fernrohren sichtbar, und nur der Himmel weiß, wie viele noch außerhalb ihrer Reichweite liegen mögen. Oder vielmehr — ich glaube, daß auch ich es mehr oder weniger weiß. Aber das ist alles nur Theorie, und davon werdet ihr später noch genug zu hören bekommen.

Nunmehr werden also die Spiralnebel oder Milchstraßen unsere Einheiten bilden. Wie der Chemiker ein Atom als Einheit nimmt und sich um nichts Kleineres zu kümmern braucht, wenn er sich mit Myriaden von Atomen befaßt, genau so werden wir die Milchstraßen als unsere Atome betrachten, ohne uns um etwas Kleineres zu kümmern, und ein Gebilde aus gut und gern einer Billion Milchstraßen untersuchen, die offenbar das Weltall ausmachen.

Wir wollen jetzt sehen, wohin wir in der Größenskala gekommen sind:

Abstand der Sonne	150 000 000 km
Grenze des Sonnensystems (Bahn des Pluto)	5 800 000 000 „
Entfernung des nächsten Sternes	41 000 000 000 000 „
Entfernung der nächsten Milchstraße	8 000 000 000 000 000 000 „
Ursprünglicher Umfang des Weltalls	39 000 000 000 000 000 000 000 „

Die letzte Angabe ist etwas verfrüht, aber wir werden darauf später zurückkommen (S. 207).

Mir sind manchmal Klagen zu Ohren gekommen, daß man astronomische Zahlen nicht behalten kann, weil sie allzu groß sind. Ich muß zugeben, daß die Zahlen in diesem Kapitel das gewohnte Maß stark überschreiten. Aber ich kann nicht einsehen, wieso jemand eine Schwierigkeit mit denjenigen Zahlen haben kann, die in den kleineren astronomischen Systemen vorkommen. Es sind genau solche Zahlen wie die, mit denen unsere Finanzleute und Politiker es ständig zu tun haben und von denen täglich in den Zeitungen die Rede ist. Und da sagen die Leute, daß sie sich unter so großen Zahlen nichts vorstellen können. Aber es ist ja auch das letzte, was jemand von großen Zahlen verlangt, daß man sie sich sollte vorstellen können. Glaubt ihr wirklich, daß sich der Finanzminister beim Herannahen der Haushaltsberatung in einen hypnotischen Zustand versetzt, in dem er 800 000 000 englische Pfund in Gold oder in Banknoten, oder in Staatspapieren, oder was auch immer er einzuheimsen im Begriff ist, im Geiste greifbar vor sich sehen kann? Seine einzige Sorge ist, daß er die einzelnen Zahlen sicher nicht miteinander verwechselt, obgleich weder 800 000 000

noch 8 000 000 000 eine Zahl ist, die man sich möglicherweise „vorstellen“ könnte. Es ist der Zweck der vorstehenden Entfernungstabelle, daß wir aus ihr lernen sollen, die verschiedenen Größenordnungen in unserem Kopf säuberlich auseinanderzuhalten. Insbesondere müssen wir uns merken, daß es einen sehr großen Sprung in der Größenordnung bedeutet, wenn wir von einem Sternsystem zu einem Milchstraßensystem übergehen.

Wie messen wir die Entfernung von Milchstraßen? Um einen Anfang zu machen, können wir zunächst einmal einige der hellsten Sterne in den nächstgelegenen Milchstraßen photographieren. Infolge ihres großen Abstandes erscheinen sie sehr schwach; ihre geringe Helligkeit ist ein Maß für ihre Entfernung, vorausgesetzt, daß wir wissen, wie groß ihre Leuchtkraft ist (vgl. S. 134), und unter der weiteren Voraussetzung, daß sich kein Dunst dazwischenlagert. Wären alle Kraftwagen mit Scheinwerfern der gleichen Lichtstärke ausgerüstet, so könnte man die Entfernung jedes einzelnen Wagens angeben, wenn man die scheinbare Helligkeit der Scheinwerfer sorgfältig mißt. In den Milchstraßen gibt es viele Scheinwerfer, und unter ihnen erkennen wir einige, von denen wir wissen, daß sie eine ganz bestimmte Leuchtkraft besitzen, nämlich die Cepheiden, eine bestimmte Klasse von veränderlichen Sternen. Wenn wir in einer der Milchstraßen einen Stern beobachten, der sich nach Art der Cepheiden mit einer Periode von zehn Tagen verändert, so schlagen wir in unserem Verzeichnis die Leuchtkraft einer Cepheide mit einer zehntägigen Periode nach (berechnet nach Messungen an Sternen in unserer nächsten Umgebung), und daraus kann dann die Entfernung der Milchstraße im Handumdrehen berechnet werden. Auf diese Weise hat E. P. Hubble die Entfernung von einigen der uns nächsten Milchstraßen gemessen. Für die größeren Entfernungen gibt es nur weniger befriedigende Methoden, und die den entfernteren Milchstraßen zugeschriebenen Entfernungen sind wohl mit einigen Zweifeln zu betrachten. Indessen sind wir doch der Ansicht, daß sie eine einigermaßen vernünftige Vorstellung von dem System vermitteln.

Wir können auch feststellen, wie schnell sich eine Milchstraße in der Sehrichtung auf uns zu oder von uns weg bewegt, indem wir die Dopplerverschiebung ihrer Spektrallinien messen, — ein Verfahren, das auf alle Lichtquellen anwendbar ist, deren Spektrum nicht aller besonderen Merkmale bar ist. Unter den Sternen unseres eigenen Systems finden wir selten eine Geschwindigkeit von mehr als 100 bis 200 km in der Sekunde; aber die Geschwindig-

keiten der fremden Milchstraßen sind im allgemeinen viel größer und betragen viele Hunderte oder Tausende von Kilometern in der Sekunde.

Diese Bewegungen zeigen eine sehr bemerkenswerte Eigentümlichkeit. Je weiter entfernt eine Milchstraße ist, um so größer ist ihre Geschwindigkeit. Überdies bewegen sich die Milchstraßen fast ausnahmslos von uns fort.

Die nächste der fremden Milchstraßen ist etwa 1 Million Lichtjahre von uns entfernt. Gegenwärtig beträgt die äußerste Grenze, bis zu der unsere Beobachtungen reichen, 150 Millionen Lichtjahre. Im Sternbild der Zwillinge gibt es einen Spiralnebel, dessen Entfernung so groß ist, daß die Lichtwellen ihn vor 150 Millionen Jahren verlassen haben müssen, um uns heute zu erreichen; dieser Nebel entfernt sich von uns mit einer Geschwindigkeit von rund 25 000 km in der Sekunde. Die näherliegenden Milchstraßen entfernen sich mit kleinerer Geschwindigkeit, und ihre Geschwindigkeiten sind, so genau wir es sagen können, der Entfernung proportional. Das System erstreckt sich ohne Zweifel über 150 Millionen Lichtjahre hinaus; aber die weiter entfernten Milchstraßen sind so lichtschwach, daß es bisher noch nicht möglich war, die zur Bestimmung ihrer Geschwindigkeit nötigen Messungen zu machen. (Soeben — November 1934 — wird ein noch weiter entfernter Nebel im Bootes angekündigt, der sich mit einer Geschwindigkeit von 39 000 km in der Sekunde von uns entfernt.)

Die Regel, daß die fremden Milchstraßen sich von uns entfernen, hat fünf Ausnahmen. Aber dies ungewöhnliche Verhalten beschränkt sich auf Milchstraßen in unserer nächsten Umgebung und hat wahrscheinlich nichts besonderes zu bedeuten. Nach dem Gesetz von der Proportionalität der Entfernung und der Geschwindigkeit sollten die nächsten Milchstraßen, die 1 bis 2 Millionen Lichtjahre von uns entfernt sind, eine nach außen gerichtete Geschwindigkeit von 150 bis 300 km in der Sekunde haben. Das genügt kaum, um sich gegenüber verschiedenen zufälligen Einflüssen durchzusetzen, die sonst noch wirksam sein können. Daher brauchen wir der gelegentlichen Umkehrung in diesem Bereich keine besondere Beachtung zu schenken. Sobald der Entfernungseffekt so groß wird, daß er durch solche Einflüsse nicht mehr verdeckt werden kann, bewegen sich alle Milchstraßen übereinstimmend von uns fort, d. h. sie besitzen eine von uns weggerichtete Radialgeschwindigkeit.

II.

Wenn sich alle Milchstraßen von uns entfernen, keine sich auf uns zu bewegt, so wird eine Zeit kommen, in der die Gegend, die wir jetzt überblicken, leer geworden sein wird. Ich kann nicht behaupten, daß das unsere irdischen Angelegenheiten sonderlich beeinflussen wird; aber der Astronom jener künftigen Zeit wird eines der erhabensten und herrlichsten Wahrzeichen des Himmels nicht mehr kennen. Übrigens ist jener Zeitpunkt gar nicht so weit entfernt. Ich will keine übertriebene Aufregung verbreiten; aber die Nebel verdoppeln ihren Abstand von uns alle 1300 Millionen Jahre, und die Astronomen werden die Öffnung ihrer größten Fernrohre alle 1300 Millionen Jahre verdoppeln müssen, nur um ihrer Flucht auf den Fersen zu bleiben. Ernsthaft gesagt, 1300 Millionen Jahre sind keine große Zeitspanne in der Geschichte des Kosmos; sie entspricht ungefähr dem Alter, das man den ältesten irdischen Gesteinen zuschreibt, und es ist wahrlich ein befremdender Gedanke, daß innerhalb geologischer Zeiträume im ungeheuren System des Weltalls irgendwelche beträchtlichen Veränderungen eingetreten sein sollen. Er zwingt dazu, das Tempo des Wandels und der Entwicklung als viel schneller anzunehmen, als wir noch vor wenigen Jahren zu tun geneigt waren. Wir müssen die Entwicklung der Sterne schneller ablaufen lassen, um Schritt zu halten.

Die Flucht der Milchstraßen bedeutet nicht, daß sie sich gerade von uns besonders abgestoßen fühlten. Nicht, daß sie gerade unsere eigene Milchstraße mieden; dazu ist sie nicht wichtig genug. Wenn wir das aus der Erfahrung gewonnene Gesetz, nach dem die Radialgeschwindigkeit der Entfernung proportional ist, genau bedenken, so sehen wir, daß sich die einzelnen Milchstraßen auch voneinander ebenso entfernen, wie sie sich von unserer Milchstraße entfernen. Es vollzieht sich eine gleichförmige Aufblähung oder Dehnung des ganzen Systems. Wenn sich dieser Hörsaal auf das Doppelte seiner jetzigen Maße dehnen würde, wobei sich alle Sitzplätze im gleichen Verhältnis voneinander entfernen würden, so würdet ihr zunächst meinen, daß alle übrigen Hörer von euch abgerückt sind. Aber jeder andere würde den gleichen Eindruck haben. Eine solche Expansion ist es, die sich im Milchstraßensystem abspielt. Da die gegenseitige Abstandsänderung, die Zunahme des Abstandes zwischen den einzelnen Milchstraßen,

dem Abstände proportional ist, so brauchen sämtliche Abstände zu ihrer Verdopplung die gleiche Zeit, nämlich 1300 Millionen Jahre.

So dehnt sich das Milchstraßensystem aus, wie sich ein Gas ausdehnt, indem seine Atome sich weiter und weiter voneinander entfernen. (Man erinnere sich, daß in dieser Überphysik des Weltalls die einzelnen Milchstraßen die Rolle der unteilbaren Atome spielen.) Wenn die Astronomen recht haben, so folgt aus den Messungen unmittelbar, daß sich das Milchstraßensystem ausdehnt, — oder, da das Milchstraßensystem das ganze uns bekannte Weltall ausmacht, daß sich das Weltall ausdehnt. Dahinter steckt keine Spitzfindigkeit oder Metaphysik. Abgesehen davon, daß das betreffende System ungewohnt große Ausmaße hat, kann man sich das leicht genug vorstellen.

Sind wir aber der beobachteten Sachverhalte sicher? Männer der Wissenschaft lieben es, väterlich daran zu erinnern, daß man der beobachteten Sachverhalte völlig sicher sein müsse, bevor man sich in eine Theorie stürzt. Es ist ein Glück, daß die Taten derer, die solches predigen, ihren Worten nicht entsprechen. Beobachtung und Theorie fahren immer am besten, wenn sie vereint auftreten, indem sie sich gegenseitig bei der Erforschung der Wahrheit unterstützen. Es ist ein gesunder Grundsatz, daß man kein übergroßes Vertrauen auf eine Theorie setzen soll, solange sie nicht durch die Erfahrung bestätigt ist. Ich hoffe, daß ich bei den Experimentalphysikern kein allzu großes Argernis erzeuge, wenn ich hinzufüge, daß es auch ein gesunder Grundsatz ist, daß man kein übergroßes Vertrauen auf Beobachtungsergebnisse setzen soll, solange sie nicht durch die Theorie bestätigt worden sind.

Wenn ich also damit anfangen, über das sich ausdehnende Weltall zu theoretisieren, so halte ich es doch nicht für durchaus erwiesen, daß die aus der Beobachtung abgeleiteten Tatbestände, die wir besprochen haben, völlig zuverlässig sind. Das gerade möchte ich ja erfahren, — ob die Theorie sie bestätigt. Vorläufig widersteht es uns ein wenig, diese Beobachtungsergebnisse nach ihrem Nennwert anzunehmen. Nicht die Expansion des Weltalls an sich, sondern die schnelle Expansion läßt uns die Beobachtungsergebnisse mit sehr kritischem Blick betrachten; denn wenn sie zutreffen, so richten sie unter unseren früheren Ansichten über das Tempo der evolutionären Entwicklung eine arge Verwüstung an. Wenn die bei den Spiralnebeln gefundenen Geschwindigkeiten



Mount Wilson Observatory

Spiralnebel. M.51 in den Jagdhunden

echte Geschwindigkeiten sind, so gibt es vor dieser schnellen Expansion kein Entrinnen.

Sind es aber echte Geschwindigkeiten? Wir dürfen kaum sagen, daß wir diese Radialgeschwindigkeiten im eigentlichen Sinne beobachten. Wir beobachten eine Rotverschiebung der Spektrallinien; und wenn auch eine solche Verschiebung im allgemeinen von einem Zurückweichen der betreffenden Lichtquelle herrührt, so ist es doch nicht undenkbar, daß sie gelegentlich auch von einer anderen Ursache herrühren kann. Ich kann lediglich sagen, daß nichts uns beim heutigen Stande unseres physikalischen Wissens einen Hinweis auf eine andere mögliche Ursache der Rotverschiebung der Nebelspektren liefert. Es müßte erst eine tiefgehende Wandlung entweder in der Theorie des Lichtes oder allgemein in den astronomischen Vorstellungen eintreten. Man kann einwenden, daß unser Wissen unvollkommen ist, und daß unvorhergesehene Entwicklungen immer möglich sind; aber das gleiche kann gegen jeden unserer naturwissenschaftlichen Schlüsse eingewendet werden, und es ist irreführend, wenn man in einem besonderen Zusammenhange plötzlich daran erinnert. In einem neuen „General Catalogue of Radial Velocities“ sind die Angaben für alle anderen Objekte unter der Überschrift „Radialgeschwindigkeiten“ angeführt, aber bei den Spiralnebeln lautet die Überschrift „Scheinbare Radialgeschwindigkeiten“. Mancher wird darin eine empfehlenswerte Vorsicht sehen; aber mich erinnert es an die Vorsicht jenes Geistlichen, der seiner Frau schrieb: „Ich werde (s. G. w.) am Freitag daheim sein; auf jeden Fall aber am Sonnabend.“

Wenn ich hier von der Theorie spreche, so muß ich betonen, daß es die Theorie gewesen ist, die zuerst eine systematische rückläufige Bewegung der Spiralnebel vermuten ließ und so zu einer Suche nach dem Effekt veranlaßte. Die theoretische Möglichkeit wurde zuerst im Jahre 1917 von W. de Sitter erkannt. Damals waren nur die Radialgeschwindigkeiten von drei Nebeln bekannt, und sie gaben seiner Theorie mit einer Mehrheit von 2 gegen 1 nur eine sehr schwache Stütze. Seitdem ist es möglich geworden, weiter entfernte Nebel zu untersuchen, die die Theorie bisher ausnahmslos bestätigen. Diesen Fortschritt verdanken wir hauptsächlich V. M. Slipher von der Lowell-Sternwarte und M. L. Humason von der Mount Wilson-Sternwarte. Das Gesetz der linearen Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Entfernung ist von E. H. Hubble gefunden worden. Mittlerweile hat sich auch die Theorie weiter

entwickelt und sie hat die Gestalt angenommen, die insbesondere an die Namen A. Friedmann und G. Lemaître geknüpft ist.

Die Relativitätstheorie sagt die Existenz einer gewissen Kraft voraus, die wir die kosmische Abstoßung nennen. Sie ist dem Abstände des betreffenden Objektes direkt proportional und so schwach, daß wir sie bei der Betrachtung der Bewegung der Planeten um die Sonne und überhaupt jeder Bewegung innerhalb der Grenzen unserer eigenen Milchstraße vernachlässigen können. Da sie aber proportional mit dem Abstände zunimmt, so wird sie, wenn wir zu ausreichend großen Entfernungen übergehen, beträchtliche Werte annehmen. Wird sie in der Entfernung der Spiralnebel merklich sein? Die Relativitätstheorie kann darüber nichts sagen, denn sie sagt über die Größe der Kraft nichts aus. Sie konnte nur dazu anregen, die Bewegungen so entfernter Objekte zu untersuchen; und wenn man dann eine allgemeine Flucht entdeckte, wie sie von einer abstoßenden Kraft hervorgerufen werden müßte, dann konnte das sehr wohl eine Wirkung der kosmischen Abstoßung sein.

Ich habe soeben gesagt, daß die Abstoßungskraft dem Abstände des Objektes proportional ist. Dem Abstände von wo? Von wo immer ihr wollt. Wir rechnen ihn als den Abstand von der Erde, oder besser von unserer Milchstraße, da ja die Milchstraßen unsere unteilbaren Atome sind. Aber ein Beobachter auf einer anderen Milchstraße kann ihn ebenfalls als den Abstand von sich selbst ansehen. Das tut nichts zur Sache; wir werden alle zu den gleichen Ergebnissen kommen, soweit sie irgend etwas Beobachtbares betreffen. Die kosmische Abstoßung ist eine zerstreuende Kraft, die ein System gleichförmig zu dehnen sucht — nicht so, daß es von irgendeinem bestimmten Mittelpunkt aus auseinanderstrebt, sondern so, daß alle Abstände in ihm im gleichen Verhältnis zunehmen. Das entspricht genau der Art von Expansion, die wir im Milchstraßensystem beobachten.

Ich habe gesagt, daß die Relativitätstheorie eine kosmische Abstoßungskraft vorhersagt. In ihrer eigenen Fachsprache redet die Relativitätstheorie nicht von so handfesten Dingen, wie es eine Kraft ist; sie beschreibt die Erscheinungen mittels einer Krümmung der Raum-Zeit-Welt. In praktischen Fällen ist aber diese Krümmung, die in die Gravitationswirkungen eingeht, sehr nahezu der Newtonschen Gravitationskraft äquivalent; und ähnlich ist die kosmische Abstoßungskraft eine Übertragung eines anderen, von der Relativitätstheorie geforderten Krümmungseffektes in die Newtonsche Ausdrucksweise. Solche Übertragungen sind natürlich

mit Vorsicht anzuwenden; sie dürfen nicht durch Anwendung auf ungewöhnliche Verhältnisse überspannt werden. Der tiefgründige Wortschatz der Theorie hätte kein Daseinsrecht, wenn in allen Fällen eine Übertragung in die gewohnte Sprache ausreichend wäre. Indessen, der bewußte Relativitätseffekt wird mit ausreichender Genauigkeit durch eine kosmische Abstoßungskraft wiedergegeben, und zwar jedenfalls bis zu den größten Entfernungen, die wir wirklich beobachten können.

Die kosmische Abstoßung ist nicht die einzige Kraft, die am Werke ist. Die Milchstraßen üben aufeinander ihre gewöhnliche, von der Gravitation herrührende Anziehung aus, die nahezu dem Newtonschen Gesetz gehorcht. Das führt dazu, daß sie einander festzuhalten suchen. So handelt es sich in Wirklichkeit um den Wettstreit zweier Kräfte. Die Newtonsche Anziehungskraft sucht das Weltall beisammenzuhalten, die kosmische Abstoßung sucht es in alle Winde zu zerstreuen. Wenn unsere Theorie zutrifft, muß die kosmische Abstoßung die Oberhand gewonnen haben, da die Milchstraßen tatsächlich auseinandergetrieben werden. Nachdem die Abstoßung einmal die Oberhand hat, wird sie sie auch behalten. Denn je weiter sich die Nebel voneinander entfernen, um so kleiner wird ihre gegenseitige Anziehung werden, und einen um so kleineren Widerstand leisten sie der auseinandertreibenden Kraft.

Im Zusammenhang mit der kosmischen Abstoßung definieren wir eine wichtige Naturkonstante: die kosmologische Konstante; das ist die Größe der kosmischen Abstoßung in der Abstandseinheit vom Beobachter. Diese Konstante wird im allgemeinen mit λ bezeichnet. Die gewöhnliche Relativitätstheorie sagt uns nichts über den Betrag von λ , nicht einmal über sein Vorzeichen (plus oder minus). Sie fordert lediglich, daß λ nicht gleich Null ist; denn dann würde die Theorie aufhören, eine Relativitätstheorie zu sein *. Es war ein Mangel der ursprünglichen Einsteinschen Theorie, der zuerst von H. Weyl beseitigt wurde, daß sie die Existenz einer absoluten Längeneinheit einschloß, — eines Begriffes, der dem relativistischen Denken ebenso fremd ist wie eine absolute Bewegung, eine absolute Gleichzeitigkeit, eine absolute Rotation usw. Wenn man $\lambda = 0$ setzt, so bedeutet das eine Rückkehr zur

* Die kosmologische Konstante drückt eine Maßbeziehung zwischen zwei Arten von Erscheinungen aus. Solange diese durch irgendeine, wenn auch kleine, endliche Zahl ausgedrückt wird, bleibt die Beziehung gültig. Wird sie aber durch die Zahl Null ausgedrückt, so wird die Beziehung hinfällig.

unvollkommen relativistischen Theorie — ein Schritt, an den man ebensowenig denken kann wie an eine Rückkehr zur Newtonschen Theorie.

Demnach wird der geltende Wert der kosmologischen Konstanten aus den beobachteten Radialgeschwindigkeiten der Milchstraßen abgeleitet. Eine solche Ableitung kann natürlich nur eine vorläufige sein, da sie voraussetzt, daß die großen Radialgeschwindigkeiten von der kosmischen Abstoßung und nicht von anderen Ursachen herrühren. Wir werden indessen später sehen, daß man sich der kosmologischen Konstanten noch auf einem anderen Wege nähern kann, der eine genaue, von astronomischen Tatsachen unabhängige Bestimmung ihres Betrages erlaubt, und der daher einen Prüfstein für die ganze Theorie liefert.

III.

Ich könnte mir denken, daß ein Leser, der die Auseinandersetzungen in Wort und Schrift über diesen Gegenstand ein wenig verfolgt hat, mich hier mit einer Frage unterbrechen möchte. „Du hast die Expansion eines großen Milchstraßensystems beschrieben, das das materielle Weltall bildet. Versteht man denn aber unter der ‚Expansion des Weltalls‘ nicht noch etwas mehr als das? Nicht nur ein Zurückschieben der Grenzen eines materiellen Systems, sondern eine Expansion, eine Aufblähung des Raumes selbst?“ Allerdings, und ich muß daher ein wenig von der Expansion des Raumes erzählen, obgleich es schwierig ist, diesem Gedanken zu folgen.

Eine neue physikalische Erscheinung wird natürlich auf der Grundlage derjenigen allgemeinen physikalischen Theorien betrachtet und beschrieben, die zu der in Frage kommenden Zeit in Geltung sind. So würde man heute eine neue Erscheinung im Bereich der Atome auf der Grundlage der Wellenmechanik beschreiben, obgleich sie vielleicht nur einen geringen oder gar keinen Zusammenhang mit den besonderen Zügen der Wellenmechanik hat und eine klassische Beschreibung und Erklärung ebensogut möglich wäre. Wenn es auch nützlich ist, festzustellen, daß die Erscheinung die Grenzen der klassischen Theorie nicht durchbricht, so werden wir sie als einen Beitrag zum allgemeinen Fortschritt der Wissenschaft doch nur dann gebührend auswerten, wenn wir sie vom Standpunkt unserer fortschrittlichsten Ansichten betrachten. Vor hundert Jahren hätte sich ein Physiker wohl

gewundert, wenn er gehört hätte, daß das Positron einer sehr verwickelten Erklärung bedürfen solle, die eigentlich nur für einen Mathematiker verständlich ist, und daß man in seinem Dasein sogar manchmal eine Bestätigung neuester Gedanken erblicken will. Er würde es vielmehr als eine Bestätigung seiner ganz natürlichen Ansicht betrachten, daß es zwei elektrische Fluida mit völlig symmetrischen Eigenschaften gibt, die sich in ihren Wirkungen gegenseitig aufheben können. Ebenso sind wir hier einer astronomischen Erscheinung begegnet, die auf den ersten Blick weiter nichts ist als eine gewöhnliche Expansion eines materiellen Systems. Die moderne Theorie ist dabei nur insofern im Spiele, als sie die Ursache des Auseinanderweichens nahelegt (die kosmische Abstoßung), während man anderenfalls eine Erklärung *a d h o c* hätte ersinnen müssen. Mit dieser Beschreibung geben wir uns aber deshalb nicht zufrieden, weil das System von außerordentlich viel größeren Ausmaßen ist, als irgendein anderes bisher erforschtes System; und die ungeheure Größe des Systems führt zu gewissen Unterschieden zwischen der modernen und der klassischen wissenschaftlichen Betrachtungsweise, die bei einem kleineren System belanglos sein würden. In diesem Zusammenhange taucht der Gedanke des sich ausdehnenden Raumes auf. In einer kürzeren Auseinandersetzung über die Expansion des Weltalls wäre es wohl berechtigt, jeden Hinweis auf die Expansion des Raumes zu unterlassen, so wie ich ja auch bei der Einführung des Positrons kein Wort von der Diracschen Theorie gesagt habe, nach der es eine vorübergehend nicht besetzte Stelle unter unendlich vielen besetzten Quantenzuständen negativer kinetischer Energie ist.

Wir haben gesehen, daß die Geschwindigkeiten, mit denen die Milchstraßen forteilten, ihren Entfernungen proportional sind. Bei einer Entfernung von 150 Millionen Lichtjahren beträgt die Geschwindigkeit 25 000 km in der Sekunde, bei 1500 Millionen Lichtjahren wären es 250 000 km in der Sekunde. Wir können aber nicht unbegrenzt so fortfahren. Bei 1800 Millionen Lichtjahren erhalten wir 300 000 km in der Sekunde, und das ist gleich der Lichtgeschwindigkeit, so daß wir offenbar in Schwierigkeiten hineinsteuern. Tatsächlich sind wir den Schwierigkeiten schon so nahe, daß Dr. Hubble uns wahrscheinlich schon hineinmanövriert hätte, wenn er über ein 1000 zölliges Fernrohr verfügt hätte statt eines nur 100 zölligen.

Es scheint, daß Einstein im Jahre 1916 eine Vorahnung hatte, daß wir Schwierigkeiten heraufbeschwören würden, wenn wir unser

Schema der Dinge auf sehr große Entfernungen ausdehnen würden. Die wunderliche Größe „Unendlichkeit“ ist ein wahrer Verderb, und kein vernünftiger Physiker sollte sich mit ihr einlassen. Daher entschloß sich Einstein zu einem Raumtypus, in dem es Entfernungen oberhalb eines bestimmten Betrages nicht gibt, genau wie es auf der Erdoberfläche keine größeren Entfernungen als 20 000 km gibt. Wir haben eben gesehen, daß uns Schwierigkeiten drohen, wenn wir uns im Milchstraßensystem zu weit hinaus wagen. Aber Einstein hat vorsichtshalber das Weltall geschlossen, so daß wir nicht allzu weit gehen können.

Es ist kein Zufall, daß die Geschlossenheit des Raumes die Lage rettet. Wie wir gesehen haben, ist die kosmische Abstoßungskraft, wie die Schwerkraft, ein angenähertes Äquivalent in gewöhnlicher Sprache für die Krümmung der Raum-Zeit-Welt in der Relativitätstheorie. Die Geschlossenheit des Raumes, die bewirkt, daß er ein endliches Volumen hat, und daß Entfernungen einen endlichen Grenzwert nicht übersteigen können, rührt ebenfalls von der Krümmung her. Demnach sind die Größe des Raumes und der Betrag der kosmischen Abstoßungskraft einander proportional, da sie beide von der gleichen kosmologischen Konstanten abhängen; und sie stehen in einer solchen Beziehung zueinander, daß die befürchtete Schwierigkeit nicht eintreten kann.

Wenn wir dies alles zusammenfassen, so kommen wir zu folgendem Schluß: Wenn wir die von der Relativitätstheorie gelieferte kosmische Abstoßung gelten lassen, so müssen wir folgerichtig auch die Endlichkeit des Raumes gelten lassen, die auf Grund der Theorie von jener nicht getrennt werden kann. Gewiß berührt die letztere Tatsache das Problem kaum, mit dem wir uns ursprünglich beschäftigt hatten, nämlich die Expansion der Milchstraßen, sofern wir nicht Entfernungen in Betracht ziehen, die zehnmal größer als die bisher beobachteten sind; wir haben bisher auch keine Beweise dafür, daß das System sich so weit erstreckt. Wenn wir aber dazu übergehen, den Bau und die Entwicklung des Weltalls als Ganzes zu betrachten, so müssen wir uns natürlich auf eine völlig in sich geschlossene Theorie beziehen.

Wenn sich das Milchstraßensystem über den ganzen endlichen und geschlossenen Raum erstreckt, so kann es sich nur dann ausdehnen, wenn sich der Raum selbst ausdehnt. So kommt es, daß wir nicht nur zur Betrachtung eines sich ausdehnenden materiellen Systems, sondern auch eines sich ausdehnenden Raumes geführt werden.

IV.

Um die Sache zu vereinfachen, wollen wir annehmen, daß die Milchstraßen im Raum gleichförmig verteilt sind. Dann wird der Raum sphärisch sein; das heißt, er wird der Oberfläche einer Kugel entsprechen, nur wird er eine Dimension mehr haben, die ihr euch vorstellen müßt, so gut es geht. In geometrischer Ausdrucksweise wird man sagen, daß er der dreidimensionalen Oberfläche oder Begrenzung einer vierdimensionalen Hypersphäre entspricht. Ich sage, daß er der Oberfläche einer Hypersphäre entspricht — das heißt, daß wir die einfachste Art einer Landkarte des Raumes herstellen können, indem wir sie auf einer Hypersphäre zeichnen. Ich sage nicht, daß er die Oberfläche einer Hypersphäre ist, denn die Hypersphäre liefert nur das Netz der Karte. Da der Karte der Gedanke zugrunde liegt, daß die ganze Außenwelt der Oberfläche der Hypersphäre entspricht, so gibt es für das Innere und das Äußere der Hypersphäre kein objektives Gegenstück.

Ein Wesen, das in seinen Bewegungsmöglichkeiten auf die Oberfläche einer Kugel beschränkt ist, wird, wenn es immer geradeaus geht, ohne sich je nach rechts oder links zu wenden, schließlich wieder an seinen Ausgangspunkt zurückkehren. Ebenso werdet auch ihr, da ihr auf einen dreidimensionalen Raum beschränkt seid, der der Oberfläche einer Hypersphäre entspricht, wenn ihr euch immer weiter und weiter genau geradeaus bewegt, schließlich wieder an euren Ausgangspunkt zurückkehren. Wie weit ihr zu gehen haben werdet, kann ich so genau nicht sagen, aber die Entfernung beträgt mindestens 6000 Millionen Lichtjahre; es kann auch fünf- oder zehnmal soviel sein, mehr aber wohl nicht. Nur werdet ihr gut tun, euch zu beeilen, da sich das Weltall ausdehnt; und je länger ihr die Reise aufschiebt, um so weiter werdet ihr gehen müssen. Tatsächlich ist es sogar jetzt schon zu spät zum Aufbruch, auch wenn ihr mit Lichtgeschwindigkeit reisen würdet. Wenn ihr meine Mindestzahl von 6000 Millionen Lichtjahren gelten laßt, so würdet ihr 1500 Millionen Jahre brauchen, um ein Viertel der Rundreise zu bewältigen. Wir haben aber gesehen, daß sich alle Entfernungen infolge der Expansion in 1300 Millionen Jahren verdoppeln. Daher haben sich jetzt die restlichen drei Viertel eurer Reise von 4500 Millionen Lichtjahren auf mehr als 9000 Lichtjahre erhöht. Ihr seid vom Ziel weiter entfernt als im Augenblick eures Aufbruches. Es geht euch wie Alice und der Roten Königin*:

* Aus dem bekannten Buch „Alice in Wonderland“. D. Übers.

„Nun, bei uns zu Hause“, sagte Alice und schnappte noch etwas nach Luft, „würde man irgendwo anders hinkommen, wenn man lange Zeit so schnell laufen würde, wie wir es getan haben.“

„Das ist mir eine langsame Gegend!“ sagte die Königin. „Hier muß man, wie du siehst, schon so schnell laufen, wie du überhaupt kannst, um am gleichen Platz zu bleiben. Wenn du irgendwo anders hinkommen willst, so mußt du schon mindestens doppelt so schnell laufen.“

Der sphärische Raum bietet viele solche Merkwürdigkeiten, aber wir wollen uns hier nicht mit ihnen aufhalten*. Sie führen fast durchweg auf nichts, das der praktischen Beobachtung zugänglich sein könnte.

Wenn wir das Milchstraßensystem betrachten, wie es sich in den Raum zerstreut, so drängt sich uns die Frage auf: Woher ist es gekommen? Und wohin geht es? Auf die letzte Frage gibt es, soweit wir das beurteilen können, nur eine Antwort. Das System wird sich in alle Ewigkeit weiter und weiter zerstreuen, indem sich die Milchstraßen immer weiter von einander entfernen. Die kosmische Abstoßung vergrößert nun zwar den Abstand zwischen den Milchstraßen, aber sie vergrößert die einzelnen Milchstraßen selbst nicht. Das kommt daher, daß eine Zerstreuung eines Systems nur dann eintritt, wenn die Abstoßung die ihr entgegenwirkende Massenanziehung der einzelnen Teile des Systems überwiegt, die von der Gravitation herrührt. In den Milchstraßen und anderen kleineren Systemen überwiegt stets die Gravitation. Wenn wir daher auch von den Millionen Milchstraßen um uns herum allmählich Abschied nehmen müssen, so werden wir doch in der Gemeinschaft einer Milchstraße von einigen 10 000 Millionen Sternen bleiben, die man noch vor einigen Jahren als ein recht geräumiges Weltall angesehen haben würde.

Schwieriger ist es, zu entscheiden, von wo das Weltall aufgebrochen ist. Ich für mein Teil bevorzuge die Hypothese, die einen möglichst friedlichen und ordentlichen Anfang der Dinge sichert. Wenn euch aber die (von Lemaître bevorzugte) Hypothese lieber ist, nach der das Weltall unter Blitz und Donner aufgebrochen ist, so kann man dem bei dem gegenwärtigen Stande unseres Wissens nicht widersprechen; nur scheint es mir nicht kunstgerecht, wenn man einem Weltall, das schon auf Grund seiner Beschaffenheit eine natürliche Ursache für eine Expansion in sich trägt, beim Aufbruch noch einen besonderen Anstoß gibt.

* Vgl. The Expanding Universe, Kap. III (deutsch: „Dehnt sich das Weltall aus?“).

Wir haben gesehen, daß die Newtonsche Anziehung und die kosmische Abstoßung zwei widerstreitende Kräfte sind. Man könnte meinen, daß sich diese beiden Kräfte im Urzustand der Dinge genau die Waage hielten, so daß das Weltall während unermesslicher Zeiten in diesem embryonalen Zustande hätte bleiben können. Man kann aber nachweisen, daß das Gleichgewicht nicht stabil gewesen wäre. Sobald die kosmische Abstoßung einmal die Oberhand gewonnen hat, wird sie sie behalten (S. 203), und das Weltall wird sich ständig weiter ausdehnen. Ebenso würde die Newtonsche Anziehung ein einmal gewonnenes Übergewicht behalten, und das Weltall würde sich dann ständig weiter zusammenziehen. Früher oder später mußte einmal eine kleine Störung des vollkommenen Gleichgewichtes eintreten und bewirken, daß das Weltall in der einen oder anderen Richtung aus seinem Gleichgewicht fällt. Manche Forscher haben versucht, festzustellen, ob man eine bestimmte Ursache dafür finden könne, daß das Weltall eher in einen Expansionszustand als in einen Kontraktionszustand verfallen sollte; aber man ist nicht zu wirklich bündigen Schlüssen gelangt.

Nach den Beobachtungen beträgt die Radialgeschwindigkeit der Spiralnebel (in runden Zahlen) 500 km in der Sekunde für je 1 Megaparsec *, das bedeutet, daß ein Nebel, der 500 Megaparsec entfernt ist, mit einer Geschwindigkeit von 500 km in der Sekunde forteilt, ein Nebel, der 10 Megaparsec entfernt ist, mit einer Geschwindigkeit von 5000 km in der Sekunde usw. Auf Grund dieser Angabe können wir nach Lemaitres Theorie die kosmologische Konstante und verschiedene wichtige Eigenschaften des Weltalls berechnen. Wenn wir annehmen, daß das Weltall aus dem oben beschriebenen Gleichgewichtszustand aufbrach, so betrug sein ursprünglicher Radius etwa 1000 Millionen Lichtjahre. Seitdem hat es sich ausgedehnt; den heutigen Radius können wir aber nur auf Grund sehr unsicherer Schätzungen über die mittlere Dichte der Materie im Milchstraßensystem berechnen.

Wir können aus der Lemaitreschen Theorie ferner ableiten, daß der Gesamtbetrag der Materie im Weltall etwa 10^{22} Sonnenmassen beträgt. Wenn eine durchschnittliche Milchstraße 10 000 Millionen Sterne enthält, so liefert das etwa 1 Billion (10^{12}) Milchstraßen. Man kann das Ergebnis auch so ausdrücken, daß es im Weltall

* 1 Megaparsec = 3,26 Millionen Lichtjahre.

10⁷⁹ Protonen und ebenso viele Elektronen gibt. Das ist ganz nützlich zu wissen. Die Bestätigung werden wir im 11. Kapitel finden.

Ich habe mir sagen lassen, daß dies nicht der erste Versuch ist, die Zahl der Teilchen im Weltall zu berechnen. Es gibt eine ältere Berechnung von Archimedes *.

Es gibt Leute, König Gelon, die da meinen, daß die Menge des Sandes an Zahl unendlich ist; und mit dem Sand meine ich nicht nur den Sand, den es bei Syrakus gibt und im übrigen Sizilien, sondern auch den Sand, welchen man in allen bewohnten oder unbewohnten Gegenden antrifft. Es gibt aber wiederum andere, die die Zahl nicht für unendlich halten, die aber glauben, daß man noch nie eine Zahl genannt hat, die so groß ist, daß sie seine Menge überschritte. ... Ich aber will euch zu zeigen versuchen, und zwar mit geometrischen Beweisgründen, denen ihr werdet folgen können, daß einige von den Zahlen, die ich genannt und in der an Zeuxippus gesandten Schrift angegeben habe, nicht nur die Zahl überschreiten, die einer Sandmenge von der Größe der Erde entspricht, sondern sogar die Sandmenge, die der Größe des Weltalls gleich ist.

Die Berechnung erfolgt schrittweise, von Sandkörnern zu Mohnsamen, zu Fingerdicken, zu Stadien, zum Durchmesser der Erde, zum Durchmesser des Weltalls, „gemäß der gewöhnlichen Berechnung, so wie man es von den Astronomen hört“, und schließlich zu dem viel größeren Weltall, für das kurz vorher Aristarchus eingetreten war. Archimedes schließt, daß „eine Kugel von derjenigen Größe, wie sie Aristarchus der von den Fixsternen gebildeten Kugel zuschreibt, weniger als 10⁶³ Sandkörner enthalten würde.“

Ich will mit meinem ehrwürdigen Rivalen keinen Disput beginnen. Ich habe das Gefühl, daß wir einander durch seine abschließende Bemerkung näherkommen:

Ich begreife wohl, König Gelon, daß diese Dinge den meisten Menschen unglaublich erscheinen werden, die keine Mathematik studiert haben.

V.

Der Begriff des sich ausdehnenden Weltalls scheint das Gebäude der Physik wie eine luftige Zinne zu krönen. Vielleicht erinnert er mit seinen phantastischen Seltsamkeiten auch eher an jene Ornamente, die man an gotischen Domen findet. Ich für mein Teil sehe in ihm weder eine Zinne noch ein bloßes Ornament. Ich halte ihn für einen der Grundpfeiler des Bauwerkes.

* Es ist dies die berühmte „Sandrechnung“ des Archimedes. Vgl. Archimedes, Opera (Heiberg). D. Übers.

Das, was hinter dem Phänomen der zurückweichenden Milchstraßen wirksam ist, ist die kosmologische Konstante. Sie ist aber noch hinter sehr vielem anderen wirksam. Vor einigen Jahren kam ich zu der sehr sicheren Überzeugung, daß wir mit diesen astronomischen Entdeckungen in den äußersten Fernen des Weltraumes den Schlüssel zum Geheimnis der Protonen und Elektronen gefunden haben. Alles, was ich seither auf diesem Gebiet habe erarbeiten können, bestärkt meine Überzeugung. Im sphärischen Raum müssen diejenigen, die sich in einer bestimmten Richtung auf den Weg begeben, schließlich denen begegnen, die in der entgegengesetzten Richtung aufbrachen. So begegnen jetzt in der Wissenschaft die Astronomen, die ausgingen, das unbegreiflich Große zu suchen, den Physikern, die auf die Suche nach dem unbegreiflich Kleinen ausgingen.

Die kosmologische Konstante, die wir aus der Bewegung der Milchstraßen berechnen, können wir auch aus den im Laboratorium ermittelten Eigenschaften der Protonen und Elektronen berechnen. Auf diese Weise verfügen wir über zwei unabhängige Bestimmungen der kosmologischen Konstanten, die sich gegenseitig so gut bestätigen, wie man es irgend erwarten kann. Wir werden die Theorie der Bestimmung im Laboratorium — die Gleichung, welche λ durch andere, genauer bekannte Naturkonstanten ausdrückt — im 11. Kapitel eingehend behandeln. Hier will ich nur einige vorläufige Überlegungen anführen.

Welches ist unser Maßstab, wenn wir behaupten, daß das Weltall sich ausdehnt? Die Antwort kann ohne Spitzfindigkeit gegeben werden: Die Expansion bezieht sich auf die Maßstäbe, die wir auch sonst für gewöhnlich anwenden. Sie bezieht sich z. B. auf das Meternormal oder auf die Wellenlänge der roten Cadmiumlinie, die man oft für ein besseres Normal hält, oder auf irgendeine der linearen Abmessungen, die mit den Atomen, Elektronen usw. verknüpft sind, und die man in der Atomphysik als „Naturkonstanten“ anspricht. Wenn sich aber das Weltall im Verhältnis zu diesen Maßstäben ausdehnt, so schrumpfen diese Maßstäbe im Verhältnis zum Weltall zusammen. Die Theorie des sich ausdehnenden Weltalls ist in gleicher Weise auch die Theorie des schrumpfenden Atoms. Wir können daher die Theorie des Weltalls von der Theorie des Atoms nicht trennen. Wir dürfen uns die kosmologische Konstante nicht als etwas denken, was sich nur im Übersystem den Milchstraßen offenbart, aber in den Atomen und anderen Systemen von kleinen Abmessungen belanglos ist. Sie offenbart sich in einer Beziehung

(einer Maßbeziehung) zwischen dem Übersystem der Milchstraßen und den ganz kleinen Systemen, und sie ist dem einen Ende dieser Kette von Beziehungen nicht weniger eigentümlich als dem anderen. So müssen wir uns der kosmologischen Konstante ebenso gut auf dem Wege über die Atomtheorie (genauer über die Gleichungen der Quantentheorie, die die Abmessungen sehr kleiner Systeme angeben) nähern können wie über die Theorie des Weltalls.

Nach dem Relativitätsprinzip können wir nur das relative Verhalten der Dinge beobachten und nur von diesem eine Kenntnis erlangen. Wenn wir also von den Eigenschaften eines Dinges reden, so müssen wir stets ein Vergleichsding im Sinne haben. Wenn wir von seiner Geschwindigkeit sprechen, so meinen wir seine Geschwindigkeit relativ zu irgendeinem Vergleichsding oder einem System von markierten Punkten. Wenn wir von seiner Größe sprechen, so müssen wir über irgendein Größennormal verfügen, mit dem wir es vergleichen können. Denkt euch, ihr seiet ganz allein im Weltall, so daß es nichts gäbe, mit dem ihr euch selbst vergleichen könntet — und dann versucht einmal zu sagen, wie groß ihr seid. Das könnt ihr einfach nicht. Ihr habt überhaupt keine Größe, sofern es nicht irgend etwas außer euch gibt, das „größer als“ oder „kleiner als“ sein kann.

So haben wir bei jeder Angabe, die wir in der Physik machen, immer zwei Dinge im Sinn, das eine, das uns ursprünglich angeht, und das zweite, mit dem wir das erste vergleichen. Um die Sache einfacher zu machen, halten wir uns immer, soweit es geht, an das gleiche Vergleichsding. Wenn wir z. B. von der Größe sprechen, so bildet im allgemeinen das Meternormal unser Vergleichsding. Da wir gewohnheitsmäßig das gleiche Normal benutzen, so neigen wir dazu, es zu vergessen, und bemerken kaum, daß ein zweites Ding im Spiel ist. Wir sprechen von den Eigenschaften eines Elektrons, während wir tatsächlich die Eigenschaften eines Elektrons und eines Meterstabes meinen — Eigenschaften, die sich auf Erfahrungen beziehen, die den Meterstab nicht weniger betreffen als das Elektron. Wenn wir an das zweite Ding überhaupt noch denken, so vergessen wir, daß es ein physikalisches, körperliches Ding ist; es ist für uns kein Meterstab, sondern einfach ein Meter.

Ursprünglich sagen wir lieber *M e t e r* als *M e t e r s t a b*, weil ein gleichwertiger Ersatz für den Meterstab auf die verschiedensten Weisen möglich ist. Wir denken uns aber gewöhnlich unter einem Meter nicht eine allgemeine Bezeichnung für eine große Mannig-

faltigkeit von physikalischen Dingen oder Systemen; wir denken dabei überhaupt nicht an irgendein Ding. Ich stehe dafür ein, daß ein anderes physikalisches Ding ein gleichwertiger Ersatz für einen Meterstab sein kann, ich stehe aber nicht dafür ein, daß ein entmaterialisiertes Meter ein gleichwertiger Ersatz für einen Meterstab ist. Wenn der Quantenphysiker in seiner Theorie ein Längennormal benutzt, so behandelt er es nicht als ein Ding. Täte er das, so würde er ihm, seiner Theorie getreu, eine Wellenfunktion zuordnen müssen, wie er es bei den anderen Dingen tut, die an den Erscheinungen beteiligt sind. Nach meiner Ansicht begeht er einen Fehler. Entweder benutzt er das Längennormal als Ersatz für denjenigen zweiten Körper, der in der beobachteten Größenbeziehung mitspielt; in diesem Falle müßte er ihm eine Wellenfunktion zuordnen, so daß er ihn in seine Gleichungen auf die gleiche Weise einführen kann, wie er den zweiten Körper eingeführt hätte. Oder er behandelt die Länge so, als sei sie nicht eine beobachtbare Beziehung zwischen einem physikalischen Ding und einem zweiten, und dann sind die Längen, auf die sich seine Gleichungen beziehen, nicht diejenigen Längen, die wir zu beobachten versuchen *.

Wir müssen also verstehen, daß das, was man die Eigenschaften eines Elektrons nennt, tatsächlich die vereinten Eigenschaften oder die Beziehungen des Elektrons und irgendeines anderen physikalischen Systems sind, das als Vergleichsding dient. Denn ein Elektron hat für sich allein überhaupt keine Eigenschaften. Bestände es völlig für sich allein, so wäre von ihm nicht das allergeringste auszusagen — nicht einmal, daß es ein Elektron ist. Und wir müssen uns nicht dadurch irreführen lassen, daß das Vergleichsding in der üblichen Quantentheorie durch eine Abstraktion ersetzt wird, z. B. durch ein Meter, das in die Gleichungen nicht so eingeht, wie es ein beobachtbares Vergleichsding tun würde. Denn das ist ein Punkt, in dem die übliche Quantentheorie ganz offensichtlich auf falschem Wege ist **.

* Ich meine damit nicht, daß sie nicht die gleichen Zahlenwerte haben; das erzwingt der Quantenphysiker durch empirische Angleichung. Aber sie sind nicht Größen gleicher Art, und der praktisch wichtige Punkt ist, daß sie eine verschiedene Art von Wahrscheinlichkeitsverteilung haben.

** Die übliche Theorie ist nicht relativistisch und erhebt nicht den Anspruch, die endgültige Form zu sein. Dieser Punkt aber scheint mir im allgemeinen von denen übersehen worden zu sein, die versuchen, eine vollkommen relativistische Quantentheorie zu formulieren. Wir werden auf S. 233 hierauf zurückkommen.

Der Fortschritt der Wissenschaft beruht auf einer Zerlegung unserer Erfahrungen in ihre einfachsten Elemente. Ein Ding unserer täglichen Erfahrung, etwa ein Tisch, erweist sich als höchst verwickelt, und wir zerlegen ihn in Moleküle; die Moleküle erweisen sich als zusammengesetzt und werden in Atome zerlegt; die Atome erweisen sich wiederum als zusammengesetzt und werden in Protonen und Elektronen zerlegt. In Verfolg dieses Vereinfachungsverfahrens gelangen wir zu immer kleineren Einheiten, bis wir schließlich, soweit wir das sagen können, bei den Elektronen und Protonen an der Grenze angekommen sind. Doch was geschieht derweil mit dem zweiten Ding, das bei dieser Erfahrung mitspielt — mit dem Vergleichsding? Hier müssen wir danach streben, etwas Universelleres an die Stelle zu setzen. Der Meterstab genügt uns nicht, weil er offensichtlich ein zu stark örtlich bedingtes und zu spezielles System ist. Wie wir gesehen haben, wäre es ein falscher Schritt, wenn wir an seine Stelle ein abstraktes Meter setzen wollten. Wir müssen auch weiterhin ein physikalisches Ding zum Vergleich heranziehen — ein idealisiertes, wenn ihr wollt —, aber nicht so weitgehend idealisiert, daß es zur menschlichen Erfahrung in einer andersartigen Beziehung stünde als ein physikalisches Ding. Wir können ein System benutzen, in dem ein Meter (oder irgendeine bestimmte Anzahl von Metern) die Rolle eines Merkmals spielt, aber nicht ein jeder Körperlichkeit entblößtes Meter. Auf der Suche nach einer solchen universellen Größe gehen wir von der Erde zur Sonne, zum „Durchschnitt der Sterne“, zu unserer Milchstraße und schließlich zum universellsten aller Systeme, dem Weltall selbst über. In diesem letzten System spielt eine bestimmte Anzahl von Metern die Rolle eines Merkmals, das man den Krümmungsradius der Raum-Zeit-Welt nennt; das also kann als Vergleichsding für die Länge dienen.

Das Ende unserer Jagd nach Vereinfachung ist also, daß wir als ursprüngliches Ding das Elektron (oder Proton) und als Vergleichsding das Weltall erhascht haben. Auf die Verbindung dieser beiden bezieht sich die einfachste Aussage, und auf sie treffen die Grundgleichungen der Physik in ihrer einfachsten Gestalt zu.

Die fundamentalste Gleichung der heutigen Physik ist die Wellengleichung eines Elektrons. Man tut im allgemeinen so, als beschriebe sie das Elektron allein; wir haben aber gesehen, daß das Unsinn wäre — es gibt da nichts zu beschreiben. Sie beschreibt die Beziehung des Elektrons zu einem physikalischen Vergleichsding oder System. Und wenn auch das Vergleichsding nicht

erwähnt wird, so können wir doch leicht einsehen, daß es das Weltall ist — nicht ganz das wirkliche Weltall, sondern das Weltall, das wir idealisiert haben, indem wir alle Gravitationsfelder und elektromagnetischen Felder einebnen. Denn wäre ein näherliegendes Vergleichsding im Spiel, so würde die Wellenmechanik nach ihren eigenen Grundsätzen eine verwickeltere Gleichung mit einer zweifachen Wellenfunktion anwenden, um die beobachtbaren Beziehungen darzustellen, in die das Elektron und jenes zweite Ding eingehen.

Da die Gleichung sich auf Bedingungen bezieht, bei denen es kein Gravitationsfeld gibt, so ist das beteiligte Vergleichsweltall überall gleichmäßig ungestört. Es muß aber daran erinnert werden, daß die Wellenfunktion empirisch gefunden wurde, und zwar durch Beobachtungen, die im wirklichen Weltall angestellt wurden; das Vergleichsding ist kein beliebiges Weltall, das so viel oder so wenig Materie enthält, wie es uns gerade beliebt. Das Einebnen der Gravitationsfelder bedeutet eine ganz entsprechende Idealisierung wie diejenige in Lemaîtres Modell des expandierenden sphärischen Weltalls; die Sterne und Milchstraßen sind zu einer gleichförmig verteilten Materie verschmiert; aber die allgemeinen Abmessungen sind nicht mit betroffen. Wir können kurz sagen, daß das Elektron in der Wellengleichung auf das Lemaîtresche sphärische Weltall als Vergleichsding bezogen ist.

So ist denn die „Wellengleichung des Elektrons“ eine Gleichung, die die Gesamtheit alles Physikalischen berührt und die Beziehung des Elektrons zum Weltall beschreibt. Wenn wir die Beziehung des Elektrons zum Weltall umkehren, so erhalten wir die Beziehung des Weltalls zum Elektron. Wir brauchen nur die Gleichung, die das Elektron mittels des Weltalls als Vergleichsding beschreibt, zu nehmen und sie sozusagen durch das verkehrte Ende des Fernrohrs zu betrachten, um die Gleichung zu erhalten, die das Weltall mittels des Elektrons als Vergleichsding beschreibt. Indem wir das Verhalten — insbesondere die Expansion — des Weltalls beschreiben, dient uns im letzten Grunde das Elektron als Vergleichsmaß; denn die gewöhnlichen kleinen Längennormale stehen in einer konstanten Beziehung zum Elektron. Auf diese Weise gelangen wir zu einer Gleichung für das Verhalten des Weltalls, die (wenn das ganze physikalische Schema ein in sich geschlossenes ist) derjenigen äquivalent sein muß, die die Relativitätstheorie in der Gestalt gibt, wie sie Friedmann und Lemaître entwickelt haben. Statt daß sie aber eine kosmologische Konstante von unbekanntem

Beträge enthält, sind alle ihre Koeffizienten sehr gut bekannt; denn sie sind der Wellengleichung des Elektrons entnommen, die jene Gleichung nur von einer anderen Seite darstellt. Demnach können wir durch einen Vergleich beider Gleichungen den Betrag der kosmologischen Konstanten ermitteln.

So einfach, wie es klingt, ist das Verfahren nicht; aber die Schwierigkeit liegt hauptsächlich darin, daß man vor seiner Anwendung den obenerwähnten Mangel der derzeitigen Quantentheorie beseitigen muß. Wenn es also auch an sich recht einfach ist, so erscheint es doch als der letzte Schritt einer ziemlich schwierigen Untersuchung, von der das meiste die kosmologische Konstante nicht unmittelbar betrifft.

Meine in dieser Richtung angestellten Untersuchungen haben mich davon überzeugt, daß die Frage des sich ausdehnenden Weltalls alles andere ist, als nur ein interessanter Abstecher, sondern daß sie auf der Hauptstraße der künftigen Entwicklung der Physik liegt. Sie wird auch in der Astronomie praktische Bedeutung haben. Denn wenn der aus den gewöhnlichen, experimentell ermittelten Konstanten berechnete Betrag der Radialgeschwindigkeiten der Nebel mit der astronomischen Berechnung übereinstimmt, so wird das die derzeit angenommenen Abstandsverhältnisse der Nebel, die zunächst noch etwas fragwürdig sind, bestätigen. Ich will mich hier nicht darüber verbreiten, daß unser gegenwärtiges Wissen noch Stückwerk ist; aber die Frage der Expansion des Weltalls scheint mir einen besonderen Vorrang zu verdienen, als eine Frage, deren weitere Untersuchung von einer geradezu überragenden Wichtigkeit ist.

11. Kapitel

DIE NATURKONSTANTEN

Numero deus impare gaudet *. Virgil, Eclogae.

I.

In der Experimentalphysik verwendet man viel Sorgfalt auf die Messung gewisser grundlegender Konstanten. Die Lichtgeschwindigkeit, die Masse des Wasserstoffatoms, der absolute Nullpunkt der Temperatur, das mechanische Wärmeäquivalent, die Gravitationskonstante, das Plancksche Wirkungsquantum — diese und viele andere sind für den Physiker Grundzahlen. Ich glaube, man kann den Begriff einer „Naturkonstante“ nicht genauer definieren, als so, daß man darunter eine gemessene Größe versteht, die beständig gebraucht oder angezogen wird. Ein Astronom würde zu seinen Naturkonstanten die Sonnenparallaxe und die Präzessionskonstante rechnen; aber ihre Bedeutung ist rein örtlich, da sie von dem Planeten abhängen, auf dem wir zufällig wohnen. Andere gut bekannte Konstanten beziehen sich auf besonders ausgewählte Stoffe — z. B. die Raumgitterkonstante des Calcits, die Wellenlänge der roten Cadmiumlinie, die spezifische Wärme des Wassers. Die Wahl der ersten beiden Stoffe beruht nur auf ihrer praktischen Eignung als Bezugstoffe; und auch die Wahl des Wassers könnte einem Bewohner des wasserlosen Mars willkürlich vorkommen. Aber es gibt einige Konstanten, die augenscheinlich eine überaus universelle Bedeutung haben und die das Maß jeder natürlichen Struktur in sich bergen. Diese wollen wir hier näher betrachten.

Es ist aber nicht leicht, eine Messung zu finden, der wir eine wirklich universelle Bedeutung zuschreiben könnten. Der Wasserstoff ist das einfachste Element; es steht als Nr. 1 in der Rangliste. Wir können uns daher kaum eine grundlegendere Messung denken, als eine Bestimmung des Durchmessers des Wasserstoffatoms oder irgendeiner äquivalenten Abmessung, die die Maßverhältnisse seines Aufbaues vorschreibt. Die Schwierigkeit liegt aber darin, daß wir das Messungsergebnis in irgendeiner Einheit ausdrücken müssen. Wenn man den alten Berichten glauben darf, so hat König Heinrich I. um das Jahr 1120 die Elle (yard) dadurch

* Die Gottheit freut sich der ungeraden Zahlen.

festgelegt, daß er seinen Arm ausstreckte. König David von Schottland (um 1150) befahl, demokratischer gesinnt, daß das Zoll (inch) gleich der durchschnittlichen Daumendicke dreier Männer sein solle, „eines großen Mannes, eines Mannes von mittlerer Statur und eines kleinen Mannes“, und daß die Daumen an der Nagelwurzel zu messen seien. Das Meter verewigt weniger romantisch die Irrungen der alten Geodäten. So besteht das Ergebnis aller unserer sorgfältigen Messungen darin, festzustellen, wieviel Wasserstoffatome auf die Armlänge von König Heinrich I. oder auf die Daumendicke dreier Schotten entfallen. Das bringt uns den Geheimnissen der Natur kaum wesentlich näher.

Wenn wir eine andere Länge messen können, die in der Natur ebenso grundlegend ist — sei es der Radius des Elektrons oder des Weltalls oder eine jener Konstanten von der Dimension einer Länge, die man durch geeignete Kombination anderer gemessener Größen erhält —, so können wir die Elle und das Meter, nachdem sie ihren Dienst als Mittler getan haben, ausschalten; und tatsächlich ist ja auch das Verhältnis dieser anderen Länge zum Durchmesser des Wasserstoffatoms eine viel belangvollere Größe. Auf diese Weise wird dann die Natur nach ihrem eigenen Maße gemessen. Die Bedeutung unserer physikalischen Konstanten liegt also in den in ihnen enthaltenen reinen Zahlenverhältnissen.

Im allgemeinen betrachtet man die folgenden Größen als die Grundkonstanten der Physik:

- e , die Ladung des Elektrons (Elementarquantum),
- m , die Masse des Elektrons,
- M , die Masse des Protons,
- h , das Plancksche Wirkungsquantum,
- c , die Lichtgeschwindigkeit,
- G , die allgemeine Gravitationskonstante,
- λ , die kosmologische Konstante.

Wir sind der Ansicht, daß es grundsätzlich möglich sein sollte, aus diesen Konstanten jede andere Konstante zu berechnen, die sich in den Naturerscheinungen zu erkennen gibt. Natürlich können wir die Berechnung nicht immer wirklich ausführen. Das mag zu verwickelt sein, oder wir mögen über die Rechenregeln noch teilweise im unklaren sein. Wenn wir z. B. die Wellenlänge der D -Linie des Natriums erfahren wollen, so bleibt uns zur Zeit nichts übrig, als sie zu messen; es zweifelt aber kein Mensch daran, daß es einen ganz bestimmten Weg gibt, um sie auf Grund der Vorstellung von einem Natriumatom zu berechnen, das aus

einem Kern und elf äußeren Elektronen besteht, ohne dabei andere als die soeben genannten sieben Konstanten zu benutzen. Ich schließe selbstverständlich Konstanten aus, die sich auf eine Anhäufung von Materie von nur örtlicher Bedeutung beziehen, wie die Abmessungen der Erde oder den Goldstandard des Dollars; solche Größen lassen sich natürlich aus den allgemeinen Naturgesetzen nicht herleiten.

Die obige Liste der sieben Grundkonstanten wird als vollständig angesehen, soweit unser heutiges Wissen das zu beurteilen gestattet. Doch mögen einige Physiker der Ansicht sein, daß bei der Struktur der Atomkerne noch eine weitere Konstante ins Spiel kommt. Die Liste kann abgeändert werden, indem man äquivalente Konstanten oder Kombinationen von Konstanten einführt, aber das ändert am Wesen der Sache nichts. Die Konstante h tritt in der Theorie fast durchweg in der Verbindung $h/2\pi$ auf, und es wäre besser gewesen, wenn man von Anfang an $h/2\pi$ als Quantenkonstante gewählt hätte. Es ist allgemein üblich, $h/2\pi$ mit $\hbar$ zu bezeichnen und $\hbar$ als die Grundkonstante anzusehen.

Wir können also das Weltall einer Symphonie vergleichen, die auf sieben Grundkonstanten gespielt wird, wie man auf den sieben Tönen der Tonleiter Musik macht. Aber wir stehen noch immer im Schatten König Heinrichs I. und seiner Nebenbuhler, und unser nächster Schritt muß sein, daß wir uns frei machen. Die sieben Konstanten hängen von drei willkürlichen Einheiten ab, den Einheiten der Länge, der Masse und der Zeit. Indem wir sie auf geeignete Weise miteinander kombinieren, können wir die sieben ursprünglichen Konstanten durch sieben andere ersetzen, von denen drei je eine Länge, eine Masse und eine Zeit darstellen, während die vier übrigen dimensionslos, also reine Zahlen sind. Indem wir so jede Beziehung zu unseren künstlichen Maßstäben ausmerzen, erhalten wir vier reine Zahlen oder Zahlenverhältnisse, die in der natürlichen Struktur des Weltalls enthalten sind. Diese sind Naturkonstanten in des Wortes eigenster Bedeutung, und sie sind es, die im Brennpunkt unseres Interesses stehen. Ich will sie hier in symbolischer Darstellung angeben:

$$A = \frac{M}{m}, \quad B = \frac{hc}{2\pi e^2}, \quad C = \frac{e^2}{GMm}, \quad D = \frac{2\pi c}{h} \sqrt{\frac{Mm}{\lambda}}.$$

A ist das Massenverhältnis von Proton und Elektron. Sein gemessener Wert liegt in der Nähe von 1840.

B ist die Feinstrukturkonstante. Ihr gemessener Wert beträgt etwa 137.

C ist das Verhältnis der elektrischen Anziehung zwischen einem Proton und einem Elektron zur Massenanziehung zwischen ihnen, sofern die üblichen Gesetze der elektrischen Anziehung und der Gravitation auf ein Gebilde von so kleinen Abmessungen angewendet werden dürfen. Sein gemessener Wert beträgt $2,3 \cdot 10^{39}$.

D ist das Verhältnis des natürlichen Krümmungsradius der Raum-Zeit-Welt zur Wellenlänge einer mittleren Schrödingerwelle (nämlich zu dem geometrischen Mittel aus den Wellenlängen, die in der Wellenmechanik einerseits mit dem Proton und andererseits mit dem Elektron verknüpft sind). Sein Wert, der von den beobachteten Radialgeschwindigkeiten der Spiralnebel* abhängt, beträgt etwa $1,2 \cdot 10^{39}$.

Diese vier Zahlen könnten auf die verschiedensten Weisen kombiniert werden und so andere reine Zahlen ergeben; aber die vier hier angegebenen Kombinationen liefern eine natürliche und ins einzelne gehende Beschreibung, so wie man sie erhalten würde, wenn man Kostenanschläge für den Bau eines Weltalls einfordern würde.

Sofern wir nicht über das hinausgehen, was man im allgemeinen als geltende Theorie ansieht, sind dies vier Urkonstanten. In diesem Falle müssen sie durch Messungen ermittelt werden. Was sie sind, das sind sie aus einer Laune der Natur. Gedanklich ist es nicht nötig, irgend etwas außer ihnen zu messen. Wenn der Experimentalphysiker uns mit diesen Zahlen versorgt hat, könnte er in den Ruhestand treten und die übrige Physik dem Mathematiker überlassen. Aber die Theorie macht Fortschritte, und wir beginnen zu fragen. Sind diese vier Konstanten auf nichts anderes zurückführbar, oder werden sich bei einer weiteren Vereinheitlichung der Physik einige von ihnen oder alle als entbehrlich erweisen? Wäre es denkbar, daß sie einen anderen Wert hätten, als sie wirklich haben? Ich will hier nicht an die metaphysische Frage rühren, ob ein Weltall von der Art des unseren die einzige denkbare Art eines Weltalls ist. Wenn wir die vorhandenen Hilfsmittel als gegeben ansehen, und wenn wir ferner — um uns den Beweis zu ersparen — als gegeben ansehen, daß die Zahl der Dimensionen in der Raum-Zeit-Welt auf vier festgelegt ist, so erhebt sich die Frage, ob die obigen Zahlenverhältnisse

* Diese sind mit 500 km/sec je Megaparsec angenommen.

ebensogut auch andere Werte haben könnten, oder ob sie zwangsläufig sind. Im ersten Falle können wir ihre Werte nur aus Messungen erfahren; im zweiten Falle muß es möglich sein, sie auf Grund einer Theorie zu ermitteln.

Die Vereinheitlichung der verschiedenen Zweige der Physik vermindert die Zahl der grundlegenden Konstanten; und tatsächlich besteht die Vereinheitlichung ja gerade in der Ausmerzung überflüssiger Konstanten. Es kann sich herausstellen, daß die Experimentalphysiker in den verschiedenen Zweigen der Physik die gleiche Konstante unter verschiedenen Namen messen. Vor 80 Jahren war das Verhältnis der elektrostatischen und der elektromagnetischen Ladungseinheit eine Grundkonstante der Elektrizitätslehre; eine Grundkonstante der Optik war die Lichtgeschwindigkeit. Mit der Zusammenfassung der Elektrizitätslehre und der Optik in Maxwells elektromagnetischer Lichttheorie wurden sie als identisch erkannt. Häufiger aber erscheint die gleiche Konstante auf den beiden Gebieten nur in etwas verschiedenem Gewande. So können die Experimentalphysiker ihre Aufmerksamkeit auf dem einen Gebiet vielleicht mehr auf den Radius eines Kreises, auf dem anderen Gebiet mehr auf den Umfang des gleichen Kreises gerichtet haben. Bevor dies nicht durch eine Zusammenfassung der Theorien erkannt ist, wird man ihr Verhältnis zusammen mit den übrigen Naturkonstanten A , B , C und D buchen. Es wird überflüssig, wenn wir erkennen, daß es unser alter Freund 2π und deshalb eher eine Sache der Berechnung als der Messung ist. Die wesentliche Identität zweier Konstanten kann auch durch andere Umstände verschleiert werden; so enthält z.B. die „Stefan-Boltzmannsche Strahlungskonstante“ den Faktor $1,0823 \dots$ oder $1 + (1/2)^4 + (1/3)^4 + (1/4)^4 + \dots$. Es liegt nahe, zu vermuten, daß zwischen unseren Konstanten C und D eine bestimmte theoretische Beziehung dieser Art besteht. Sobald also eine Theorie zur Verfügung steht, wird es unnötig werden, mehr als eine von beiden zu messen, natürlich abgesehen davon, daß die Messung beider einen erwünschten Prüfstein für die Theorie liefert.

Heute herrscht wohl im allgemeinen die Meinung, daß die Konstanten A , B , C und D nicht beliebig sind, sondern daß sich schließlich einmal eine theoretische Erklärung für sie finden wird, obgleich gelegentlich auch die gegenteilige Meinung energisch vertreten wird. In den letzten fünf Jahren habe ich mich hauptsächlich mit dieser Frage beschäftigt, und ich für mein Teil sage unbedenklich, daß in der Struktur des Weltalls, soweit die heutige Physik

sie kennt, höchstens eine willkürliche Konstante enthalten ist, nämlich die große Zahl, die die Basis von C und D bildet. Unser heutiger Wissensstand mit seinen vier Zahlenkonstanten an Stelle einer einzigen zeigt lediglich an, welches Maß an Vereinheitlichung der Theorie noch zu bewältigen bleibt. Es ist möglich, daß die eine verbleibende Konstante nicht beliebig ist, aber darüber weiß ich nichts.

II.

Wir wollen mit der Feinstrukturkonstante beginnen. Ihr Name bezieht sich auf die Feinstruktur der Spektrallinien, aber sie hat einen weiteren Geltungsbereich, genau wie die Lichtgeschwindigkeit in vielen Problemen auftritt, die mit dem Licht nichts zu tun haben. Die Feinstrukturkonstante ist tatsächlich das Verhältnis zweier natürlicher Einheiten oder Atome der Wirkung. Die physikalische Größe, der man den wenig passenden Namen „Wirkung“ gegeben hat, kam in der Mechanik zuerst durch das Hamiltonsche Prinzip der kleinsten Wirkung zur Geltung; weitere Bedeutung erlangte sie in der Relativitätstheorie, weil sie eine der ganz wenigen absoluten Größen (Invarianten) in der Physik ist. Und sie erreichte ihren Gipfel in der Quantentheorie, weil die Quantenkonstante selbst eine Wirkungseinheit ist.

Wir erhalten eine Wirkung, wenn wir eine Energie mit einer Zeit multiplizieren; sie bedeutet so viel Energie während einer so langen Zeit. Ein Verfahren, um eine bestimmte natürliche Wirkungsgröße zu erhalten, besteht darin, daß man zwei Elementarteilchen — zwei Elektronen oder zwei Protonen — betrachtet. Sie haben infolge der zwischen ihnen herrschenden Abstoßung eine gegenseitige elektrostatische Energie; die mit ihnen auf natürliche Weise verknüpfte Zeitgröße ist die Zeit, die das Licht (oder richtiger eine elektromagnetische Welle) benötigen würde, um von dem einen nach dem anderen Teilchen zu gelangen. Indem wir die Energie mit dieser Zeit multiplizieren, erhalten wir die mit dem Teilchenpaar auf natürliche Weise verknüpfte Wirkung. Sie ist immer die gleiche, ob nun die Teilchen dicht beieinander oder weit voneinander entfernt sind. Sind sie weit voneinander entfernt, so ist die Energie klein, die Laufzeit des Lichtes aber entsprechend größer. Wenn r der Abstand ist, so beträgt die Energie e^2/r und die Laufzeit r/c , so daß ihr Produkt gleich e^2/c ist.

In der Theorie der Strahlung tritt eine andere natürliche Wirkungseinheit auf, nämlich $h/2\pi$. Wie wir schon erwähnt haben, bevorzugt die neuere Theorie dies vor der von Planck ursprünglich gewählten Einheit h . So verfügen wir über zwei natürliche Wirkungseinheiten, von denen die eine aus der Elektronentheorie, die andere aus der Strahlungstheorie hervorgeht. Die zweite ergibt sich etwa als das 137 fache der ersten. Ihr Verhältnis beträgt $h/2\pi$ geteilt durch e^2/c , oder $hc/2\pi e^2$, und das ist die oben angeführte Konstante B .

So haben wir es bei allen Problemen, in die Teilchen und Strahlung — Materie und Äther — eingehen, mit zwei Systemen zu tun, die nach verschiedenen Maßstäben errichtet, aus verschiedenen großen Wirkungsatomen aufgebaut sind. Die derzeitige Theorie macht keinen Versuch, die Bedeutung dieses Unterschiedes der Maßstäbe aufzuklären; sie nimmt ihn einfach als eine Erfahrungstatsache hin und führt eine empirische Feinstrukturkonstante ein, um ihn zu berücksichtigen. Das kann aber nicht der Weisheit letzter Schluß sein. Wir werden geradezu herausgefordert, eine einheitliche Theorie der elektrischen Teilchen und der Strahlung zu finden, die den elektrostatischen und den quantenmäßigen Typus der Wirkung bis auf ihren Ursprung zurück verfolgt. Wir werden dann zu verstehen vermögen, warum der eine einem Atom entspricht, das 137mal größer ist als das andere, und wir werden dann dieses Verhältnis genau so deutlich voraussehen können, wie wir im voraus wissen, daß der Umfang eines Kreises 3,14159...mal größer ist als sein Durchmesser. Für eine solche Entwicklung besitzen wir einen sehr aussichtsvollen Hinweis.

Wenn wir die der Theorie der elektrischen Teilchen angemessene natürliche Einheit verwenden (das Verfahren, durch das, wie beschrieben, Heinrich I. ausgeschaltet wird), so beträgt die als Coulombsche Energie bekannte wechselseitige Energie zweier im Abstände r voneinander befindlicher Protonen oder Elektronen $\frac{1}{r}$. Wenn wir andererseits die der Strahlungstheorie angemessene, 137mal größere Einheit benutzen, so beträgt die Coulombsche Energie $\frac{1}{137} \cdot \frac{1}{r}$. Soviel über den Betrag der Energie. Es ist nun aber ein übliches Verfahren, daß man physikalische Größen durch Symbole bezeichnet, die nicht nur ihren Betrag angeben, sondern auch ihre Richtung im Raum oder in der vereinigten Raum-Zeit-Welt, mit der sie verknüpft sind. Ebenso ist es nach einem Ver-

fahren von Dirac üblich, der Energie zweier Ladungen ein Symbol hinzuzufügen, das den Betrag der Energie nicht beeinflußt, sondern etwas bezeichnet — es ist schwer zu sagen, was. Bei einfacheren Problemen und in Sonderfällen bezeichnen die Diracschen Symbole eine Richtung, und das ist die Vorstellung, die wir uns zuerst von ihnen machen müssen. Aber der Begriff wird dann so erweitert, daß er alles zu umfassen vermag, was einen Unterschied in der Art und Weise erzeugt, wie die zahlenmäßigen Merkmale eines Systems miteinander verknüpft sein können. So hat er jede Beziehung zu irgend etwas graphisch Darstellbarem mehr oder weniger verloren *. Im vorliegenden Falle haben die zusätzlichen Symbole, die der Energie $1/137 r$ angehängt werden müssen, die Gestalt EF , wobei sich E auf das erste und F auf das zweite Teilchen bezieht.

Die Hinzufügung eines solchen Symbols zur Energie bildet einen Teil der üblichen Quantentheorie, die mit der Energie umgeht, ohne einen Versuch zu machen, ihren Ursprung zu erforschen. Aber ich möchte jetzt die Frage stellen: Wie viele solcher Symbole EF stehen uns zur Auswahl zur Verfügung? Die Antwort lautet: 136. Es gibt 16 Spielarten von E und 16 Spielarten von F . Das würde 16^2 oder 256 Spielarten von EF ergeben. Dabei wird aber angenommen, daß man wissen kann, welches Teilchen das E und welches das F besitzt. So aber ist die Verteilung nicht beschaffen. Es ist eine besondere Eigentümlichkeit der Quantentheorie, daß die Teilchen einander so gleichen, daß wir sie niemals unterscheiden können; und wir werden später sehen, daß diese Nichtunterscheidbarkeit tatsächlich die Ursache der Energie ist, die wir hier untersuchen, so daß wir sie hier auch nicht außer acht lassen dürfen. Wir müssen also dem einen Teilchen eines von 16 möglichen Geschenken machen und dem anderen ebenfalls eines von 16 möglichen Geschenken; aber die Teilchen sind Kommunisten und halten nichts vom Privateigentum, und daher macht es keinen Unterschied, welches Teilchen welches Geschenk erhalten hat. Es gibt 16 Arten, wie ihre Gemeinschaft zwei gleiche Geschenke erhalten kann, und 120 Arten, wie sie zwei ungleiche Geschenke erhalten kann, und das macht zusammen 136. Die 120 ungleichen Geschenke würden sich verdoppeln, wenn wir die Empfänger unterschieden, so daß dann die Zahl auf 256 ansteigen würde.

* Einiges Nähere über diese Symbole werden wir im nächsten Kapitel mitteilen.

So wie die Energie gewöhnlich geschrieben wird, steht im Zähler eines von 136 möglichen, unabhängigen Symbolen, und im Nenner eine Zahl, die nahezu 136 ist. Das ist sicher ein so auffallender Hinweis, daß er nicht unbeachtet bleiben kann. Wir wollen die Frage, ob 136 oder 137, für den Augenblick aus dem Spiele lassen. Der Quantenphysiker hat in seiner Gleichung ein EF -Symbol, und er wundert sich, warum nur $1/136$ eines Quantums daran hängt. Ist es so unvernünftig, zu vermuten, daß die Tatsache, daß EF nur ein Fall unter 136 ist, etwas damit zu tun hat? Anscheinend glaubt die Mehrzahl der Quantenphysiker, daß es unvernünftig ist. Mir für mein Teil scheint der Hinweis gut genug, um ihn weiter zu verfolgen.

Man könnte aber nun sagen, daß der Bruch tatsächlich $1/137$ und nicht $1/136$ beträgt. Ich denke, wenn wir schon für $136/137$ des Quantums aufkommen können, dann werden auch die übrigen $1/137$ nicht lange auf sich warten lassen. Ihr kennt die Redensart: „Einen Löffel voll für jeden und einen für den Topf.“

III.

Wir haben es mit der Wechselwirkung zwischen zwei Teilchen zu tun; wir wollen annehmen, es seien zwei Elektronen. In der klassischen Physik versteht man unter einer Wechselwirkung einen Unterschied im Verhalten des einen Teilchens, der durch die Anwesenheit des zweiten hervorgerufen wird. In der Quantentheorie aber untersuchen wir Wahrscheinlichkeitsverteilungen und betrachten die Wahrscheinlichkeit des Verhaltens. Daher bedeutet Wechselwirkung hier einen Unterschied in der Wahrscheinlichkeit des Verhaltens des Teilchens. Die mit dem Elektron A verknüpften Wahrscheinlichkeiten, die die Möglichkeiten angeben, die für seine verschiedenen räumlichen Lagen und für seine verschiedenen Geschwindigkeiten bestehen, werden durch die Gegenwart des Elektrons B beeinflusst.

Es gibt zwei Wege, um solche Wahrscheinlichkeitsänderungen zu behandeln. In der Quantentheorie wird die wirkliche Wahrscheinlichkeit als das Produkt einer Wahrscheinlichkeit a priori mit einem abändernden Faktor ausgedrückt. Das entspricht dem Ausschließungsverfahren, das wir früher erörtert haben (S. 114). Die Wahrscheinlichkeit a priori ist die Häufigkeit innerhalb einer Aus-

gangsklasse, und die wirkliche Wahrscheinlichkeit ist die Häufigkeit in der Klasse, nachdem man sie durch Ausschluß derjenigen Glieder eingeschränkt hat, die mit den von der Beobachtung gelieferten und auf das vorliegende Problem bezüglich zusätzlichen Auskünften nicht vereinbar sind. Die Änderung der wirklichen Wahrscheinlichkeit, die von der Anwesenheit des Elektrons B herrührt, kann jedem der beiden Glieder aufgeprägt werden, — der Wahrscheinlichkeit *a priori* oder dem abändernden Faktor. Das macht im weiteren Verlauf keinen Unterschied; aber die beiden Verfahren entsprechen zwei etwas verschiedenen Standpunkten. Wir können die Auskunft, daß das Elektron B anwesend ist, als eine Sonderauskunft betrachten, die das besondere in Frage stehende Problem betrifft; es hält durch seine Abstoßung das Elektron A von sich fern, und die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Elektrons A , die wir angesetzt hätten, wenn wir diese Auskunft nicht erhalten hätten, wird entsprechend geändert. Diese Betrachtungsweise prägt die Wechselwirkung dem abändernden Faktor auf. Wir können aber auch die Tatsache, daß mehr als ein Elektron anwesend ist, nicht als eine zusätzliche Auskunft, sondern als einen untrennbaren Teil des Problems ansehen. Wir betrachten dann das Problem von Anbeginn an als ein Zweielektronenproblem, nicht als das Problem eines Elektrons, in das wir ein zweites Elektron wie durch einen nachträglichen Einfall einführen. Dann ist die Wechselwirkung der Wahrscheinlichkeit *a priori* aufgeprägt; denn da die Wechselwirkung stets vorhanden ist, so würde etwas Wesentliches fehlen, wenn man eine Verteilung betrachten wollte, die sie außer acht läßt. Die Tatsache, daß es eine Wechselwirkung wirklich gibt, beweist, daß die Sache einen Haken hat, — daß wir nicht zur Wahrscheinlichkeitsverteilung einer größeren Zahl von Teilchen gelangen, indem wir die Wahrscheinlichkeitsverteilungen einzelner Teilchen einfach so miteinander verbinden, als seien sie voneinander unabhängig. Aus diesem Grunde sagt man, daß eine größere Anzahl von geladenen Teilchen einer „neuen Statistik“ oder Fermi-Dirac-Statistik gehorcht, im Gegensatz zur „klassischen Statistik“, die das einfache Ergebnis einer Verbindung der Wahrscheinlichkeiten unter der Voraussetzung ihrer Unabhängigkeit darstellt.

Beide Betrachtungsweisen kommen in der üblichen Quantentheorie vor, und sie werden oft in unangemessener Weise miteinander vermengt. Wenn es sich um wenige Teilchen handelt, so wird die Wechselwirkung mittels der Coulombschen Anziehungs- oder Abstoßungskräfte beschrieben und dann dem abändernden

Faktor aufgeprägt. Handelt es sich aber um zahlreiche Teilchen, so benutzen wir die Fermi-Dirac-Statistik, und die Wechselwirkung wird der Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori aufgeprägt. Manchmal — denn sicher ist sicher — scheint sogar beides zugleich zu geschehen!

Der sachverständige Leser wird an dieser Stelle vielleicht einwenden, daß die Einflüsse elektrischer Kräfte in die Fermi-Dirac-Statistik nicht einbegriffen sind. Wenn sie es nicht sind, so sollten sie es doch sein. In welchem Sinne kann die Fermi-Dirac-Statistik wahr sein, wenn sie in der Natur nicht befolgt wird? Es handelt sich nicht um eine Frage der Annäherung. Die Fermi-Dirac-Statistik ist nicht zu dem Zweck geschaffen worden, um den Grenzwert der Verteilung für den Fall zu beschreiben, daß die Teilchen so große Abstände voneinander haben, daß die Coulombschen Kräfte zwischen ihnen vernachlässigt werden können. Die Fermi-Dirac-Statistik wird erst dann wichtig, wenn die Teilchen dicht beieinander sind und den entarteten Zustand der Materie bilden (S. 148). Und wenn die Coulombschen Kräfte vernachlässigt werden können, so kann auch der Unterschied zwischen der Fermi-Diracschen und der klassischen Statistik vernachlässigt werden. Warum aber sollten wir so viel Gewicht darauf legen, was sich Fermi und Dirac über das Verhalten geladener Teilchen dachten, wenn ihre Erwartungen nicht erfüllt wären? Es mag sein, daß Fermi und Dirac den strengen Ausdruck für die Wechselwirkung noch nicht gefunden haben, aber ich halte es für ausgeschlossen, daß sie uns mit dem Vorschlag einer Wahrscheinlichkeitsverteilung hinters Licht geführt haben, von der die Natur niemals auch nur näherungsweise Gebrauch macht.

Wie dem auch sei, wir sehen, daß die landläufige Theorie die Wechselwirkung stückweise behandelt, indem sie teils die Grundlage der Statistik abwandelt und teils anziehende und abstoßende Kräfte einführt; und so teilt sie einen tatsächlich einheitlichen Gegenstand in zwei Teile. Sowohl die Coulombschen Kräfte wie die Fermi-Dirac-Statistik beschreiben eine Veränderung der wirklichen Wahrscheinlichkeit gegenüber der klassischen Wahrscheinlichkeit für Teilchen ohne Wechselwirkung. Indem die übliche Theorie jene mit dem abändernden Faktor, diese mit der Wahrscheinlichkeit a priori verknüpft, verschleiert sie die Tatsache, daß zwischen ihnen ein Zusammenhang besteht.

Man weiß, daß die Fermi-Dirac-Statistik aus der Tatsache folgt, daß die betreffenden Teilchen voneinander nicht unterschieden

werden können. Aber der Ursprung der Wechselwirkung muß der gleiche sein, ganz gleich, ob wir sie durch die neue Statistik ausdrücken oder durch den Begriff der Kraft. Wenn die Fermi-Dirac-Statistik von der Vertauschbarkeit nichtunterscheidbarer Teilchen herrührt, so muß das auch für die Coulombschen Kräfte gelten. Demnach ist die Coulombsche Energie Austauschenergie. Hieraus ergibt sich ein klarer Hinweis darauf, welcher Weg eingeschlagen werden muß, um zu einer theoretischen Berechnung ihres Betrages ($1/137 r$) zu gelangen. Wir müssen bei zwei Ladungen das gleiche erreichen, was Fermi und Dirac für zahlreiche Ladungen erreicht zu haben scheinen. Das bedeutet, daß wir im einzelnen untersuchen müssen, wie die mit einem System von zwei Teilchen verknüpften Wahrscheinlichkeiten dadurch beeinflußt werden, daß wir die Teilchen nicht voneinander zu unterscheiden vermögen.

Es ist vielleicht nützlich, ein Beispiel dafür zu geben, wie aus einer Vertauschbarkeit Kräfte entstehen können. In der Astronomie werden die beiden Komponenten eines Doppelsternes als unterscheidbare Teilchen behandelt. Gelegentlich kommt es aber vor, daß sie sich im Aussehen so sehr gleichen, daß ein Astronom sie versehentlich verwechselt, nachdem sie sich im Periastrum sehr nahe gekommen sind. Das Ergebnis ist eine „Bahn“, die einem Kraftgesetz entspricht, das von dem Newtonschen gänzlich verschieden ist! Wäre etwas Derartiges nicht etwa nur eine Ausnahme, sondern im Gegenteil das gewöhnliche Ereignis, so wären wir außerstande, die Gültigkeit des Newtonschen Gesetzes bei den Doppelsternen festzustellen. Die Astronomie der Doppelsterne würde dann nicht auf ein Kraftgesetz gegründet sein, das zwar richtig wäre, aber nie bestätigt werden könnte, sondern sie müßte auf ein Kraftgesetz gegründet sein, das der Tatsache der Nichtunterscheidbarkeit der Sterne angepaßt wäre, und das auf die Wahrscheinlichkeit versehentlicher Vertauschungen Rücksicht nähme. Man würde dann (sofern man über ihren Ursprung im Bilde ist) sagen, daß die zusätzliche Kraft der Austauschenergie entspricht. Wenn ihr hiergegen einwendet, daß die so geschaffene Kraft nichts als eine reine Fiktion ist, so muß ich erwidern, daß man von einer Kraft überhaupt nichts Besseres erwarten kann, als daß sie eine Fiktion ist. Wenn ihr in der relativistischen Theorie der Gravitation Bescheid wißt, so werdet ihr euch daran erinnern, daß auch die Newtonsche Kraft eine „Fiktion“ ist. Ob es aber eine versteckte Fiktion ist, wie die Gravitation, oder eine ganz durchsichtige Fiktion wie die Zentrifugalkraft, sie muß ihren deutlich erkennbaren Ausdruck

in den Gleichungen finden, derer wir uns bedienen, um das beobachtbare Verhalten oder die Wahrscheinlichkeit des beobachtbaren Verhaltens vorherzusagen.

An diesem Beispiel erkennt ihr, daß es mit der Nichtunterscheidbarkeit nichts Geheimnisvolles auf sich hat. Wir nehmen nicht an, daß ein Elektron sich dessen bewußt ist, daß man es von anderen Elektronen nicht unterscheiden kann und daß es sich mit Rücksicht hierauf anders benimmt. Die Wirkung der Nichtunterscheidbarkeit besteht vielmehr darin, daß unsere praktischen Probleme eine Änderung erfahren. Wir können uns vorstellen, daß ein höheres Wesen, das jedes einzelne Elektron zu identifizieren vermag, auch weiterhin seine Probleme auf die alte Weise weiter behandelt. Seine Ergebnisse sind durchaus richtig, nur gehen sie uns nichts an; denn da wir nicht so begabt sind wie jenes Wesen, so können wir auf keine Weise die Beobachtungsdaten ermitteln, deren es sich bedient. Es beobachtet das Elektron Nr. 1 zur Zeit t am Orte x und zur Zeit t' am Orte x' , und so erhält es die Angabe, daß das Elektron eine Geschwindigkeit $(x' - x)/(t' - t)$ besitzt. Wir dagegen beobachten zur Zeit t ein Elektron am Orte x und zur Zeit t' ein Elektron am Orte x' , aber wir wissen nicht, ob es das gleiche Elektron ist. Elektronengeschwindigkeiten sind für uns keine beobachtbaren Sachverhalte, denn wir wissen nicht, ob wir die beobachteten örtlichen Lagen richtig miteinander verknüpfen. Wir bedienen uns einer Art von Ersatz (den wir beobachten können), den man eine dynamische Geschwindigkeit nennt*. Diese kann man sich am besten als ein Äquivalent der wirklichen kinematischen Geschwindigkeit denken, aber verknüpft mit einem gewissen Spielraum für eine durchschnittliche Zahl von Irrtümern bei der Identifizierung. Natürlich gehorchen aber diese dynamischen Geschwindigkeiten nicht denselben Gleichungen wie die wirklichen kinematischen Geschwindigkeiten; der Unterschied wird durch zusätzliche Glieder in den Gleichungen dargestellt. Die Mühle der dynamischen Gleichungen für nichtunterscheidbare Teilchen ist von derjenigen für unterscheidbare Teilchen verschieden, weil sie ein anderes Mahlgut zu mahlen hat.

Wenn wir in unserer Untersuchung weiterschreiten, so finden wir, daß die 136 Symbole $E F$ verschiedene Variationsmöglichkeiten

* Sie ist gleich dem Impuls, geteilt durch die Masse, wobei der Impuls allgemeiner definiert ist, als es in der elementaren Mechanik geschieht.

eines Systems von zwei elektrisch geladenen Teilchen kennzeichnen oder, wie man meist sagt, verschiedene „Freiheitsgrade“. Wir müssen einen 137. Freiheitsgrad hinzufügen, der dem Austausch entspricht. Da wir die Teilchen nicht identifizieren können, so können wir ein bestimmtes Teilchen nicht mit Sicherheit zeitlich verfolgen. Wir können das System dahin beschreiben, daß es aus Elektronen besteht, die sich an den Orten P und Q befinden, wir müssen aber auch die wechselnde Wahrscheinlichkeit dafür beschreiben, daß das am Orte P befindliche Elektron das Elektron Nr. 1 ist. Eine abnehmende Wahrscheinlichkeit dafür, daß es Nr. 1 ist, und eine zunehmende Wahrscheinlichkeit dafür, daß es Nr. 2 ist, kann wie eine stetige Verschiebung längs des 137. Freiheitsgrades behandelt werden, der den Austausch der beiden Elektronen darstellt. Wenn man die Teilchen als unterscheidbar behandelt, so ist das gleichbedeutend mit der Einführung eines Zwanges, der jede Bewegung in der Richtung des 137. Freiheitsgrades unterbindet; denn in diesem Falle ist P als der Ort eines bestimmten Teilchens (Nr. 1) definiert. Das System zweier unterscheidbarer Teilchen ist daher auf 136 Freiheitsgrade beschränkt. Es sei bemerkt, daß nichtunterscheidbare und unterscheidbare Teilchen Grenzfälle bilden, und daß man innerhalb dieser Grenzen Teilchen behandeln kann, deren Identifizierung eine Frage der Wahrscheinlichkeit ist, z. B. ein Teilchen, für das auf Grund unserer lückenhaften Auskünfte die Wahrscheinlichkeit, Nr. 1 zu sein, gleich $2/3$, und die Wahrscheinlichkeit, Nr. 2 zu sein, gleich $1/3$ ist.

Der Freiheitsgrad, der in der Dynamik nichtunterscheidbarer Teilchen neu hinzukommt, gibt die Erklärung dafür, warum das Quantum in 137 Teile zerfällt, statt in 136, wie wir es anfänglich erwartet hatten. Die Coulombsche Energie $1/137 r$ ist die „Bewegungsenergie“ im 137. Freiheitsgrad*. Das ist vielleicht die

* Die folgende Ergänzung ist für den mathematisch geschulten Leser bestimmt. Wenn die Wahrscheinlichkeit dafür, daß das Elektron in P Nr. 1 ist, $\cos^2 \Theta$ beträgt, und demnach die Wahrscheinlichkeit dafür, daß es Nr. 2 ist, gleich $\sin^2 \Theta$ ist, so wird die Permutationsvariable Θ als die Koordinate in der 137. Dimension genommen. Der mit ihr konjugierte Impuls ist der verlangte, in die dynamischen Gleichungen eingehende Wechselwirkungsterm. Wenn die Teilchen nichtunterscheidbar sind, so ist Θ eine nicht kennbare Koordinate, und der konjugierte Impuls hat den Betrag $1/137 r$. Sind aber die Teilchen unterscheidbar, so ist der konjugierte Impuls notwendig gleich Null. In den dazwischenliegenden Fällen, wenn die Unterscheidung eine Frage der Wahrscheinlichkeit ist, müssen Θ und sein konjugierter Impuls als Veränderliche des Problems behandelt werden.

Grenze, bis zu der wir das Problem hier mit Nutzen verfolgen können. In Übereinstimmung mit meinen eigenen Folgerungen hat die ausführliche mathematische Untersuchung diese Gedanken bestätigt.

IV.

Wenn wir der Grundkonstante A , dem Massenverhältnis, nachgehen, so kommen wir in noch tieferes Wasser. Unter der Masse eines Elektrons verstehen wir gewöhnlich seine Masse im metrischen System, d. h. seine Masse, ausgedrückt in der durch ein bestimmtes Stück Metall, das Kilogrammnormal, dargestellten Einheit. Messungen der Masse können auf die verschiedensten Weisen ausgeführt werden; zweierlei ist aber bei einem solchen Versuch unentbehrlich; das eine ist das Elektron und das andere das Kilogrammnormal. Die Messung kann in einer Anzahl von Schritten vor sich gehen, diese müssen zusammen aber eine vollständige Kette bilden, die vom Elektron bis zum Kilogrammnormal aus Metall reicht. Stellt euch vor, daß ein Physiker die vollständige Messung ausführt. Er macht eine Anzahl von Beobachtungen, stellt die Berechnungen an und veröffentlicht das Ergebnis. Nachher aber macht man die Entdeckung, daß das Kilogrammnormal die ganze Zeit über im Schrank eingeschlossen war und nie benutzt wurde. Dann würden wir den Schluß ziehen, daß irgend etwas an diesem Verfahren nicht stimmt. Wenn wir die heutige Quantentheorie genau unter die Lupe nehmen, so kommen wir kaum um den Schluß herum, daß sich der theoretische Physiker genau der gleichen Gedankenlosigkeit schuldig gemacht hat.

Ich muß aber erst eines näher erklären. Wir sprechen von der experimentellen Bestimmung der Elektronenmasse so, als sei dabei der Experimentator als einzige Person beteiligt. Er legt aber nicht etwa das Elektron auf die Waagschale und wägt es. Tatsächlich ist die Bestimmung im höchsten Grade theoretisch. Man veranlaßt den Experimentalphysiker, eine Anzahl von Beobachtungen zu machen; er hätte aber nicht die geringste Ahnung, was für Beobachtungen er machen muß und wie er aus ihnen die Elektronenmasse ermitteln kann, wenn ihm der theoretische Physiker keine Anweisungen gegeben hätte. So wollen wir den Experimentalphysiker (mit einem guten Zeugnis) von der Last dieses Problems befreien und den gewöhnlich als richtig angenommenen Wert der Masse als eine Entdeckung des theoretischen Physikers

ansehen, der die Oberleitung über das Ganze hatte. Ihn klagte ich an, daß er vergaß, das Kilogrammnormal hereinzubringen.

Und das ist so gekommen. Zwischen dem Elektron und dem Kilogramm besteht im allgemeinen nur eine ziemlich mittelbare Verbindung. Das Elektron muß nach der Quantentheorie behandelt werden; für das große Metallstück bedarf es aber des mächtigen Mikroskops der Quantentheorie nicht, es genügt die klassische Mechanik oder zwecks noch besserer Einsicht die relativistische Mechanik. Am Elektronenende zeichnet der Quantenphysiker verantwortlich, am Kilogrammende der Relativitätsphysiker; es scheint sich aber niemand dafür verantwortlich gefühlt zu haben, daß zwischen ihnen eine Verbindung besteht. Es muß immer ein verbindendes Glied geben, wo wir von einer makroskopischen zu einer mikroskopischen Masse übergehen, und dieses Glied müssen wir uns vornehmen, denn hier stoßen die Quantentheorie und die Relativitätstheorie aufeinander.

Da es auf jeden Fall ein verbindendes Glied gibt, in dem eine mikroskopische Masse mit einer makroskopischen verglichen wird, so können wir für den Augenblick annehmen, daß das Elektron mit dem Kilogramm unmittelbar verglichen wird. Das bedeutet, daß wir es mit der kombinierten Wahrscheinlichkeitsverteilung der Elektronenmasse und der Kilogrammmasse zu tun haben — der Verteilung ihrer Orte, Impulse, Dralle usw. Unsere messenden Beobachtungen bestimmen einige Züge dieser kombinierten Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Es liegt im Wesen des Versuchs, daß er Sachverhalte bezüglich der kombinierten Verteilung feststellt. Wenn wir durch irgendeinen Zufall die Messung in eine solche einer unabhängigen Wahrscheinlichkeitsverteilung des Elektrons einerseits und des Kilogramms andererseits auflösen können, so verfehlt der Versuch seinen Zweck. Soweit die Messungen Eigenschaften der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Elektrons enthüllen, die es unabhängig von der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Kilogramms besitzt, und die daher auch bestehen bleiben, wenn man das Kilogramm entfernt und in den Schrank schließt, sind sie für eine Massenbestimmung wertlos. Die einer experimentellen Massenbestimmung zugrunde liegende Theorie ist daher die Theorie einer doppelten Wahrscheinlichkeitsverteilung, die in der Wellenmechanik durch eine doppelte Wellenfunktion beschrieben wird. Doppelte Wellenfunktionen werden in den Lehrbüchern der Quantentheorie in ziemlicher Breite behandelt; man wird aber in Verbindung mit der Masse des Elektrons

nie einen Hinweis auf doppelte Wellenfunktionen finden. Die Masse wird als ein Merkmal einer einzelnen Wellenfunktion eingeführt, die sich nur auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Elektrons bezieht. Wie wir gesehen haben, ist das gleichbedeutend damit, daß das Kilogrammnormal im Schrank geblieben ist.

Wir stehen also hier vor einem Widerspruch zwischen Theorie und Praxis. In der Wellenmechanik wird die Masse des Elektrons als ein bestimmtes Merkmal der einfachen Wellenfunktion des Elektrons allein definiert. Nachdem man eine sogenannte experimentelle Bestimmung der Masse angestellt hat, nimmt man an, daß sie den Betrag dieses Merkmals angibt, und auf diese Weise dient sie weiterhin zur Vorausberechnung von Spektren, Stoßvorgängen usw. Demgegenüber kann durch den Versuch nichts anderes ermittelt worden sein, als Merkmale der doppelten Wellenfunktion eines Elektrons und eines makroskopischen Massennormals. An irgendeiner Stelle hat also der Theoretiker insgeheim eine doppelte Wellenfunktion zu einer einfachen Wellenfunktion zusammengeschoben, und wir finden nirgends eine Betrachtung darüber, was dieser Sprung denn eigentlich mit sich bringt.

Man kann nachweisen, wie es zu der Verwechslung einer einfachen und einer doppelten Wellenfunktion gekommen ist. Eine der Wirkungen der Wahrscheinlichkeitswellen, mit denen wir es hier zu tun haben, besteht darin, daß sie den Ort des Systems mit einer Art von Dunst umgibt (vgl. den „Nebel“, S. 39). In diesem Falle handelt es sich sozusagen um einen zweidimensionalen Dunst, der zum Teil von der Unschärfe des Ortes des Elektrons, zum anderen Teil von der Kilogrammasse herrührt. Aber die Maßverhältnisse der Wellen und des entsprechenden Dunstes sind der Masse umgekehrt proportional, so daß der Dunst in der dem Elektron entsprechenden Dimension 10^{31} mal weiter ausgedehnt ist, als in der dem Kilogramm entsprechenden Dimension. Auf den ersten Blick scheint es ziemlich kleinlich, wenn man auf dem zweidimensionalen Charakter eines Dunstes besteht, der so nahezu linear verteilt ist. Die Annäherung, die man erhält, wenn man 10^{-31} vernachlässigt, ist doch sicher gut genug! Nein, gerade dann nicht, wenn es eben die Größe 10^{-31} ist, nach der man forscht, nämlich die Masse des Elektrons in Einheiten des Massennormals. Wir müssen auf dem zweidimensionalen Charakter der Wahrscheinlichkeitsverteilung bestehen, weil eine eindimensionale Verteilung die Größe nicht einbegreifen würde, die wir messen.

Ob nun eine logische Grundlage für den Ersatz der doppelten Wellenfunktion durch eine einfache Funktion gefunden werden kann oder nicht, wir müssen sie als eine g e g e b e n e T a t s a c h e betrachten, deren Auswirkungen in die derzeitige Theorie und den gebräuchlichen Wortschatz übergegangen sind. Dann bleibt die Frage, unter welchen Umständen der Sprung ohne böse Folgen geschehen kann. Wir finden dann, daß es gerade zwei Massenbeträge gibt, für die die einfache Wellenfunktion die gleichen Beobachtungsergebnisse liefert, wie es die doppelte Wellenfunktion tun würde. Indem der Physiker diesen Sprung macht, ist er also (um sein schlechtes Betragen zu verschleiern) gezwungen, seinen Elementarteilchen die eine oder die andere dieser beiden Massen zuzuschreiben. Oder anders gesagt: wenn er von dem übrigen Weltall einen Teil abtrennt, dem die eine oder die andere dieser Massen zukommt, so wird sein vorschnelles Verhalten gerechtfertigt; ganz folgerichtig sieht er in diesen Massen die einzigen, die richtig abgetrennt und so behandelt werden können, als ob sie ein unabhängiges Dasein hätten. Demnach bilden sie die Elementarteilchen seines Schemas.

Der Einfachheit halber haben wir von einem unmittelbaren Vergleich der Elektronenmasse mit dem Kilogrammnormal gesprochen; tatsächlich aber ist zwischen ihnen das Weltall als ein vermittelnder Vergleichskörper eingeschaltet. Wir haben gesehen (S. 214), daß die Wellengleichung das Elektron in bezug auf das Weltall beschreibt; der Rest der Verbindungskette, die die Kilogrammmasse mit dem Weltall verbindet, wird in der Relativitätstheorie behandelt, die die Masse als eine Krümmung der Raum-Zeit-Welt enthüllt. Daher ist es die doppelte Wellenfunktion des Elektrons und des Weltalls, die zu einer einzigen Wellenfunktion zusammengeschoben wurden. Wenn m die Masse eines geladenen Teilchens und m_0 die Masseneinheit ist, die das Weltall als Vergleichsding liefert, so kann man feststellen, daß der Übergang von einer doppelten zu einer einfachen Wellenfunktion nur dann möglich ist, wenn

$$10 m^2 - 136 m m_0 + m_0^2 = 0.$$

Das Wesen der Größe m_0 braucht uns hier nicht aufzuhalten; sie ist der Ausgangspunkt unserer Theorie der kosmologischen Konstanten. Wenn wir m_0 als eine bestimmte Masseneinheit ansehen, so ergibt die quadratische Gleichung zwei Werte von m , nämlich

$$0,007\,357\,m_0 \text{ und } 13,593\,m_0.$$

Wahrscheinlich sind dies die Massen des Elektrons und des Protons. Ihr Verhältnis beträgt 1847,6, ein Wert, der mit den Messungsergebnissen des Massenverhältnisses sehr gut übereinstimmt.

V.

Ich habe m_0 die Masseneinheit genannt, die das Weltall als Vergleichsding liefert. Da m_0 kleiner als die Masse des Protons ist, könnte es sonderbar klingen, wenn man es als die Masse des Weltalls bezeichnet. Es ist aber eine Tatsache, daß man die Masse kaum so definieren kann, daß eine Übereinstimmung mit der Praxis sowohl der Quantentheorie wie der makroskopischen Theorie besteht. Die Terminologie hat sich weitgehend zufällig entwickelt und zeigt Widersprüche, wenn die beiden Theorien zusammentreffen, und die Verwirrung wird noch durch den Sprung gesteigert, von dem wir im letzten Abschnitt gesprochen haben. Ich kann hier nicht Halt machen, um den Knoten zu lösen. So will ich hier nur ganz schlicht sagen, daß von einem bestimmten Standpunkt aus m_0 die Masse des Weltalls ist.

Auf S. 103 fanden wir, daß nach der Unschärferelation eine kleine, irreduzible Energie (oder die ihr äquivalente Masse) mit jedem Teilchen im gekrümmten Raum verknüpft ist. Wir können das ein wenig weiter fassen. Ich habe keine Ahnung, auf welchem Teil der Erdoberfläche du, mein Leser, lebst. Daher möchte ich die Unschärfe deines Ortes mit rund 6400 km angeben, denn du mußt dich ja in irgendeiner Richtung in einem Abstände von rund 6400 km vom Erdmittelpunkt befinden. Entsprechend können wir, wenn R der Radius des Raumes ist, die Unschärfe des Ortes eines Teilchens (über das wir keinerlei Auskünfte besitzen) mit R angeben. Wenn wir dieses Teilchen als Bezugspunkt bei der Beschreibung des relativen Ortes eines anderen Teilchens wählen, so ist die Unschärfe des Ortes unseres Bezugspunktes gleich R .

Unschärfen werden herabgesetzt, wenn man das Mittel aus einer großen Anzahl nimmt. Wenn wir N unabhängige Teilchen haben, deren jedes mit einer Unschärfe (oder einem wahrscheinlichen Fehler) R behaftet ist, so wissen wir aus der Fehlertheorie, daß die Unschärfe (oder der wahrscheinliche Fehler) ihres Schwerpunktes gleich $R/\sqrt{N}$ ist. Wenn wir nun anstatt eines Teilchens das Mittel aus

N unabhängigen Teilchen als Bezugspunkt wählen, so erhalten wir einen Bezugspunkt, dessen Ort mit einer Unschärfe $R/\sqrt{N}$ behaftet ist.

N sei die Zahl der Teilchen im Weltall. Wenn wir das Weltall als Vergleichsding benutzen, so verschmieren wir die Massenverteilung zu einer gleichförmigen sphärischen Verteilung, die der Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori der Teilchen entspricht (S. 126), d. h. derjenigen Verteilung, die wir als vorhanden annehmen, wenn wir keine von der Beobachtung gelieferten Auskünfte besitzen, die die Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori ändern. Die Teilchen sind demnach als solche zu behandeln, über die wir keine Auskünfte besitzen. Das Mittel über diese Teilchen liefert also ein Bezugssystem oder einen Bezugspunkt, dessen Lage mit einer Unschärfe $R/\sqrt{N}$ behaftet ist. Nach Heisenbergs Unschärferelation ist der entsprechende irreduzible Impuls von der Größenordnung $h : (R/\sqrt{N})$. Wenn wir noch einige Einzelheiten berücksichtigen, so finden wir, daß er tatsächlich $h\sqrt{N}/2\pi R$ beträgt. Die entsprechende Masse beträgt $h\sqrt{N}/2\pi R c$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist.

Das Weltall ist in seiner Eigenschaft als Vergleichsding mit dieser Masse behaftet, die von der Endlichkeit des Raumes herührt, in dem sich seine N unabhängigen Teilchen befinden. Ich identifiziere diese Masse mit der Masse m_0 , womit wir im letzten Absatz die Masse des Weltalls bezeichneten, oder (um den Leser nicht zu sehr vor den Kopf zu stoßen) die Masseneinheit, die uns das Weltall als Vergleichsding zur Verfügung stellt. Daher ist

$$m_0 = \frac{h}{2\pi c} \frac{\sqrt{N}}{R}.$$

Wengleich ich kaum im Zweifel bin, daß die Überlegung sachlich richtig ist, so ist doch die obige Gleichung in gewisser Hinsicht nur als eine vorläufige anzusehen. Bei der ausführlichen mathematischen Untersuchung tauchen unter anderem folgende Fragen auf: Ist für N die Zahl der Teilchen einer Art (Elektronen oder Protonen) oder die Zahl der Teilchen von beiderlei Art (Elektronen und Protonen) zu wählen? Ist R der sogenannte Einstein-Radius oder der de Sitter-Radius des Weltalls? Müssen gewisse Größen über drei (räumliche) Dimensionen oder über vier (raumzeitliche) Dimensionen gemittelt werden? Usw. Alle diese Fragen werden ohne Zweifel zu ihrer Zeit geklärt werden, aber ich kann auf sie vorläufig noch nicht ohne Bedenken antworten. Es ist möglich, daß sie

zur Einführung von Faktoren von etwa der Größe 2 oder 3 in die Gleichung für m_0 führen können; die Größenordnung jedoch beeinflussen sie nicht *.

Wir haben schon gesehen, daß m_0 gleich 1/13,593 der Masse des Protons ist. Daher können wir, indem wir die bekannten Werte von h und c benutzen, aus der Gleichung $R/\sqrt{N}$ (in Zentimetern) berechnen. R/N ist bereits aus der Relativitätstheorie bekannt **; es hängt von dem gemessenen Wert der allgemeinen Gravitationskonstanten ab. Indem wir beide Ausdrücke kombinieren, erhalten wir R und N einzeln. Da die Gleichung für m_0 noch nicht endgültig ist, gebe ich die so ermittelten Werte nicht an; nimmt man aber die Gleichung wie sie ist, so stimmen sie mit den ziemlich rohen Werten, die man aus den Radialgeschwindigkeiten der Nebel erhält, ganz gut überein. Im einzelnen finden wir, daß N in runder Zahl gleich 10^{79} ist, so daß das aus den Nebeln abgeleitete Ergebnis bestätigt wird (S. 209/210).

VI.

Die theoretischen Werte der Feinstrukturkonstanten (137) und des Massenverhältnisses (1847,6) lassen eine sehr genaue experimentelle Prüfung zu. Es besteht kein Zweifel, daß sie innerhalb 0,2% bzw. 0,5% bestätigt werden. Im allgemeinen nimmt man aber an, daß ihre Genauigkeit noch größer ist, und sie zeigen dann kleine, aber doch merkliche Abweichungen von den obigen Werten. Man darf indessen nicht übersehen, daß dieser Vergleich sich auf die sogenannten „beobachteten Werte“ bezieht, die aber nicht durch unmittelbare Beobachtung ermittelt, sondern aus beobachteten Daten mit Hilfe von Gleichungen berechnet werden, die aus der üblichen Quantentheorie abgeleitet sind. Daher sind sie auch mit den (etwaigen) Unvollkommenheiten der üblichen Quantentheorie behaftet. Wenn man die Beobachtungen als völlig zuverlässig ansieht, so müssen die Abweichungen an einem Widerspruch zwischen der üblichen Quantentheorie und der neuen Verbindung zwischen Relativitätstheorie und Quantentheorie liegen, die wir hier angewendet haben. Es ist sicher nicht gerechtfertigt, wenn man von

* Vgl. hierzu den Nachtrag am Schluß dieses Kapitels (S. 241). D. Übers.

** Man sagt richtiger, daß die Relativitätstheorie R/M gibt, wobei M die Masse des Weltalls ist (die gewöhnliche makroskopische Masse). Da wir aber die ungefähre Anzahl der Protonen und Elektronen in einem Gramm der Materie kennen, so kann R/N ohne weiteres berechnet werden.

vornherein annimmt, daß der Vorwurf notwendig diese neue Verbindung trifft.

W. N. Bond hat vermutet, daß die Ursache der Abweichungen darin besteht, daß bei einigen oder allen Methoden zur Bestimmung der Elektronenmasse die zur Auswertung der Beobachtungsergebnisse verwandte Methode das 137/136 fache der wahren Masse ergibt. Die Konstante, die man meist angibt, ist e/m in elektromagnetischen Einheiten; ihr zuverlässigster „beobachteter Wert“ beträgt $1,757 \cdot 10^7$ *. Nach Bonds Hypothese müßte dies mit 137/136 multipliziert werden, so daß der wirkliche Wert $1,770 \cdot 10^7$ wäre. Sowohl Bond wie Birge haben bereits erkannt, daß $1,770 \cdot 10^7$ das Ergebnis ist, das eine vollkommene Übereinstimmung zwischen den Beobachtungen und den vom Verfasser theoretisch berechneten Werten der beiden Konstanten herbeiführen würde.

Es scheint aus theoretischen Gründen wahrscheinlich, daß Bonds Vermutung das Richtige trifft. Wir wollen uns daran erinnern, daß wir anfänglich erwarteten, daß die Coulombsche Energie zweier Teilchen $1/136 r$ sein werde. Das war 137/136 mal zu groß, weil wir den 137. Freiheitsgrad nicht berücksichtigt hatten, der von der Nichtunterscheidbarkeit der beiden Teilchen herrührt. Bonds Vermutung bedeutet, daß wir nicht die einzigen Opfer dieses Irrtums sind, und daß die übliche Quantentheorie, wenn sie (aus Beobachtungsergebnissen) einen anderen Energiebetrag ableitet, nämlich den, der als Masse des Elektrons in die Erscheinung tritt, auch ein um den Faktor 137/136 zu großes Ergebnis erhält. Wenn das zutrifft, so hat es vermutlich den gleichen Grund, nämlich die Vernachlässigung des 137. Freiheitsgrades.

Wir haben gesehen, daß es mit der Nichtunterscheidbarkeit nichts Geheimnisvolles auf sich hat. Sie verursacht keinen Unterschied im Verhalten, sondern einen Unterschied in dem, was wir über das Verhalten zu erfahren suchen können, und deshalb einen Unterschied in der Behandlung. Insbesondere beschränken wir das System, wenn wir die Teilchen zu unterscheiden vermögen, auf 136 statt auf 137 Freiheitsgrade. Daher müssen wir eine Wahrscheinlichkeit a priori anwenden, die gleichförmig über einen geschlossenen ** Bereich von 136 statt von 137 Dimensionen verteilt

* R. T. Birge, Nature, 28. April 1934, S. 648.

** Der Bereich einer gleichförmigen Wahrscheinlichkeitsverteilung a priori kann kein unendliches Volumen haben, denn das würde die Wahrscheinlichkeit in jedem endlichen Volumen zu Null machen. Der Bereich muß daher immer den Charakter eines sphärischen oder hypersphärischen Raumes haben.

ist. Das bedingt einen Unterschied in den Mittelwerten der verschiedenen Merkmale und deshalb im metrischen Tensor (S. 125). Mit anderen Worten: wir verknüpfen mit den zwei Behandlungsweisen eine verschiedene Metrik des Raumes. Die theoretische Analyse scheint darauf hinzuweisen, daß durch die Änderung der Metrik ein (in der üblichen Quantentheorie vernachlässigter) Faktor $136/137$ eingeführt wird, wenn wir den Raum, der von den nichtunterscheidbaren Teilchen der Quantentheorie eingenommen wird, mit dem Raum gleichsetzen, der von den unterscheidbaren Bestandteilen unseres Meßgeräts eingenommen wird.

Die beiden anderen numerischen Konstanten C und D können, soweit wir wissen, aus der reinen Theorie nicht ermittelt werden; aber ihr Verhältnis kann mit Hilfe der im Abschnitt V entwickelten Theorie berechnet werden, so daß sie einer einzigen verfügbaren Konstanten im Bau des Weltalls entsprechen. Der theoretische Wert des Verhältnisses von C zu D ergibt sich zu $\sqrt{90}/\pi$ oder 3,02; aber er hängt von unserer Gleichung für m_0 ab, so daß er noch nicht endgültig ist *. Wenn man die beträchtliche Unsicherheit der Beobachtungen in Betracht zieht, aus denen D ermittelt wird, so liegt der derzeitige Wert dem beobachteten Verhältnis nahe genug **.

Wenn in der Beschreibung des Weltalls nur eine einzige verfügbare Zahlenkonstante auftritt, so kann diese schwerlich etwas anderes sein, als die Gesamtzahl der Teilchen, aus denen es besteht. Diese Zahl haben wir mit N bezeichnet. Der große Zahlenfaktor, der sowohl bei C wie bei D auftritt, ist die Wurzel aus N . Man findet aus unseren Gleichungen

$$C = \frac{\sqrt{3N}}{\pi}, \quad D = \sqrt{\frac{N}{30}}.$$

Setzen wir z. B. $N = 2 \cdot 10^{79}$ (nämlich 10^{79} Protonen und 10^{79} Elektronen), so erhalten wir

$$C = 2,5 \cdot 10^{39}, \quad D = 0,82 \cdot 10^{39},$$

was den beobachteten Werten auf S. 220 recht nahe kommt. Weder die Theorie noch die Beobachtungen sind zuverlässig genug, um für N eine bessere Näherung zu gewährleisten.

* Vgl. hierzu den Nachtrag am Schluß dieses Kapitels (S. 241). D. Übers.

** C ist aus Beobachtungen gut bekannt, aber der Wert von D , der von der Radialgeschwindigkeit der Nebel abhängt, kann aus den Beobachtungen nur roh berechnet werden.

Fürth hat darauf hingewiesen, daß die 256. Potenz von 2 ein wenig größer als 10^{77} ist, und er hat vermutet, daß N irgend etwas mit 2^{256} zu tun haben könnte. Das würde bedeuten, daß die Zahl der Teilchen im Weltall nicht durch Willkür bestimmt, sondern durch irgendeine innere Notwendigkeit gegeben ist. Das ist eine interessante Idee, aber man hat bisher nichts gefunden, was ihr eine Stütze gäbe.

Infolge des Auftretens von $\sqrt{N}$ in der Konstanten C wird das Verhältnis der Massenanziehung zur elektrostatischen Kraft zwischen den Teilchen von der Gesamtzahl der Teilchen im Weltall abhängig. Man könnte fragen, ob wir im Ernst annehmen wollen, daß dieses Verhältnis, das doch durch Versuche innerhalb der vier Wände eines Laboratoriums bestimmt werden kann, wirklich von dem Dasein einer ungeheuren Zahl von Teilchen jenseits der fernsten bisher geschauten Milchstraßen abhängen soll. Wie könnte es für einen gewöhnlichen Laboratoriumsversuch, wie z. B. den Cavendish-Versuch, irgendeinen merklichen Unterschied ausmachen, wenn man die gesamte Materie jenseits unserer eigenen Milchstraße beseitigte?

Mir scheint, daß diese Frage eine Verwechslung zwischen einer mathematischen Abhängigkeit und einer physikalischen Verursachung verrät. Es war nicht meine Absicht, zu sagen, daß das Ergebnis des Cavendish-Versuchs zur Messung der Gravitationskonstanten durch die Teilchen, die sich in sehr fernen Gegenden des Weltalls befinden, beeinflusst wird; sondern wir sind, nachdem der Cavendish-Versuch ein bestimmtes Ergebnis hatte, in der Lage, die Zahl der Teilchen in fernen Gegenden des Weltalls zu berechnen, wenn wir annehmen, daß dort die gleichen Gesetze gelten wie hier. Der Versuch zeigt uns den Betrag der Krümmung der Raum-Zeit-Welt an, die mit einer gegebenen Zahl von Teilchen verknüpft ist. Wenn wir unseren Überblick immer weiter nach außen ausdehnen, so trägt jedes weitere Teilchen ein weiteres zur Krümmung bei und bringt den Raum der Geschlossenheit näher. Die Gesamtzahl der Teilchen ist dadurch bestimmt, daß das N te Teilchen die Öffnung versiegelt. Das $(N + 1)$ te Teilchen bleibt draußen — im Nichts. Es hat keine Bleibe in einem Weltall, dessen Eigenschaften mit dem Cavendish-Versuch in Einklang sind. Im Sinne dieser Betrachtungsweise ist die Zahl der Teilchen im Weltall eher eine Folge des durch den Cavendish-Versuch enthüllten Verhaltens der Materie, als seine Ursache.

Ich möchte aber doch sagen, daß es eine beträchtliche Extrapolation bedeutet, wenn wir die in den Konstanten C und D enthaltene Zahl N als die wirkliche Zahl der Teilchen im Weltall ansehen. Die Theorie ist nur für das sphärische Modell entwickelt worden. Wenn die Verteilung der Milchstraßen irgendwelche beträchtlichen Ungleichförmigkeiten aufweist, so daß der Raum von der sphärischen Gestalt stark abweicht, so mag eine Korrektur nötig sein; es ist aber unwahrscheinlich, daß die Größenordnung eine andere ist. Die einfachsten Grundgleichungen der Physik beziehen sich auf idealisierte, gleichförmige Bedingungen, und unter diesen Bedingungen ist die durch die Gleichungen gegebene Zahl N streng gleich der Zahl der Teilchen im gesamten Raum.

Nachtrag für die deutsche Ausgabe. Ich habe jetzt die Untersuchungen, die ich in diesem Kapitel besprochen habe, vervollständigt und kann nunmehr gewisse Punkte, die unentschieden blieben, klarstellen. Auf S. 236 habe ich gesagt, daß die dort angegebene Gleichung für m_0 vielleicht noch abgeändert werden müßte. Das neue Ergebnis (das ich für endgültig halte) lautet:

$$m_0 = \frac{h}{2\pi c} \frac{\sqrt{\frac{5}{10}} N}{R}.$$

Dabei ist N die Gesamtheit der Teilchen im Weltall ($N/2$ Protonen und $N/2$ Elektronen) und R der Einstein-Radius des Weltalls.

Hieraus ergibt sich $R = 6,57 \cdot 10^{26}$ und eine obere Grenze für die Radialgeschwindigkeit der Spiralnebel von 865 km/sec je megaparsec. Als Wert, der aus astronomischen Beobachtungen folgt, wird gewöhnlich 550 km/sec je megaparsec angegeben. Es ist möglich, daß der Unterschied teilweise auf die gegenseitige Anziehung der Nebel zurückzuführen ist, indem die Expansion vielleicht noch nicht so weit vorgeschritten ist, daß diese zu vernachlässigen ist und die Radialgeschwindigkeit ihren vollen oberen Grenzwert erreicht hat. Ich halte es aber für wahrscheinlicher, daß er auf einer falschen Annahme der Astronomen über die Entfernungen der Nebel beruht.

Als Betrag von N ergibt sich $1,573 \cdot 10^{79}$. Das dürfte auf 0,1 bis 0,2 % genau sein. Im Hinblick auf die Bemerkung auf S. 240 ist es interessant, zu bemerken, daß $N = 135,82 \cdot 2^{256}$ ist. Daher scheint es wahrscheinlich, daß die Zahl N der Teilchen im Weltall genau gleich $136 \cdot 2^{256}$ ist.

12. Kapitel

DIE GRUPPENTHEORIE

Es gibt in der Schulphilosophie eine Menge von Spekulationen, die man sich hätte ersparen können, wenn man sich der Bedeutung der Struktur und der Schwierigkeit, sie zu erkennen, bewußt gewesen wäre. So sagt man z. B. oft, daß Raum und Zeit subjektiv sind, daß sie aber objektive Gegenstände haben; oder daß zwar die Erscheinungen subjektiv sind, daß sie aber durch Dinge an sich hervorgerufen werden, die unter sich Verschiedenheiten besitzen müssen, die den Verschiedenheiten der Erscheinungen entsprechen, die sie veranlassen. Wo solche Hypothesen aufgestellt werden, nimmt man im allgemeinen an, daß wir über die objektiven Gegenstände nur sehr wenig wissen können. Indessen würden die objektiven Gegenstände, wenn die Hypothesen in dieser Form zutreffend wären, tatsächlich eine Welt bilden, die die gleiche Struktur hat wie die Erscheinungswelt . . . Kurz, jeder Satz, der eine mittelbare Bedeutung besitzt, muß entweder auf beiden Seiten der Welt zutreffen oder auf keiner. Der einzige Unterschied muß in eben jenem inneren Wesen der Individualität liegen, das man nicht in Worten ausdrücken und auf keine Weise beschreiben kann, das aber, gerade aus diesem Grunde, für die Wissenschaft ganz belanglos ist.

Bertrand Russel, *Introduction to Mathematical Philosophy*, S. 61.

I.

Wir wollen uns einmal vorstellen, daß dereinst nach tausend Jahren die Altertumsforscher sich mit Ausgrabungen an den Stätten der vergessenen Zivilisation Großbritanniens beschäftigen. Dabei ist ihnen das folgende literarische Fragment in die Hände gefallen, das der Vernichtung entging, als die Abschaffung der Bibliotheken angeordnet wurde:

'Twas brillig, and the slithy toves
Did gyre and gimble in the wabe,
All mimsy were the borogoves
And the mome raths outgrabe*.

* Anmerkung des Übersetzers. Da es sich um eine „archäologische Urkunde“ handelt, so ist das Gedicht hier im Urtext wiedergegeben worden. Allerdings würde sich ein deutscher Leser, der die Übersetzung dennoch versuchen würde, vor die gleiche Schwierigkeit gestellt sehen, wie ein Engländer, der versuchen wollte, das „Große Lalula“ in Chr. Morgensterns Galgenliedern ins Englische zu übersetzen. Diese und die folgenden Strophen sind reines „Kauderwelsch“. Sie erwecken trotz der völlig sinnlosen Worte den Eindruck irgendeiner emsigen Geschäftigkeit irgendwelcher Wesen. Die Strophen sind einem Gedicht „Jabberwockies“ des weiter unten genannten Mathematikers Dodgson in Oxford entnommen, der unter dem Decknamen Lewis Carroll die bekannten „Alice-Books“ verfaßte, auf die in diesem Buch mehrfach Bezug genommen wird.

Man sieht hierin einen wertvollen Beitrag zu den spärlichen Überresten eines interessanten geschichtlichen Zeitalters. Aber selbst die Sachverständigen sind sich über seine Bedeutung nicht klar. Man hat festgestellt, daß der Verfasser ein Mathematiker in Oxford war; aber das ist noch keine ganz ausreichende Erklärung dafür, daß der Sinn des Fragments so dunkel ist. Es beschreibt sicher irgend eine Art von emsiger Tätigkeit; wer aber die Handelnden sind, und welcher Tätigkeit sie sich hingeben, das bleibt ein undurchdringliches Geheimnis. Daher scheint der Vorschlag annehmbar, daß Mr. D o d g s o n eine Theorie des Weltalls auseinandersetzt.

Diese Erklärung könnte eine Stütze in einem weiteren Bruchstück des Gedichtes finden:

One, two! One, two! and through and through
The vorpal blade went snicker-snack.

„Eins, zwei! Eins, zwei!“ Aus den unbekannten Tätigkeiten unbekannter Handelnder tauchen mathematische Zahlen auf. Die Vorgänge in der Außenwelt können nicht mit Alltagsbildern beschrieben werden. Wir mögen sie durch Worte oder Symbole beschreiben, ihr inneres Wesen bleibt unbekannt. Aber sie sind die Träger eines Schemas von Beziehungen, die durch Zahlen beschrieben werden können, und die auf diese Weise zu jenen numerischen Messungen (Zeigerablesungen) führen, welche die Grundlagen bilden, aus denen jedes Wissen über das äußere Weltall abgeleitet wird.

Unser Bericht über die Außenwelt muß (nachdem die Erfindungen des Geschichtenerzählers in unserem Bewußtsein ausgemerzt sind) einem solchen Kauderwelsch gleichen, wo unkennbare Handelnde unkennbare Handlungen verrichten. Wie können wir unter solchen Umständen überhaupt zu irgendeinem Wissen gelangen? Wir müssen nach einem Wissen streben, das sich weder auf Handelnde noch auf Handlungen bezieht, sondern das uns durch die Handelnden und ihre Handlungen nur vermittelt wird. Das für uns erreichbare Wissen ist ein Wissen um eine Struktur, die in den Handlungen enthalten ist. (Vielleicht ist das die Erklärung für das gemalte Kauderwelsch, das man manchmal an den Wänden von Kunstaustellungen hängen sieht.) In der Mathematik bezeichnen wir ein solches Wissen als die Kenntnis einer Gruppenstruktur.

Dem Mathematiker macht es kein Kopfzerbrechen, daß er es mit unbekannten Dingen zu tun hat. In den Anfängen der Algebra beschäftigt er sich mit unbekannten Größen x und y . Seine Größen sind Unbekannte, aber er unterwirft sie bekannten Operationen — Additionen, Multiplikationen usw. Nach B e r t r a n d R u s s e l l s

bekannter Definition weiß ein Mathematiker nie, wovon er spricht, noch ob das, was er sagt, wahr ist; wir möchten aber doch sagen, daß er zum mindesten weiß, was er tut. Dieser Vorbehalt macht es fast ein wenig zweifelhaft, ob er fähig ist, sich mit einem Weltall abzugeben, das der Schauplatz unkenntlicher Handlungen und Operationen ist. Was wir brauchen, ist eine Über-Mathematik, in der die Operationen ebensowenig bekannt sind, wie die Größen, an denen sie ausgeführt werden, dazu ein Über-Mathematiker, der nicht weiß, was er tut, wenn er diese Operationen ausführt. Eine solche Über-Mathematik ist die Gruppentheorie.

Die Gruppentheorie ist gewöhnlich mit der strengsten logischen Behandlung verknüpft. Ich zweifle, ob jemand bisher je so schändlich war, sie aus der edlen Fassung reiner mathematischer Strenge herauszuberechnen. Aber es wird jetzt allmählich dringend nötig, sie dem Verständnis des Physikers näherzubringen, denn ihre allgemeinen Begriffe und Ergebnisse beginnen eine sehr große Rolle im Fortschritt der Quantentheorie zu spielen. Man hat mit den mannigfachsten mathematischen Werkzeugen versucht, sich bis an die Basis der Physik vorzugraben, und zur Zeit scheint dieses Werkzeug weit wirksamer zu sein, als irgendein anderes. So will ich mich denn anschicken, den Tempel der Strenge mit handfestem Beweis und notdürftiger Schilderung zu entweihen.

Indessen, meinem Streben sind sehr enge Grenzen gesteckt. Am einen Ende haben wir die der Beobachtung zugänglichen Erscheinungen, die dem menschlichen Bewußtsein über die Nerven seines Körpers irgendwie zugeleitet werden; am anderen Ende haben wir die Grundeinheiten der Physik – Elektronen, Protonen, Wellen usw. –, die wir für die Wurzeln dieser Erscheinungen halten. Dazwischen liegt die theoretische Physik, die heute einen fast völlig mathematischen Charakter hat. Insoweit die physikalische Theorie vollständig ist, erhebt sie den Anspruch, zu zeigen, daß die Eigenschaften, die den Grundeinheiten zugeschrieben werden, und die sie auf diese Weise ihrem Wesen nach definieren, unabweislich zu den Gesetzen führen, denen, wie wir sehen, die unseren Sinnen zugänglichen Erscheinungen gehorchen. Wenn weiter diese Eigenschaften nicht mehr als das sind, was für diesen Zweck gerade genügt, und wenn sie in einer möglichst wenig bindenden Form ausgesprochen werden, so können wir uns auch auf den entgegengesetzten Standpunkt stellen und sagen, daß die theoretische Physik das Weltall der beobachtbaren Erscheinungen bis in diese Grundeinheiten zergliedert hat. Für die Ausgestaltung dieses Zusammenhanges ist der

Mathematiker zuständig, und es ist nicht unsere Aufgabe, sie hier zu erörtern. Was ich zu zeigen versuchen will, ist, wie der Mathematiker ein erster Zugriff auf die Grundeinheiten glückte, deren Wesen und Tun grundsätzlich nicht kennbar ist. Wir wollen betrachten, woher der Mathematiker sein Material bezieht; wie er aber mit ihm umgeht, das können wir hier nur oberflächlich streifen.

Diese Einschränkung könnte unserem Gegenstand einen Anstrich von Trivialität geben. Wir drücken Gedanken mathematisch aus, die, soweit wir sie entwickeln können, ebenso gut auf nicht mathematische Weise hätten ausgedrückt werden können. Aber das ist die einzige Möglichkeit, einen Anfang zu machen. Wir wollen sehen, wo der Mathematiker uns davonläuft. Sobald der Mathematiker richtig in Gang gekommen ist, läßt er den mathematisch nicht genügend geschulten Verfasser und Leser keuchend hinter sich. Ich werde mich ganz und gar nicht entschuldigen, wenn der Leser am Ende des Kapitels ein wenig zu schnaufen beginnt. Meine Aufgabe ist es, zu zeigen, wie ein Mittel zum Fortschritt, das mit Gemeinplätzen beginnt, schließlich genug Schwung erhalten kann, um als Arbeitsmaschine des Sachverständigen zu dienen. Daher werden wir es beim letzten Blick, den wir von ihm erhaschen, schnell in die Weite verschwinden sehen.

II.

Bei der Beschreibung des Verhaltens eines Atoms spricht man oft von dem Sprung eines Elektrons von einer Bahn auf eine andere. Wir haben das Atom so dargestellt, daß es aus einem schweren zentralen Kern und einer Anzahl von leichten und flinken Elektronen besteht, die den Kern umkreisen, wie die Planeten die Sonne. Im Sonnensystem vollzieht sich jede Änderung einer Planetenbahn stetig, in einem Atom aber kann das Elektron seine Bahn nur sprungweise ändern. Solche Sprünge von einer Bahn auf eine völlig andere Bahn erfolgen dann, wenn ein Atom ein Strahlungsquantum absorbiert oder aussendet (S. 34).

Dieses Bild darf nicht allzu wörtlich genommen werden. Die Bahnen können sich kaum auf eine wirkliche Bewegung im Raume beziehen, denn es ist allgemein anerkannt, daß die landläufige Vorstellung des Raumes im Innern eines Atoms versagt. Es besteht ferner heute keineswegs die Neigung, einen besonderen Nachdruck auf die Plötzlichkeit oder Unstetigkeit zu legen, die in dem Worte „Sprung“ liegt. Man erkennt also, daß man einem Elektron nicht so,

wie es das Bild will, einen bestimmten Ort zuschreiben kann. Kurz, der Physiker entwickelt einen kunstvollen Plan des Atoms, und dann macht er sich kritisch daran, alle Einzelheiten wieder auszuradiieren. Das, was übrigbleibt, ist das Atom der heutigen Physik!

Ich möchte erklären, daß unser Begriff vom Atom nach sorgfältiger Ausführung der Rasur nicht notwendig ein ganz unbeschriebenes Blatt ist. Es ist nicht genug übrig, um ein Bild zu gestalten, aber es ist doch etwas übrig, womit der Mathematiker etwas anfangen kann. Um zu erklären, wie das kommt, werde ich mir einige Vereinfachungen erlauben. Wenn ich euch aber diesen Vorgang an einem System erläutern kann, das irgendeine entfernte Ähnlichkeit mit einem wirklichen Atom hat, so dürfen wir es dem Mathematiker anheimstellen, das Verfahren verwickelteren Bedingungen in der Natur anzupassen.

Um uns etwas ganz Bestimmtes vorzustellen, wollen wir annehmen, daß es im Atom neun Hauptstraßen gibt — neun mögliche Bahnen für das Elektron. Dann stehen bei jeder sich bietenden Gelegenheit dem Elektron neun Möglichkeiten offen; es kann auf irgendeine der anderen acht Bahnen springen, oder es kann bleiben, wo es ist. Das erinnert uns an einen anderen wohlbekannten Springer — den Springer im Schach. Ihm stehen acht Felder zur Verfügung, auf die er sich begeben kann, oder er kann bleiben, wo er ist. Anstatt daß wir das Atom so darstellen, daß es ein Teilchen und neun Straßen oder Bahnen enthält, warum sollen wir es nicht so darstellen, daß es einen Springer und ein Schachbrett enthält? „Aber du meinst das doch nicht wörtlich!“ Natürlich nicht; aber der Physiker meint auch nicht, daß das Teilchen und die Bahnen wörtlich genommen werden sollen. Wenn das Bild ohnehin ausradiert wird, ist es dann so wichtig, ob wir es auf die eine oder die andere Weise zeichnen?

Aber es ergibt sich, daß mein Vorschlag in keiner Weise anständig ist. Wie metaphysisch unser übliches Bild auch sei, es enthält eine wesentliche Wahrheit über das Verhalten des Atoms, die im Bilde des Springers auf dem Schachbrett nicht erhalten bleiben würde. Wir müssen dieses Merkmal auf eine abstrakte oder mathematische Weise ausdrücken, damit uns, wenn wir das falsche Bild ausradiieren, das Merkmal verbleibt — jenes etwas, das im Bilde der Bahnen doch nicht so völlig falsch ist, wie im Bilde des Springers —, auf daß wir es dem Mathematiker übergeben können. Der Unterschied ist der folgende. Wenn das Elektron zwei Bahnsprünge nacheinander macht, so gelangt es in einen Zustand, den

es auch durch einen einzigen Sprung hätte erreichen können; führt aber der Springer zwei Schritte aus, so gelangt er auf ein Feld, das er durch einen einzigen Schritt nicht hätte erreichen können.

Wir wollen jetzt versuchen, diesen Unterschied auf eine regelrechte symbolische Weise zu beschreiben. Wir müssen zunächst eine Bezeichnung erfinden, um die verschiedenen Bahnsprünge zu beschreiben. Es ist am einfachsten, wenn man die Bahnen mit den Zahlen 1 bis 9 bezeichnet und sich vorstellt, daß die Zahlen in der richtigen Reihenfolge auf einem Kreise so angeordnet sind, daß nach der 9 wieder die 1 kommt. Dann wird der Sprung von der Bahn 2 auf die Bahn 5 als eine Verschiebung um 3 Stellen, ein Sprung von der Bahn 7 auf die Bahn 2 als eine Verschiebung um 4 Stellen zu beschreiben sein. Wir werden einen Sprung oder eine Operation, bei der eine Verschiebung um eine Stelle erfolgt, mit P_1 bezeichnen, eine Verschiebung um zwei Stellen mit P_2 usw. Wir werden dann neun verschiedene Operatoren P haben, einschließlich des identischen Operators P_0 , der das Verbleiben am ursprünglichen Orte bezeichnet.

Wir wollen das Symbol A benutzen, um das Atom in irgendeinem Anfangszustand zu bezeichnen, den wir nicht genauer anzugeben brauchen. Wir wollen annehmen, daß es den Sprung P_2 vollführt. Dann werden wir das Atom im neuen Zustande mit $P_2 A$ bezeichnen. Das soll bedeuten, daß das Atom in seinem neuen Zustande das Ergebnis davon ist, daß man an dem als A beschriebenen System die Operation P_2 ausgeführt hat. Wenn das Atom einen weiteren Sprung P_4 ausführt, so wird der neue Zustand als $P_2 P_4 A$ beschrieben, denn das bezeichnet das an dem als $P_2 A$ beschriebenen System durch die Operation P_4 hervorgerufene Ergebnis. Wenn wir die besondere Art der Sprünge nicht anzugeben brauchen, sondern nur ein Atom beschreiben, daß von seinem Anfangszustand A aus zwei Sprünge vollführt hat, so bezeichnen wir es dementsprechend mit $P_a P_b A$. a und b stehen statt zweier beliebiger Zahlen zwischen 0 und 8.

Wir haben gesehen, daß zwei aufeinanderfolgende Sprünge einen Zustand herbeiführen, der auch durch einen einzigen Sprung hätte erreicht werden können. Wäre der Zustand durch einen einzigen Sprung erreicht worden, so hätten wir das Atom in diesem Zustand mit $P_c A$ bezeichnet, wobei c eine der Zahlen zwischen 0 und 8 ist. Auf diese Weise erhalten wir eine charakteristische Eigenschaft der Bahnsprünge, nämlich daß für sie die Beziehung

$$P_b P_a A = P_c A$$

gilt. Da wir uns um den Anfangszustand des Atoms nicht kümmern, und da wir nicht mehr über das Atom zu wissen beanspruchen, als daß es der Schauplatz der Operationen P ist, so wollen wir die Gleichung durch A dividieren, so daß

$$P_b P_a = P_c.$$

Diese Division durch A kann als der mathematische Ausdruck dafür angesehen werden, daß wir das Bild ausradieren.

Um die Bewegungen des Springers ebenso zu behandeln, können wir sie zunächst dadurch unterscheiden, daß sie ungefähr nach den Himmelsrichtungen NNO, ONO, OSO usw. gerichtet sind, und sie in dieser Reihenfolge durch die Operatoren $Q_1, Q_2, \dots, Q_8$ bezeichnen. Q_0 bezeichnet den identischen Operator, das Verbleiben am Orte. Da nun zwei Schritte des Springers niemals einem einzigen Springerschritt äquivalent sind, so ergibt sich *

$$Q_b Q_a \neq Q_c$$

(ausgenommen wenn a, b oder $c = 0$). Wir müssen $c = 0$ deshalb ausschließen, weil zwei Schritte den Springer wieder auf seinen alten Platz bringen können.

Wir wollen einen Augenblick bei der Betrachtung dieses ersten Ergebnisses unserer Betätigung als Über-Mathematiker verweilen. Die P stellen Vorgänge unbekannter Art dar, die sich an einem Gebilde unbekannter Art (Atom genannt) abspielen. Wir haben zwar mit einem ganz bestimmten Bilde des Atoms begonnen, mit Elektronen, die von Bahn zu Bahn springen, und gezeigt, daß die Gleichung $P_b P_a = P_c$ in ihm erfüllt ist. Jetzt aber haben wir das Bild wegradiert; A ist aus den Gleichungen verschwunden. Ohne das Bild sind die Operationen P , die uns geblieben sind, von völlig unbekannter Art. Ein gewöhnlicher Mathematiker möchte gern etwas ganz Bestimmtes tun — multiplizieren, Wurzeln ziehen, differenzieren usw. Er braucht ein Bild mit Zahlen darin, so daß er z. B. sagen kann, daß das Elektron von einer Bahn auf eine andere Bahn vom doppelten oder n -fachen Radius gesprungen ist. Wir Über-Mathematiker haben aber nicht die geringste Ahnung, was wir dem Atom antun, wenn wir vor A das Symbol P setzen. Wir wissen nicht, ob wir es ausdehnen oder ob wir es drehen oder ob wir es verschönen. Nichtsdestoweniger waren wir imstande, durch unsere Gleichung $P_b P_a = P_c$ irgendeine Wahrheit oder eine Hypothese über die Betätigungen des Atoms auszusprechen.

* Das Zeichen $\neq$ bedeutet „ist nicht gleich“.

Daß unsere Gleichung kein einfacher Gemeinplatz ist, das beweist die Tatsache, daß wir zum genau gegenteiligen Ergebnis $Q_b Q_a \neq Q_c$ gelangen, wenn wir mit einem Springer beginnen, der sich auf einem Schachbrett bewegt, und wenn wir die gleichen Rasuren vornehmen.

Zufällig ist es die durch $P_b P_a = P_c$ ausgedrückte Eigenschaft, die der Gruppentheorie zu ihrem Namen verholfen hat. Eine Gesamtheit von Operatoren, die so beschaffen sind, daß das Produkt zweier von ihnen immer einen zu der gleichen Gesamtheit gehörigen Operator ergibt, heißt eine Gruppe. Die Bewegungen des Springers bilden keine Gruppe. Ich werde euch nicht in alle Verästelungen der mathematischen Analyse von Gruppen und Untergruppen einführen. Es genügt, wenn ich sage, daß das, was die Physik letzten Endes in den Atomen oder überhaupt in jedem anderen mit physikalischen Methoden untersuchten Gebilde entdeckt, die Struktur einer Gesamtheit von Operationen ist. Wir können eine Struktur beschreiben, ohne das für sie benutzte Material näher zu bezeichnen; so können auch die Operationen, die die Struktur bilden, unbekannt bleiben. Individuell könnte jede Operation irgend etwas beliebiges sein; was uns angeht, ist die Art, wie sie ineinandergreifen. Die Gleichung $P_b P_a = P_c$ ist ein Beispiel für eine sehr einfache Art des Ineinandergreifens.

Die Art und Weise, wie die Operationen ineinandergreifen, nicht ihr Wesen, ist für diejenigen Offenbarungen der Außenwelt verantwortlich, die schließlich zu unseren Sinnen gelangen. Nach unserem heutigen Standpunkt ist dies das Grundprinzip der Naturphilosophie.

Ihr müßt nun nicht glauben, daß die Physik aus dem Atom nichts weiter als diese eine Gleichung ableitet, oder daß dies etwa auch nur eine der wichtigsten Gleichungen ist. Alles aber, was man bei der heutigen (höchst schwierigen) Erforschung des Atoms abgeleitet hat, ist ein Wissen von der gleichen Art, ein Wissen von der Struktur einer Gesamtheit von unbekannten Operatoren.

III.

Ein sehr nützlicher Operator ist der selektive (auswählende) Operator. In meiner Schulzeit lief ein dummer Witz um: „Wie fängt man in der Wüste Löwen?“ Antwort: „In der Wüste gibt es eine Unmenge Sand und ein paar Löwen; also nimmt man ein Sieb,

siebt den Sand durch, und die Löwen bleiben übrig.“ Ich erinnere daran, weil es eine der in der Quantentheorie gebräuchlichsten Methoden beschreibt, um uns alles zu verschaffen, was wir untersuchen möchten.

Wir wollen mit Z den Zoo bezeichnen und mit S_l die Operation des Aussiebens oder Auslesens von Löwen. Dann ist $S_l Z = L$, wobei L Löwen bezeichnet, oder mehr formal ausgedrückt, eine reine Mannigfaltigkeit, die durch das Löwenmerkmal ausgezeichnet ist. Diese rein selektiven Operatoren haben eine ziemlich sonderbare mathematische Eigenschaft, nämlich

$$S_l^2 = S_l. \quad (A)$$

Denn S_l^2 (eine Abkürzung für $S_l S_l$) bedeutet, daß man, nachdem man alle Löwen ausgelesen hat, die Operation wiederholt, indem man aus dem, was man erhalten hat, noch einmal alle Löwen ausliest. Aber die zweite Siebung bringt nun keinen Unterschied mehr hervor; und wenn man sie n -mal wiederholt, so ist immer $S_l^n = S_l$. Wegen der durch die Gleichung (A) ausgedrückten Eigenschaft sagt man, daß S_l i d e m p o t e n t oder e r s c h ö p f e n d ist.

Nunmehr sei S_t die Operation, durch die Tiger ausgelesen werden. Dann ist

$$S_t S_l = 0. \quad (B)$$

Denn wenn man zuerst lauter Löwen ausgelesen hat und dann aus diesen alle Tiger herausliest, so erhält man natürlich gar nichts.

Stellt euch jetzt vor, daß die einzelnen Tierarten im Zoo in einem Verzeichnis mit den Zahlen von 1 bis n bezeichnet sind, und daß wir für jede einen selektiven Operator einführen. Dann ist

$$S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + \dots + S_n = I, \quad (C)$$

wobei I der identische Operator ist. Denn wenn man alle einzelnen Bestandteile nacheinander aussiebt und dann das, was bei den einzelnen Siebungen herauskommt, addiert, so erhält man die Mischung wieder, von der man ausgegangen ist.

Eine Gesamtheit von Operatoren, die den Bedingungen (A), (B) und (C) genügt, heißt eine s p e k t r a l e G e s a m t h e i t, weil sie jede Mannigfaltigkeit ebenso in ihre reinen Bestandteile zerlegt, wie ein Prisma oder ein Gitter das Licht in seine verschiedenen reinen Spektralfarben zerlegt. Die drei Gleichungen besagen, daß die Operatoren einer spektralen Gesamtheit erstens idempotent oder erschöpfend sind, zweitens, daß sie sich gegenseitig ausschließen, und drittens, daß sie vollständig sind.

Wir wollen das soeben beschriebene Verfahren zur Auslese von Löwen aus dem Zoo mit dem Verfahren vergleichen, das zur Gewinnung von „schwerem Wasser“ aus gewöhnlichem Wasser dient. Bei der elektrolytischen Zersetzung des Wassers in Sauerstoff und Wasserstoff zersetzt sich das schwere Wasser aus irgendeinem Grunde langsamer als das gewöhnliche Wasser. Wenn wir demnach eine größere Wassermenge einer Elektrolyse unterziehen, so daß sich das meiste Wasser in Gas verwandelt, so enthält der Rest einen verhältnismäßig großen Anteil an schwerem Wasser. Ein solcher „Fraktionierungsvorgang“ ist eine selektive Operation, aber er ist keine reine Auslese, wie wir sie oben betrachtet haben. Wenn wir den Rest wiederum einer Elektrolyse unterziehen, so werden wir das schwere Wasser noch weiter konzentrieren. Ein fraktionierender Operator ist nicht erschöpfend ($F^2 \neq F$), und das unterscheidet ihn vom reinen selektiven Operator.

Der Gedanke einer Zerlegung der Dinge in ihre reinen Bestandteile und einer Unterscheidung zwischen Mischungen und reinen Mannigfaltigkeiten spielt offenbar bei den physikalischen Begriffen von der Wirklichkeit eine wichtige Rolle. Es ist aber keineswegs so ganz leicht, genau zu definieren, was wir damit meinen. Wir denken uns eine reine Mannigfaltigkeit derart, daß sie aus einer Anzahl von Individuen besteht, die unter sich vollkommen gleich sind. Aber die Löwen im Zoo sind unter sich keineswegs alle vollkommen gleich; nur in einer bestimmten Hinsicht sind sie einander gleich. Sind wohl die Moleküle des schweren Wassers sämtlich vollkommen gleich? Von ihrem innersten Wesen können wir nicht sprechen, denn davon wissen wir gar nichts. Ihre Beziehungen zu anderen Dingen und ihre Wechselwirkungen mit ihnen sind es, die ihre physikalischen Eigenschaften definieren; und in einem Weltall, in dem jedes Ding in irgendeiner Beziehung zu jedem anderen steht, können niemals zwei Dinge einander in ihren sämtlichen Beziehungen gleich sein. Wir können nur sagen, daß sich die Moleküle des schweren Wassers in irgendeinem gemeinsamen Merkmal gleichen. Aber das genügt nicht, um sicherzustellen, daß sie eine reine Mannigfaltigkeit bilden. Auch die Moleküle, die irgendeine beliebige Mischung bilden, gleichen sich in einem gemeinsamen Merkmal, nämlich darin, daß sie Moleküle sind.

Wenn wir schon auf Schwierigkeit bei der Definition der Reinheit von Dingen stoßen, für die wir ein mehr oder weniger konkretes Bild haben, so stoßen wir auf noch viel größere Schwierigkeiten, wenn es sich um die abgründigeren Größen der Physik handelt.

Trotzdem ist es klar, daß der Gedanke einer Unterscheidung zwischen reinen Bestandteilen und Mischungen den Keim einer wichtigen Wahrheit in sich trägt. Der Mathematiker hat die Pflicht, diesen Keim aus der allgemeinen Auflösung des Bildes zu retten. Und er tut das, indem er sein Augenmerk nicht auf das Wesen dessen richtet, was bei der Operation herauskommt, sondern auf das Wesen der selektiven Operation selbst. Er zeigt, daß die beobachteten Wirkungen — die uns wahrnehmbar bewußt werden, und die gewöhnlich der Tatsache zugeschrieben werden, daß wir es mit einer Anhäufung gleicher Individuen zu tun haben — unmittelbar aus der Tatsache hergeleitet werden können, daß man zu der Anhäufung durch eine Operation von solcher Art gelangen kann, daß sie, einmal vollzogen, beliebig oft wiederholt werden kann, ohne daß das noch irgend etwas ändert. Er setzt also eine mathematisch vollkommen definierte Eigenschaft des Operators, nämlich $S_l^3 = S_l$, an die Stelle einer nur sehr ungenau definierten Eigenschaft des Ergebnisses der Operation, nämlich einer gewissen Art von Gleichheit derjenigen Individuen, die zusammen L bilden. Auf diese Weise macht er seine Ergebnisse von den verschiedenen unverbürgten Hypothesen unabhängig, die ins Spiel gebracht sein können, wenn man versucht, sich von dieser Eigenschaft von L ein Bild zu machen.

In den ersten Zeiten der Atomtheorie war das Atom als ein unteilbares Materieteilchen definiert. Heute hingegen scheint die Zerteilung der Atome die Hauptbeschäftigung der Physiker zu sein. Die Definition enthielt eine wesentliche Wahrheit; nur war sie falsch ausgedrückt. Das, was man wirklich meinte, war eine Eigenschaft, die unteilbare Teilchen in typischer Weise besitzen, die aber nicht notwendig auf unteilbare Teilchen beschränkt ist. So geht es mit allen Modellen und Bildern und anschaulichen Beschreibungen; wohl besitzen sie die Eigenschaften, die uns interessieren, aber sie verknüpfen sie mit belanglosen Eigenschaften, über die wir uns irren können, und für die wir auf jeden Fall keinerlei Gewähr haben. Ihr werdet sehen, daß die hier besprochene mathematische Methode mit Hypothesen sehr viel sparsamer umgeht. Sie sagt über das System nichts weiter als das, was auch wirklich in die Gleichungen aufgenommen wird, die zu einem Vergleich der physikalischen Theorie mit der Erfahrung dienen. Und soweit sie die Schwierigkeiten der Untersuchung zu meistern vermag, sind ihre Behauptungen über das physikalische Weltall das genaue, systematisierte Äquivalent der Beobachtungsergebnisse, auf die sie gegründet sind. Man kann wohl

sagen, daß aus jenem Teil der Physik, der von der Methode der Gruppentheorie erfaßt wird, Hypothesen im älteren Sinne verbannt sind. Der heutige Physiker macht wohl einmal einen Fehler, aber er macht keine Hypothesen.

Eine Wirkung der Einführung selektiver Operatoren besteht darin, daß sie die Unterscheidung zwischen Operatoren und Operanden beseitigt. Als wir die „Sprung“-Operatoren P betrachteten, mußten wir einen Operanden A einführen, an dem sie angreifen konnten. Wir mußten für A irgendeine Beschreibung beibringen, und A ist dann jegliches, was dieser Beschreibung entspricht. Es sei S_a der Operator zur Auslese alles dessen, was der Beschreibung A entspricht, und U sei das Weltall. Dann ist offenbar $A = S_a U$, und wir können statt $P_b P_a A$ auch schreiben $P_b P_a S_a U$. Daher sind spezielle Operanden, nämlich solche, die etwas anderes sind als Operatoren, nicht erforderlich. Es gibt eine große Mannigfaltigkeit von Operatoren, darunter einige selektive, aber nur einen einzigen Operanden — den gleichen in jeder Gleichung —, nämlich das Weltall.

Diese mathematische Art, alles zu beschreiben, womit wir es zu tun haben, unterstreicht, vielleicht ganz unabsichtlich, eine wichtige physikalische Wahrheit. Wenn wir ein Wasserstoffatom betrachten wollen, so sind wir gewohnt, ein weißes Blatt Papier zu nehmen und als erstes das Proton und das Elektron einzutragen. Das ist zunächst alles, was im Problem steckt, sofern oder bevor wir nicht etwas sonst eintragen, von dem wir annehmen, daß es auch noch vorhanden ist. So stellt sich das Atom als das Werk eines Schöpfungsaktes dar, eines Schöpfungsaktes, den wir an jeder beliebigen Stelle unterbrechen können. Nachdem wir unser Wasserstoffatom geschaffen haben, steht es uns völlig frei, ob wir auch noch ein Weltall schaffen wollen, auf daß es ihm angehöre. Die wirklichen Wasserstoffatome aber, mit denen wir experimentieren, sind etwas, was aus dem immer vorhandenen Weltall ausgelesen wurde, was häufig auf experimentellem Wege ausgelesen und abgetrennt wird, was wir aber in jedem Falle in Gedanken auslesen. Und wir begreifen allmählich, daß ein Wasserstoffatom nicht das wäre, was es ist, wenn es nicht das Ergebnis einer selektiven Operation wäre, die man an jenem Labyrinth von wechselseitigen Beziehungen ausgeführt hat, das wir das Weltall nennen.

In der Einsteinschen Relativitätstheorie ist der Beobachter ein Mann mit einem Meßstock, der ausgeht, die Wahrheit zu suchen. In der Quantentheorie ist er ein Mann mit einem Sieb.

IV.

Ich werde nunmehr eine Folge von Operationen einführen, mit denen wir etwas erheblich anspruchsvolleres ausführen können. Diese Operationen werden an einer Gesamtheit von vier Dingen ausgeführt, die ich durch die Buchstaben A, B, C, D darstellen will. Wir beginnen mit acht Operationen; ich will zuerst jede Operation (symbolisch) nennen und dann das Ergebnis ihrer Anwendung auf $ABCD$ angeben:

S_α . Man vertausche das erste und zweite, sowie das dritte und vierte Glied ($BADC$).

S_β . Man vertausche das erste und dritte, sowie das zweite und vierte Glied ($CDAB$).

S_γ . Man vertausche das erste und vierte, sowie das zweite und dritte Glied ($DCBA$).

S_δ . Es bleibt alles wie es ist ($ABCD$).

D_α . Man stelle das dritte und vierte Glied auf den Kopf ($AB\bar{C}\bar{D}$).

D_β . Man stelle das zweite und vierte Glied auf den Kopf ($A\bar{B}\bar{C}\bar{D}$).

D_γ . Man stelle das zweite und dritte Glied auf den Kopf ($A\bar{B}\bar{C}\bar{D}$).

D_δ . Es bleibt alles wie es ist ($ABCD$).

Wir benutzen ferner einen Operator, der durch das Zeichen — dargestellt wird, und der bedeutet: „es wird alles auf den Kopf gestellt“.

Wir können zwei oder mehr von diesen Operatoren nacheinander anwenden. So bedeutet z. B. $S_\alpha S_\beta$, daß wir, nachdem wir die Operation S_β ausgeführt haben, die $CDAB$ ergibt, an dem Ergebnis die weitere Operation S_α ausführen, die das erste und zweite, sowie das dritte und vierte Glied vertauscht. Das Ergebnis ist $DCBA$. Das ist das gleiche Ergebnis wie das der einzigen Operation S_γ . Daher gilt

$$S_\alpha S_\beta = S_\gamma.$$

Manchmal, aber nicht immer, macht es einen Unterschied, welche der beiden Operationen zuerst ausgeführt wird, wie folgendes Beispiel zeigt:

Wenn wir das Ergebnis der Operation D_γ , nämlich $A\bar{B}\bar{C}\bar{D}$, nehmen, und an ihm die Operation S_α , ausführen, so erhalten wir $BADC$.

Nehmen wir aber das Ergebnis der Operation S_α , nämlich $BADC$, und führen an ihm die Operation D_γ aus, so erhalten wir $B\bar{V}\bar{C}\bar{D}$.

So ist die doppelte Operation $S_\alpha D_\gamma$ nicht das gleiche wie $D_\gamma S_\alpha$. Es besteht zwischen ihnen aber eine einfache Beziehung. $BADC$ erhält man, indem man jeden Buchstaben in $BADC$ umdreht, d. h. durch Anwendung der Operation, die wir durch das Zeichen — an-
geben. Daher ist

$$S_\alpha D_\gamma = - D_\gamma S_\alpha.$$

Operatoren, die auf diese Weise miteinander verknüpft sind, nennt man antikommutierend. Eine nähere Untersuchung ergibt, daß S_α, S_β kommutieren, desgleichen D_α, D_β sowie S_α, D_α . Nur eine Kombination eines S und eines D mit verschiedenen Indizes α, β, γ (aber nicht δ) antikommutiert.

Wir können 16 verschiedene Operatoren von der Form $S_\alpha D_\beta$ bilden, wobei α und β an Stelle irgendeines der vier Indizes $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ stehen. Diese kombinierten Operatoren sind es, die uns hauptsächlich interessieren. Ich will sie E -Operatoren nennen und mit $E_1, E_2, E_3, \dots, E_{16}$ bezeichnen. Sie bilden eine Gruppe, und das bedeutet, wir wie gesehen haben, daß das Ergebnis zweier aufeinanderfolgender Anwendungen von Operationen der Gruppe in gleicher Weise auch durch Anwendung einer einzigen Operation der Gruppe erzielt werden kann. Ich muß indessen bemerken, daß die Operation — hier als gratis zugegeben betrachtet wird*. Vielleicht können wir durch eine einzige Operation E_c die Buchstaben nicht in den gleichen Zustand bringen, wie ihn $E_b E_a$ ergibt; wenn das aber nicht der Fall ist, so können wir doch die gleiche Reihenfolge erhalten, nur mit lauter auf den Kopf gestellten Buchstaben. Diese Eigenschaft der E -Operatoren wird demnach durch die Gleichung

$$E_a E_b = \pm E_c$$

ausgedrückt.

Nunmehr wählen wir unter den E -Operatoren fünf aus. Unsere Auswahl sieht auf den ersten Blick ein wenig seltsam aus, weil sie keinen ersichtlichen Zusammenhang mit der Zusammensetzung aus S - und D -Operatoren hat. Es sind die folgenden:

$$\begin{aligned} E_1 &= S_\alpha D_\delta, \text{ ergibt } BADC. \\ E_2 &= S_\delta D_\beta, \quad \text{,,} \quad ABCD. \\ E_3 &= S_\gamma D_\gamma, \quad \text{,,} \quad DCBA. \\ E_4 &= S_\alpha D_\gamma, \quad \text{,,} \quad BADC. \\ E_5 &= S_\gamma D_\beta, \quad \text{,,} \quad DCBA. \end{aligned}$$

* Um eine Gruppe gemäß der strengen Definition zu erhalten, hätten wir 32 Operatoren nehmen müssen, nämlich die obigen 16 und die weiteren 16, die man durch Hinzufügung des Zeichens — erhält.

Wir wählen diese fünf aus, weil sie alle miteinander antikommutieren, d. h. es ist $E_1 E_2 = -E_2 E_1$ usw. für alle zehn Paare. Ihr könnt das bestätigen, indem ihr es mit allen vier Buchstaben versucht, obgleich es natürlich mathematische Kunstgriffe gibt, um es schneller zu bestätigen. Eine Folge dieser Art nennen wir eine *Pentade*.

Es gibt sechs verschiedene Arten, wie man unsere Pentade auswählen kann. Man erhält sie, indem man die Indizes α, β, γ auf verschiedene Weise vertauscht. Es ist aber nicht möglich, mehr als fünf E -Operatoren zu finden, deren jeder mit jedem anderen antikommutiert. Darum müssen wir bei Pentaden haltmachen.

Es ist noch eine andere wichtige Eigenschaft anzumerken. Man sieht ohne weiteres, daß $E_1^2 = 1$ ist; denn E_1 ist das gleiche wie S_α , und eine Wiederholung der durch S_α ausgedrückten Vertauschung stellt die ursprüngliche Anordnung wieder her. Jetzt aber betrachtet E_5 . Bei der Operation E_5 stellen wir den zweiten und vierten Buchstaben auf den Kopf und kehren dann die Reihenfolge der Buchstaben um. Diejenigen Buchstaben, die aufrecht stehengeblieben sind, werden dabei auf den zweiten und vierten Platz gebracht, so daß sie bei einer Wiederholung der Operation auf den Kopf gestellt werden. So kehren die Buchstaben in ihrer ursprünglichen Reihenfolge wieder, stehen aber alle auf dem Kopf. Das ist der Operation — äquivalent, und daher ist $E_5^2 = -1$. Auf diese Weise finden wir, daß

$$E_1^2 = E_2^2 = E_3^2 = 1, \quad E_4^2 = E_5^2 = -1.$$

Eine Pentade besteht immer aus drei Operatoren, deren Quadrat 1 ist, und zwei Operatoren, deren Quadrat — 1 ist.

Bezüglich des Symbols 1 ist zu sagen, daß es hier für den identischen Operator steht. Da das auch die Wirkung der Zahl 1 ist, wenn sie in der Arithmetik als Operator (Multiplikator) verwendet wird, so ist die Bezeichnung angemessen. (Wir haben den identischen Operator auch mit S_δ und D_δ bezeichnet, so daß $S_\delta = D_\delta = 1$.) Da der Operator 1 keine Änderung herbeiführt, so bedeuten die Operatoren „—“ und „— 1“ das gleiche; so fügen wir manchmal eine 1 hinzu, wenn — allein allzu verlassen dastehen würde. Eine Wiederholung der Operation — stellt den alten Zustand der Dinge wieder her; infolgedessen ist $(-)^2$ oder $(-1)^2$ gleich 1. Obgleich das Symbol, wie wir es hier definiert haben, nichts mit „minus“ zu tun hat, hat es doch in dieser Hinsicht die gleiche Eigenschaft wie — und — 1 in der Algebra.

Ich habe euch gesagt, daß der richtige Über-Mathematiker nie weiß, was er tut. Wir, die wir auf einer tieferen Ebene gearbeitet haben, wissen, was wir getan haben. Wir haben uns damit beschäftigt, vier Buchstaben hin und her zu ordnen. Es gibt aber in unserem Kreise einen Über-Mathematiker, der über diese Seite der Sache, die wir untersucht haben, nichts weiß. Wenn wir verkünden, daß wir eine Gruppe von 16 Operatoren gefunden haben, von denen gewisse Paare kommutieren und die übrigen Paare antikommutieren, von denen einige Wurzeln aus 1 und andere Wurzeln aus -1 sind, dann fängt er an, die Ohren zu spitzen und Notiz zu nehmen. Denn er kann diese Art von Struktur einer Gruppe von Operationen begreifen, einer Struktur, die sich nicht auf das Wesen der Operationen bezieht, sondern auf die Art ihres Ineinandergreifens. Er interessiert sich für die Anordnung der Operatoren zu Pentaden. Das ist sein Ideal eines Wissens um eine Gesamtheit von Operationen, ein Wissen von der unterschiedlichen Art ihrer Struktur. Man hat noch eine Menge anderer Eigenschaften der E -Operatoren entdeckt, die im einzelnen zu untersuchen es mir an Raum fehlt. Es gibt Paare von Triaden, die so beschaffen sind, daß die Glieder der gleichen Triade alle miteinander antikommutieren und jedes Glied mit den drei Gliedern der anderen Triade kommutiert. Es gibt Antitriaden, die aus drei wechselseitig kommutierenden Operatoren bestehen, die zu Antitetraden werden, wenn man den identischen Operator mit einbezieht.

Dieses gesamte Wissen von der Struktur kann ausgedrückt werden, ohne das Wesen der Operationen im einzelnen zu bezeichnen. Und auf dem Wege über die Erkenntnis einer Struktur dieser Art können wir ein Wissen über eine Außenwelt erlangen, die von einem gewöhnlichen Standpunkt aus ihrem Wesen nach unkenndbar ist.

Vor einigen Jahren habe ich die Struktur dieser Gruppe von Operatoren im Zusammenhang mit der Diracschen Theorie des Elektrons ausgearbeitet. Später erfuhr ich, daß ein großer Teil dessen, was ich geschrieben hatte, in einer Abhandlung über die Kummersche Fläche 4. Grades zu finden ist. Zufällig befindet sich in meinem Hörsaal ein Modell der Kummerschen Fläche 4. Grades, das ich oft mit Neugier betrachtet habe, verwundert, was es damit wohl auf sich haben möchte. Nichts kam mir weniger in den Sinn, als daß ich selbst (ein wenig verspätet) eine Arbeit über seine Struktur geschrieben haben könnte. Vielleicht wäre der Verfasser jener Abhandlung nicht minder erstaunt gewesen, zu erfahren, daß er sich mit dem Verhalten des Elektrons beschäftigt hat. Seht, da habt ihr es wieder, wir Über-Mathematiker wissen nie, was wir tun.

V.

Das Ergebnis unseres Spiels mit vier Buchstaben hat uns in den Stand gesetzt, das Schema einer Struktur zu beschreiben, die von dem Spiel losgelöst und anderweitig verwendet werden kann. So losgelöst, sehen wir die gleiche Struktur in der Welt der Physik auftreten. Ein kleiner Teil des Schemas zeigt sich auf eine ganz elementare Weise, wie wir sogleich sehen werden; ein anderer Teil wurde von Dirac in seiner Elektronentheorie ans Licht gezogen; im weiteren Verlauf findet man die gesamte Struktur, wobei jeder Teil den ihm zukommenden Anteil an den physikalischen Erscheinungen hat.

Wenn wir eine neue Anwendung für unsere symbolischen Operatoren E suchen, können wir nicht im voraus wissen, welche Art von Operationen sie darstellen werden. Im Spiel haben wir sie identifiziert, aber in der physikalischen Welt müssen sie von neuem identifiziert werden. Aber auch wenn wir sie in der vertrauten Geschichte des Bewußtseins identifiziert haben, bleibt ihr letztes Wesen unbekannt; denn das Wesen der Betätigung der Außenwelt liegt jenseits unseres Fassungsvermögens. Daher treten wir, mit unserem losgelösten Strukturschema bewaffnet, mit offenem Sinn an die physikalische Welt heran, gespannt, wie ihre Operationen sich in unserer Erfahrung offenbaren werden.

Ich muß auf ein elementares mathematisches Ergebnis hinweisen. Wir betrachten das Quadrat von $(2 E_1 + 3 E_2)$, das heißt die Operation, die einer zweimaligen Ausführung der Operation $2 E_1 + 3 E_2$ äquivalent ist. Wir haben bisher mit unseren Operatoren noch keine Zahlen verbunden; aber daraus erwächst keine Schwierigkeit, wenn wir das so verstehen, daß in einem Ausdruck dieser Art 2 die Operation der Multiplikation mit 2, 3 die Multiplikation mit 3 bedeutet, genau wie in der gewöhnlichen Algebra. Dann erhalten wir

$$(2 E_1 + 3 E_2) (2 E_1 + 3 E_2) = 4 E_1^2 + 6 E_1 E_2 + 6 E_2 E_1 + 9 E_2^2.$$

Wir müssen nun auf eines achten, was uns in der gewöhnlichen Algebra nicht begegnet. In der Algebra hätten wir die beiden mittleren Glieder zusammengefaßt und statt $6 E_1 E_2 + 6 E_2 E_1$ geschrieben $12 E_1 E_2$. Wir haben aber gesehen (S. 256), daß die Operation E_2 , der die Operation E_1 folgt, nicht das gleiche ist wie die Operation E_1 , der die Operation E_2 folgt. In der Tat wählen wir aus bestimm-

ten Gründen diese Operatoren so, daß $E_2 E_1 = -E_1 E_2$. Infolgedessen heben sich die beiden Mittelglieder auf, und es bleibt übrig

$$(2 E_1 + 3 E_2)^2 = 4 E_1^2 + 9 E_2^2.$$

Wir haben ferner gesehen, daß $E_1^2 = 1$ und $E_2^2 = 1$. Daher ist

$$(2 E_1 + 3 E_2)^2 = 4 + 9 = 13.$$

Mit anderen Worten, $(2 E_1 + 3 E_2)$ ist die Quadratwurzel von 13, oder vielmehr eine Quadratwurzel von 13.

Nehmt an, ihr bewegt euch an einen Ort, der um 2 m nach rechts und um 3 m geradeaus liegt. Nach dem pythagoreischen Lehrsatz beträgt eure resultierende Verschiebung $\sqrt{2^2 + 3^2} = \sqrt{13}$ m. Es liegt nahe, daß der Über-Mathematiker, wenn er (ohne zu wissen, auf was für eine Art von Operationen er sich bezieht) sagt, daß $(2 E_1 + 3 E_2)$ eine Quadratwurzel von 13 ist, das gleiche meint, wie der Geometer, der sagt, daß eine Verschiebung um 2 m nach rechts und um 3 m nach vorwärts Quadratwurzel von 13 m beträgt. Tatsächlich weiß auch der Geometer gar nicht, auf was für eine Art von Operation er sich bezieht; er kennt nur die Beschreibung, die der bewußte Geschichtenerzähler von ihr gibt. Er kann sich aber von den Hirngespinnsten des Erzählers unabhängig machen, indem er ein Über-Mathematiker wird. Dann wird er sagen:

Was der Geschichtenerzähler eine Verschiebung nach rechts nennt, ist eine Operation, deren eigentliches Wesen mir unbekannt ist, und die ich mit E_1 bezeichnen will; was er eine Verschiebung nach vorn nennt, ist eine zweite unbekannte Operation, die ich mit E_2 bezeichnen werde. Das Wissen über die Eigenschaften einer Verschiebung, das ich aus der Erfahrung gewonnen habe, ist in Feststellungen enthalten, wie: „Eine Verschiebung um 2 m nach rechts und um 3 m vorwärts ist gleich Quadratwurzel von 13 m.“ In meiner Ausdrucksweise lautet das: „ $2 E_1 + 3 E_2$ ist eine Quadratwurzel von 13“. Die Über-Mathematik versetzt mich in die Lage, diese Feststellungen in den einzigen Schluß zusammenzufassen, daß eine Verschiebung nach rechts und eine Verschiebung vorwärts zwei Operationen aus jener Gesamtheit sind, deren Gruppenstruktur wir im Abschnitt IV dieses Kapitels untersucht haben*.

* Er wird natürlich, um die Gruppenstruktur der ganzen Gesamtheit zu ermitteln, mehr benötigen als nur eine Kenntnis, die sich auf zwei von den Operatoren bezieht. Bei diesem Stande seines Wissens ist die unmittelbar zu ziehende Folgerung derjenige Teil der Gruppenstruktur, der durch die Gleichungen $E_1^2 = E_2^2 = 1$ und $E_2 E_1 = -E_1 E_2$ dargestellt wird.

Entsprechend können wir eine Verschiebung um zwei Einheiten nach rechts, um drei Einheiten vorwärts und um vier Einheiten nach oben durch $(2 E_1 + 3 E_2 + 4 E_3)$ darstellen. Wenn wir wieder wie oben das Quadrat dieses Ausdrucks bilden, finden wir als Ergebnis 29, was mit der geometrischen Berechnung übereinstimmt, nach der das Ergebnis der Verschiebung gleich $\sqrt{2^2 + 3^2 + 4^2} = \sqrt{29}$ beträgt. Das Geheimnis liegt darin, daß der Über-Mathematiker durch das Antikommutieren seiner Operatoren diejenige Eigenschaft ausdrückt, die der Geometer als Rechtwinkligkeit der Verschiebungen versteht. Aus diesem Grunde haben wir auf S. 255 eine Pentade von antikommutierenden Operatoren ausgesondert, in der weisen Voraussicht, daß sie eine unmittelbare Anwendung bei der Beschreibung von aufeinander senkrechten Richtungen finden würden, ohne daß wir uns des üblichen Bildes des Raumes zu bedienen hätten. Sie drücken die Eigenschaft der Rechtwinkligkeit aus ohne Berufung auf das Bild der Rechtwinkligkeit.

Bis hierher haben wir die Struktur unserer Folge von 16 E -Operatoren erst am äußersten Zipfel berührt. Nur wenn ich tief in die Elektronentheorie eindringen würde, könnte ich euch zeigen, wie die ganze Struktur zutage tritt. Aber einen kleinen Schritt weiter will ich euch doch führen. Nehmt einmal an, ihr wolltet eine Verschiebung um 2 m nach rechts, um 3 m vorwärts, um 4 m aufwärts und um 5 m senkrecht zu allen drei Richtungen — in einer vierten Dimension — vornehmen. Jetzt seid ihr schon hinter den Trick gekommen, und ihr werdet ohne viel Besinnen $(2 E_1 + 3 E_2 + 4 E_3 + 5 E_4)$ als denjenigen Operator hinschreiben, der diese Verschiebung symbolisiert. Aber dann gibt es ein Unglück, und das ist, daß wir die Zahl der Glieder der Pentade erschöpft haben, deren Quadrat gleich 1 ist, und daß wir auf E_4 zurückgreifen müssen, dessen Quadrat gleich -1 ist (S. 256). Es folgt

$$(2 E_1 + 3 E_2 + 4 E_3 + 5 E_4)^2 = 2^2 + 3^2 + 4^2 - 5^2 = 4.$$

So ist unsere Verschiebung gleich einer Quadratwurzel von 4, während der pythagoreische Lehrsatz verlangen würde, daß sie die Quadratwurzel von $2^2 + 3^2 + 4^2 + 5^2 = 54$ ist. So ist unserer Darstellung von zueinander rechtwinkligen Richtungen durch E -Operatoren eine Grenze gesteckt. Vor einem Mißerfolg werden wir in der Praxis nur dadurch bewahrt, daß wir im wirklichen Raum keine Veranlassung haben, eine vierte Dimension in Betracht zu ziehen. Welch eine glückliche Fügung!

Es ist gar keine glückliche Fügung. Die Struktur, die wir hier erörtern, beansprucht, die Struktur der wirklichen Welt und der Schlüssel zu ihren Offenbarungen in unserer Erfahrung zu sein. Die Struktur liefert keine vierte Dimension des Raumes, so daß es in einer auf diese Weise gebauten Welt auch keine vierte Dimension geben kann. Unsere Erfahrung bestätigt, daß dies in der wirklichen Welt zutrifft.

Wenn wir den Wunsch haben, eine vierte Verschiebungsrichtung einzuführen, so müssen wir sie mit einem Minuszeichen statt mit einem Pluszeichen versehen, so daß es eine Verschiebung von etwas anderer Art sein wird. Im Jahre 1908 entdeckte Minkowski, daß das „später“ in dieser Weise als eine Verschiebungsrichtung betrachtet werden kann, die sich von den gewöhnlichen räumlichen Verschiebungen nur dadurch unterscheidet, daß ihr Quadrat mit einem Minuszeichen statt mit einem Pluszeichen zu versehen ist. Daher wird die Verschiebung um 2 m nach rechts, 3 m nach vorwärts, 4 m nach oben und 5 „m“ später* durch den Operator $(2E_1 + 3E_2 + 4E_3 + 5E_4)$ dargestellt. Wir haben oben berechnet, daß dies eine Quadratwurzel von 4 ist, so daß die Verschiebung 2 m beträgt. Wenn man, wie wir hier, sowohl Verschiebungen im Raum wie Verschiebungen in der Zeit betrachtet, so nennt man den resultierenden Betrag das I n t e r v a l l. Der Wert des Intervalls beträgt im obigen Problem nach Minkowskis Gleichung 2 m, so daß unsere Ergebnisse übereinstimmen. Minkowski führte in das vierte Glied das Minuszeichen statt des Pluszeichens ein, weil er in dem Vorzeichenwechsel den mathematischen Ausdruck für den Unterschied zwischen Zeit und Raum erblickte; wir führen es ein, weil wir nicht umhin können. Es wird uns durch die Gruppenstruktur, die wir erforschen, aufgezungen. Minkowskis Intervall ist später zum Ausgangspunkt der allgemeinen Relativitätstheorie geworden.

So ist der Unterschied zwischen Raum und Zeit in der Struktur der Gesamtheit von E -Operatoren bereits vorgesehen. Der Raum kann nur drei Dimensionen haben, weil nicht mehr als drei Operatoren die notwendigen Bedingungen für eine rechtwinklige Verschiebung erfüllen. Man kann eine vierte Verschiebung hinzufügen, aber sie ist ihrem Wesen nach durchaus verschieden von einer räumlichen Verschiebung. Wenn wir sie eine zeitliche Verschiebung nennen, so gewährleisten die Eigenschaften des mit ihr verknüpften

* Ein „Meter“ Zeit muß als diejenige Zeit ausgelegt werden, die das Licht braucht, um die Strecke 1 m zurückzulegen.

Operators, daß die Beziehung einer zeitlichen Verschiebung zu einer räumlichen Verschiebung genau diejenige ist, die die Relativitätstheorie fordert.

Ich behaupte nicht, daß der Unterschied zwischen der vierten Dimension und den übrigen drei etwas ist, was wir lediglich durch Überlegungen a priori hätten voraussagen können. Wir hatten keine Veranlassung, a priori zu erwarten, daß ein Strukturschema, das wir bei einem Spiel mit Buchstaben fanden, irgendeine Bedeutung im physikalischen Weltall haben werde. Die Übereinstimmung ist nur dann eindrucksvoll, wenn wir unabhängige Gründe dafür haben, anzunehmen, daß die Weltstruktur auf diese besondere Gruppe von Operatoren gegründet ist. Wir müssen uns deshalb daran erinnern, daß die E -Operatoren zuerst in Diracs Wellengleichung des Elektrons als für die Physik nötig erkannt wurden. Diracs großer Erfolg bei der Einführung dieser Struktur bestand darin, daß er dadurch eine schwer verständliche Eigenschaft des Elektrons erklärte, die in der experimentellen Erfahrung eine wichtige Rolle spielt, und die als „spin“ oder Drall bekannt ist. Das ist ein Problem, das vom Ursprung des Unterschiedes zwischen Raum und Zeit himmelweit entfernt zu sein scheint. Wir können sagen, daß zwar der Unterschied zwischen Raum und Zeit für ein Weltall von völlig unbekannter Art nicht vorhergesagt werden kann, daß er aber für ein Weltall vorhergesagt werden kann, dessen Elementarteilchen von der Art sind, wie sie in der modernen Wellenmechanik beschrieben werden.

Es bleibt jetzt nur noch hinzuzufügen, daß die 16 E -Operatoren diejenigen sind, auf die wir uns im vorhergehenden Kapitel (S. 224) bezogen haben. Wir benutzen dort eine doppelte Gesamtheit; wenn z. B. E_1 die Operation einer Verschiebung des Elektrons Nr. 1 nach rechts bedeutet, so bedeutet F_1 die Operation einer Verschiebung des Elektrons Nr. 2 nach rechts. Ich habe schon erklärt, auf welche Weise die geheimnisvolle Zahl 136 in dieser doppelten Gesamtheit auftritt. Die doppelte Gesamtheit von Operatoren ist nicht auf das besondere Problem zweier Teilchen beschränkt. Sie hat eine universelle Bedeutung dank der Tatsache, daß wir immer nur Beziehungen beobachten können; aus diesem Grunde besteht unsere vorschriftsmäßige Ausrüstung aus zwei Gesamtheiten von Operatoren, für jedes Ende der Beziehung eine. Daher tritt die Zahl 136 auf S. 234 noch einmal in einem anderen Zusammenhange auf.

Die Zahl 136 ist mit einer doppelten Gesamtheit von E -Operatoren auf zweifache Weise verknüpft. Die eine habe ich erklärt; ich will jetzt die zweite erklären, welche nach meiner Meinung die un-

mittelbarere Ursache ihres Auftretens in den grundlegenden Naturkonstanten ist. Wir haben unterschieden zwischen Operatoren von der Art von E_1 , deren Quadrat $+1$ ist, und solchen von der Art von E_4 , deren Quadrat -1 ist. Wir können die ersten als „raumähnlich“, die zweiten als „zeitähnlich“ bezeichnen, denn in dieser Weise ist der Unterschied in die Erscheinung getreten, soweit wir ihn im vorstehenden erörtert haben. Wenn wir alle 16 E -Operatoren auf diese Weise einordnen, so finden wir, daß 10 von ihnen raumähnlich und 6 zeitähnlich sind. Indem wir ebenso die 256 EF -Operatoren einordnen, finden wir ohne weiteres, daß $10^2 + 6^2$ oder 136 raumähnlich (Quadrat $= +1$) und $(10 \times 6) + (6 \times 10)$ oder 120 zeitähnlich sind (Quadrat $= -1$). Ich glaube, daß die Zahl 136, wo sie in den Konstanten der Physik auftritt, sich im allgemeinen auf die 136 raumähnlichen Doppeloperatoren bezieht; denn die raumähnlichen Operatoren bestimmen die Anzahl der Dimensionen des Bereiches, über den die Gesamtwahrscheinlichkeit eines Systems sich verteilt. Die weitere Verfolgung dieser Fragen würde uns aber allzu weit in die Gefilde der Theorie entführen.

13. Kapitel

KRITIKEN UND KONTROVERSEN

Codlin ist der Freund, nicht Short. Short ist
ja soweit auch sehr gut, aber der wahre Freund
ist Codlin, nicht Short.

Dickens, The Old Curiosity Shop.

I.

In den frühen Tagen der Relativitätstheorie war eine der häufigsten Fragen in den an mich gerichteten Briefen die folgende: Ist die Fitzgerald-Kontraktion* wirklich oder scheinbar? Ist es wirklich wahr, daß ein schnell bewegter Stab sich in seiner Bewegungsrichtung verkürzt? Die Antwort, die ich in „The Nature of the Physical World“ (S. 32—34; „Das Weltbild der Physik“, S. 38—41) gegeben habe, ist zu lang, um sie hier anzuführen. Nachdem ich dort an einem Beispiel gezeigt habe, daß wir oft einen Unterschied machen zwischen Dingen, die „wahr“, und solchen, die „wirklich wahr“ sind, erkläre ich, daß nach dem gleichen Grundsatz die Verkürzung des bewegten Stabes als wahr, aber nicht wirklich wahr zu beschreiben wäre.

Es ist interessant, zu sehen, wie dieser Versuch einer Erklärung auf einen nicht unfreundlichen Beurteiler** gewirkt hat:

Sicher ist es viel einfacher, geradeswegs zu sagen, daß der Abstand zwischen zwei Teilchen keine zweifache, sondern eine dreifache Beziehung ist, in die ein Bezugssystem eingeht, und daß eine zweifache Beziehung nur in solchen Fällen mit Erfolg aufgestellt werden kann, wo sich die Teilchen relativ zueinander in Ruhe befinden und man mit ihrer Hilfe das Bezugssystem derart definiert, daß sie sich in ihm in Ruhe befinden.

Sehr viel einfacher — jedenfalls für den Verfasser.

Bücher, die nicht für Fachleute bestimmt sind, bilden sehr oft eine Zielscheibe der Kritik, eben deshalb, weil sie sich nicht fachlich gebärden. Ich habe ein sehr harmloses Beispiel einer solchen Kritik angeführt. Aber es gibt so leicht keine Entschuldigung für einen Kritiker, der jemanden ohne einen triftigeren Grund der wissen-

* Diese relativistische Längenänderung bewegter Körper wird in der deutschen Literatur meist als Lorentz-Kontraktion bezeichnet. D. Übers.

** Mind, Bd. 38, S. 413, 1929.

schaftlichen Unsauberkeit beschuldigt. Behauptungen werden als unvorsichtig hingestellt, weil sie nicht die Sicherheit amtlicher Urkunden haben. Erklärungen werden wie Definitionen behandelt. Man sagt dem Verfasser nach, daß er nicht sagt, was er meint. Natürlich sagt er nicht genau, was er meint; in der Umgangssprache geschieht das selten. Aber es besteht zwischen dem, der für Laien schreibt, und seinen Lesern ein stillschweigendes Einverständnis, daß er wenigstens einigermaßen wie ein menschliches Wesen reden soll und nicht wie ein Parlamentsbeschluß.

Nach meiner Meinung muß ein solches Buch so gehalten sein, daß es exakte Gedanken in nicht exakter Sprache vermittelt. Der Verfasser hat sich von den Fachausdrücken und den mathematischen Symbolen losgesagt, die das sonst übliche Mittel zum Ausdruck exakter Gedanken sind, und er ist auf weniger unmittelbare Methoden angewiesen, um in den Köpfen seiner Leser die Gedanken zu erwecken, die er zu vermitteln wünscht. Das wird ihm nicht immer gelingen. Ohne die Mitarbeit des Lesers wird es ihm nie gelingen.

Ein Briefschreiber hat mich darauf hingewiesen, daß an verschiedenen Stellen in „The Nature of the Physical World“ das Wort „Raum“ in vier verschiedenen Bedeutungen vorkommt. Ich glaube fast, daß er erwartete, ich solle das reumütig bekennen. Aber das Wort hat diese Bedeutungen; und da der gute Mann keineswegs schüchtern war und mir auch sagte, was ich an jeder einzelnen Stelle wirklich gemeint hatte, so zog ich den Schluß, daß in diesem Falle mein Versuch, exakte Gedanken in nicht exakter Sprache zu vermitteln, durchaus geglückt ist.

Es handelt sich gar nicht darum, daß man von der steilen Höhe ernster wissenschaftlicher Betrachtung in die Ebene einer größeren Oberflächlichkeit hinabsteigen sollte. Es ist in der Forschung und bei einer Darstellung für weitere Kreise gleich nötig, daß wir unsere Ergebnisse von einer schulmeisterlichen Ausdrucksweise freihalten und zu einer Einsicht gelangen, in der die weniger wichtigen Verwickeltheiten in den Hintergrund treten. Wir versuchen, das, was wir erkannt haben, in eine strenge Ausdrucksform zu kleiden, aber wir lassen es nicht in seinem strengen Ausdruck begraben bleiben. Wir ziehen es ständig aus seinem Hinterhalt hervor, um es in unseren Sinn aufzunehmen und uns zum Nutzen weiteren Fortschritts seiner zu bedienen. Und bei dieser Art mit der Wahrheit umzugehen, zeigt sich die Strenge eines wissenschaftlichen Gedankens erst in höchstem Grade. Strenge ist ein viel mißbrauchtes

Wort, und es ist nicht nur in Schriften für Laien, sondern auch in wissenschaftlichen Originalabhandlungen allzu häufig nur ein Deckname für einen Mangel an Augenmaß.

II.

Bei einem Überblick über die mannigfachen Kontroversen, die sich im Anschluß an die philosophische Einstellung erhoben haben, die ich mir in meinen früheren Schriften zu eigen gemacht habe, scheint mir der wichtigste Punkt die Kluft zu sein, auf die ich im 1. Kapitel im Anschluß an meine Bemerkung: „Der Geist ist das erste und unmittelbarste Ding unserer Erfahrung; alles andere sind weit hergeholte Schlüsse“, angespielt habe. Der typische Philosoph und der typische Naturwissenschaftler scheinen unversöhnbare Standpunkte bezogen zu haben.

Ich will zuerst meine eigenen Ansichten zusammenfassen, die wohl für die meisten naturwissenschaftlich gebildeten Menschen annehmbar sind, sofern sie sich über diese Dinge überhaupt Gedanken gemacht haben. Die Erfahrungen jeder Einzelperson bestehen ursprünglich in ihren wechselnden Bewußtseinsinhalten. Sie sind eine Folge von Bildern, die von verschiedenartigen Sinnesempfindungen, Erinnerungen, abstrakten Gedanken, Regungen usw. begleitet werden. Auch für einen sehr wenig nachdenklichen Menschen bedeutet diese verwickelte Tätigkeit ein Problem; wir haben das Bedürfnis, die Verknüpfungen der mannigfachen Elemente dieser Erfahrung zu ermitteln, und herauszufinden, um was alles es sich dabei handelt. Wenigstens für einen naturwissenschaftlich denkenden Menschen ist aber die Art dieser Fragestellung sehr weitgehend durch die Tatsache bestimmt, daß die Menschen imstande sind, einander einen Teil ihrer Erfahrungen mitzuteilen. Wenn ihr mir eure Erfahrungen mitteilt, so wird der Klang eurer Stimme ein Bestandteil meiner eigenen Erfahrung; für die Zwecke des Problems aber benutze ich nicht *m e i n e* Wahrnehmung eines Klanges, sondern *e u r e* Wahrnehmung von etwas anderem. Ich behandle dies wie eine Beteiligung an einer Erfahrung — einem Bewußtseinsinhalt —, die nicht die meine ist. Durch diesen Schritt wird das Problem erweitert; es betrifft jetzt nicht mehr nur die Feststellung der Wechselbeziehungen von Elementen, die sämtlich in dem gleichen Bewußtsein enthalten sind, sondern von Elementen im Bewußtsein sehr vieler verschiedener Menschen. Daher erfordert es

die Vorstellung eines Wirkungsfeldes, das außerhalb des Bewußtseins des Einzelmenschen liegt. Die Physik liefert uns ein Bild, oder richtiger eine symbolische Formulierung, eines solchen äußeren Wirkungsfeldes, das mit jedem individuellen Bewußtsein in Wechselwirkung tritt. Wenn wir die naturwissenschaftliche Lösung und insbesondere die naturwissenschaftliche Deutung des Nervenmechanismus im Körper als richtig annehmen, so ist der Zusammenhang zwischen den Dingen, auf deren Dasein in dieser Außenwelt man schließt, und den Eindrücken, die das Bewußtsein erfährt, offenbar sehr entfernt und nur sehr mittelbar.

Es ist sehr schwer zu erkennen, was der Philosoph im Sinne hat, wenn er diese Ansicht verwirft. Es ist wichtig, festzustellen, ob es sich nur einfach um das sehr verbreitete Mißverstehen zweier Menschen handelt, die nicht die gleiche Sprache reden, oder ob der Philosoph wirklich beabsichtigt, die naturwissenschaftliche Ansicht über den Ursprung unserer Wahrnehmungen zu verwerfen, soweit dieser Ursprung außerhalb des Bewußtseins selbst liegt.

Mit dieser Frage haben sich zwei philosophische Autoren in ziemlicher Breite und unter besonderer Bezugnahme auf meine eigenen Schriften beschäftigt, nämlich Prof. W. T. Stace * und C. E. M. Joad **. Ich will mich mit ihnen einzeln beschäftigen, da sie ziemlich verschiedene Standpunkte vertreten. Ich glaube, daß die Ansichten eines sehr großen Teiles der Philosophen der realistischen Schule zwischen den durch diese Autoren gegebenen Grenzen liegen.

Ich möchte meinen typischen Gegner als einen Menschen definieren, der glaubt, daß es außerhalb meines Geistes „einen wirklichen Apfel mit einem ihm wirklich innewohnenden Geschmack“ gibt. Ich habe gegen einen wirklichen Apfel außerhalb meines Geistes nichts einzuwenden, und ich bin bereit, mich vom Dasein eines wirklichen Geschmacks (der etwas anderes ist als die physikalische Wechselwirkung zwischen den Molekülen des Apfels und denjenigen einer bestimmten Zunge) außerhalb meiner Sinne überzeugen zu lassen. Wenn aber der Philosoph den wirklichen Geschmack in den wirklichen Apfel verlegt, so verstößt er gegen

* „Sir Arthur Eddington und the Physical World“, Philosophy Bd. 9, S. 40, 1934.

** Philosophical Aspects of Modern Science, 1932.

die einfachste naturwissenschaftliche Lehre. Man tut gut, wenn man Worte wie Geschmack, Farbe, Klang, vermeidet, die unterschiedslos sowohl für Empfindungen, als auch für die mittelbare Ursache der Empfindungen benutzt werden. Es ist daher vielleicht deutlicher, wenn ich den betreffenden Philosophen als einen Menschen beschreibe, der an „einen wirklichen Zahnbohrer mit einem ihm wirklich innewohnenden Schmerz“ glaubt, der ja offenbar ein Gegenstück zu dem vorstehenden Beispiel ist. Aber ich möchte ihn nicht mit Ansichten belasten, die ich bisher noch nicht ausdrücklich anerkannt gesehen habe.

Das Wesen der Gegebenheiten von denen der Naturwissenschaftler und der Philosoph in gleicher Weise ausgehen müssen, wird z. B. durch „~~ich empfinde den Geschmack eines Apfels~~“ gekennzeichnet. Ich benutze diese Wortkette, um euch auf eine bestimmte Art des Gewährwerdens hinzuweisen; es ist das Gewährwerden, nicht die Beschreibung oder die in ihr enthaltene Analyse, die die Gegebenheit bildet. Eine andere Gegebenheit könnte sein „~~er empfindet den Klang einer Glocke~~“. Man ist sich darüber einig, daß diese Gegebenheit mit jener ersten, die mir durch mein Bewußtsein unmittelbar geliefert wird, auf gleicher Stufe steht, obgleich ich nur auf mittelbare Weise in den Besitz dieser zweiten Gegebenheit gelangt bin. Die Erkenntnis, daß sinnliche Gegebenheiten ein verschiedenes Subjekt („ich“ und „er“) haben können, ist der erste Schritt zu ihrer Analyse. Es liegt nahe, zu prüfen, ob sie wie eine Beziehung zwischen Subjekt und Objekt behandelt werden können. Wir können eine Art von Gleichung bilden:

$$\text{Gegebenheit minus Subjekt minus einer konstanten Beziehung („empfindet“) = Objekt.}$$

Wenn uns das aber irgend weiterbringen soll, so müssen wir annehmen, daß wenigstens einige von den Objekten einer Verknüpfung mit mehreren Subjekten fähig sind. Wir haben dann ein gemeinsames Objekt „~~den Klang einer Glocke~~“, der den Gegebenheiten „~~ich empfinde den Klang einer Glocke~~“ und „~~er empfindet den Klang einer Glocke~~“ gemeinsam ist, genau wie das Subjekt „ich“ mehreren Gegebenheiten gemeinsam sein kann. Die Ansicht, daß die Objekte der sinnlichen Gegebenheiten gemeinsame Objekte sind, die der Wahrnehmung durch mehr als ein Subjekt fähig sind, ist eine Hypothese; sie erfordert, daß die verschiedenen Empfindungen eines Menschen auf irgendeine

Weise mit denjenigen eines anderen Menschen identifiziert werden können.

Die Gegebenheiten sind offensichtlich geistiger Art; sie sind ein Gewahrwerden, — ein Bewußtseinsinhalt meiner selbst oder dieses oder jenes anderen. Die gemeinsamen Objekte, sofern es sie gibt, befinden sich nicht in irgendeinem Bewußtsein; auch können sie nicht mit den Objekten oder Dingen der physikalischen Welt identifiziert werden. Wenn es erforderlich ist, ihnen irgendeinen Ort zuzuschreiben, so muß dieser in irgendeinem dritten Bereich liegen. Prof. Stace schlägt folgenden Standpunkt vor, gegen den die Physiker nach seiner Ansicht nichts einzuwenden haben sollten:

Die Ansicht, daß die sinnlichen Qualitäten geistiger Art sind, beruht auf dem unbesehen hingenommenen Dogma, daß es nur zwei Bereiche gibt, denen sie angehören könnten, den physikalischen und den geistigen Bereich. Träfe das zu, so wäre der Beweis, daß sie nicht physikalisch sind, gleichbedeutend mit dem Beweis, daß sie geistig sind. Und das ist die Ansicht des Physikers. Aber die Annahme, auf die der Beweis sich gründet, die althergebrachte und scheinbar dem gesunden Menschenverstand natürliche Teilung des Weltalls in Geist und Stoff und weiter nichts, ist falsch. Es gibt einen dritten Bereich, der weder physikalisch noch geistig ist, und den wir den „neutralen“ Bereich nennen können. Sinnliche Qualitäten gehören diesem Bereich an und sind weder physikalisch noch geistig.

Ich gebe zu, daß ich im allgemeinen die Worte Geist und geistig benutze, um darunter alles zu verstehen, was nicht physikalisch ist, ebenso wie man die Worte Materie (Stoff) und materiell (stofflich) oft benutzt, um damit alle physikalischen Wesenheiten zu bezeichnen. Es gibt wohl keinen umfassenderen Ausdruck, der allgemein verständlich wäre. Die Unzulänglichkeit der Sprache wird durch den von Prof. Stace vorgeschlagenen Ausdruck „neutral“ beleuchtet. Er unterstellt, daß die sinnlichen Qualitäten (die gemeinsamen Objekte) als neutral zwischen dem physikalischen und dem geistigen Bereich stehen; und weitere Äußerungen bestätigen, daß Stace sie auch so betrachtet. Vom Standpunkt des Physikers betrachtet sind sie aber ultra-geistig. Wenn nämlich der Philosoph aus unseren gemeinsamen sinnlichen Daten ein gemeinsames Objekt, „den-Klang-einer-Glocke“, ableitet, und noch mehr, wenn er (ich weiß nicht wie) eine Glocke mit einem ihr innewohnenden Klang ableitet, so entfernt er sich von der Außenwelt der Physik noch weiter. Um wieder zu der Glocke zu gelangen, die der Physiker betrachtet, müssen diese Schritte wieder

rückwärts gemacht werden, und wir müssen wieder bei den unmittelbaren Wahrnehmungen individueller Geister beginnen, — wie ich später zeigen werde. Prof. Stace fährt fort:

Von diesem Standpunkt aus scheint Prof. Eddingtons Behauptung: „Der Geist ist das erste und unmittelbarste Ding in unserer Erfahrung; alles andere sind weit hergeholte Schlüsse“ —, die, wie er sagt, den Philosophen so anstößig ist —, gar nichts anstößiges an sich haben, mit Ausnahme der offenbaren Identifizierung der sinnlichen Daten mit dem Geist. Das nach meiner Meinung war den Philosophen anstößig.

Ich kann nicht zugeben, daß die philosophische Konstruktion eines Bereiches der sinnlichen Qualitäten (der gemeinsamen Objekte), der außerhalb unserer individuellen Geister bestehen soll, ein irgend weniger weit hergeholter Schluß ist, als die Konstruktion des Physikers auf Grund der gleichen Gegebenheiten. Ein „unpersönlicher Geschmack“, der nicht einen Bestandteil des Bewußtseinsinhaltes irgendeines Menschen bildet, mag ein zulässiger Begriff sein, er ist aber keine Sache der unmittelbaren Erfahrung; wenigstens habe ich einen solchen nie geschmeckt. Ich muß es deutlich aussprechen, daß für mich sinnliche Gegebenheiten die Erfahrungen selbst sind, — die Wahrnehmung von irgendwem oder irgendwas. Stace hingegen, und vielleicht die Philosophen im allgemeinen, benutzen den Ausdruck „sinnliche Gegebenheiten“ für das, was ich hier als gemeinsame Objekte bezeichnet habe, wie „den-Geschmack-eines-Apfels“, oder gar für ein Ding, von dem man annimmt, daß es aus Geschmacks, Farben, Gestalten usw. zusammengesetzt ist, wie der wohlbekannte Apfel, den der Geschichtenerzähler in meinem Bewußtsein beschreibt. Wenn man solche hypothetischen Konstruktionen als „Gegebenheiten“ bezeichnet, so heißt das doch wirklich die Antwort vorwegnehmen.

Wir wollen die ersten Schritte verfolgen, die der Naturwissenschaftler tut, wenn er aus den Gegebenheiten seiner Erfahrung einen Schluß zieht. An erster Stelle findet er die Gegebenheiten, in denen er selbst die Rolle des Subjektes spielt, in zeitlicher Folge angeordnet. Eine primitivere Beschreibung eines Wahrnehmungszustandes wäre: „ich-empfinde-einen-Geschmack, den-ich-gestern-empfunden-habe“. Wir erkennen eine Empfindung nicht auf Grund dessen, was sie an sich selbst ist, sondern auf Grund ihrer Ähnlichkeit mit einer früheren Empfindung. Die Aufmerksamkeit wendet sich vom Wesen der Erfahrung sofort auf die Wiederkehr der Erfahrung. Wie wir im 1. Kapitel gezeigt haben, sind es die wieder-

kehrenden Erfahrungen, aus denen wir unsere Schlüsse auf die Welt der Physik ziehen. Daher trennt sich der Weg des Physikers sofort von dem des Philosophen. Dieser gestaltet ein allgemeines Objekt oder eine sinnliche Qualität, „den-Geschmack-eines-Apfels“, der in keines Menschen Erfahrung wohnt und daher mit keinem bestimmten Ort und mit keiner bestimmten Zeit verknüpft ist; jede Wiederkehr geht verloren, indem man das Objekt aus der Zeitfolge seines Subjektes herausreißt. Es mag vorkommen, daß eine Anzahl von Individuen (weil sie es nicht gern mit dem Arzt zu tun haben) „den-Geschmack-eines-Apfels“ täglich von neuem wahrnehmen. Mir scheint, daß der Philosoph, der damit anfängt, „den-Geschmack-eines-Apfels“ als das Objekt einer ihnen allen gemeinsamen Erfahrung zu behandeln, das auf diese Weise aus den individuellen Zeitabläufen herausgelöst ist, unfähig ist, sich mit dieser Wiederkehr zu befassen, obgleich es sich um eine Wiederkehr in ihrer gemeinsamen Erfahrung handelt.

Das, was ich hier besonders deutlich machen möchte, ist, daß die gemeinsamen Objekte oder die sinnlichen Qualitäten keinen Bezug zur Physik haben, denn sie merzen gerade denjenigen Teil der Erfahrung aus, der den Physiker angeht, nämlich die Wiederkehr, und sie bewahren nur den Teil, der ihn nichts angeht, nämlich den qualitativen Charakter der Empfindungen. Aus diesem Grunde bilden die sinnlichen Qualitäten, über die der Philosoph sich Gedanken macht, keinen Bereich inmitten zwischen der geistigen und der physikalischen Welt.

Auf den ersten Blick könnte es ja sehr erfreulich scheinen, daß der Philosoph sich um das kümmert, was der Physiker nicht beachtet, und umgekehrt. Ich fühle mich aber doch verpflichtet, die Frage aufzuwerfen, ob der Philosoph, der doch von den gleichen Erfahrungsdaten ausgeht, aus freien Stücken ein anderes Problem aufgegriffen und einen anderen Bezirk der Wahrheit erreicht hat, oder ob er sich an dem gleichen Problem einer Synthese versucht hat, wie der Physiker, und dann gleich zu Beginn den richtigen Weg verfehlt hat. Wenn der Philosoph einem bestimmten Geschmack ein Außerhalbsein und ein objektives Dasein zuschreibt, so bin ich ganz und gar nicht überzeugt, daß das überhaupt auf Philosophie beruht; mir sieht das verdächtig nach Physik aus zweiter Hand aus.

Die Anerkennung der Existenz eines Geschmacks von bestimmter Qualität außerhalb eines individuellen Bewußtseins müßte sich darauf gründen, daß man eine Geschmacksempfindung

eines Individuums mit einer Geschmacksempfindung eines zweiten Individuums identifizieren kann. Darum nehme ich als gegeben, daß der Philosoph annimmt, die Geschmacksempfindungen verschiedener Individuen entsprächen einander eindeutig, und daß er dies Entsprechen dahin auslegt, daß es eine Identität des empfundenen Objektes — des Geschmackes — anzeigt. Nun läßt auch der Physiker die Geschmacksempfindungen verschiedener Individuen einander eindeutig entsprechen, aber er stellt keine Betrachtungen darüber an, ob einander entsprechende Empfindungen auch identisch sind. Für ihn sind einander entsprechende (aber nicht notwendig identische) Geschmacksempfindungen solche, die entstehen, wenn die Zungen verschiedener Personen durch das gleiche Ding gereizt werden. Ist es diese Art des Entsprechens, die der Philosoph übernommen und neu ausgelegt hat? Wenn nicht, wie definiert er dann seine Art des Entsprechens? Prof. Staces Ansicht scheint zu sein, daß in seinem „neutralen“ Bereich ein bestimmter Geschmack umhergeistert, der fähig ist, entweder von euch oder von mir empfunden zu werden. Wenn es ein Geschmack ist, den ich bei einer bestimmten Gelegenheit empfand, wie können wir wissen, wann ihr den gleichen Geschmack empfindet? Diese Frage verlangt eine Antwort; denn offenbar kann das Dasein eines Geschmacks, der eurer und meiner Wahrnehmung gemeinsam ist, nicht gut eines der „ersten Dinge in unserer Erfahrung“ sein, wenn wir nicht einmal wissen, wann eine solche Erfahrung eintritt.

Wenn ein Philosoph den Geschmack als denjenigen eines Apfels beschreibt, so scheint es, als habe er sich das Entsprechungskriterium des Naturwissenschaftlers ausgeliehen. Augenscheinlich bezieht er sich auf das Prüfungsverfahren des Naturwissenschaftlers, das darin besteht, daß man Stücke eines Apfels, d. h. eines harten, runden, grünen Gegenstandes mit einer ganz bestimmten Vorgeschichte in der physikalischen Welt, auf die Zungen verschiedener Individuen legt; und weil die physikalischen Bedingungen die gleichen sind, so schließt er, daß die Empfindung in jedem einzelnen Geist eine Wahrnehmung eines gemeinsamen Wahrnehmungsobjektes ist. Wenn das aber wirklich der Weg ist, auf dem der Philosoph die unpersönlichen Geschmacksentdeckungen (oder erfunden), die seinen nicht-geistigen und nicht-physikalischen Bereich bewohnen, so sind diese Geschmacksentdeckungen, weit entfernt davon, daß man von ihrem Dasein ein unmittelbares Wissen besäße, ein weit hergeholter Schluß aus unseren weit hergeholten Schlüssen über die physikalische Welt.

Wenn jedes Element der Erfahrung von jedem anderen Element der Erfahrung völlig verschieden wäre, so würde es weder für die Naturwissenschaft noch für die Philosophie etwas zu tun geben. Der Fortschritt hängt davon ab, daß man in zwei Elementen der Erfahrung einen gemeinsamen Faktor erkennt. Die einfachste Art eines gemeinsamen Faktors ist durch unsere Erkenntnis gegeben, daß eine Anzahl von Erfahrungen das gleiche Subjekt haben können; das können wir übergehen, da es darüber keine Meinungsverschiedenheit gibt. Anschließend müssen wir weiterhin Ähnlichkeiten zwischen zwei Erfahrungselementen untersuchen, die entweder a) das gleiche Subjekt haben, oder die b) verschiedene Subjekte haben. Die Physik scheint sich auf a) zu gründen; die neu-realistische Philosophie hingegen scheint sich auf b) zu gründen. Die letztere nimmt an, daß der gemeinsame Faktor ein gemeinsames Wahrnehmungsobjekt ist, das den „dritten“ Bereich bewohnt. In der Physik wird der gemeinsame Faktor nicht mit einem Wahrnehmungsobjekt identifiziert. (Zu physikalischen Objekten gelangt man erst in einer sehr viel späteren Phase des Schließens.) Wir bedienen uns statt dessen der Gruppenstruktur der Ähnlichkeiten (der wiederkehrenden Erscheinungen), und diese kann nach der Theorie des 12. Kapitels so verstanden werden, daß ihr Dasein unabhängig davon ist, woraus die Struktur besteht. Durch diesen Schritt übertragen wir die Struktur der individuellen Erfahrung in einen außer uns befindlichen Bereich, wo sie mit den Strukturen anderer individueller Erfahrungen verwoben werden kann, die ebenso dorthin übertragen werden.

Wären die Ähnlichkeiten b) unmittelbare Erfahrungsdaten — etwas, dessen wir unmittelbar gewahr wären —, so wäre es gerechtfertigt, zu sagen, daß die Wahrnehmungsobjekte oder die sinnlichen Qualitäten weniger weit hergeholte Schlüsse seien, als es die physikalischen Objekte sind. Es ist aber offenkundig, daß die Ähnlichkeiten a) die einzigen sind, deren wir unmittelbar gewahr werden. Die Ähnlichkeiten b) sind nicht nur weit hergeholte und sehr unsichere Schlüsse aus unserer Erfahrung, sondern sie setzen auch eine ins einzelne gehende Kenntnis der Physik und der Physiologie voraus. Ich kann nicht umhin, zu glauben, daß eure Empfindungen beim Genuß eines Apfels den meinen beim Genuß eines Apfels mehr ähneln, als meine eigene Empfindung beim Hören einer Glocke; aber ich weiß nicht, wie ich diese Meinung irgend logisch begründen soll — denn tatsächlich liegen Schlüsse vom Typus b) so völlig außerhalb jeglicher Erfahrung, daß wir uns

kein Bild davon machen können, was eine solche Ähnlichkeit eigentlich bedeuten würde.

Wenn der Philosoph weiter dazu übergeht, „den Geschmack eines Apfels“ mit einem Apfel zu verknüpfen, so greift er das Problem auf, die Verknüpfung zwischen bestimmten Geschmacks-, Gesichts- und Gefühlsempfindungen zu finden, ein Problem, das auch der Physiker und im besonderen der Physiologe bereits aufgegriffen hat. Wenn er nun das experimentelle Verfahren zur Auf-
findung des Wesens der Verknüpfung außer acht läßt, und wenn er eine Hypothese aufstellt über ihr gemeinsames Dasein in einem Objekt, das außerhalb des Geistes liegt, das aber von einer Anzahl von Geistern wahrgenommen werden kann — eine Hypothese, die der naturwissenschaftlichen Theorie über die Art, wie die assoziierte Wiederkehr der Empfindungen bestimmt ist, geradeswegs zuwiderläuft —, wenn er dies tut, dann darf er sich nicht beklagen, wenn das in den Augen eines Naturwissenschaftlers nur ein müßiges Spielen mit Gedanken ist.

Ich hoffe, daß diese Erwiderung nicht als ein Versuch angesehen wird, die leeren Anmaßungen realistischer Philosophen anzuprangern. Ich bin mir wohl bewußt, daß Prof. Stace in einem nicht für Fachleute geschriebenen Aufsatz nicht in voller Bewaffnung auftreten kann. Wenn er nicht immer gesagt hat, was er meint, so kann man mir vielleicht immer noch vorwerfen, daß ich seine Gedanken nicht begriffen habe, da es mir an ausreichenden Fachkenntnissen fehlt, um der Sprache einer strengen Beweisführung zu folgen. Meine Absicht ging dahin, die Frage, der die Philosophen Rede und Antwort stehen müssen, deutlich herauszustellen und zu zeigen, daß die neue Naturphilosophie nicht ganz das wehrlose Opfer ist, für das manche von ihnen sie zu halten scheinen.

III.

Ich glaube, daß die eingehendste Kritik meiner naturwissenschaftlichen Philosophie sich in C. E. M. Joads „Philosophical Aspects of Modern Science“ findet. Zunächst muß ich die große Sorgfalt anerkennen, mit der er meine Beweisgründe und Folgerungen dargestellt hat, wobei er, wo es nötig ist, zwischen ihnen und denen von Jeans und Russell, mit denen er sich auch beschäftigt, einen Unterschied macht. Joad gehört der realistischen Schule an, und darum liegt unser Streitfall in gewissem Umfange ebenso wie der, den

wir im vorigen Abschnitt behandelt haben. Er scheint aber einen weniger extremen Standpunkt einzunehmen als Prof. Stace. Stace sagt: „Es gibt wirklich Stühle und Tische und Sterne. Sie sind genau das, was sie zu sein scheinen, farbige, raumerfüllende, tönende Dinge. Noch mehr als das; diese wohlbekannte Welt ist die einzige wirkliche Welt, die einzige Welt, die es wirklich gibt.“ Joad (S. 12) hingegen sagt: „Ich kann nicht behaupten — habe es tatsächlich auch gar nicht erwartet —, daß der Versuch, soweit er eine Rechtfertigung der Welt des gesunden Menschenverstandes bezweckt, besonders erfolgreich gewesen wäre. Ich fürchte, daß Stühle und Tische nicht auf die Weise existieren, wie man es im täglichen Leben von ihnen annimmt; daraus folgt aber noch nicht, daß darum ihre physikalische Zerlegung in Atome und Elektronen, die mit sekundären Eigenschaften behaftet sind, die ihnen der Geist zuschreibt, richtig ist.“ Und an anderer Stelle (S. 11): „Der neu-realistischen Welt der miteinander in Wechselbeziehung stehenden sinnlichen Gegebenheiten ist eine Ähnlichkeit mit der Welt der physikalischen Dinge, wie sie dem gesunden Menschenverstand erscheint, und die der Realismus in seinen Anfängen zu erhalten versuchte, mehr und mehr verlorengegangen.“

Natürlich bringt ihn diese gemäßigte Haltung meinem eigenen Standpunkt sehr viel näher:

So halte ich denn dafür, daß die Forschungen des Naturwissenschafters, ebenso wie die Wahrnehmungen des einfachen Menschen, das sittliche Bewußtsein des guten Menschen, das Einfühlungsvermögen des Künstlers und das religiöse Erlebnis des Mystikers, Offenbarungen einer Wirklichkeit sind. Erkenntnistheoretisch stehen sie auf gleicher Stufe. Jeder Hinweis darauf, daß eine dieser Erfahrungsweisen lediglich subjektiv ist, trifft auch die anderen; wenn uns daher irgendeine von ihnen Auskunft über eine Welt außerhalb unserer selbst erteilt, so tun es die anderen auch.

Ich hätte das leicht für einen Auszug aus meinen eigenen Schriften halten können.

Aber der Grad der Annäherung macht mich nur um so mehr geneigt, zu fragen, wieso denn eine Notwendigkeit für eine neu-realistische Welt besteht, die weder die uns wohlbekannte Welt, noch die naturwissenschaftliche Welt, noch eine erweiterte Wirklichkeit ist, die die naturwissenschaftliche Welt als einen Teil ihrer selbst einbegreift. Wenn die Wege zweier Menschen rechtwinklig zueinander verlaufen, so vermuten wir, daß sie zwar verschiedene, aber in gleicher Weise lobenswerte Ziele verfolgen; wenn sie aber

nur um einen kleinen Winkel voneinander abweichen, so kommen wir auf den Verdacht, daß vielleicht der eine von ihnen den richtigen Weg verfehlt hat.

Joads Kritik ist hauptsächlich darauf gerichtet, in meinen Schriften eine gegenseitige Unvereinbarkeit von Ausdrücken und von Gedanken nachzuweisen. Ich bin in Versuchung, mich im einzelnen zu verteidigen; es ist aber vielleicht besser, wenn ich mich auf eine allgemeine Bemerkung beschränke. Ich glaube, daß solche Widersprüche einem Naturforscher nicht so abscheulich scheinen werden, wie einem Philosophen. In den Naturwissenschaften erwarten wir nichts endgültiges. Die im naturwissenschaftlichen Teil dieses Buches beschriebenen Theorien bilden kein vollständiges und lückenloses Lehrgebäude; es sind Mängel in ihrem Zusammenhang vorhanden, die wir erst werden beheben können, wenn die künftige Forschung uns weiter aufgeklärt hat. Es ist durchaus möglich, daß die naturwissenschaftliche Theorie im Zuge ihrer fortschreitenden Vervollkommenung eine grundsätzliche Umwandlung erfahren wird; nichtsdestoweniger fühlen wir uns berechtigt, zu behaupten, daß unsere heutigen unvollständigen Ergebnisse ein hohes Maß an Wahrheit in sich bergen. Selbstverständlich glaube ich, daß die Naturphilosophie dem gleichen allmählichen Fortschritt unterworfen ist. Ohne Zweifel hat die jüngste Entwicklung der Physik philosophische Folgen von der größten Bedeutung, und ich habe es unternommen, sie zu erläutern und weiter zu entwickeln. Wie die Fortschritte der Naturwissenschaft, so können auch die Fortschritte der Philosophie zu etwas wie einem System zusammengefaßt werden; aber ich rege mich nicht unnötig auf, wenn es noch lose Enden gibt, die nicht ganz in das System hineinpassen — Funken einer tieferen Wahrheit, die wir noch nicht in Worte zu fassen vermögen.

Der Fortschritt der Naturphilosophie ist hauptsächlich aus zwei Quellen geflossen, der Relativitätstheorie und der Quantentheorie. Als ich „The Nature of the Physical World“ schrieb, lagen die wissenschaftlichen Begriffe der beiden Theorien miteinander im Streit; und wenn sie einander auch jetzt nicht mehr eigentlich widersprechen, so ist doch eine vollständige Verschmelzung noch nicht gelungen. Es kann uns nicht überraschen, wenn der philosophische Standpunkt die Spuren der gleichen Unstimmigkeiten trägt; wenn aber auch die Philosophie der Relativitätstheorie und die Philosophie der Quantentheorie noch nicht ganz harmonisch zueinander stimmen, so sind sie doch jedenfalls schon weitgehend auf einen gemeinsamen Nenner gebracht.

Es wäre vielleicht unbillig, zu sagen, daß der Philosoph deshalb so großen Wert auf eine formale Widerspruchsfreiheit legt, weil ihm sonst wenig übrigbleibt, an dem er die Tauglichkeit seiner Philosophie prüfen könnte. Jedenfalls trifft dies nicht auf eine Philosophie zu, die auf naturwissenschaftlicher Grundlage entwickelt wird. In der Naturwissenschaft ist die innere Einheit und Widerspruchsfreiheit des Lehrgebäudes ein Ideal, dem man sich nur schrittweise nähern kann. Wir sind es durchaus gewohnt, verschiedene Seiten der gleichen Wahrheit zu entdecken, je nach dem Wege, auf dem wir uns ihr nähern; ja, wir freuen uns ihrer Vielseitigkeit. Ich habe mir nicht die geringste Mühe gegeben, die Vielseitigkeit der Wahrheit zu unterdrücken, die, wie ich glaube, im heutigen Fortschritt der Physik enthalten ist; und so bin ich ein billiges Opfer für jeden, der sich bemüßigt fühlt, Stellen aus meinen Schriften zusammenzutragen, in denen ich mich ihr aus verschiedenen Richtungen nähere.

Die Kritiker minderen Ranges haben auch daraus Kapital geschlagen, daß sie Stellen miteinander vermengten, in denen ein rein wissenschaftlicher Standpunkt eingenommen wird oder in denen ich dem Leser eine erste Einführung gebe, und solche, in denen ich meine philosophischen Gedanken ausführlich darlege. In dieser Hinsicht hat sich Joad völlig einwandfrei benommen. Indessen muß ich auf einen überraschenden Irrtum aufmerksam machen. Nach Joad behaupte ich, daß die Atome und Elektronen objektiv wirklich sind, und daß sie (zusammen mit anderen physikalischen Wesenheiten) tatsächlich die gesamte objektive Wirklichkeit bilden. Er versichert das zweimal (ebenda S. 113 und 127), und jedesmal führt er zur Bekräftigung einen Satz an, der fast am Anfang meines Buches steht: „Die heutige Physik hat mir versichert, daß mein zweiter, wissenschaftlicher Tisch das einzige ist, was wirklich da ist — wo auch immer ‚da‘ sein möge.“ Der Zweck der letzten sechs Worte ist doch offenbar der, daß sie einen Ausweg offen lassen sollen, und daß die Versicherung in einem neuen Licht erscheinen könnte, wenn wir entdecken, was für eine Bedeutung wir (wenn überhaupt) dem „da“ zuzuschreiben haben. Ganz gewiß sehe ich die Wesenheiten der physikalischen Welt nicht als die einzige objektive Wirklichkeit an. Meine Antwort auf die Frage, ob die Atome und Elektronen objektiv wirklich sind, teile ich in zwei Teile. Erstens halte ich es nicht für sehr wichtig, ob wir einen besonderen Ausdruck „objektiv wirklich“, den offenbar niemand definieren kann, gebrauchen oder nicht gebrauchen. Ich habe versucht, die Beziehung der Atome und Elek-

tronen zu den Gegebenheiten der menschlichen Erfahrung zu erläutern. Ich glaube, der Leser wird geneigt sein, alles, was eine solche Beziehung zur Erfahrung hat, „wirklich“ zu nennen; wenn er aber der Ansicht ist, daß das ein unzureichendes Zeugnis für die Wirklichkeit ist, so werde ich nichts dagegen einwenden. Das ist eine reine Definitionsfrage. Zweitens: da die Atome und Elektronen der Gegenstand der Quantentheorie sind, die sich noch in der Entwicklung befindet, so ist ihr naturwissenschaftlicher Stand mit manchen Unsicherheiten behaftet, und das berührt selbstverständlich auch ihren philosophischen Stand. Die Wellenmechanik (insbesondere in der Gestalt, die ihr Dirac gegeben hat) bewirkt, daß die Trennung des subjektiven und des objektiven Elements in der menschlichen Erfahrung unbestimmter geworden ist. Die Relativitätstheorie entdeckte ein unerwartetes subjektives Element in der klassischen Physik und beseitigte es; die Wellenmechanik hat ein weiteres subjektives Element aufgedeckt; aber sie geht anders vor. Sie läßt es bestehen und wendet Methoden an, die der Behandlung einer teilweise subjektiven Welt angepaßt sind. Soweit ich es übersehen kann, erkennen wir uns als unfähig, mit physikalischen Methoden zu einer rein objektiven Welt zu gelangen, und daraus sollte man schließen, daß alle Wesenheiten der Physik an der teilweisen Subjektivität der Welt teilhaben, der sie angehören — obgleich sie natürlich nicht rein subjektiv sind.

Ich wende mich jetzt zu einigen einzelnen Einwänden Joads. Er wendet sich dagegen (S. 31), daß ich die physikalische Welt darstelle a) als etwas, was durch den Geist des Naturforschers aus einer umfassenderen Wirklichkeit abgeleitet ist, b) als etwas, was durch den Geist aus Beziehungen und Bezogenem konstruiert ist, und c) als etwas Gegebenes, das in den Untergrund der Wirklichkeit eingebettet ist. Nach Joad kann sie nicht alles drei zugleich sein, d. h. etwas Abgeleitetes, etwas Konstruiertes und etwas Gegebenes zugleich. Ich kann aber nicht einsehen, warum nicht alle drei Auffassungen zulässig sein sollten. Das Sternbild des Drachen ist eine zweidimensionale Erscheinung, die aus der vollständigen räumlichen Verteilung der zugehörigen Sterne abgeleitet ist; es ist durch einen Geist konstruiert, der Ähnlichkeiten mit mythologischen Zeichen und Geschöpfen sucht; es ist gegeben als eingebettet in eine Milchstraße von Sternen. Wenn eine dieser drei Seiten fehlen würde, so würde es das Sternbild des Drachen nicht geben. Offenbar wäre es nicht vorhanden, wenn es keine Sterne gäbe. Zwischen den Sternen, aus denen es gebildet ist, besteht keinerlei andere Be-

ziehung als eine aus der Phantasie geborene Ähnlichkeit mit einer Schlange; und diese Ähnlichkeit besteht auch nur deshalb, weil wir die Sterne in der Projektion auf das Himmelsgewölbe betrachten, statt in allen drei Dimensionen. Ähnlich ist, wie mir scheint, die durch die Gleichungen der Physik beschriebene Welt eingebettet in einen Untergrund, der außerhalb des individuellen Geistes liegt, und konstruiert durch eine Zusammenfügung von Verknüpfungen, für die der menschliche Geist empfänglich ist; ihr abstrakter, abgeleiteter Charakter liegt auf der Hand.

Es folgt eine Anzahl von Einwänden (S. 34—41), die vermuten lassen, daß Joad nicht begriffen hat, was es mit dem symbolischen Charakter der physikalischen Einheiten auf sich hat. Es hat den Anschein, als hätte ich, nachdem ich gesagt habe: „Es sei x eine Masse“, mich einer Verwechslung schuldig gemacht, indem ich x sowohl als ein algebraisches Symbol, wie auch als eine physikalische Größe behandelte. Joad fragt: „Was ist es denn, das auf die Sinne einwirkt, um die Botschaften auszulösen?“ Er ist bestürzt, weil die Antwort lautet: „Atome oder Dinge wie Atome“, welche man sich, wie ich ihm versichert habe, im strengen wissenschaftlichen Sinne nicht so vorstellen darf, als besäßen sie irgendein anderes Wesen als das einer Anzahl von Zeigerablesungen. Wie kann eine Anzahl von Zeigerablesungen einen geistigen Vorgang auslösen? Er könnte entsprechend fragen: Wie kann ein algebraisches Symbol x es schwierig machen, einen Gegenstand zu verschieben? Die Antwort lautet, daß die Trägheit oder die Masse, die den Gegenstand schwer verschieblich macht, durch x symbolisiert wird. Und entsprechend symbolisiert die Anzahl von Zeigerablesungen die Vorgänge, die die Botschaften auslösen. Insbesondere bedeutet die Wiederkehr der gleichen Zeigerablesungen die Wiederkehr der gleichen Vorgänge.

Ich wende mich zum letzten formalen Einwand. „Die Welt der alltäglichen Erfahrung ist das Gegebene, von dem der Physiker ausgeht, und der Prüfstein, an dem er die Gültigkeit der Struktur beurteilt, die er aufrichtet. Sie wird deshalb als ganz und gar wirklich und objektiv vorausgesetzt *.“

* Da der Inhalt dieser Stelle sich insbesondere auf meine Auslassungen über den Bau der Welt bezieht, in denen ich den Einfluß der geistigen Auswahl auf die Merkmale der physikalischen Welt betone, so wäre es besser, das Wort „Gültigkeit“ durch „Anwendbarkeit“ zu ersetzen, d. h. die Anwendbarkeit auf das Problem der Erfahrung.

Das scheint zu bedeuten, daß man auf eine Gegebenheit keine Schlüsse gründen kann, sofern man nicht voraussetzt, sie sei objektiv. Diese Behauptung ist so erstaunlich, daß ich zweifle, ob es überhaupt möglich ist, daß dies Joads wirkliche Meinung ist. Die durch die individuelle Erfahrung gelieferten Gegebenheiten sind ganz augenscheinlich subjektiv, und diese Gegebenheiten sind es, aus denen der physikalische Begriff des Weltalls letzten Endes abgeleitet wird — denn das, was wir „kollektive Erfahrung“ nennen, ist eine Zusammenfassung individueller Erfahrungen. Es klingt fast wie ein Axiom, daß eine ursprüngliche Gegebenheit notwendig subjektiv sein muß. Joad erklärt dann das folgende als ein Dilemma (S. 47):

So sind denn Atome und Quanten das Ergebnis eines Folgerungsprozesses, der sich auf die Beobachtung der Alltagswelt gründet, während sie gleichzeitig einen Prozeß zeitigen, der in der Konstruktion der Alltagswelt gipfelt. Demnach muß die Alltagswelt vorausgesetzt werden, bevor der Prozeß, der in ihrer Konstruktion gipfelt, beginnen kann.

Es ist wohl ein sonderbarer Einwand gegen die naturwissenschaftliche Theorie, daß sie für ein Weltall sorgt, das imstande ist, von unseren alltäglichen Erfahrungen Rechenschaft abzulegen. Selbstverständlich liegt den Schlußfolgerungen einzig die Absicht zugrunde, daß das Ergebnis des Schließens in dem bestehe, was der Ursprung der Gegebenheiten ist, auf Grund derer die Schlüsse gezogen werden. Wenn wir aus der Beobachtung weißer Mäuse auf Alkohol schließen, so liegt die Gültigkeit des Schlusses in der Tatsache, daß dasjenige, auf was wir schließen, einen Prozeß zeitigt, der in der geistigen Konstruktion von weißen Mäusen endet. Joads Dilemma scheint davon herzurühren, daß er ohne Grund annimmt, die Voraussetzung werde „als objektiv wirklich vorausgesetzt“. Es wird aber durchaus nicht vorausgesetzt, daß die weißen Mäuse objektiv wirklich sind.

Seine Schwierigkeit läßt eher vermuten, daß ein zyklisches Erkenntnischema, wie es uns in der Naturwissenschaft ganz geläufig ist, in der Philosophie noch nicht geschätzt wird. Man kann das Wesen eines zyklischen Schemas vortrefflich an dem bekannten Kinderschertz erläutern: „Wenn der Topf aber ein Loch hat, lieber Heinrich, lieber Heinrich!“ „Stopf's zu, liebe, liebe Liese, liebe Liese, stopf's zu.“ „Womit soll ich's denn zustopfen, lieber Heinrich, usw.“ Bekanntlich kehrt man schließlich zum Anfang zurück, und das Ganze wiederholt sich beliebig oft. Es ist aber keineswegs notwendig, daß man gerade mit dem Loch im Topf beginnt, man kann

auch bei dem Stroh, dem Messer usw. beginnen*. Einen solchen Kreis stellt das Schema der Physik dar; und in gleicher Weise können wir einen größeren Kreis betrachten, der das mit umfaßt, was jenseits der Physik liegt. Wenn wir von dem Punkt des Kreises ausgehen, der unseren individuellen Wahrnehmungen entspricht, so gelangen wir zu anderen Wesenheiten, die Konstruktionen aus unseren Wahrnehmungen sind. Von diesen aus gelangen wir wieder zu anderen Wesenheiten, und so geht es noch einige Schritte weiter. Wenn wir glauben, einen weiten Weg von unserem Ausgangspunkt zurückgelegt zu haben, so entdecken wir, daß unsere Wahrnehmungen (oder genauer die Wiederholungen in unseren Wahrnehmungen) als eine Konstruktion aus den zuletzt erreichten Wesenheiten wieder auftreten. Die Tatsache, daß wir auf einem Kreise zurückkehren, und nicht indem wir unsere Schritte wieder zurücklenken, gewährleistet, daß unser Abenteuer eine Erweiterung unseres Wissens bedeutet und nicht einen Ausflug in die Tautologie. Nach der Methode des 12. Kapitels können wir aus dem Kreise die Gruppenstruktur ableiten und so die gleiche Wahrheit symbolisch ausdrücken, — wenn wir wollen, ohne eine formale Voraussetzung.

IV.

Die brennende Frage des Determinismus ist eine Quelle vieler Einwände und Kontroversen. Obgleich die strittige Seite des Gegenstandes im 4. Kapitel nicht außer acht gelassen worden ist, dürfte es doch interessieren, wenn ich meinen Standpunkt mit ausdrücklicherem Bezug auf die Ansichten und Behauptungen führender Deterministen, insbesondere von Planck und Einstein, verfechte. Die Anklage gegen mich, die sich hauptsächlich auf diese beiden Autoritäten stützt, ist von Sir Herbert Samuel ** sehr geschickt erhoben worden. Das folgende ist ein Auszug aus einem Aufsatz, den ich als Erwiderung schrieb***.

* Im Original wird hier eine abgeänderte Fassung des „House that Jack built“ benutzt. Vgl. *The Nature of the Physical World*, S. 262, *Das Weltbild der Physik*, S. 258. D. Übers.

** „Cause, Effect, and Professor Eddington“, *The Nineteenth Century and After*, April 1933.

*** *The Nineteenth Century and After*, Juni 1933. Abgedruckt mit freundlicher Erlaubnis des Herausgebers.

Sir Herbert Samuel hat mich angeklagt, weil ich versucht hätte, die Öffentlichkeit ihrer wertvollsten Überzeugungen zu berauben, und er hat drei der bedeutendsten lebenden Physiker als Zeugen laden lassen, um gegen mich auszusagen. Ich möchte glauben, daß er sich mehr auf den Eindruck verläßt, den dieses Aufgebot von Autoritäten machen wird, als auf den wirklichen Gehalt ihrer Aussagen. Denn das, was sie zu sagen haben, ist mehr Widerspruch als Beweis. Was die Autorität anlangt, so könnte man schwerlich ein gewichtigeres Trio finden, als Planck, Einstein und Rutherford; indessen setze ich mein Vertrauen darauf, daß das Gericht geduldig anhören wird, was ich zu meiner Verteidigung vorzubringen habe, bevor es sein Urteil spricht.

Die Veranlassung für das Verfahren ist, daß ich (wie viele andere heutige Physiker), Unglauben gegen das „Kausalitätsprinzip“ gesät habe, das der Öffentlichkeit besser als Lehre vom Determinismus bekannt ist. Sir Herbert Samuel und seine Zeugen bedienen sich mit Vorliebe der ersten Bezeichnung, aber ich bin nicht sicher, ob jeder Leser sie richtig verstehen wird. Der Wortlaut der Anklage wird hoffentlich niemanden auf die Vermutung bringen, daß ich etwa leugnete, daß Wirkungen aus Ursachen entstehen können. Die Versammlung der Zuschauer bei einem internationalen Fußballwettkampf ist ohne Zweifel die Ursache für die Verstopfung der Straßen von Twickenham eine oder mehrere Stunden später. Das Kausalitätsprinzip behauptet aber, daß eine beobachtete Verursachung dieser Art bis ins Unendliche analysiert werden kann, so daß auch die winzigste Bewegung in der Menge durch Ursachen bestimmt wäre, die Stunden (und länger) vorher bestanden. Gegen diese unbedingte und universelle Kausalität oder Prädetermination wende ich mich.

Unter den drei Zeugen ist Prof. Max Planck derjenige, auf den sich mein Ankläger vor allem verläßt, und er ist auch der einzige, dessen Aussage in einer Form vorliegt, die eine Prüfung im einzelnen zuläßt. Rutherford ist tatsächlich zu bedächtig, um sich in eine Auseinandersetzung einzulassen, die nach Philosophie schmeckt. Er flüchtet sich in einen Gemeinplatz, der zwar vermutlich als eine Verurteilung der Indeterministen gedacht ist, der aber genau so gut als eine Verurteilung der Deterministen verstanden werden kann. Plancks Ansichten sind von besonderem Belang, da er der Begründer der physikalischen Theorie ist, die zu der heutigen Krisis geführt hat, und seine Gründe sind in einem sorgfältig geschriebenen Buch zusammengefaßt.

Im Streitfall „Determinismus gegen Indeterminismus“ ist es wesentlich, daß wir eine klare Übereinstimmung darüber herbeiführen, welcher Seite die Beweislast zufällt — welche Seite eine *p o s i t i v e* Lehre aufstellt, von der sie wünscht, daß die Gegenseite sich ihr anschließt. Sir Herbert Samuel zitiert einen Brief Lord Rutherfords, in dem es heißt:

Es scheint mir unwissenschaftlich und geradezu gefährlich, weittragende Schlüsse aus einer theoretischen Vorstellung zu ziehen, die weder unmittelbar noch mittelbar einer experimentellen Bestätigung zugänglich ist.

Wem gilt das? Meine Sache gegen Sir Herbert Samuel und seine deterministischen Genossen war, daß sie einen philosophischen Standpunkt von größter Tragweite auf das Kausalitätsprinzip gründeten — ein Prinzip, das experimentell nicht bestätigt worden ist. Hier habt ihr Einsteins Aussage *:

Bisher hat man das Kausalitätsprinzip als einen Satz angesehen, der im Laufe der Zeit eine experimentelle Prüfung von ständig wachsender Genauigkeit zulassen würde. Wenn man es positiv als ein Grenzgesetz formuliert, so lautet es folgendermaßen ...

Nunmehr hat Heisenberg eine Lücke in dem Satz entdeckt... Das Kausalitätsprinzip verliert seine Bedeutung als empirischer Satz.

Die Kausalität kann daher nur als eine *F o r m d e s t h e o r e t i s c h e n* Systems verstanden werden. Nun sind die heutigen Physiker in der Hauptsache der Meinung, daß es unzulässig ist, irgendeine Theorie auf etwas aufzubauen, was prinzipiell nicht geprüft werden kann.

Einstein gibt, wie man sieht, zu, daß das Kausalitätsprinzip ein positiver Satz ist. Er gibt nicht vor, es sei experimentell bestätigt. Nachdem es seine empirische Bedeutung verloren hat, liegt es außerhalb des Bereiches der experimentellen Prüfung und kann in der Tat nur als eine *F o r m e i n e s t h e o r e t i s c h e n* Systems verstanden werden. Die Worte Lord Rutherfords fallen wie ein Bumerang auf den Ankläger zurück. Aus dem Munde seiner eigenen Zeugen muß er vernehmen, daß das Kausalitätsprinzip — die wertvolle Überzeugung, die ich angeklagt bin, der Öffentlichkeit zu rauben — als „ein theoretischer Begriff, der einer experimentellen Bestätigung nicht zugänglich ist“, erwiesen ist.

* Aus einem Brief an Sir Herbert Samuel, veröffentlicht in dessen Presidential Address: *Philosophy an the ordinary Man*, S. 15.

Vergleicht ferner Plancks Zeugnis *:

Ist es von vornherein ganz ausgemacht und gar nicht anders denkbar, daß es für ein Ereignis in jedem Falle eine natürliche Ursache geben muß?... Eine einfache Überlegung zeigt, daß diese Frage entschieden zu verneinen ist.

Hieraus folgt für uns das wichtige Resultat, daß sich über die Gültigkeit des Kausalgesetzes in der wirklichen Welt auf rein logischem Wege sicherlich nichts entscheiden läßt.

mit Einsteins Zeugnis **::

Indeterminismus ist ein ganz unlogischer Begriff... Wenn ich sage, daß die mittlere Lebensdauer eines solchen Atoms in dem Sinne undeterminiert ist, daß sie nicht durch eine Ursache bedingt ist, so rede ich Unsinn.

Meine Herren Richter, es ist Ihnen von Planck versichert worden, daß für das menschliche Denken keine logische Notwendigkeit besteht, daß jedes Ereignis eine entsprechende Ursache haben müßte, nichtsdestoweniger „darf man insofern sagen, daß die Physik, zu der wir hier auch die Astronomie, die Chemie und die Mineralogie rechnen dürfen, auf allen ihren Gebieten die strenge Gültigkeit des Kausalitätsgesetzes zugrunde legt“***. Einstein sagt Ihnen, daß die Leugnung des Kausalitätsgesetzes unlogisch ist, und daß es unsinnig ist, von einem Ereignis so zu sprechen, als habe es keine Ursache; aber das Kausalitätsprinzip ist ein theoretischer Satz, der auf Grund seines eigensten Wesens einer experimentellen Prüfung nicht zugänglich ist. Rutherford warnt Sie und sagt, daß es unwissenschaftlich ist, wenn man seine Schlüsse auf einen Begriff gründet, der der experimentellen Bestätigung nicht zugänglich ist. Daher wissen Sie jetzt genau, was Sie vom Kausalitätsprinzip zu halten haben, und zwar aus dem Munde der Autorität!

Da Plancks Ausführungen am weitesten in die Tiefe gehen, will ich ihn als den Kronzeugen behandeln. Ich glaube, es ist für seine Einstellung bezeichnend, daß er ein ganzes Kapitel seines Buches einer Übersicht über die Ansichten der verschiedenen philosophischen Schulen widmet, während die physikalischen Ergebnisse auf etwa drei Seiten mitgeteilt werden. Diese sollen die „Antwort der

* Wege zur physikalischen Erkenntnis, S. 90/91.

** Diese Bemerkung Einsteins findet sich in einem Anhang der englischen Ausgabe der „Wege zur physikalischen Erkenntnis“ („Where is Science Going?“) und ist in der deutschen Ausgabe nicht enthalten. Der Übers.

*** Wege zur physikalischen Erkenntnis, S. 111.

Physik“ geben. Die wichtigste Stelle *, die schon von Sir Herbert Samuel zitiert wird, lautet:

Die eingehendere Forschung ... hat ferner gezeigt, daß, wenn wir für jeden einzelnen dieser feinen Vorgänge die Gültigkeit dynamischer Gesetze, also strenge Kausalität, voraussetzen, dann gerade die durch Beobachtung festgestellten Wahrscheinlichkeitsgesetze sich ergeben. Die Abweichung von der statistischen Regel in Einzelfällen hat also nicht darin ihren Grund, daß das Kausalgesetz nicht erfüllt ist, sondern darin, daß unsere Beobachtungen viel zu wenig fein sind, um zu einer direkten Prüfung des Kausalgesetzes verwendet werden zu können. Wären wir imstande, die Bewegung jedes einzelnen Moleküls zu verfolgen, so würden wir an ihr die genaue Gültigkeit der dynamischen Gesetze bestätigt finden.

Wie kann Planck das behaupten? So könnte nur jemand sprechen, vor dem der ganze Lauf der Natur offen daläge. Obgleich wir die Prüfung nicht vornehmen können, meint er, daß die Prüfung streng bestanden werden würde, wenn wir sie vornehmen könnten. Tatsächlich werden aber dynamische Gesetze, auf die er hier anspielt (d. h. kausale Gesetze, also solche, die etwas anderes sind, als statistische Gesetze), in den heutigen quantentheoretischen Abhandlungen nie erwähnt, und zwar deshalb, weil man sie bisher weder entdeckt noch irgendeine Vermutung über sie aufgestellt hat. Man kann eine solche Meinung höchstens als eine Hypothese hinstellen (wenn man die Gefahr auf sich nehmen will, Lord Rutherford's Mißfallen zu erregen). In der Tat ist das die Hypothese, die die Deterministen in der Regel aufstellen, um ihrer Lehre einen Halt zu geben. Aber es ist sicher völlig falsch, sie als die Antwort der Physik hinzustellen. Tatsächlich ist die heutige Richtung der Physik die entgegengesetzte. Ich meine nicht, daß die Hypothese widerlegt wurde; aber Erscheinungen, die man früher für die unmittelbare Folge bestimmter kausaler Gesetze hielt, sind jetzt als die Folge statistischer Gesetze anerkannt, so daß sie nunmehr keine Stütze für Plancks Beweisführung bilden. Während man früher den Tatsbestand als günstig ansah, erweist er sich jetzt als belanglos.

Möglicherweise wollte Planck besonderen Nachdruck auf den ersten Satz des obigen Zitats legen, indem er damit sagen will, daß es (mathematisch oder logisch) erwiesen sei, daß statistische Gesetze nur dann für eine Gesamtheit möglich sind, wenn jedes ihrer Individuen von streng kausalen Gesetzen beherrscht wird. Wir können aber doch nicht im Ernst glauben, daß die immer wieder

* Wege zur physikalischen Erkenntnis, S. 111/112.

kehrenden Erfahrungen der Lebensversicherungsgesellschaften unmöglich wären, wenn die versicherten Personen irgendeinen freien Willen haben? Ich glaube, daß Planck lediglich ein Verfahren feststellt, dessen man sich früher gewöhnlich bediente, indem man zunächst ein System kausaler Gesetze aufstellte, bevor man aus ihnen statistische Gesetze ableitete. Dabei übersieht er aber, daß Heisenberg, Schrödinger, Dirac und andere dieses Verfahren aufgegeben haben, und daß es ihre statistischen Gesetze sind, die die Grundlage der heutigen Quantentheorie bilden.

Sir Herbert Samuel fragt, „mit welchem Recht ich sage, daß nicht nur gewisse Forscher, sondern daß die Wissenschaft selbst den Determinismus aufgegeben hat“. Es ist mir lieb, daß er diesen Unterschied betont. Er wird durch eine andere Bemerkung Plancks beleuchtet*:

Einige wesentliche Abänderungen scheinen unvermeidlich; aber ich glaube, wohl im Einklang mit den meisten Physikern, daß die Quantentheorie schließlich ihren strengen Ausdruck in gewissen Gleichungen finden wird, die eine strengere Formulierung des Kausalitätsgesetzes bilden werden.

So ist das Kausalitätsgesetz nicht in der Quantentheorie, so wie sie heute ist, zu finden, sondern in dem, was nach Plancks Ansicht einmal aus ihr werden wird. Das ist genau das, was ich behauptete. Das Kausalitätsgesetz gibt es in der heutigen Physik nicht — in jener Verkörperung von systematischer Erkenntnis und von Hypothesen, die experimentell gesichert ist. Es lebt nur in den vorgefaßten Meinungen mancher Forscher —, Meinungen, auf die natürlich ihre philosophischen Lieblingsgedanken abgefärbt haben.

Das philosophische Kapitel in Plancks Buch enthält einen Zug, der uns bei unserer Erörterung sehr nahe angeht. Das Kapitel beginnt **::

Kausalgesetz und Willensfreiheit, ein Thema, so alt wie der innere Drang jedes ernsthaft nachdenkenden Menschen, das Bewußtsein seiner eigenen sittlichen Würde in Einklang zu bringen mit seiner Überzeugung von dem Walten einer strengen Gesetzmäßigkeit in dem gesamten Geschehen der äußeren und inneren Welt. Offenbart sich doch hier auf den ersten Anblick ein Gegensatz, wie er schärfer kaum gedacht werden kann. Auf der einen Seite der Ablauf aller Geschehnisse nach unverbrüchlichen Regeln, — in der Natur wie im Geistesleben —, die Vor-

* Diese Stelle findet sich im Anhang der englischen Ausgabe der „Wege zur physikalischen Erkenntnis“. Vgl. die Fußnote ** auf S. 284. Der Übers.

** Wege zur physikalischen Erkenntnis, S. 87.

bedingung jeder wissenschaftlichen Erkenntnis und die Grundlage allen praktischen Handelns. Auf der anderen Seite die in unserem Selbstbewußtsein, also durch die unmittelbarste Erkenntnisquelle, die es geben kann, verbürgte Gewißheit, daß wir letzten Endes selber Herr sind über unsere eigenen Gedanken und Entschließungen...

Das ganze Kapitel beschäftigt sich mit den Versuchen, diesen Zwiespalt zu lösen.

Offensichtlich entsteht diese Schwierigkeit nur dann, wenn wir das Kausalitätsgesetz als in der Natur gültig annehmen. Es mag andere Seiten des Problems der Willensfreiheit geben, die zu anderen Schwierigkeiten führen; aber die Hauptschwierigkeit, die Planck in den Vordergrund des Problems stellt, verschwindet zugleich mit dem Kausalitätsgesetz. Viele Autoren haben gesagt, daß unsere Forschungen über die Gesetze der Atomphysik mit der Frage der Willensfreiheit und des Wollens nichts zu tun haben. Planck denkt darüber offenbar anders. Für ihn liegt, wie für mich, das wesentliche Problem darin, ob die Physik das Kausalitätsgesetz bestätigt oder nicht.

In dieser Frage nimmt eine Anzahl von Verfassern gemeinverständlicher Schriften einen Standpunkt ein, der mir ganz abwegig scheint. Sie meinen, da die strenge Kausalität nicht widerlegt ist, und da sie mit den neuen Theorien nicht unverträglich ist, sei keine Änderung des Problems eingetreten. Es kann aber nur dann eine Schwierigkeit entstehen, wenn die Physik dem Kausalitätsprinzip eine positive Stütze gibt. Zu einem Streit bedarf es zweier Streiter, nicht eines Streiters und eines Unbeteiligten.

Bei der vorliegenden Streitfrage besteht eine starke Neigung, zwei Fragen miteinander zu vermengen: „Ist das Kausalitätsgesetz im physikalischen Weltall wahr?“, und „Ist es die gegenwärtige Grundlage der Physik?“ Ich habe Plancks Bild vom Mechanismus der Natur angeführt, das offenbar weit über das hinausgeht, was durch das vorhandene Wissen gewährleistet wird. Wenn ich erklären wollte, daß das Bild unrichtig sei, so würde auch ich mich dem Vorwurf des Dogmatismus aussetzen. Mit völliger Bestimmtheit kann ich aber sagen, daß dieses Bild nicht die Grundlage der heutigen Physik ist. Die heutige Physik verhält sich ihm gegenüber völlig gleichgültig. Ob wir es heute für richtig und morgen für falsch halten — kein einziges Symbol in einem modernen Lehrbuch der Physik würde dadurch geändert werden.

Einstein erkennt (im Gegensatz zu Planck) diesen Wandel voll an. Während Planck glaubt, daß die heutige Physik immer noch

auf dem Kausalitätsgesetz beruht, erkennt Einstein an, daß sie das nicht tut, und er bedauert diesen Wandel. Dazu ist noch zu sagen, daß Einstein unter dem Eindruck dieser Überzeugung einige Jahre lang eifrig auf der Suche nach einer Theorie gewesen ist, die dem Kausalitätsgesetz seine alte, überragende Stellung wieder verschaffen sollte. Es braucht kaum gesagt zu werden, daß ein Verfasser, der die philosophischen Auswirkungen der Physik behandelt, seine Behauptungen auf den derzeitigen Stand des Wissens gründen muß, so wie es sich aus den wissenschaftlichen Leistungen von Planck, Einstein, Rutherford und anderen ergeben hat, nicht aber auf eine Theorie, die Einstein eines Tages einmal zu entwickeln hofft.

Ich glaube nicht, daß die sozialen und politischen Folgen meiner Lehre so fürchterlich sein werden, wie es Sir Herbert Samuel vorauszusehen glaubt. Er vermutet, daß ein Bergbaustudent, der gelernt hat, daß es, wenn er Feuer an eine Sprengladung legt, zwar sehr wahrscheinlich, aber nicht gewiß ist, daß eine Explosion erfolgt, sich entschließen könnte, die Probe aufs Exempel zu machen. Das Ergebnis wird ohne Zweifel meine Behauptung bestätigen, daß eine Explosion überaus wahrscheinlich ist. Ich sehe daher nicht ein, mit welchem Recht die Hinterbliebenen des Verstorbenen sich bei mir beschweren könnten. Und ich lasse doch auch meinem Studenten wenigstens volle Freiheit, die Katastrophe zu vermeiden, indem er eine so sonderbare Handlungsweise unterläßt. Dagegen ist nach Sir Herbert Samuel und den Deterministen die Explosion der Sprengladung die unausweichliche Folge von Ursachen, die seit dem Anfang der Welt bestanden haben.

Ich glaube ferner auch nicht, daß der Ersatz der Gewißheit durch eine hohe Wahrscheinlichkeit sich in der politischen und wirtschaftlichen Welt unheilvoll auswirken wird. Es könnte scheinen, daß der gegenwärtige Zeitpunkt einer Ausmerzung der „Gewißheit“ in den politischen und wirtschaftlichen Wissenschaften sehr wenig günstig ist. Wäre es dann nicht vielleicht besser, den Nachdruck auf die andere Seite meiner Schlüsse zu legen — daß nämlich, soweit sich das voraussagen läßt, unsere Zukunft durch physikalische Gesetze nicht vollkommen vorbestimmt ist? In unsere Hand ist es gegeben, sie besser oder schlechter zu gestalten. Ich habe bei einer bestimmten Gelegenheit Sir Herbert Samuel unterstützt und seinen politischen Bestrebungen um eine Besserung der Verhältnisse meine Stimme gegeben. Meine Entscheidung gründete sich auf eine Wahrscheinlichkeit; ich konnte nicht mit völliger Gewißheit erwarten, daß seine Politik ihr Ziel

erreichen würde. Wenn irgendeiner unserer führenden Männer der Welt einen Weg zur Befreiung aus ihren heutigen Nöten zu zeigen vermag, so werden wir nicht nach Gewißheit fragen; wenn er uns nur überzeugt, daß die Wahrscheinlichkeit des Erfolges überwältigend groß ist, so werden wir ihm bis ins letzte folgen.

V.

Es wäre von geringem Nutzen, wenn ich hier die strittigen Seiten der Schlüsse über rein wissenschaftliche Fragen, zu denen ich selbst gekommen bin, oder die ich den Arbeiten anderer entnommen habe, erörtern wollte. Soweit der Raum erlaubte, den Einwänden im voraus zu begegnen, die einem aufmerksamen Leser wahrscheinlich kommen müssen, habe ich es zu tun versucht. Wenn aber ein sachverständiger Fachgenosse nicht überzeugt ist, oder wenn er behauptet, daß er Fehler und Trugschlüsse entdeckt hat, so gehört eine Entgegnung in eine Fachzeitschrift, in der man eine mathematische Gleichung gegen eine andere setzen kann, und wo alle Hilfsmittel zur Aufdeckung der Wahrheit zu ihrer Geltung kommen können. Wer nicht so vorgebildet ist, daß er selbst einer fachlichen Beweisführung folgen kann, muß sich, so gut es geht, ein Bild aus den Beteuerungen zweier Gegner machen, die etwa so klingen wie: „Codlin ist der Freund, nicht Short“*. Ich kann nicht mehr tun, als den Schimmer eines Verständnisses weiter verbreiten, den ich selbst bei meinem Ringen um Erkenntnis erhascht habe.

Es gibt in bezug auf allgemeinverständliche Darstellungen der Physik einen Punkt, der vielleicht noch nicht allgemein erkannt ist. In der Regel ist man zu den Ergebnissen, die sie in eine nicht fachliche Sprache zu übertragen versuchen, zum Teil durch strenge mathematische Ableitung gelangt, zum Teil durch allgemeine Erwägungen darüber, welche Hypothesen mit der physikalischen Beobachtung und mit den Versuchen wohl am besten übereinstimmen. Nun ist die Physik nicht dogmatisch, oder sie sollte es wenigstens nicht sein. Kein Mathematiker ist unfehlbar; auch er kann einmal irren; aber er darf keine Vor-

* Vgl. S.264. Dies ist etwa so zu verstehen: „X ist ja ein ganz ordentlicher Physiker, nur er versteht nichts von der heutigen Theorie.“ D. Übers.

behalte machen. Selbst in unserer Zeit, die das Dogma nicht liebt, ist keine Nachfrage nach einem undogmatischen Lehrbuch der Geometrie; und ein Prüfling, der nicht imstande ist, den binomischen Lehrsatz zu beweisen, und der nur „dachte, daß er ihn einigermaßen wahrscheinlich gemacht hat“, gilt nicht als ein nachahmenswertes Vorbild. Wenn man aber die Folgerungen für den Laien zusammenfaßt, so werden mathematische und physikalische Überlegungen miteinander vermengt, und es ist ohne ein Eingehen auf fachliche Einzelheiten unmöglich, zu zeigen, wo die dogmatische mathematische Ableitung endet und die nur einleuchtende physikalische Folgerung beginnt. Es kommt daher vor, daß ein Buch, das als Ganzes die freidenkende, undogmatische Haltung der Naturwissenschaft widerspiegelt, mit Aussprüchen durchsetzt ist, die nach Allwissenheit und Unduldsamkeit schmecken. Das letztere ist ein Zeichen dafür (jedenfalls ist es menschenfreundlich, wenn man es so betrachtet), daß die Beweisführung in den Bereich der strengen, mathematischen Ableitung hinübergeglitten ist, wo es keine Vorbehalte gibt, und wo eine feste Hand führen muß.

Dementsprechend gibt es zwei Arten von Einwänden. Die einen behaupten, eine Lücke in der mathematischen Beweisführung eines Verfassers gefunden zu haben; die anderen weichen von ihm in der Beurteilung der Tatbestände ab. Im ersten Fall kann man nur sagen, daß einer von beiden durch eigene Schuld im Unrecht sein muß. Wenn man aber voraussetzt, daß über die mathematische Seite des Problems Übereinstimmung besteht, dann ist oft noch Raum für eine anregende und wertvolle Meinungsverschiedenheit über Urteilsfragen; und eine gewisse Verschiedenheit der Meinungen ist durchaus segensreich. Wo ein Urteil schwieriger als gewöhnlich ist, habe ich die entsprechende Ungewißheit anzudeuten versucht; aber es gibt kaum einen physikalischen Schluß, von dem wir annehmen können, daß er vor der Möglichkeit einer Nachprüfung sicher ist. Selbst ein so grundlegendes Gesetz wie der Satz von der Erhaltung der Energie wird jetzt auf Grund von gewissen Erscheinungen, die bei den β -Strahlen beobachtet wurden, verworfen. Ich selbst halte das nicht für sehr gefährlich, aber vielleicht habe ich Unrecht. Was den Bau der Sterne betrifft, so können wir kaum zweifeln, daß wir ein sehr weitgehendes Wissen gewonnen haben, da man alle Möglichkeiten beachtet hat, die vernünftigerweise in Frage kommen könnten; trotzdem sind wenige von den geltenden Schlüssen (wenn überhaupt einer), sei es für das tiefe Innere oder für die Oberflächenschichten eines Sternes,

so unbedingt, daß ein Stern ihnen nicht entgehen könnte, wenn er wirklich aus dem Glied brechen will.

Ohne Zweifel würde ein für sich allein dastehender Einwand oft den Aufschub eines Urteils über Fragen empfehlenswert scheinen lassen, über die ich eine bestimmte Ansicht zu äußern gewagt habe. Aber es würde wohl ein falsches Bild vom Wesen der wissenschaftlichen Betätigung geben, wenn man sie nur durch die Brille des Kritikers betrachtete. Der tätige Forscher muß, wie jeder Mensch, der etwas zu vollbringen strebt, einen Mittelweg zwischen chronischer Unentschlossenheit und übereilem Urteil finden. Es handelt sich nicht so sehr um die Frage, ob er gerade dieses oder jenes glauben soll; allerdings kann die Wahl darüber entscheiden, ob er mehrere Jahre seines Lebens in einer Sackgasse verschwenden soll oder nicht.

VI.

Meinen letzten Gang habe ich mit Bertrand Russell auszufechten. Er hat wohl mehr als irgend jemand anders die Entwicklung meiner philosophischen Ansichten beeinflußt, und ich verdanke ihm sehr viel. Aber dieses hier ist notwendig ein streitbares Kapitel, und ich muß gegen die folgende Anschuldigung Einspruch erheben*:

Sir Arthur Eddington leitet die Religion aus der Tatsache ab, daß die Atome den mathematischen Gesetzen nicht gehorchen. Sir James Jeans leitet sie daraus ab, daß sie es tun.

Russell schreibt mir hier eine Ansicht über die Grundlage der Religion zu, der ich mich auf das schärfste widersetzt habe, wo immer ich diese Frage berührt habe. Aus dem, was vorhergeht, schließe ich, daß Russell sich tatsächlich auf meine Ansichten über die Willensfreiheit bezieht, die er anscheinend als ein Äquivalent der Religion betrachtet; aber auch dann ist die Behauptung alles andere als wahr. Ich habe weder behauptet, daß die Religion, noch daß der freie Wille aus der heutigen Physik abgeleitet werden könnten; ich habe mich darauf beschränkt, zu zeigen, daß gewisse Schwierigkeiten, die ihrer Versöhnung mit der Physik entgegenstanden, beseitigt sind. Wenn ich die allgemeine Meinung verbreiten fände, daß Russell als Mathematiker nicht zuständig sei,

* The Scientific Outlook, S. 112.

weil er behaupte, er habe die Quadratur des Kreises entdeckt, so könnte ich zu seiner Verteidigung darauf hinweisen, daß die Nachricht, er habe derartiges behauptet, gänzlich unbegründet ist. Wäre es aber anständig, wenn ich sagte, daß ich die Behauptung, Russell sei als Mathematiker zuständig, aus der Tatsache herleite, daß er nicht behauptet, die Quadratur des Kreises entdeckt zu haben?

Man hätte das Vorstehende als ein gelegentliches Opfer an Genauigkeit zugunsten einer zugespitzten Redewendung betrachten können; aber an anderen Stellen wird die gleiche Anschuldigung erhoben*:

Wir werden sehen, daß Eddington an dieser Stelle** nicht auf einen bestimmten Schöpfungsakt durch einen Schöpfer schließt. Er tut das aus dem einzigen Grunde nicht, weil ihm der Gedanke nicht behagt. Die wissenschaftlichen Beweisgründe, die zu dem Schluß führen, den er verwirft, sind viel stärker als die Beweisgründe zugunsten der Willensfreiheit, denn diese stützen sich auf ein Nichtwissen, während die, die wir jetzt betrachten, sich auf ein Wissen stützen. Das ist ein Beispiel für die Tatsache, daß die theologischen Schlüsse, die die Naturwissenschaftler aus ihrer Wissenschaft ziehen, stets nur die sind, die ihnen behagen, aber nicht die, die ihr Hunger nach Rechtgläubigkeit nicht zu schlucken vermag, obgleich die Beweise für sie sprechen.

Und wiederum (S. 96):

(Eddingtons) Optimismus beruht auf dem altherwürdigen Grundsatz, daß alles, was nicht als unwahr nachgewiesen werden kann, als wahr unterstellt werden darf, ein Grundsatz, dessen Fehlerhaftigkeit durch die Vermögen der Buchmacher bewiesen wird.

Weder mein Optimismus, noch mein Glaube an Willensfreiheit und Religion, noch mein Glaube, daß Russell als Mathematiker zuständig ist, beruht auf diesem altherwürdigen Grundsatz. So starke positive Gründe man aber auch für seine eigenen Ansichten haben mag, es ist doch nicht unerheblich, daß man die Gegengründe untersucht, und daß man zur eigenen und zu anderer Befriedigung feststellt, daß die Gründe, die diesen Überzeugungen zu widersprechen schienen, in sich zusammengebrochen sind.

Man vergißt schnell, und ein Mensch wird oft mit der Ansicht eines anderen Menschen belastet. Es lohnt daher wohl, einige Stellen anzuführen, die zeigen, wie vollkommen falsch Russell meine Ansicht über Religion und Wissenschaft verstanden hat. Ich glaube, daß in den folgenden Auszügen jedes Buch und jeder Auf-

* The Scientific Outlook, S. 121.

** The Nature of the Physical World, S. 83, Das physikalische Weltbild, S. 87.

satz vertreten ist, in dem ich je an die Frage der Religion gerührt habe, außer einer kurzen, frühen Abhandlung (1925), in der sich keine Stelle findet, die gedrängt genug für eine Wiedergabe wäre.

Die Wurzel des Glaubens an eine mystische Religion ist eine innere Überzeugung von der Bedeutung, oder wie ich es früher genannt habe, ein inneres Gefühl für die Berechtigung eines Strebens, das unserem Bewußtsein innewohnt. Das muß betont werden, denn die Berufung auf eine solche Überzeugung ist noch zu allen Zeiten der Grundstein der Religion gewesen, und ich wünsche nicht den falschen Eindruck zu erwecken, als hätten wir statt dessen eine neue und wissenschaftliche Begründung gefunden. Auf das entschiedenste lehne ich die Vorstellung ab, daß man die eigentümlichen Glaubensinhalte einer Religion aus den Gegebenheiten der Physik oder mit den Methoden der Physik ableiten könne.

(The Nature of the Physikal World, S. 333. Das Weltbild der Physik, S. 326.)

Der Mangel an Endgültigkeit der physikalischen Theorien würde unsere Beweisführung ernstlich beeinträchtigen, wenn wir ihrer Beständigkeit ein großes Gewicht beigelegt hätten. Der religiöse Leser wird es wohl zufrieden sein, daß ich ihm nicht einen durch die Quantentheorie geoffenbarten Gott vor Augen gestellt habe, so daß man gewärtig sein müßte, daß er durch die nächste Umwälzung der Physik wieder gestürzt würde.

(Ebenda, S. 353 bzw. S. 346.)

Es trifft wahrscheinlich zu, daß durch den jüngsten Umschwung der naturwissenschaftlichen Denkweise einige der Hindernisse, die einer Versöhnung der Religion mit der Naturwissenschaft im Wege standen, beseitigt worden sind; man muß das aber von jeglicher Zumutung wohl unterscheiden, daß eine Religion auf eine wissenschaftliche Entdeckung gegründet werden könne. Ich für mein Teil widersetze mich durchaus jedem derartigen Versuch.

(Science and the Unseen World, S. 45.)

Die von Cohen angeführten Stellen beweisen, daß ich nicht behaupte, die neue Physik „beweise die Religion“ oder gäbe irgendeine positive Grundlage eines religiösen Glaubens ab. Aber sie liefert gute Grundlagen für eine idealistische Philosophie, die, wie ich hoffe, eine geistige Religion gastfreundlich aufnehmen wird, was so zu verstehen ist, daß der Gast für seine Beglaubigung selbst sorgen muß. Kurz, der neue Begriff vom physikalischen Weltall bringt mich in die Lage, die Religion gegen einen bestimmten Vorwurf in Schutz zu nehmen, nämlich daß sie mit der Physik nicht verträglich sei. Er ist aber kein Allheilmittel gegen den Atheismus. Wenn man das versteht . . ., so erklärt es „meine große Bereitwilligkeit, den gegenwärtigen Stand gewisser physikalischer Theorien als endgültig anzunehmen“; die Religion gegen die Naturwissenschaft mit der Mutmaßung verteidigen, daß die Wissenschaft im Irrtum sein könne, das ist kein Kunststück. Es erklärt, warum ich manchmal die

wesentliche Wahrheit der Religion als gewährleistet betrachte; der Soldat, der die eine Front einer Festung zu verteidigen hat, muß sich darauf verlassen, daß die Verteidiger der anderen Front nicht überwältigt worden sind.

(Aufsatz in The Freethinker.)

Ich wende mich jetzt zu der Frage, was in das schematische Gerüst der Symbole eingebaut werden soll. Ich habe gesagt, daß die Physik sich bei dieser Verkleidung abseits hält, und wenn ich über diese Seite der Frage etwas Positives sage, so behaupte ich nicht, als Physiker zu sprechen.

(Aus einer Rundfunk-Vortragsreihe „Naturwissenschaft und Religion“.)

Die Beziehung der Naturwissenschaft zur Religion besteht darin, daß der Forscher von Zeit zu Zeit das Amt eines Wächters übernommen und Warnungssignale gegeben hat — nicht immer zur Unzeit. Wenn ich die derzeitige Lage richtig deute, so steht ein Hauptsignal, das auf Gefahr stand, heute niedriger. Es wird sich aber nicht viel ereignen, solange kein Zug in Sicht ist.

14. Kapitel

AUSKLANG

Die heutige Wissenschaft, soweit ich mit ihr durch meine eigene wissenschaftliche Arbeit vertraut bin, die Mathematik und Physik, zeigen die Welt mehr und mehr als eine offene Welt, als eine Welt, die nicht geschlossen ist, sondern die über sich selbst hinausweist . . . Die Wissenschaft sieht sich durch die erkenntnistheoretische, die physikalische und die konstruktiv-mathematische Seite ihrer eigenen Methoden und Ergebnisse zugleich gezwungen, diese Lage anzuerkennen. Es muß hinzugefügt werden, daß die Wissenschaft nicht mehr tun kann, als diesen offenen Horizont aufzuzeigen; wir sollen nicht versuchen, durch Einbeziehung des transzendentalen Bereichs von neuem eine geschlossene (wenn auch umfassendere) Welt zu gestalten.

Hermann Weyl, *The Open World*.

I.

Unsere Heimat, die Erde, ist an Größe der fünfte oder sechste unter den Planeten, die einem Stern mittlerer Größe in der Milchstraße angehören. Allein innerhalb unserer Milchstraße gibt es vielleicht 1000 Millionen Sterne, die so groß und so hell sind wie die Sonne. Und diese Milchstraße ist nur eine von vielen Millionen, die einen Teil der gleichen Schöpfung bilden, die aber jetzt voneinander weg streben. In dieser Fülle von Welten gibt es vielleicht noch andere Himmelskörper, die von so hoch entwickelten Wesen bewohnt sind, wie es der Mensch ist, oder die es früher waren; aber wir glauben nicht, daß sie auch nur einigermaßen häufig sind. Nach allem, was wir heute wissen, ist es ein höchst seltener Zufall, wenn einem Stern das gleiche widerfährt, was die Entstehung des Sonnensystems veranlaßt hat. Es scheint, daß sich die Materie unter gewöhnlichen Umständen zu großen Massen von äußerst hoher Temperatur sammelt, und daß die Bildung kleiner, kühler Himmelskörper, die für den Aufenthalt von Lebewesen geeignet sind, ein sehr seltenes Ereignis ist. Die Natur scheint auf eine ungeheure Entwicklung feuriger Welten bedacht gewesen zu sein, auf ein Epos für Jahrtausende. Was den Menschen betrifft, so scheint es unbillig, der Natur immer wieder ihren einen Fehltritt vorzuhalten. Infolge einer winzigen Störung in der Maschine — völlig belanglos für die Entwicklung des Weltalls — wurden ganz zufällig einige Stückchen Materie von falscher Größe gebildet. Ihnen mangelt der reinigende Schutz einer hohen Temperatur oder die gleich wirksame ungeheure Kälte des Raumes. Der Mensch ist

eines der grauenvollen Ergebnisse dieses Versagens der anti-septischen Vorsichtsmaßnahmen.

Es mag heilsam sein, wenn wir uns der Nichtigkeit des Menschengeschlechtes vor der Majestät des Weltalls einmal bewußt werden; aber es bringt uns auf einen beunruhigenden Gedanken. Denn der Mensch ist der berufene Hüter gewisser Qualitäten oder Illusionen, die die Bedeutung der Dinge in einem grundsätzlich neuen Licht erscheinen lassen. Er breitet Zweckhaftigkeit über eine Welt des Zufalls. Er weiß um Wahrheit, Rechtschaffenheit und Opfersinn. In ihm lebt für einige kurze Jahre ein Funke des göttlichen Geistes. Ist das im Weltall ebenso belanglos wie er selbst?

Es geht vielleicht zu weit, wenn ich sage, daß unsere Leiber Stücke aus Sternenstoff sind, der durch einen Zufall, gegen den die Natur nicht genügend vorgesorgt hatte, seinem eigentlichen Schicksal entging, und der sich den Umstand einer niedrigen Temperatur zunutze machte, um sich außergewöhnlich verwickelt zu gestalten und die Streiche zu spielen, die wir „Leben“ nennen. Ich will diese Ansicht weder vertreten noch bestreiten; aber ich halte das so sehr für eine offene Frage, daß ich mich weigere, meine Philosophie oder meine Religion auf die Annahme zu gründen, daß sie sicher verneint werden muß. Man kann sich dem Problem aber auch auf andere Weise nähern. Die Naturwissenschaft ist ein Versuch, das Kryptogramm der Erfahrung zu entziffern; sie bringt die Sachverhalte der sinnlichen Erfahrungen menschlicher Wesen in eine Ordnung. Niemand wird leugnen, daß dieser Versuch einen beträchtlichen Erfolg gehabt hat; er knüpft aber nicht unmittelbar an den Anfang des Erfahrungsproblems an. Die erste Frage, die man über wissenschaftliche Sachverhalte und Theorien, wie sie in diesem Buche besprochen sind, stellt, lautet: „Sind sie wahr?“ Ich möchte Wert darauf legen, daß bezeichnender als die wissenschaftlichen Schlüsse selbst die Tatsache ist, daß diese Frage über sie sich so unabweislich aufdrängt. Die Frage: „Ist es wahr?“ gibt der Erfahrungswelt ein anderes Gesicht — nicht weil sie über die Welt, sondern weil sie in der Welt gestellt wird. Wenn wir wirklich ganz auf den Ursprung zurückgehen, so ist das erste, was wir in der Erfahrungswelt anerkennen müssen, ein Etwas, das auf die Wahrheit bedacht ist — ein Etwas, dessen dringendstes Anliegen es ist, daß Überzeugungen wahr seien. Das ist kein trügerisches Kryptogramm; das ist nicht in der symbolischen Sprache geschrieben, in der wir die nicht kennbaren Betätigungen un-

bekannter Handelnder im physikalischen Weltall darstellen. Bevor wir überhaupt die Naturwissenschaft veranlassen, das Problem in ihre Hand zu nehmen und die Sachverhalte der sinnlichen Erfahrung zu ordnen, haben wir schon den ersten Bestandteil der Erfahrungswelt festgestellt. Wenn die Naturwissenschaft bei ihrer Bestandsaufnahme diesen Bestandteil von neuem entdeckt, dann ist es schön und gut. Wenn aber nicht, dann mag die Naturwissenschaft den Anspruch erheben, für das Weltall aufzukommen, wer aber wird für die Naturwissenschaft aufkommen?

Was ist die letzte Wahrheit über uns selbst? Die verschiedensten Antworten drängen sich uns auf. Wir sind ein bißchen Sternensstoff, der seinen Weg verfehlt hat. Wir sind ein physikalisches Hebelwerk, — Puppen, die einherstolzieren und reden und lachen und sterben, je nachdem die Hand der Zeit an den Fäden zieht. Es gibt aber eine unausweichliche Antwort. Wir sind das Etwas, das die Frage stellt. Was auch sonst immer in unserem Wesen eingeschlossen sei, das Verantwortungsgefühl gegenüber der Wahrheit ist eines seiner Merkmale. Diese Seite unseres Wesens liegt außerhalb der Zuständigkeit des Physikers. Ich glaube nicht, daß es erschöpfend ist, wenn man eine geistige Seite unseres Seins zugibt. Es handelt sich mehr um das Gewissen als um das Bewußtsein. Das Bedürfnis nach Wahrheit ist eins von den Dingen, die das geistige Wesen des Menschen ausmachen. Es gibt andere Teile unseres geistigen Wesens, die vielleicht ebenso selbstverständlich sind; aber es ist nicht so leicht, ihr Dasein als so zwingend zu erkennen. Wir können ein Erfahrungsproblem nicht anerkennen, ohne daß wir gleichzeitig uns selbst als Wahrheitssucher anerkennen, die ihre Rolle in dem Problem spielen. Die seltsame Verbindung von Seele und Leib — eines Verantwortungsbewußtseins gegenüber der Wahrheit und einer bestimmten Gruppe von Kohlenstoffverbindungen — ist ein Problem, das natürlich unsere größte Anteilnahme erweckt; es ist aber keine mit Furcht gepaarte Anteilnahme, so als stehe das Dasein einer geistigen Bedeutung der Erfahrung in Frage. Diese Bedeutung ist vielmehr als eine Gegebenheit des Problems anzusehen, und die Lösung muß zu den Gegebenheiten passen. Wir dürfen nicht die Gegebenheiten vergewaltigen, auf daß sie zu einer vorweggenommenen Lösung passen.

Ich bin nicht der Ansicht, daß die Erscheinung des Lebens (soweit es von der Erscheinung des Bewußtseins getrennt werden kann) außerhalb des Bereiches der Physik und Chemie liegt. Gründe wie

der, daß ein lebendes Wesen, weil es ein Organismus ist, aus eben diesem Grunde etwas an sich hat, was in der Ausdrucksweise der Physik nie begriffen werden kann, machen auf mich keinen Eindruck. Man hat wohl noch nicht genügend erkannt, daß sich die heutige theoretische Physik sehr stark mit der Erforschung der Organisation beschäftigt; und der Schritt von der Organisation zum Organismus scheint nicht unmöglich. Es wäre aber nicht weniger töricht, die tiefe Kluft zu leugnen, die unser Verständnis für die verwickeltste Form anorganischer Materie von unserem Verständnis für die einfachste Form des Lebendigen trennt. Wir wollen aber einmal annehmen, diese Kluft sei eines Tages überbrückt und die Wissenschaft sei imstande zu zeigen, wie aus den Wesenheiten der Physik Geschöpfe gestaltet werden können, die ein Gegenstück unserer selbst sind, sogar darin, daß sie mit Leben begabt sind. Der Forscher wird vielleicht auf das Nervensystem des Geschöpfes hinweisen, auf seine Fähigkeit sich zu bewegen, zu wachsen, Nachkommenschaft zu zeugen, und schließlich sagen: „Das bist du“. Aber es hat noch die unabwiesliche Probe zu bestehen. Hat es, so wie ich, mit der Wahrheit zu schaffen? Dann will ich anerkennen, daß es wirklich meinesgleichen ist. Der Forscher wird vielleicht auf Bewegungen im Hirn hinweisen und sagen, daß sie wirklich Empfindungen, Regungen, Gedanken bedeuten; und vielleicht wird er uns einen Schlüssel liefern, um die Bewegungen in die entsprechenden Gedanken zu übersetzen. Selbst wenn wir diesen wenig angemessenen Ersatz für ein Bewußtsein von der Art, wie es uns wohl vertraut ist, anerkennen könnten, müßten wir immer noch Einspruch erheben: „Du hast uns ein Geschöpf gezeigt, das denkt und glaubt; du hast uns aber kein Geschöpf gezeigt, dem es darauf ankommt, daß das, was es denkt und glaubt, auch wahr ist.“ Das innerste Ich, dem das zukommt, was ich ein unabweisliches Merkmal genannt habe, kann nie ein Teil der physikalischen Welt sein, es sei denn, wir änderten die Bedeutung des Wortes „physikalisch“ so, daß es mit „geistig“ gleichbedeutend würde — eine Änderung, die für ein klares Denken kaum von Vorteil wäre. Wenn wir aber unseren angeblichen Doppelgänger so verleugnet haben, können wir dem Forscher sagen: „Gib diesen Robot, der sagt, er sei meinesgleichen, noch einmal zurück; lasse ihm das Merkmal verleihen, das ihm noch mangelt, dazu vielleicht noch andere geistige Merkmale, die ich als selbstverständlich verlangen muß. Vielleicht bekommen wir dann etwas, was in der Tat meinesgleichen ist.“

Vor einigen Jahren wäre der Gedanke, den physikalisch hergestellten Menschen zu nehmen und ihn zu einem geistigen Wesen zu vervollständigen, indem man irgend etwas zu ihm hinzu täte, eine reine Redensart gewesen — ein Hinweggleiten mit Worten über eine unüberwindliche Schwierigkeit. Etwa ebenso sprechen wir oberflächlich von einem Robot, dem wir dann Leben einblasen. Ein Robot ist vermutlich nicht so beschaffen, daß er solche Änderungen seiner Planung in letzter Minute vertragen könnte; er ist ein empfindliches mechanisches Kunstwerk, zum mechanischen Arbeiten geschaffen, und es würde eine völlige Umarbeitung erfordern, wenn man ihm weitere Fähigkeiten verleihen wollte. Um es ganz einfach zu sagen, wenn man ein Gefäß mit irgend etwas füllen will, so muß man es hohl machen, und der altmodische materielle Leib war nicht hohl genug, um ein Gefäß für geistige oder seelische Merkmale zu sein. Die Folge war, daß man das Bewußtsein in die Lage eines Störenfrieds in der physikalischen Welt versetzte. Wir standen vor der Wahl, ob wir es als eine Einbildung oder als ein widernatürliches Mißverständnis dessen, was wirklich im Gehirn vor sich geht, wegerklären wollten, oder ob wir eine Lenkung von außen her anerkennen wollten, die die Macht besäße, die sonst geltenden Naturgesetze außer Kraft zu setzen, und die sich durch grobe Eingriffe in das Verhalten der Atome und Moleküle kundtäte, mit denen sie in Berührung kommt.

Unser derzeitiger Begriff der physikalischen Welt ist h o h l g e n u g, um so ziemlich alles in sich aufzunehmen. Ich glaube, der Leser wird mir darin beistimmen. Doch vielleicht ist diese freudige Zustimmung etwas voreilig. Was wir als die Grundlage aller Erscheinungen ans Tageslicht bringen, ist ein Schema von Symbolen, die durch mathematische Gleichungen verknüpft sind. Denn hierzu verdichtet sich die physikalische Wirklichkeit, wenn man sie mit denjenigen Methoden prüft, die dem Physiker zur Verfügung stehen. Ein skelettartiges Schema von Symbolen trägt seine eigene Hohlheit offen zur Schau. Es kann mit etwas ausgefüllt werden, was ein Skelett in einen Körper, einen Plan in seine Ausführung, ein Symbol in eine Auslegung der Symbole verwandelt — ja es schreitet nach solcher Ausfüllung. Und wenn der Physiker das Problem des lebenden Körpers je lösen sollte, so wäre er nicht mehr in Versuchung, voll Stolz auf sein Ergebnis hinzuweisen und zu sagen: „Das bist du!“ Er sollte eher sagen: „Das ist eine Anhäufung von Symbolen, die in meiner Beschreibung und Erklärung derjenigen deiner Eigenschaften, die ich beobachten und messen

kann, deine Stelle vertritt. Wenn du behauptest, eine tiefere Einsicht in dein Wesen zu besitzen, durch die du diese Symbole auslegen kannst — ein eingehenderes Wissen von der Wirklichkeit, mit der ich nur auf symbolische Weise umzugehen vermag —, so kannst du beruhigt sein, daß ich dem keine gleichwertige Auslegung entgegenzustellen weiß.“ Das Skelett ist der Beitrag der Physik zum Problem der Erfahrung; mit der Bekleidung des Skeletts hat sie nichts zu tun.

II.

Der naturwissenschaftliche Begriff von der Welt hat sich von dem Alltagsbegriff mehr und mehr entfernt, und wir standen schließlich vor der Frage, was denn nun eigentlich das Ziel dieser Umformung ist. Die Lehre, daß die Dinge nicht das sind, als was sie uns erscheinen, ist noch ziemlich maßvoll; es ist aber so weit gekommen, daß wir uns einmal wieder daran erinnern müssen, daß es die Erscheinungswelt ist, nach der wir unser äußeres Leben tatsächlich auszurichten haben. Das ist nicht immer so gewesen. Anfänglich bestand der Fortschritt des wissenschaftlichen Denkens darin, daß man grobe Irrtümer in den altgewohnten Auffassungen von den Dingen richtigstellte. Wir erfuhren, daß die Erde eine Kugel und nicht eben ist. Das bezieht sich nicht auf irgendeine abstrakte, wissenschaftliche Erde, sondern auf die uns so wohlbekannte heimatliche Erde. Es bereitet wohl niemandem unter uns eine Schwierigkeit, sich die Erde als eine Kugel vorzustellen. Ich muß gestehen, daß mir dieser Gedanke so geläufig ist, daß er sich mir ganz von selbst aufdrängt; und es kann vorkommen, daß ein Wettkampf, der in Australien ausgefochten wird, meinem geistigen Auge so erscheint, als werde er kopfüber gespielt. Wir haben erfahren, daß die Erde sich dreht. Für gewöhnlich erkennen wir diesen Schluß mit unserem Verstande an, ohne den Versuch zu machen, ihn in unsere Alltagsvorstellung zu übernehmen; wenn wir es aber versuchen, so können wir uns das sehr gut vorstellen. In Rosettis Gedicht der Engel vom goldenen Altan des Himmels herab und überschaut

Die Weite, bis in jene Ferne wo
Die Erde wirbelt, einer Mücke gleich.

Da er von der Stätte der Wahrheit herabblickt, so kann nichts als die vollkommene Wahrheit sich ihm offenbaren. Er muß die Erde

sehen, wie sie wirklich ist — einem wirbelnden Insekt gleich. Jetzt aber wollen wir ihn mit etwas einigermaßen Neuzeitlichem in Versuchung führen. Nach der Einsteinschen Theorie ist die Erde, wie jegliche Materie, eine Krümmung der Raum-Zeit-Welt, und das, was wir gewöhnlich ihren Drehimpuls nennen, ist das Verhältnis zweier Krümmungskomponenten. Was soll der Engel in aller Welt damit anfangen? Ich fürchte, er muß ein wenig blaustrümpfig werden. Vielleicht ist das gar nicht so schlimm. Ich glaube, es ist keine kränkende Zumutung, daß ein himmlisches Wesen etwas von der Einsteinschen Theorie versteht. Mein Einwand ist ernster. Wenn der Engel die Erde mit Einsteins Augen sehen würde, so würde er sie auf wahre Weise erblicken — das scheint mir so gut wie sicher —, aber er würde das Wesentliche übersehen. Es ist so, als führten wir ihn in eine Gemäldegalerie, und er sähe dort (mit jenem schmerzvollen Blick für die Wahrheit, der nichts sieht, was nicht wirklich da ist) nichts als zehn Quadratmeter gelbe Farbe, fünf Quadratmeter rote Farbe usw.

Solange die Physik bei ihrer Bastelei an der Alltagswelt ihr noch diejenigen Züge erhalten konnte, die die ästhetische Seite unseres Wesens mitklingen lassen, konnte sie mit einem Schein des Rechts den Anspruch erheben, daß sie die Gesamtheit der Erfahrung umfaßt. Und wer beanspruchte, daß es eine andere, religiöse Seite unseres Daseins gibt, mußte seinen Anspruch verfechten. Nachdem aber jetzt das von ihr entworfene Bild so vieles nicht enthält, was offensichtlich bedeutsam ist, ist keine Rede mehr davon, daß es die ganze Wahrheit über die Erfahrung darstellt. Wollte sie diesen Anspruch erheben, so würde sie nicht nur auf den Widerspruch aller religiös gesinnten Menschen stoßen, sondern auch auf den Widerspruch derer, die da glauben, der Mensch sei doch auch noch etwas anderes als ein physikalisches Meßgerät.

Die Physik gibt eine Antwort von hoher Vollkommenheit auf eine ganz bestimmte Frage, der wir in unserer Erfahrung gegenübergestellt sind. Es liegt mir völlig fern, die Bedeutung des Problems und den Wert seiner Lösung zu verkleinern. Wir haben gesehen (S. 10), wie zum Zwecke einer scharfen Erfassung des Problems die verschiedenen Fähigkeiten des Beobachters eine nach der anderen ausgebootet wurden, und wie sogar sein sinnliches Rüstzeug vereinfacht wurde, bis das Problem eine solche Gestalt annahm, daß wir es mit unseren Methoden zu lösen vermögen. Für den Physiker ist der Beobachter zu einem Symbol geworden, der in einer Welt von Symbolen lebt. Aber noch bevor wir das Problem dem Physiker

überantworteten, schauten wir es mit Menschaugen, mit den Augen eines Geistes, dessen Umwelt diesem Geist verwandt ist.

Soweit ich mich in diesen Vorträgen auf eine Erfahrung berufe, die über die symbolischen Gleichungen der Physik hinausreicht, hat das mit einem bestimmten physikalischen Wissen nichts zu tun. Ich bin dabei, wie jeder andere, von dem abhängig, was das allgemeine Erbteil des menschlichen Denkens ist.

Wir müssen anerkennen, daß das besondere Wissen, um das die Physik ringt, viel zu eng begrenzt und auf zu wenig beschränkt ist, als daß es ein vollständiges Verständnis für die Umwelt des Menscheistes vermitteln könnte. Sehr viele Seiten unseres alltäglichen Lebens und Tuns entführen uns dem Blickfeld der Physik. Im wesentlichen besteht keinerlei Meinungsverschiedenheit über die Zulässigkeit und die Bedeutung dieser Seiten. Wir betrachten ihre Geltung als gewährleistet und richten, ohne viel zu fragen, unser Leben nach ihnen ein. Jegliche Erörterung darüber, ob sie mit der von der Physik enthüllten Wahrheit verträglich sind, steht nur auf dem Papier; denn was bei solchen Erörterungen auch herauskommen möge, wir werden diese Seiten unseres Lebens nicht opfern, denn wir wissen von vornherein, daß das menschliche Wesen ohne diese Wege ins Freie unvollständig wäre. Es wäre deshalb einigermaßen sonderbar, wenn unter den zahlreichen außerphysikalischen Seiten der Erfahrung gerade einzig und allein die Religion einer Versöhnung mit dem in der Naturwissenschaft zusammengefaßten Wissen bedürfte. Mit welchem Recht darf man denn erwarten, daß alles, was das Wesen des Menschen betrifft, mit der Elle gemessen oder als ein Schnittpunkt von Weltlinien ausgedrückt werden kann? Wenn es überhaupt einer Verteidigung bedarf, so muß meines Erachtens ein religiöser Standpunkt nach den gleichen Grundsätzen verteidigt werden, wie ein ästhetischer Standpunkt. Ihre Rechtfertigung scheint in dem Gefühl eines seelischen Wachstums und einer seelischen Vervollkommenung zu liegen, das man ebenso stark bei der Betätigung einer ästhetischen Begabung wie bei der Betätigung einer religiösen Begabung empfindet. Es ist dem inneren Gefühl des Forschers verwandt, das ihm die Überzeugung verleiht, daß wir durch die Betätigung einer anderen geistigen Begabung, der Fähigkeit, Schlüsse zu ziehen, etwas erreichen, was dem menschlichen Geist durch einen inneren Drang zu erstreben aufgelegt ist.

Durch eine Einsicht in unser eigenes Wesen erkennen wir zuerst, daß das physikalische Weltall sich unmöglich mit unserem Er-

lebnis der Wirklichkeit in seinem ganzen Umfange decken kann. Das „Etwas, dem es auf die Wahrheit ankommt“, muß gewiß auch seinen Platz in der Wirklichkeit haben, wie auch immer wir die Wirklichkeit definieren. Innerhalb unserer eigenen inneren Natur oder infolge der Berührung unseres Bewußtseins mit einer Natur, die die Grenzen der unsrigen überschreitet, gibt es für uns Dinge, die in gleicher Weise einen Anspruch auf Anerkennung haben — das Schöne, das Sittliche, und schließlich an der Wurzel jeder geistigen Religion jenes Erlebnis, das wir als die Gegenwart Gottes beschreiben. Wenn ich sage, daß diese Dinge eine geistige Welt darstellen, so versuche ich nicht, sie zu vergegenständlichen oder zu objektivieren — sie anders zu betrachten als so, wie wir sie in unserer Erfahrung erleben. Ich möchte vielmehr sagen, wenn in dem vom Geheimnis des Daseins überwältigten Menschenherzen der Schrei erklingt: „Um was geht dies alles?“ dann ist es keine ehrliche Antwort, wenn man nur den Teil der Erfahrung beachtet, der unseren Sinneswerkzeugen zugänglich ist, und erwidert: „Es geht um Atome und um Chaos; es geht um ein Weltall glühender Kugeln, die ihrem drohenden Verderben entgegenrollen; es geht um Tensoren und nicht-kommutative Algebra.“ Es geht vielmehr um einen Geist, in dem die Wahrheit wie in einem Schrein beschlossen ist, mit allen Möglichkeiten der Selbstvollendung in seiner Verantwortung für das Schöne und das Gute. Sollte ich nicht auch noch sagen, daß ebenso wie das Licht und die Farben und die Klänge als die Eingebungen einer außer uns befindlichen Welt zu unserem Geist gelangen, so auch diese anderen Regungen unseres Bewußtseins von etwas herrühren, das, ob wir es nun als außerhalb unserer selbst oder als in unserem tiefsten Innern verborgen beschreiben, größer ist als unser eigenes Selbst?

Es ist der eigentliche Wesenskern der Religion, daß sie uns diese Seite unserer Erfahrung als eine Angelegenheit des Alltagslebens nahebringt. Damit wir dieses Leben leben können, müssen wir es in der uns geläufigen Gestalt begreifen, und nicht als eine Folge abstrakter physikalischer Feststellungen. Es wäre unerträglich, wenn ein Mensch von seiner gewöhnlichen Umwelt ständig in der Sprache der Physik reden würde. Wenn Gott in unserem täglichen Leben irgend etwas zu bedeuten hat, so sollten wir es nicht als einen Verrat an der Wahrheit empfinden, wenn wir ganz unwissenschaftlich von ihm denken und über ihn reden, ebensowenig wie wenn wir über unsere Mitmenschen unwissenschaftlich denken und reden.

Es könnte so scheinen, als ließe eine solche Einstellung einer Selbsttäuschung allzu weiten Spielraum. Wenn wir es unternähmen, das, was wir das religiöse Erlebnis nennen, nach physikalischen Methoden zu analysieren, so könnte es geschehen, daß wir in dem Gott, der uns alsdann entgegenzutreten scheint, nichts als eine Verpersönlichung gewisser abstrakter Begriffe entdecken würden. Ich gebe zu, daß die Anwendung jeglicher Methode, die man im gewöhnlichen Sinne als eine physikalische bezeichnen würde, wahrscheinlich dieses Ergebnis haben würde. Aber was können wir denn auch anderes erwarten? Wenn wir uns auf die Methoden der Physik beschränken, so müssen wir notwendig zur Gruppenstruktur der religiösen Erfahrung kommen — wenn sie eine solche besitzt. Wenn wir die weniger exakten Wissenschaften heranziehen, so führen sie zu entsprechenden Abstraktionen und Einordnungen. Wenn unsere Methode in einer Einordnung besteht, was können wir dann anderes erlangen, als einen Schlüssel? Wenn es sich erweist, daß die physikalische Methode Gott auf einen Schlüssel zur Entzifferung der Sittlichkeit zurückführt, so beleuchtet das zwar das Wesen der physikalischen Methode; ich hege aber lebhaften Zweifel, ob es irgendein Licht auf das Wesen Gottes wirft. Wenn eine Betrachtung des religiösen Erlebnisses im Lichte der Psychologie aus unserem Gottesbegriff alles zu beseitigen scheint, was Ehrfurcht und Andacht heischt, so tun wir gut, einmal darüber nachzudenken, ob das gleiche nicht auch unseren menschlichen Freunden widerfährt, wenn man sie mit den Mitteln der Psychologie analysiert und sozusagen in eine Kartei einordnet.

Doch darf eine Verpersönlichung nicht unbedingt als ein Hirnsgespinnst verurteilt werden. Bin ich denn nicht selbst eine Verpersönlichung jenes Strukturschemas, das alles einbegreift, was die Physik an mir zu erkennen vermag?

III.

Wir wollen nun die Antwort auf die Frage betrachten, ob das Wesen der Wirklichkeit materieller oder geistiger Art oder eine Vereinigung beider ist. Ich habe oft gesagt, daß ich das Wort „Wirklichkeit“, das den eigentlichen Sinn so oft verdunkelt, nicht liebe. Ich stelle aber die Frage in ihrem üblichen Wortlaut, und ich antworte auf das, was ich für die Meinung des Fragestellers halte.

Zunächst will ich eine andere Frage beantworten. Besteht das Weltmeer aus Wasser oder aus Wellen oder aus beidem? Einige meiner Reisegefährten auf der Fahrt über den Ozean waren ganz entschieden der Ansicht, er bestehe aus Wellen; die unvoreingenommene Antwort ist aber doch wohl, daß er aus Wasser besteht. Jedenfalls wird uns, wenn wir erklären, daß das Wesen des Weltmeeres wässerig sei, wahrscheinlich niemand widersprechen und behaupten, sein Wesen sei im Gegenteil wellenhaft, oder es sei zwiespältigen Wesens, teils wässerig und teils wellenhaft. Ebenso behaupte ich, daß das Wesen der Wirklichkeit geistig ist, weder materiell noch eine Zweiheit aus Materie und Geist. Die Hypothese, daß ihr Wesen irgend etwas Materielles an sich haben könne, geht in meine Berechnung überhaupt nicht ein. Denn so, wie wir heute die Materie auffassen, ergibt die Verbindung des Eigenschaftsworts „materiell“ mit dem Hauptwort „Wesen“ im Sinne dessen, was etwas im Innersten bedeutet oder darstellt, keinen vernünftigen Sinn.

Wenn wir jetzt den Ausdruck materiell (oder genauer physikalisch) im weitesten Sinne als das auslegen, dessen wir in der Außenwelt auf Grund unserer sinnlichen Erfahrung habhaft werden können, so erkennen wir, daß es den Wellen, nicht dem Wasser des Weltmeers der Wirklichkeit entspricht. Meine Antwort leugnet nicht das Dasein der physikalischen Welt, ebenso wenig wie die Antwort, daß das Weltmeer aus Wasser besteht, das Dasein der Meereswellen leugnet. Nur gelangen wir auf diese Weise nicht bis an das innerste Wesen der Dinge. Wie die symbolische Welt der Physik, so ist auch die Welle ein Begriff, der geräumig genug ist, um so ziemlich alles in sich aufzunehmen. Es gibt Wasserwellen, Luftwellen, Ätherwellen und (in der Quantentheorie) Wahrscheinlichkeitswellen. Nachdem uns die Physik die Wellen gezeigt hat, müssen wir immer noch den inneren Gehalt der Wellen aus irgendeinem anderen Bezirk unseres Wissens ermitteln. Wenn ihr damit einverstanden seid, daß die geistige Seite der Erfahrung zur physikalischen Seite in einem Verhältnis gleicher Art steht, wie das Wasser zur Gestalt der Wellen, so kann ich es euch selbst überlassen, daß ihr euch eine Antwort auf die zu Beginn dieses Abschnittes gestellte Frage bildet, und ich kann so eine mißverständliche Auslegung meiner Worte verhindern. Wichtiger aber ist es, daß ihr erkennen werdet, wie ungezwungen sich die beiden Seiten der Erfahrung nunmehr ineinander fügen, und wie keine der anderen ihren Platz und Rang streitig macht. Es ist beinahe so, als

habe der heutige Begriff der physikalischen Welt mit feinem Verständnis Raum für die Wirklichkeit von Geist und Bewußtsein gelassen.

Wenn wir nur zwei Möglichkeiten anerkennen, geistig und materiell, so müssen wir diese Ausdrücke natürlich in einem sehr allgemeinen Sinne verwenden. Wir können nicht annehmen, daß der nichtmaterielle Untergrund der physikalischen Symbole auch sonst so bis ins einzelne entwickelt ist, wie wir es in dem Untergrund derjenigen physikalischen Symbole erkennen, die an der Stelle unserer selbst stehen. Wenn wir uns aber nicht in hypothetische Verallgemeinerungen versteigen wollen, können wir ihn kaum anders als geistig nennen, im Einklang mit dem einzigen Faden, der von uns zur Natur hin führt.

Wollt ihr diese Vorstellung als ein Ganzes sehen, so bedenkt, wie ihr selbst in das Schema des Wissens eingeht. Auf Grund einer wissenschaftlichen Untersuchung kann ich euch als einen Teil des physikalischen Weltalls beschreiben, euch einen Platz in Raum und Zeit anweisen, eure chemische Zusammensetzung feststellen, usw. Dies alles ist ein mittelbares Wissen, denn es ist (wie meine gesamte sinnliche Erfahrung) erst durch physikalische Veränderungen, die sich längs meines Nervensystems fortgepflanzt haben, in meinen Besitz gelangt. Um diesem Wissen die genaueste Gestalt zu geben, muß ich die Symbole der mathematischen Physik und die Gleichungen, die sie miteinander verknüpfen, anwenden. Doch ist damit mein Wissen von euch noch keineswegs erschöpft. Ich bin davon überzeugt, daß es in Verbindung mit jenem Teil eures Hirns, den die Physiologen im besonderen mit eurem „Ich“ identifizieren, noch einiges mehr gibt. Ihr seid nicht nur das, was die physikalischen Symbole beschreiben, sondern auch „das Etwas, dem es auf die Wahrheit ankommt“, und dessen Dasein in der Erfahrungswelt wir im Anbeginn unserer Untersuchung zugeben mußten. Ich würde hier nicht zu euch sprechen, wenn ich hiervon nicht überzeugt wäre. Als eine Folgerung ist dieses mein Wissen von euch sogar noch weiter hergeholt, als mein Wissen über eure physikalische Struktur; denn zum Teil ist es aus euren physikalischen Lebensäußerungen und eurem physikalischen Verhalten hergeleitet, zum anderen Teil aus meinem unmittelbaren Wissen davon, was solche Lebensäußerungen und ein solches Verhalten in meinem eigenen Fall zu bedeuten haben. Zwar ist die Reise länger, aber das Reiseziel liegt näher. Denn dieses ist nicht mehr ein Wissen symbolischer Art; ein

solches Wesen, wie ich es euch zuschreibe, ist aus lauter Eigenschaften zusammengesetzt, die mir ohne Zutun des Mechanismus der Sinne an meinem eigenen Geiste bekannt sind.

In welchem Umfange geht dieser Standpunkt die heutigen Anschauungen der Physik an? Sie werden auf die folgende Weise mit betroffen. Ein Philosoph, der nicht allzu tief nachdenkt, nimmt an, daß das Wesen eines Tisches mir „in meinem Geiste ohne das Zutun eines sinnlichen Mechanismus bekannt ist“. Ein jeder, dem es obliegt, Vorträge über die Relativitätstheorie zu halten, sieht sich dem weitverbreiteten Glauben gegenüber, daß das Wesen des Raumes* uns ohne Zutun des sinnlichen Mechanismus im Geiste bekannt ist. Wir haben es der Relativitätstheorie und der Quantentheorie zu verdanken, daß diese Annahmen aus der Physik beseitigt und durch den Begriff eines symbolischen Wissens ersetzt wurden, der in meinen Ausführungen eine so große Rolle spielt.

Man mag vielleicht die Frage stellen: Glaubst du dann, daß das gleiche geistige Wesen, daß den Atomen und Elektronen im lebendigen Hirn zugrunde liegt, überhaupt alle Atome und Elektronen beseelt? Darauf würde ich erwidern, daß es unpassend ist, in diesem Zusammenhang von Atomen und Elektronen zu reden. Wir haben Beweise dafür, daß unser Bewußtsein mit einem bestimmten Bereich unseres Hirns verknüpft ist; wir gehen aber nicht so weit, anzunehmen, daß ein bestimmtes Element unseres Bewußtseins mit einem ganz bestimmten Atom unseres Hirns verknüpft ist. Die Elemente unseres Bewußtseins werden durch bestimmte Gedanken und Empfindungen gebildet; die Elemente der Hirnzellen sind Atome und Elektronen; aber diese beiden Analysen laufen einander nicht parallel. Wenn ich daher einen Bereich des Geistes betrachte, der als Ganzes der physikalischen Welt angehört, so denke ich ihn mir nicht so eingeteilt, daß es für jedes Element von Zeit und Raum ein entsprechendes Teilstück im geistigen Untergrund gibt. Meine Folgerung geht dahin, daß unser Forschen über das Erfahrungsproblem zum größten Teil in einem Schleier von Symbolen endet, daß es aber in den Geistern bewußter Wesen ein unmittel-

* Ich sage nicht das Wesen der Zeit, denn ich glaube, daß wir in unserem Bewußtsein ein unmittelbares Wissen vom Zeitablauf besitzen; und es hat zu den Aufgaben der Physik gehört, das Verhältnis zwischen diesem unmittelbaren Wissen von der Zeit und unserem symbolischen Wissen von der Zeit in der Außenwelt, das wir durch unseren Sinnesmechanismus erlangt haben, aufzuklären.

bares Wissen gibt, das hier und da den Schleier lüftet; was wir aber durch diese Gucklöcher zu unterscheiden vermögen, ist geistiger und seelischer Art. An allen anderen Stellen sehen wir nichts als den Schleier.

Wie fern sind uns jene beschaulichen Zeiten, wo trotz der deutlichen Empfindung von unserer Unwissenheit über die Einzelheiten des Baues der Materie jedermann davon durchdrungen war, er sei über ihr Wesen im Grundsätzlichen vollkommen im Bilde. Was sind meine Gefühle, was meine Gedanken? Was bin ich selbst? Geheimnisse, zu tief für das menschliche Fassungsvermögen. Was aber ist dieser Tisch? O, das weiß ein jeder; er ist eben Substanz, Wirklichkeit des gesunden Verstandes, und inmitten des Phantasienflugs unserer Gedanken so beruhigend verständlich. Nein! Es ist ein Gemeinplatz, daß wir höchst wenig von unserem eigenen Geist verstehen, aber, wenn irgendwo, so liegt hier überhaupt der Anfang alles Wissens. Die außer uns befindlichen Dinge werden von der Wissenschaft erbarmungslos seziert, erforscht und gemessen, nie aber werden sie e r k a n n t. Bei ihrer Verfolgung sind wir von zusammenhängender Materie zu Molekülen, von Molekülen zu spärlich im Raum verteilten elektrischen Ladungen, von elektrischen Ladungen zu Wahrscheinlichkeitswellen gelangt. Was wird das nächste sein?

Das führt nicht zu einem reinen Subjektivismus. Das physikalische Ding in meiner Wahrnehmungswelt besteht auch in eurer Wahrnehmungswelt. Es g i b t eine Außenwelt, die weder ein Teil von euch noch von mir ist, sondern neutraler Boden, auf dem der Grundstein jener Erfahrung ruht, die unser gemeinsamer Besitz ist. Aber man kann wohl nicht zweifeln, daß die Naturwissenschaft heute einen sehr viel mystischeren Begriff von der Außenwelt hat als im vergangenen Jahrhundert, wo jede physikalische „Erklärung“ von der Annahme ausging, es könne nichts wahr sein, wovon nicht der Mechaniker ein Modell bauen könnte. Die rohere Spielart des Materialismus, die im Weltall alles, ob organisch oder anorganisch, auf einen Mechanismus aus Schwungrädern und Wirbeln oder ähnlichen Vorrichtungen zurückzuführen suchte, ist vom Erdboden verschwunden. Mechanische Erklärungen der Gravitation oder der Elektrizität findet man heute nur lächerlich. Ihr könntet heute den menschlichen Verstand getrost der Gnade des Physikers überantworten, ohne befürchten zu müssen, er werde in seinem Getriebe das Knirschen von Zahnrädern feststellen. Wir dürfen aber von

diesen Gnadenbeweisen der heutigen Physik nicht allzu viel Aufhebens machen. Denn die Gewaltherrschaft des Mechanikers ist nur durch die Gewaltherrschaft des Mathematikers abgelöst worden. Wenigstens ist das eine sehr weit verbreitete Ansicht. Daneben her geht aber die ständig wachsende Erkenntnis, daß der Mathematiker ein weniger tyrannischer Herr ist als der Mechaniker, denn er stellt nicht den Anspruch, daß seine Einsicht irgend tiefer reicht als bis zu seinen eigenen Symbolen.

In einem früheren Buch * habe ich auf die unbewußte Gewohnheit der heutigen Physiker hingewiesen, die Schöpfung so zu betrachten, als sei sie das Werk eines Mathematikers. Die Ironie dieser Zeilen liegt vielleicht heute nicht mehr so auf der Hand wie damals. Ich konnte damals nicht voraussehen, daß einige Jahre später ein Fachgenosse die Ansicht vertreten würde, „daß der große Baumeister des Weltalls auf Grund eines bis in die Tiefe gehenden Einblicks in seine Schöpfung wie ein reiner Mathematiker auszu sehen beginnt“ **. Jeans hat vorher eine andere Erklärung in Betracht gezogen, sie aber verworfen. „So könnte man behaupten, daß der Mathematiker die Natur nur durch die mathematische Brille sieht, die er für sich selbst geschliffen hat.“

Indem Jeans diejenige Erklärung verwirft, die ich für die richtige halte, verbreitet er sich über die Fehlschläge anthropomorpher Theorien sowie der mechanischen Modelle zur Erklärung der Welt, denen er die Erfolge der mathematischen Betrachtungsweise gegenüberstellt. Es sind zwei Umstände, die nach meinem Dafürhalten den verhältnismäßig großen Erfolg des Mathematikers erklären. Erstens ist der Mathematiker ein Mann, der es berufsmäßig mit Symbolen zu tun hat; er weiß mit unbekannten Größen und sogar mit unbekannten Operationen fertig zu werden. Daher ist er offenbar der rechte Mann am rechten Platz, wenn es gilt, ein wenig Wissen aus einem unermesslichen Nichtwissen zu schöpfen. Der Hauptgrund aber, weswegen der Mathematiker seine Nebenbuhler aus dem Felde geschlagen hat, ist, daß wir es ihm überlassen haben, die Bedingungen des Zweikampfes zu stellen. Das Schicksal jeder Theorie des Weltalls wird durch die zahlenmäßige Prüfung entschieden. Geht die Rechnung auf? Ich bin keineswegs überzeugt,

* The Nature of the Physical World, S. 104 und 209. Das Weltbild der Physik, S. 107 und 208—209.

** Sir James Jeans, The Mysterious Universe, S. 134.

daß der Mathematiker diese unsere Welt besser begreift als der Dichter und der mystische Schwärmer. Vielleicht ist es nur das, daß er sich besser aufs Rechnen versteht.

IV.

Ich hoffe, der Leser wird den Nachdruck, den ich hier auf die der Physik gezogenen Grenzen lege, nicht falsch verstehen. Es ist nicht davon die Rede, daß der Stern der Physik im Verbleichen ist; wohl aber können wir heute den Beitrag besser abschätzen, den sie, jetzt und künftig, zur menschlichen Entwicklung und Kultur beizusteuern vermag. Innerhalb ihrer eigenen Grenzen hat die Physik durch diesen Umschwung außerordentlich an Kraft gewonnen. Sie ist ihrer Ziele sicherer geworden — und ihrer Leistungen vielleicht weniger sicher. Nach dem letzten verwirrenden Umsturz der physikalischen Theorie (durch die Wellenmechanik) kam ein Zeitraum von einigen Jahren, während derer die Pflege eines stetigen Fortschritts möglich war. Die überraschendsten Entwicklungen der jüngsten Zeit haben sich auf der Seite der Experimentalphysik vollzogen. In schneller Folge hat die künstliche Umwandlung der Elemente, die Entdeckung des Neutrons und die Entdeckung des positiven Elektrons die wissenschaftliche Welt in Staunen versetzt und der Forschung neue Bereiche zugänglich gemacht. Das jedoch ist in meinen Augen nur ein Zeichen für ein natürliches Gedeihen, aber kein Umsturz.

Wenn wir die schrittweise Entwicklung unseres physikalischen Erkenntnischemas überschauen, die nie in irgendeiner Richtung zu etwas endgültigem zu gelangen scheint, so gibt es Zeiten, in denen wir versucht sind, die Dauerhaftigkeit dessen, was wir gewonnen haben, anzuzweifeln. Fragen, die geklärt schienen, werden wieder zu offenen Fragen:

In Dunkel barg Natur ihr Angesicht.
Gott sprach: „Es werde Newton!“ Da ward Licht.
Nicht lange. Denn des Satans heulend „Ho!
Es werde Einstein!“ stellte her den status quo.

In meinem eigenen Fach, der Astronomie, ist es ganz besonders schwierig, zu wissen, in welchem Grade man wirklich festen Boden unter den Füßen hat. So manche Folgerung muß mit dem Warnungssignal „wenn“ versehen werden. Und oft haben sich gerade diejenigen Ergebnisse, die sich der größten Anerkennung erfreuten,

hinterher als die am wenigsten sicheren erwiesen. Wenn wir uns als unfähig erkennen, einige jener einfachen Grundfragen zu entscheiden, die in hohem Grade die Richtung bestimmen, die die astronomische Theorie einschlägt, so beschleichen uns Zweifel, ob ein Fortschritt im eigentlichen Sinne wirklich erzielt wurde. Dann aber erkennen wir blitzartig, daß wir zehn Jahre früher noch nicht einmal genug wußten, um überhaupt die Zweifel auszudrücken, die uns heute plagen. Manchmal dünkt es mich, daß das wahre Maß des Fortschritts unseres Wissens nicht in den Fragen liegt, die es zu beantworten gestattet hat, sondern in den Fragen, die es uns zu stellen veranlaßt.

Wenn ich von den neuen Bahnen der Naturwissenschaft spreche, so ist es ganz natürlich, daß ein größerer Nachdruck auf den Wandlungen liegt, als auf der lückenlosen Anknüpfung an das Vergangene. Oft mag es scheinen, daß wir in einem Zeitalter leben, das nur wenig Ehrfurcht vor der Überlieferung hat, und das alles niederreißt, was unsere Vorgänger in mühevoller Arbeit errichteten. Wir müssen ohne jede Schonung enthüllen, wie es gekommen ist, wenn die Forscher einer früheren Generation durch falsche Annahmen in die Irre geleitet wurden, und in welcher Hinsicht ihre Begriffe vom Weltall sich als unzutreffend erwiesen haben. Das aber, was sie uns an Bleibendem hinterlassen haben, das nutzen wir, und so kommen wir dem letzten Ziel Schritt für Schritt näher. Der Fortschritt hat etwas unerbittliches, aber in dieser Unerbittlichkeit liegt nichts willkürliches. Wir hegen die Saat, die unsere Vorgänger säten, nicht weniger zärtlich, wenn wir sie von Zeit zu Zeit in ein neues Erdreich pflanzen, auf daß sie freier aufwachsen möge. Das und nichts anderes bedeutet eine Umwälzung in der Naturwissenschaft. Als Einstein Newtons Theorie über den Haufen warf, nahm er Newtons Pflanze, der ihr Topf zu eng geworden war, und verpflanzte sie auf ein freies Feld.

Dieses ganze neue Wachstum der Naturwissenschaft streckt seine Wurzeln in die Vergangenheit. Wenn unser Blick weiter reicht als der Blick unserer Vorgänger, so danken wir es dem, daß wir auf ihren Schultern stehen — und wenn sie hier und da einen kleinen Stoß bekommen, während wir hinaufklettern, so ist das weiter nicht verwunderlich. Heute steigt ein jüngerer Geschlecht auf die Schultern der Generation, die die meine ist; und so wird es auch künftig immer wieder geschehen. Eine jede Stufe der Entwicklung der Wissenschaft hat ihren Beitrag zu dem geliefert, was

auf der nächsten Stufe von Bestand gewesen ist. Und das gibt uns die gewisse Zuversicht, daß das kommende Geschlecht in den heutigen Gedanken über das Weltall, die wir ihm hinterlassen, etwas vorfinden wird, was des Erhaltens wert ist — etwas das mehr ist als Schall und Rauch.

Diese künftigen Entwicklungen, die wir vorahnend schauen, gleichen der natürlichen Entfaltung einer Blume:

Denn aus dem alten Acker sieht entkeimen
Der Mensch von Jahr zu Jahr das neue Korn.
Und alte Schrift, in Treue aufgeschrieben,
Ist aller neuen Menschenweisheit Born.

NAMENVERZEICHNIS

- Adams, W. S. 147.
 Archimedes 120.
 Aston, F. W. 172
 Atkinson, R. d'E. 169.
- Bertrand, J. 117.
 Birge, R. T. 238.
 Blackett, P. M. S. 27.
 Bohr, N. 68.
 Bond, W. N. 238.
 Born, M. 68, 77.
 Bowen, I. S. 192.
 Broad, C. D. 70.
 de Broglie, L. 39.
- Cockcroft, J. D. 152.
 Condorcet, Marquis de 117.
- Dingle, H. 19.
 Dirac, P. M. 205, 223, 257, 258, 262, 278.
- Einstein, A. 12, 18, 156, 203, 205, 283, 284, 287.
- Faraday, M. 38.
 Fowler, R. H. 148.
 Friedmann, A. 201, 215.
 Fürth, R. 240.
- Hartmann, J. 177.
 Heinrich I. 217.
 Heisenberg, W. 38, 42, 44, 92.
 Hertzprung 144.
 Holmes, O. W. 58.
 Hubble, E. P. 197, 201.
 Humason, M. L. 201.
- Jeans, Sir J. H. 129, 309.
 Joad, C. E. M. 267, 274.
- Kelvin, Lord 62, 154.
- Lane, J. H. 128, 131, 144.
 Larmor, Sir J. 38, 173.
 Lemaitre, G. 201, 208, 215.
 Lindemann, F. A. 101.
 Lorentz, H. A. 38.
- Maxwell, J. Cl. 64, 221.
 Minkowski, H. 261.
- Occhialini, G. P. S. 27.
 Oort, J. H. 180.
- Pauli, W. 21, 33, 148.
 Pearce, J. A. 180.
 Planck, M. 35, 68, 281, 284.
 Plaskett, J. S. 180.
- Russell, B. (Earl Russel) 96, 242, 243, 291.
 Russel, H. N. 144.
 Rutherford, Lord 152, 283.
- Samuel, Sir H. 281.
 Schrödinger, E. 39.
 Schwarzschild, K. 183.
 de Sitter, W. 201.
 Slipher, V. M. 178, 201.
 Stace, W. T. 267, 269.
 Strömgren, B. 140.
 Struve, O. 179.
- Walton, E. T. S. 152.
 Weyl, H. 68, 203, 295.
 Whitehead, A. N. 45.
 Wilson, C. T. R. 27.

SACHVERZEICHNIS

- Absicht 56, 65.
- Absorption von Strahlung 35.
- in der kosmischen Wolke 179, 188.
- in den Sternen 134.
- Abstoßungskraft, kosmische 202, 209.
- Alltagsgeschichte und wissenschaftliche Geschichte 2.
- Alphateilchen 30, 170.
- Alter der Sonne 156, 159.
- des Weltalls 162, 199.
- Anfang der Welt 55, 57, 63, 208, 292.
- Anregung von Atomen 34, 101.
- Antizufall 56, 65.
- Äquivalenz von Energie und Masse 127, 156.
- Äther 36.
- , Masse des 44.
- Atome, Bau 27, 43, 245.
- , Ionisation der 30, 137.
- Atomkerne 28.
- , Bau der 30.
- , Beschießung von 31, 167.
- , Masse der 31.
- Atommodell, Bohrsches 32, 44.
- Ausschließungsmethode 114, 123, 225.
- Austauschenergie 228, 231.
- Außenwelt 8, 22, 42.

- Bahnsprünge der Elektronen 34, 100, 193, 245.
- Baumeister des Weltalls 309.
- Beobachter, idealer 12.
- Beobachtung und Theorie 200.
- Betastrahlen 30, 290.
- Beteigeuze 144, 161.

- Calcium, interstellares 177, 182, 190.
- Canticles 79.
- Cavendish-Laboratorium 137.
- Cavendish-Versuch 240.
- Cepheiden 165, 197.

- Chemie, Gesetze der 33.
- Chlorisotope 28.
- Coulombsche Energie 223, 227, 230.

- Daseinsformen 16.
- Denken, Achtung vor dem 85, 302.
- Determinismus 68, 281.
- , Definition des 70.
- und Willensfreiheit 80, 286.
- Deuterium 29.
- Deutonen 29.
- D-Linie des Natriums 177, 190.
- Dogmatismus 289.
- Doppelsterne 177, 228.
- Drehimpuls 99.
- , Unschärfe des 100.
- Druck im Innern der Sonne 131.
- , Wirkung auf die Materie 150.
- Dualismus 17.

- Edelgase 33.
- Elektronen 19, 25.
- , äußere 27.
- im Kern 26.
- , Wellengleichung des 215, 234.
- , Wellennatur des 40, 96.
- Elektronenmasse 231, 235.
- Elektronenspin, -drall 39, 262.
- Elemente, Zahl der 28.
- , Umwandlung der 31, 152, 158, 167.
- Emission von Strahlung 34.
- Endlichkeit des Raumes 47, 102, 206.
- Energie, zwei Formen der 158.
- , Erhaltung der 103, 290.
- , Zerrüttung der 52.
- , inneratomare 136.
- , —, Freimachung der 166.
- , —, Nutzbarmachung der 155.
- , irreduzible 102.
- Energiequellen der Sterne 136, 156.
- Entartung der Materie 149.
- Entfernungstabelle, astronomische 196.
- Entropie 51.

- Entwicklung 50, 54.
 — der Elemente 31, 159.
 — der Sterne 160.
 Erfahrungsproblem 85, 296.
 Erhaltung der Energie 103, 290.
E-Symbole 224, 255, 262.
 Existenz 23, 277.
 Expansion des Raumes 204, 206.
 — des Weltalls 63, 200.
- Farbensinn 4, 11.
 Feinstrukturkonstante 220, 222, 237.
 Feld 37.
 —, metrisches 37.
 Feld-Materie-Theorie 38.
 Fermi-Dirac-Statistik 226.
 Fluoreszenz 191.
 Freier Wille 80, 84, 286, 288.
 Freiheitsgrade 230.
- Ganze Zahlen in der Außenwelt 22.
 Gas, unvollkommenes 146.
 Gegebenheiten, sinnliche 10, 17, 270.
 —, ursprüngliche 7, 268.
 Gehirn und Geist 83.
 Geist und Determinismus 81.
 — — Entropie 65.
 — — Richtung des Zeitablaufs 49.
 — — sinnliche Gegebenheiten 270.
 Geistiger Bereich 269.
 Geistiges Wesen des Menschen 297.
 — — der Wirklichkeit 307.
 Gemeinsame Objekte 268.
 Gemeinverständliche Darstellungen 264.
 — —, Dogmatismus in 289.
 Geometrisierung der Physik 11.
 Gepaarte Größen 94.
 Geschlossenheit des Raumes 47, 206, 240.
 Geschwindigkeit, dynamische 229.
 — nicht unterscheidbarer Teilchen 229.
 —, Unschärfe der 95.
 Gesetze, primäre 75.
 —, sekundäre 75, 122.
 —, statistische 75, 122, 285.
 Goldstandard 76.
 Gravitationsgesetz 127, 183.
 Grenzen der Physik 301, 310.
- Gruppen 249.
 Gruppenstruktur 243, 260, 304.
- Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit 108.
 Hauptast der Sternentwicklung 163.
 Hauptsatz, 2., der Wärmelehre 51.
 —, —, im geschlossenen Raum 62.
 —, —, bei bewußten Wesen 64.
 Helium, Bildung von 158, 169.
 —, Isotop des 169.
 —, Kern des 30.
H-Linie des Calciums 177, 182, 189.
 Hypersphäre 207, 238.
 Hypothesen 9, 252.
- Ich 83.
 Impuls und Raumkrümmung 44, 103.
 — nicht unterscheidbarer Teilchen 230.
 —, Unschärfe der 95.
 Indeterminismus der Gegenwart 92, 95.
 (siehe auch Unschärferelation.)
 Indeterministische Gesetze 76, 285.
 Indifferenzprinzip 116, 127.
 Instabilität von Atomen 31, 169.
 — von Sternen 165.
 — des Weltalls 209.
 Interstellare Materie (siehe kosmische Wolke).
 Intervall 261.
 Ionisation 30, 137.
 — der Sternmaterie 190.
 Irreversible Vorgänge 62.
 Irrtum vorbehalten 20.
 Isotope 28.
 — des Kaliums 90, 99.
 Isotropie, Ursache der 126.
- K*-Linie des Calciums 177, 182, 190.
 Kauderwelsch 242.
 Kausalitätsgesetz 70, 80, 282.
 Koinzidenzen als Beobachtungstatsachen 17, 21.
 Korrespondenzprinzip 73.
 Kosmische Wolke 175.
 —, Dichte der 183.
 —, Temperatur der 187.
 Kosmische Abstoßung 202.

- Kosmische Strahlen 34, 156, 170.
 Kosmologische Konstante 44, 203,
 209, 211, 218, 234.
 Kraft, Ursprung der 202, 228.
 Krümmung der Raum-Zeit-Welt 44,
 103, 202, 301.
 Kryptogramm 7, 10, 48.
 K-Schale 32, 35.
 Kummersche Fläche 4. Grades 257.
 Längennormale 217.
 —, Relativität der 203, 212.
 Leben 296, 297.
 Leib und Seele 65, 81, 299.
 Leuchtkraft der Sterne 129, 134,
 140, 144.
 Licht, siehe Strahlung.
 Lichtelektrischer Effekt 35, 188.
 Lichtelektrische Zelle 13.
 Linien, verbotene 192.
 L-Schale 32, 35.
 Luft 177, 194.
 Makroskopische u. mikroskopische
 Theorie 19, 125, 232.
 Mannigfaltigkeiten, reine 250.
 Masse der Elektronen und Protonen
 218, 231, 235.
 — der Sonne 131.
 — des Weltalls 209.
 —, Äquivalenz mit der Energie 127,
 156.
 —, Ursprung der 103, 236.
 Massendefekte 31, 158.
 Massenverhältnis von Proton und
 Elektron 220, 231, 235, 237.
 Masse-Leuchtkraft-Gesetz 145.
 Materie, überdichte 147.
 Mathematiker und Mechaniker 308.
 Maxwellscher Teufel 64.
 Mensch 297, 302.
 Meteore 156, 191.
 Meter und Meterstab 212.
 Metrisches Feld 37.
 Mikroskopische u. makroskopische
 Theorie 19, 125, 232.
 Milchstraße, Rotation der 180.
 Milchstraßen 195.
 —, Radialbewegungen der 198, 209.
 Modellvorstellungen 252.
 Multillionen 56.
 Natrium, interstellares 177, 182, 190.
 Naturgesetze 8.
 —, primäre und sekundäre 75.
 —, kausale und statistische 75.
 Naturkonstanten, ursprüngliche 218.
 —, numerische 220.
 Nebel, dunkle 174, 191.
 —, galaktische u. außergalaktische
 195.
 —, gasförmige 174, 185, 191..
 — (wellenmechanisch) 39, 233.
 Nebulium 191.
 Negatron 27, 172.
 Nervensignale 3, 6.
 Neutraler Bereich 269.
 Neutronen 29, 30, 171.
 — in den Sternen 143.
 Nichtunterscheidbarkeit von Teil-
 chen 227, 238.
 Nichtwasserstoff 29, 139, 159.
 Nichtwissen und Wahrscheinlichkeit
 116, 127.
 Oort-Effekt 180.
 Operatoren 247, 249, 254.
 —, erschöpfende 250.
 —, fraktionierende 251.
 —, idempotente 250.
 —, raumähnliche 263.
 —, selektive 249.
 Ordnung 52.
 Ordnungszahl 28.
 Ordnungszerstörung 52.
 Organisation 52.
 Organismus 298.
 Ozonschicht in der Atmosphäre 183.
 Pauliverbot 21, 33, 102, 148.
 Periodisches System der Elemente
 33.
 Permutationsvariable 230.
 Perseus, Sternhaufen im 179.
 Philosophen 5, 22, 267.
 Philosophie, realistische 267, 274,
 275.
 Photonen 35, 137.
 Physik, Grenzen der 301, 310.
 —, primäres und sekundäres Ziel
 der 72.
 —, Vereinheitlichung der 10, 221.
 Pluto 28.

- Positronen 26, 30, 171.
 Prinzip der kleinsten Wirkung 222.
 Protonen 26.
 —, Masse der 235.
 — in der Sonne 138.
 —, Umwandlung von 167.
 Prüfungsfrage 115.
 Psi (ψ) 42, 104.
 Pulsation der Sterne 129, 165.
 Pythagoreischer Lehrsatz 259, 260.
 Quantengesetze 35, 188.
 Quantentheorie und Relativitätstheorie 19, 39, 124, 232.
 —, Kritik der 213, 227, 233.
 Radialgeschwindigkeiten der Spiralnebel 241.
 Radioaktivität 31, 78, 90, 99, 158.
 Raum, endlicher, aber unbegrenzter 47, 102, 206.
 —, geschlossener 47, 206, 240.
 —, interstellarer 174.
 —, leerer 46.
 —, sphärischer 48, 207.
 — und Äther 36.
 — — Zeit 262.
 —, Expansion des 204, 207.
 Relativitätstheorie 17, 97, 123, 147, 212.
 — und Quantentheorie 19, 39, 124, 232.
 Religion 291, 302.
 Riesensterne 144, 163.
 Röntgenstrahlen 34, 35.
 — in den Sternen 133, 137.
 Rotation der Milchstraße 180.
 — — Sonne 176.
 — — der Sterne 140.
 Rotverschiebung der Spektrallinien 201.
 Rückentwicklung 51.
 Rückwirkende Merkmale 89, 92.
 Sauerstoff 177, 193.
 Schlußfolgerungen 8, 87.
 —, rückwirkende 88.
 —, weit hergeholte 5, 266.
 —, System von 120.
 Schöpfung 292, 309.
 Schwankungen der Entropie 59.
 Sieb 253.
 Siriusbegleiter 147.
 Sonne, Abmessungen der 131.
 —, Alter der 156, 159.
 —, Energie der 156.
 —, Rotation der 176.
 Sonnenfinsternisse, Vorhersage 78.
 Spektrum 35, 130, 183.
 —, Rotverschiebung des 201.
 — gasförmiger Nebel 191.
 Spin 39, 262.
 Spiralnebel 195.
 —, Zurückweichen der 198, 209.
 Springerzüge 246.
 Statistik, neue 148, 226.
 Statistische Gesetze 75, 122, 285.
 Stefansche Konstante 221.
 Sterne, allgemeine Merkmale 129.
 Sterntemperaturen an der Oberfläche 129.
 — im Innern 131, 167.
 Stickstoff 177, 193.
 Strahlung der gasförmigen Nebel 191.
 — der Sonne 156.
 — im interstellaren Raum 187.
 — im Sterninnern 134, 137.
 Strenge, wissenschaftliche 244, 265.
 Struktur 15, 243, 249.
 Subjektives Element der Physik 42, 98, 278.
 Teilchen, sehr schnelle 31, 167.
 —, nicht unterscheidbare 227.
 Teilchenzahl im Weltall 209, 236, 240, 241.
 Temperatur der Sterne, siehe Sterntemperaturen.
 — der kosmischen Wolke 187.
 Tensor, metrischer 125, 239.
 Teufel, Maxwellscher 64.
 Theorie und Beobachtung 200.
 Thermodynamik 72.
 Thermodynamisches Gleichgewicht 53, 58.
 Trübheit der Sternmaterie 134, 139.
 Überdichte Materie in Sternen 147.
 Übergänge, verbotene 192.
 Übermathematik 244, 248, 257.
 Ultrastrahlen 34, 156, 170.
 Umkehrprinzip 54.

- Umwälzung der Naturwissenschaft 312.
- Umwandlung der Elemente 31, 152, 158, 167.
- Unbestimmtheitsrelation
 siehe Unschärferelation.
- Undeterminiertheit der Zukunft 70.
- , Größe der 77, 82, 95.
- Unendlichkeit 206.
- Unkennbare Größen 92.
- Koordinaten 230.
- Unmöglich und unwahrscheinlich 61, 74.
- Unordnung 52.
- Unschärferelation 42, 66, 92, 97, 235.
- Ursache und Wirkung 70.
- Vakuum 46, 144, 186.
- Verantwortungsgefühl 84, 297.
- Vereinheitlichung der Physik 10, 221.
- Vergleichsdinge und Normale 212.
- Vernichtung der Materie 157, 171.
- von Protonen 26, 171.
- Verpersönlichung 304.
- Verständiger Mensch 106, 113.
- Verzug, zeitlicher, der Energiefreimachung 166, 169.
- Vierte Dimension 260.
- Vorherbestimmung 70, 79, 88.
- Wahrheit 296.
- Wahrscheinlichkeit 39, 60, 104.
- , inverse 119, 121.
- Wahrscheinlichkeitsverteilung 45, 123, 124, 226, 232, 236, 238.
- a priori 45, 123, 126, 236.
- Wärme, Wesen der 52, 132.
- , zwei Arten der 132.
- Wärmehaushalt der Sonne 135, 154, 156.
- Wärmequellen der Sterne 135, 142, 154, 155.
- Wärmestrahlung 132.
- Wärmemethod 55.
- Wasser, schweres 29, 251.
- Wasserkugel, maximale Größe 183.
- Wasserstoff, Atom 28.
- in den Sternen 140.
- , Umwandlung des 158, 168.
- Wasserstoff, schwerer 29, 251.
- Wechselwirkung 225.
- Wegweiser für die Zeit 49, 63.
- Wellen, elektromagnetische 34,
 siehe auch Strahlung.
- und Stoff 305.
- Wellenfunktionen 213, 214, 233.
- Wellengleichung des Elektrons 214, 234.
- Wellenmechanik 39, 101, 122, 140, 233.
- Wellenpakete 96.
- Weltall, Expansion des 200.
- , Masse des 209, 235.
- , kennbares 98.
- als Vergleichsding 214.
- der Wahrscheinlichkeiten 122.
- Werden 49.
- Wiederholungen in der Erfahrung 8.
- Willen 83.
- Willensfreiheit 80, 84, 286, 288.
- Wirklichkeit 23, 277, 304.
- , objektive 1, 42, 43, 98.
- Wirkungsatome 222.
- Wirkungsquantum 35, 95, 218, 219, 223.
- Wissenschaftliche und alltägliche Geschichte 2.
- Yard 212.
- Zeigerablesungen 13, 14, 243.
- Zeit, Wegweiser für die 49, 63.
- und Raum.
- Zeitdauer der Sternentwicklung 63, 156, 159, 162, 199.
- Zerstreuung der Energie 62.
- Zurückweichen der Spiralnebel 198, 209.
- Zusammendrückbarkeit der Materie 145, 150.
- Zusammenstöße von Atomen 138, 187.
- Zusammentreffen, zufälliges, von Umständen 57, 61, 84.
- Zwergsterne 144.
- , weiße 147, 163.
- Zyklisches Schlußverfahren 280.
- Weltall 55.

ZITATE

- Archimedes 210.
Bohr, N. 68.
Born, M. 68, 77.
Braithwaite, R. B. 264.
Broad, C. D. 70.
Chaucer 312.
Dickens, Ch. 264.
Dodgson siehe Lewis Carroll.
Einstein, A. 283, 284.
Holmes, O. W. 59.
Jeans, Sir J. 309.
Joad, C. E. M. 275, 280.
Keats 174.
Laplace, P. S. 70, 104, 184.
Lewis Carroll 208, 242, 243.
Milton 195.
Omar Khayyam 71.
Planck, M. 68, 284, 285, 286.
Poincaré, H. 1.
Rossetti, D. G. 300.
Russell, Earl 242, 292.
Rutherford, Lord 283.
Shakespeare 25, 128, 186.
Stace, W. T. 269.
Swift 152.
Unbekannte Autoren 47, 58, 310.
Virgil 217.
Weyl, H. 68, 295.
Whitehead, A. N. 45.
Wordsworth 194.