

Die Plancksche Entdeckung und die philosophischen Grundfragen der Atomlehre*)

VON W. HEISENBERG, Göttingen

7064
HEISENBERG, W.
1958

Wenn im folgenden von den philosophischen Auswirkungen der Planckschen Entdeckung die Rede sein soll, so muß zuvor die Frage aufgeworfen werden, wie überhaupt eine spezielle naturwissenschaftliche Entdeckung etwas mit allgemeinen philosophischen Problemen zu tun haben kann. Offenbar ist dies nur dann möglich, wenn durch die Entdeckung Fragen sehr allgemeiner Art gestellt oder beantwortet werden; Fragen, die nicht so sehr ein spezielles Gebiet der Naturwissenschaft als vielmehr die wissenschaftliche Methode schlechthin oder die Grundvoraussetzungen aller Naturwissenschaft zum Ziel haben. Das berühmte Beispiel dafür, daß dies möglich ist, gibt in der Physik die Newtonsche Mechanik, die zum Beginn der Neuzeit neu die Frage gestellt hat, was überhaupt mit dem Wort „Verständnis“ oder „Erklärung der Natur“ gemeint sein könne. Der außerordentliche Einfluß der Newtonschen „Principia“ auf das Denken der folgenden Jahrhunderte beruhte nicht auf den speziellen Axiomen oder Ergebnissen dieser Newtonschen Mechanik – etwa auf der bekannten Formel: Kraft = Masse $\times$ Beschleunigung –, sondern auf der Tatsache, daß zum erstenmal Naturerscheinungen in ihrem zeitlichen Ablauf mathematisch beschrieben werden konnten, also auf dem Nachweis, daß eine solche mathematische Naturbeschreibung grundsätzlich möglich ist.

Wenn in dieser Weise spezielle Entdeckungen in der Naturwissenschaft Einfluß gewinnen können auf das Denken ganzer Jahrhunderte, so äußert sich dieser Einfluß doch nicht darin, daß die Entdeckungen etwa eine Entscheidung herbeiführten zwischen verschiedenen widerstreitenden philosophischen Systemen oder daß sie die sichere Grundlage schufen für ein neues derartiges System. So eng kann der Zusammenhang zwischen Naturwissenschaft und Philosophie nie werden. Auch die folgenden Überlegungen dürfen nicht dahin mißverstanden werden, als sollte von der Quantentheorie oder der Atomtheorie hier Stellung genommen werden für oder gegen eines der früheren oder heutigen philosophischen Systeme. Das Interesse des Naturforschers an den philosophischen Denkweisen ist von anderer Art. Ihn interessieren vor allem die Fragestellungen, erst in zweiter Linie die Antworten. Die Fragestellungen scheinen ihm wertvoll, wenn sie in der Entwicklung des menschlichen Denkens fruchtbar geworden sind. Die Antworten können in den meisten Fällen nur zeitbedingt sein; sie müssen durch die Erweiterung unserer Kenntnisse von den Tatsachen im Lauf der Zeit an Bedeutung verlieren. Insbesondere würde es dem Geist der Naturwissenschaft in jeder Weise zuwider laufen, wenn man versuchen wollte, irgendwelche bestimmten Antworten zum Dogma zu erheben. Wir müssen also im Gegenteil versuchen, ohne Vorurteil aus den neuen Tatsachen und aus den alten und neuen Fragestellungen so viel wie möglich zu lernen.

Nach diesen Vorbemerkungen soll die Frage nach der philosophischen Bedeutung der Planckschen Entdeckung gestellt werden. Welche Fragen allgemeiner Art sind damals durch eine Erkenntnis über das doch sehr spezielle Problem der Wärmestrahlung aufgeworfen worden? Was kann die Plancksche Formel¹⁾

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

für die Philosophie bedeuten? Man kann den grundsätzlichen Charakter des Neuen, das im Jahr 1900 durch PLANCK in die moderne Naturwissenschaft eingetreten ist, vielleicht am besten durch den Hinweis deutlich machen, daß hier jenes Problem erneut zur Diskussion gestellt wurde, um das bereits vor zweieinhalb Jahrtausenden PLATO und DEMOKRIT gerungen haben, das den entscheidenden Punkt der Meinungsverschiedenheit zwischen diesen beiden Philosophen bezeichnet hat.

Hier muß kurz ein Blick auf die Geschichte der griechischen Atomphilosophie geworfen werden. Das systematische Denken der griechischen Naturphilosophen von THALES bis DEMOKRIT hatte schließlich zur Frage nach den kleinsten Teilen der Materie geführt. An die Stelle der in die Paradoxie mündenden Polarität von Sein und Nichtsein bei PARMENIDES hatte DEMOKRIT die Polarität zwischen dem Vollen und dem Leeren, nämlich zwischen den Atomen und dem leeren Raum, gesetzt. Das Seiende war nach DEMOKRIT unendlich oft vorhanden, eben als kleinster, unveränderlicher und unteilbarer Bestandteil der Materie. Das verschiedenartige Geschehen in der Welt erklärte sich durch die verschiedenartige Lagerung und Bewegung der Atome im leeren Raum. Ebenso, wie die Tragödie und die Komödie mit den gleichen Buchstaben geschrieben werden können, so kann, nach DEMOKRIT, sehr verschiedenartiges Geschehen durch die gleichen Atome verwirklicht werden. Nach dem Wesen der Atome aber, warum sie gerade so und nicht anders seien, wurde nicht mehr gefragt. Die Atome waren das schlechthin Gegebene, sie waren unteilbar, unveränderlich, das eigentlich Seiende, aus dem alles zu erklären war, das aber selbst keiner Erklärung mehr bedurfte.

Auch PLATO hat wesentliche Elemente der Atomlehre übernommen. Den vier Elementen: Erde, Wasser, Luft und Feuer, entsprechen bei ihm vier Sorten kleinster Teilchen. Diese Elementarteilchen sind nach PLATO mathematische Grundgebilde von hoher Symmetrie. Die kleinsten Teile des Elements Erde werden als Würfel, die des Elements Wasser als Ikosaeder, die des Elements Luft als Oktaeder und schließlich die des Elements Feuer als Tetraeder vorgestellt. Aber diese Elementarteilchen sind bei PLATO nicht unteilbar. Sie können in Dreiecke zerlegt und

*) Vortrag, gehalten am 25. April 1958 in Berlin bei der Feier von MAX PLANCKs 100. Geburtstag.

¹⁾ Hierin bedeuten: ρ_ν die räumliche Dichte der Hohlraumstrahlung von der Schwingungszahl ν , h und k die Plancksche und die Boltzmannsche Konstante, T die absolute Temperatur und c die Lichtgeschwindigkeit.

aus Dreiecken wieder aufgebaut werden. Daher kann z.B. aus zwei Elementarteilchen Luft und aus einem Elementarteilchen Feuer ein Elementarteilchen Wasser aufgebaut werden. Die Dreiecke selbst sind nicht Materie, sie sind nur noch mathematische Form. Bei PLATO ist also das Elementarteilchen nicht das schlechthin Gegebene, Unveränderliche und Unteilbare; es bedarf noch einer Erklärung, und die Frage nach dem Warum der Elementarteilchen wird von PLATO auf Mathematik zurückgeführt. Die Elementarteilchen haben die ihnen von PLATO zugeschriebene Form, weil sie die mathematisch schönste und einfachste Form ist. Die letzte Wurzel der Erscheinungen ist also nicht die Materie, sondern das mathematische Gesetz, die Symmetrie, die mathematische Form. Der Kampf um den Primat der Form, des Bildes, der Idee auf der einen Seite über die Materie, das materiell Seiende auf der anderen oder umgekehrt der Materie über das Bild, also der Kampf zwischen Idealismus und Materialismus hat in der Geschichte der Philosophie immer wieder das menschliche Denken in Bewegung gesetzt. Dem Naturwissenschaftler mag der Unterschied zwischen den beiden Auffassungen manchmal nicht allzu wichtig erscheinen. Aber schon PLATO selbst hat den Gegensatz als so tief empfunden, daß er den Wunsch geäußert haben soll, die Bücher des DEMOKRIT sollten verbrannt werden.

Was aber hat die Plancksche Entdeckung mit dieser alten Frage zu tun? Für die Chemie des 19. Jahrhunderts waren die Atome als die kleinsten Teile der chemischen Elemente gegeben. Sie waren nicht mehr selbst Gegenstand der Forschung. Der Zug von Diskontinuität oder Unstetigkeit, der sich in der atomaren Struktur der Materie gezeigt hatte, mußte zunächst ohne Erklärung hingenommen werden. Die Plancksche Entdeckung aber machte offenbar, daß dieses selbe Element von Unstetigkeit noch an anderen Stellen, nämlich in der Wärmestrahlung, auftritt, wo es sicher nicht einfach als Folge der atomaren Struktur der Materie aufgefaßt werden kann. In anderen Worten: Die Plancksche Entdeckung legte den Gedanken nahe, daß dieser Zug von Unstetigkeit im Naturgeschehen, der sich in der Existenz der Atome und in der Wärmestrahlung unabhängig äußert, als Folge eines viel allgemeineren Naturgesetzes verstanden werden müßte. Damit tritt also von neuem der Gedanke PLATONS in die Naturwissenschaft ein, daß der atomaren Struktur der Materie letzten Endes ein mathematisches Gesetz, eine mathematische Symmetrie zugrunde liege. Die Existenz der Atome oder der Elementarteilchen als Ausdruck einer mathematischen Struktur, das war die neue Möglichkeit, die PLANCK mit seiner Entdeckung aufgezeigt hatte, und hier berührt er Grundfragen der Philosophie.

Freilich war der Weg zu einem wirklichen Verständnis dieser Zusammenhänge noch sehr weit. Zunächst verging noch einmal ein Vierteljahrhundert, bis auf Grund der Bohrschen Theorie des Atombaus eine widerspruchsfreie mathematische Formulierung der Planckschen Quantentheorie gegeben werden konnte. Aber auch damit war man noch weit von einem vollen Verständnis der Struktur der Materie entfernt.

Immerhin war mit der Planckschen Entdeckung ein ganz neuer Typus von Naturgesetz als möglich erkannt worden, und damit kommen wir zu spezielle-

ren physikalischen Fragen. Die früher mathematisch formulierten Naturgesetze, etwa in der Newtonschen Mechanik oder in der Wärmelehre, enthielten als sogenannte „Konstanten“ nur die Eigenschaften der Körper, auf die sie angewendet werden sollten. Es gab in ihnen aber keine Konstanten vom Charakter eines universellen Maßstabs. Die Gesetze der Newtonschen Mechanik z.B. konnten im Prinzip auf die Bewegung eines fallenden Steins, auf die Bahn des Mondes um die Erde oder den Stoß eines atomaren Teilchens angewandt werden. Überall schien grundsätzlich das Gleiche zu geschehen. Die Plancksche Theorie enthielt aber das sogenannte „Plancksche Wirkungsquantum“. Damit war ein bestimmter Maßstab in der Natur gesetzt. Es war klargestellt, daß die Phänomene dort, wo die vorkommenden Wirkungen sehr groß gegen die Plancksche Konstante sind, grundsätzlich anders ablaufen als dort, wo sie mit dem Planckschen Wirkungsquantum vergleichbar werden. Da die Ereignisse unserer täglichen Erfahrungen stets mit Wirkungen zu tun haben, die sehr groß gegen die Plancksche Konstante sind, war die Möglichkeit angedeutet, daß die Phänomene im atomaren Bereich Züge aufweisen, die sich unserer unmittelbaren Anschauung überhaupt entziehen. Es konnte sich um Vorgänge handeln, die zwar noch in ihren Auswirkungen experimentell beobachtet und rational mit den Mitteln der Mathematik analysiert werden können, von denen wir uns aber kein Bild mehr machen können. Der unanschauliche Charakter der modernen Atomphysik beruht letzten Endes auf der Existenz des Planckschen Wirkungsquantums, auf dem Vorhandensein eines Maßstabs von atomarer Kleinheit in den Naturgesetzen.

Schon wenige Jahre nach der Planckschen Entdeckung sind zum zweiten Male Naturgesetze formuliert worden, die eine solche Maßstabskonstante enthalten. Diese zweite Konstante selbst, die Lichtgeschwindigkeit, war allerdings den Physikern schon lange Zeit bekannt. Ihre grundsätzliche Rolle als Maßstab in den Naturgesetzen ist aber erst durch EINSTEINS Relativitätstheorie verstanden worden. Zwischen Raum und Zeit, den scheinbar ganz unabhängigen Anschauungsformen, in denen wir das Geschehen begreifen, bestehen Beziehungen, und in der mathematischen Formulierung dieser Beziehungen erscheint die Lichtgeschwindigkeit als die charakteristische Konstante. Unsere tägliche Erfahrung hat fast immer mit Bewegungsvorgängen zu tun, die langsam im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit ablaufen. Daher ist es nicht überraschend, wenn unsere Anschauung versagt bei Vorgängen, die sich mit Geschwindigkeiten in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit abspielen. Die Lichtgeschwindigkeit ist ein von der Natur gesetztes Maß, das nicht über bestimmte Dinge in der Natur, sondern über die allgemeine Struktur von Raum und Zeit Auskunft gibt. Unserer Anschauung ist diese Struktur aber nicht mehr unmittelbar zugänglich.

Als die grundsätzliche Bedeutung der beiden universellen Naturkonstanten, des Planckschen Wirkungsquantums und der Lichtgeschwindigkeit, erkannt war, lag es nahe, die Frage zu stellen, wieviele unabhängige derartige Naturkonstanten es überhaupt geben kann. Die Antwort lautet, daß es mindestens drei solche universelle Konstanten geben muß, daß aber wahrscheinlich alle anderen Naturkonstanten durch zum

Teil noch unbekannte mathematische Beziehungen auf diese drei zurückgeführt werden können. Daß gerade drei solche unabhängige natürliche Maßeinheiten existieren müssen, kann sich der Physiker oder Techniker am einfachsten durch die Überlegung klarmachen, daß schon die üblichen physikalischen oder technischen Maßsysteme stets drei solche Maßeinheiten enthalten, etwa die Einheit der Länge, der Zeit und der Masse: Zentimeter, Sekunde und Gramm. Wenn man an die Stelle dieser drei, durch Konvention festgesetzten Maßeinheiten natürliche Maßeinheiten setzen will, so muß man also dem Planckschen Wirkungsquantum und der Lichtgeschwindigkeit noch eine weitere Konstante zufügen. Die atomare Struktur der Materie legt es nahe, als dritte Einheit eine Länge von atomarer Größenanordnung zu wählen, etwa eine Länge von der Ordnung des Durchmessers einfacher Atomkerne. Eine präzise Formulierung dieser Längeneinheit aber kann erst gegeben werden, wenn es gelingt, die Naturgesetze mathematisch auszudrücken, in denen die Längeneinheit als wesentliche Größe vorkommt. Wieder würde man erwarten, daß unsere anschaulichen Begriffe für Phänomene anwendbar sind, die sich in Räumen abspielen, die groß gegen jene atomare Längeneinheit sind, daß dagegen im Bereich der kleinsten Länge, wie man diese Konstante auch genannt hat, die Erscheinungen wesentlich anders als in unserer gewohnten Welt ablaufen.

Aber mit dieser Überlegung eilen wir der Entwicklung, so wie sie sich in den vergangenen Jahrzehnten wirklich vollzogen hat, weit voraus. Zunächst hatte die Plancksche Entdeckung ja nur die Möglichkeit sichtbar gemacht, die atomare Struktur der Materie auf mathematisch formulierte Naturgesetze, d.h. auf mathematische Formen, zurückzuführen. Obwohl man sich damals kaum eine Vorstellung davon bilden konnte, um was für mathematische Formen es sich dabei schließlich handeln würde, so war doch der Atomphysik damit ein Ziel gesetzt. Der Blick der Naturforscher wurde gerichtet auf den noch fernen Gipfel der Atomtheorie, von dem aus nicht nur die Existenz der Elementarteilchen und aller aus ihnen bestehenden atomaren Gebilde, sondern damit indirekt die physikalischen Zusammenhänge der Welt überhaupt als Folge einfacher mathematischer Strukturen erkannt werden konnten. An dieser Stelle trafen sich die Hoffnungen der Atomphysiker mit den Wünschen ALBERT EINSTEINS, der in den zwanziger Jahren den Plan entwickelte, von der allgemeinen Relativitätstheorie ausgehend zu einer einheitlichen Feldtheorie vorzustoßen. Das Nebeneinander verschiedener, scheinbar unabhängiger Kraftfeldarten war schon seit dem Entstehen der Einsteinschen Gravitationstheorie als unbefriedigend empfunden worden. Als Kraftfelder waren den Physikern seit langer Zeit eben das Gravitations- oder Schwerefeld und die elektromagnetischen Kräfte bekannt. Dazu kamen in unserem Jahrhundert die Materiewellen, die man auch als Kraftfelder der chemischen Bindung bezeichnen kann, schließlich die vielen verschiedenen Wellenfelder, die den verschiedenen, in den letzten Jahrzehnten entdeckten Elementarteilchen im Sinne der Quantentheorie zugeordnet sind. EINSTEIN hatte die Hoffnung, man werde alle diese Kraftfelder als Aussagen über die von Ort zu Ort variierende geometrische Struktur des Raumes und der Zeit auffassen und durch die

Beziehung zwischen Geometrie und Materie auf eine gemeinsame Wurzel zurückführen können.

Bei diesem Versuch betrachtete EINSTEIN die in der allgemeinen Relativitätstheorie versuchte Deutung des Gravitationsfeldes durch eine ortsabhängige Geometrie als grundlegend, während er die von PLANCK aufgedeckten quantentheoretischen Gesetzmäßigkeiten als sekundär empfand. Die ganz andersartige mathematische Formulierung der Planckschen Quantentheorie, über die nachher noch gesprochen werden muß, konnte EINSTEIN nicht als endgültig anerkennen, da sie seinen philosophischen Vorstellungen von der Aufgabe der exakten Naturwissenschaften nicht entsprach. Er empfand es als unbefriedigend, wenn die Naturgesetze sich nicht auf die objektiven Vorgänge, sondern auf die Möglichkeit, auf die Wahrscheinlichkeit solcher Vorgänge beziehen sollten. Andererseits erschien den Atomphysikern gerade die Plancksche Quantentheorie als der eigentliche Schlüssel zum Verständnis der Zusammenhänge. Daher mußten sie versuchen, zu einer einheitlichen Feldtheorie auf dem Weg über die Quantentheorie der Elementarteilchen vorzudringen. Der Gegensatz zwischen Kraft und Stoff, der in der Naturphilosophie des 19. Jahrhunderts eine gewisse Rolle gespielt hatte, war ja in der Quantentheorie längst aufgelöst in dem mathematisch analysierten Dualismus zwischen Welle und Korpuskel oder zwischen Kraftfeld und materiellen Elementarteilchen, so daß der Weg von hier aus zu einer einheitlichen Feld- und Materietheorie grundsätzlich offen schien.

Bevor wir diesem Weg, soweit er bisher gegangen werden konnte, und damit der Entwicklung der letzten zehn Jahre folgen, muß aber noch auf die erkenntnistheoretische Situation eingegangen werden, die durch die Plancksche Entdeckung und ihre präzise mathematische Formulierung in den zwanziger Jahren entstanden war. Schon vorhin war die Rede von einem neuen Typus Naturgesetz, bei dem in der Natur gegebene Maßeinheiten auftreten. Vielleicht sollte man richtiger sagen, daß es sich um mathematisch formulierbare Grundstrukturen der Natur handelt; denn schon der Begriff des Gesetzes ist beinahe zu eng, um diese sehr allgemeinen Zusammenhänge zu fassen. Es wurden zwei solche Zusammenhangsbereiche erwähnt: die Quantentheorie und die Relativitätstheorie. Diese beiden Theorien haben einschneidende Veränderungen in unserem Weltbild hervorgerufen, weil sie uns klargemacht haben, daß die anschaulichen Vorstellungen, mit denen wir die Dinge unserer täglichen Erfahrung ergreifen, nur in einem beschränkten Erfahrungsbereich gelten, daß sie also keineswegs etwa zu den unumstößlichen Voraussetzungen der Naturwissenschaft gehören.

In der Quantentheorie handelt es sich speziell um die Frage der objektiven Beschreibung der physikalischen Vorgänge. In der früheren Physik war die Messung der Weg zur Feststellung objektiver, von der Messung unabhängiger Sachverhalte. Diese objektiven Sachverhalte konnten mathematisch beschrieben, ihr Kausalzusammenhang dadurch streng festgelegt werden. In der Quantentheorie ist zwar die Messung selbst auch noch ein objektiver Sachverhalt, ebenso wie in der früheren Physik; aber der Schluß von der Messung auf den objektiven Ablauf des zu messenden atomaren Geschehens wird problematisch,

da die Messung in das Geschehen eingreift und sich nicht mehr vom Geschehen selbst vollständig trennen läßt. Eine anschauliche Beschreibung der atomaren Vorgänge, so wie man sie sich in der Physik vor 50 Jahren gewünscht hätte, wird daher unmöglich. Wir können die Naturvorgänge im atomaren Bereich nicht mehr in der gleichen Weise ergreifen wie die Vorgänge im großen. Wenn wir die gewohnten Begriffe verwenden, so wird ihre Anwendbarkeit durch die sogenannten „Unbestimmtheitsrelationen“ eingeschränkt. Für den weiteren Verlauf des atomaren Vorgangs können wir in der Regel nur die Wahrscheinlichkeit voraussagen. Nicht mehr die objektiven Ereignisse, sondern die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten gewisser Ereignisse können in mathematischen Formeln festgelegt werden. Nicht mehr das faktische Geschehen selbst, sondern die Möglichkeit zum Geschehen — die „Potentia“, wenn wir diesen Begriff der Philosophie des ARISTOTELES verwenden wollen — ist strengen Naturgesetzen unterworfen.

Über diese Seite der Quantentheorie ist oft gesprochen worden, und ich möchte dieses Thema hier nicht allzu ausführlich behandeln. Auch möchte ich von der Geschichte dieser Entwicklung, die in erster Linie mit den Namen BOHR, BORN, JORDAN und DIRAC verknüpft ist, hier nicht sprechen; ebenso nicht von der Entwicklung der Wellenmechanik durch DE BROGLIE und SCHRÖDINGER.

Wenn man den Schritt von der klassischen Physik zur Quantentheorie als endgültig betrachtet, wenn man also annimmt, daß die exakte Naturwissenschaft auch in Zukunft den Begriff der Wahrscheinlichkeit oder Möglichkeit, der „Potentia“, in ihren Grundlagen enthalten wird, so rücken dadurch manche Probleme aus der Philosophie früherer Zeiten in ein neues Licht, und umgekehrt kann das Verständnis der Quantentheorie durch das Studium jener früheren Fragestellungen vertieft werden. Auf die Beziehung zu dem Begriff der „Potentia“ in der Philosophie des ARISTOTELES wurde schon hingewiesen. Aber auch zur Philosophie der Neuzeit in ihren verschiedenen Systemen ergeben sich eine Menge von Beziehungen, die hier allerdings nur ganz kurz gestreift werden können; auf eine ausführliche und sorgfältige Behandlung muß verzichtet werden.

In der Philosophie des DESCARTES spielte der Gegensatz zwischen der „res cogitans“ und der „res extensa“ eine entscheidende Rolle, und die in diesem Begriffspaar ausgedrückte Spaltung der Welt hat das Denken der folgenden Jahrhunderte aufs stärkste beeinflußt. In der quantentheoretischen Physik sieht dieser Gegensatz etwas anders aus als früher. Er erscheint als weniger schroff, da diese Physik uns gezwungen hat, in verschiedenen Zusammenhangsbereichen zu denken, die zueinander in jenem Verhältnis stehen, das BOHR mit dem Begriff „Komplementarität“ ausgedrückt hat. Die Zusammenhangsbereiche können sich einerseits ausschließen, andererseits aber doch auch ergänzen, so daß erst durch das Spiel zwischen den verschiedenen Bereichen die volle Einheit sichtbar wird. Wie das ohne die geringste Unklarheit möglich ist, zeigt die quantentheoretische Mathematik. Im Vergleich zur klassischen Physik rückt die Quantentheorie daher deutlich ab von jener etwas zu schroffen Zweiteilung der Welt in der Descartesschen Philosophie.

KANT hatte den sogenannten „synthetischen Urteilen a priori“ und den apriorischen Anschauungsformen einen zentralen Platz in seiner Philosophie eingeräumt. In der neuen Deutung der Quantentheorie werden zwar auch die Grundbegriffe der klassischen Physik als apriorische Elemente anerkannt; insofern enthält die Quantentheorie einen erheblichen Teil Kantischer Philosophie. Aber es wird gleichzeitig dem Apriori nur eine relative Bedeutung zugemessen, da, im Gegensatz zur Kantischen Auffassung, auch die apriorischen Begriffe nicht mehr als unveränderliche Grundlagen der exakten Naturwissenschaften gelten.

Auf die positivistischen Elemente in der Relativitätstheorie und der Quantentheorie ist oft hingewiesen worden. Insbesondere haben die Gedankengänge MACHS zweifellos die Entwicklung der Physik seit der Planckschen Entdeckung immer wieder befruchtet. Aber auch dieser Einfluß darf nicht überschätzt werden. Insbesondere betrachtet die Quantentheorie in ihrer heute allgemein angenommenen Deutung keineswegs die Sinnesindrücke als das primär Gegebene, wie es der Positivismus tut. Wenn etwas als primär gegeben bezeichnet werden soll, so ist das in der Quantentheorie die Realität, die mit den Begriffen der klassischen Physik beschrieben werden kann.

Da die Quantentheorie im Zusammenhang mit der Atomlehre entstanden ist, so steht sie auch, trotz ihrer erkenntnistheoretischen Struktur, in enger Beziehung zu jenen Philosophien, die die Materie in den Mittelpunkt ihres Systems rücken. Aber die Entwicklung der letzten Jahre, über die nachher gesprochen werden soll, vollzieht doch sehr deutlich — wenn man überhaupt Vergleiche mit der antiken Philosophie ziehen will — die Wendung von DEMOKRIT zu PLATO. Gerade die Plancksche Entdeckung enthält ja schon den Hinweis, daß die atomare Struktur der Materie als Ausdruck mathematischer Gestalten in den Naturgesetzen aufgefaßt werden kann.

Außerdem enthält die erkenntnistheoretische Analyse der Quantentheorie besonders in der Form, die BOHR ihr gegeben hat, manche Züge, die an die Methoden der Hegelschen Philosophie erinnern.

Schließlich sind verschiedene Untersuchungen angestellt worden über die Beziehung der Quantentheorie zur Logik. Ich erinnere besonders an die Untersuchungen von WEIZSÄCKERS. Offenbar kann man die quantentheoretische Interpretation der atomaren Vorgänge mit einer Erweiterung der Logik in Verbindung bringen, die vielleicht in der zukünftigen exakten Naturwissenschaft eine sehr allgemeine Bedeutung erhalten wird. Damit haben wir einen allerdings nur sehr flüchtigen Blick geworfen auf die mannigfachen Beziehungen zwischen der Quantentheorie und einer Reihe verschiedenartiger philosophischer Fragestellungen, auf die im einzelnen hier leider nicht eingegangen werden kann.

Schließlich muß noch ausführlicher ein mehr physikalisches Problem erwähnt werden, das schon zur Entwicklung der Quantentheorie und Atomtheorie im letzten Jahrzehnt überleitet. Die Relativitätstheorie und die Quantentheorie haben gewisse Grundstrukturen der Natur sichtbar gemacht, die früher unbekannt waren. In der Relativitätstheorie handelt es sich um die Struktur von Raum und Zeit, in der Quantentheorie um die Konsequenzen des Umstandes,

daß jede Messung im atomaren Bereich einen Akt, einen Eingriff erfordert.

Die in der speziellen Relativitätstheorie aufgedeckte Struktur von Raum und Zeit kann etwa folgendermaßen kurz beschrieben werden: Wir können unter dem Wort „Vergangenheit“ alle jene Ereignisse zusammenfassen, von denen wir, wenigstens prinzipiell, etwas erfahren können, unter dem Wort „Zukunft“ alle jene anderen Ereignisse, auf die wir, wenigstens grundsätzlich, noch einwirken können. In unserer anschaulichen Vorstellung sind diese beiden Ereignisbereiche nur durch einen unendlich kurzen Zeitpunkt getrennt, den wir den „gegenwärtigen Augenblick“ nennen. Aus der Einsteinschen Theorie wissen wir aber jetzt, daß dieser Gegenwartsbereich endlich ist, daß er zeitlich um so länger dauert, je weiter der Ort der Ereignisse von dem unseren entfernt ist. Dies liegt daran, daß sich Wirkungen nie schneller als mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen können. Es gibt also eine scharfe raum-zeitliche Grenze zwischen den Ereignissen, von denen wir erfahren können, und denen, von denen wir nicht mehr erfahren können, und eine andere Grenze zwischen den Ereignissen, auf die wir noch einwirken können, und denen, auf die wir nicht mehr einwirken können.

Die Existenz einer solchen scharfen Grenze paßt aber schlecht zu der Struktur der physikalischen Vorgänge, die sich durch die Quantentheorie enthüllt hat. Aus den Unbestimmtheitsrelationen wissen wir, daß eine Ortsbestimmung einen um so schärferen Eingriff erfordert, je genauer sie vorgenommen werden soll. Eine unendlich scharfe Ortsbestimmung würde sogar einen unendlich großen Eingriff voraussetzen und kann daher gar nicht realisiert werden. So ist es nicht weiter verwunderlich, daß jene von der Relativitätstheorie behauptete scharfe Grenze zu Unzulänglichkeiten beim Versuch der quantentheoretischen Formulierung der physikalischen Vorgänge führt. Auf die Einzelheiten kann hier auch wieder nicht eingegangen werden; aber die theoretische physikalische Literatur der letzten 25 Jahre ist angefüllt von Diskussionen jener Unzulänglichkeiten und scheinbaren Widersprüchen, die durch die sogenannten „Divergenzen“, z. B. die unendliche Selbstenergie des Elektrons, eine befriedigende Beschreibung der Vorgänge bei den Elementarteilchen lange Zeit unmöglich gemacht haben. Quantentheorie und Relativitätstheorie können also offenbar nicht ohne Schwierigkeiten zusammengefügt werden.

Nach den Ergebnissen der letzten Jahre haben wir allen Grund zu der Annahme, daß es erst dann gelingen kann, die beiden Theorien zusammenzufügen, wenn man auch die dritte Grundstruktur, die mit der Existenz einer universellen Länge von der Größenordnung 10^{-13} cm verknüpft ist, in den Kreis der Betrachtungen einbezieht.

Zunächst soll hier kurz besprochen werden, um welche physikalischen Phänomene es sich dabei handelt. Die Chemie hatte ursprünglich den verschiedenen chemischen Elementen je eine Atomsorte zugeordnet. Die Rutherford'schen Experimente und die Bohrsche Theorie hatten dann gezeigt, daß das sogenannte Atom der Chemiker aus einem Kern und einer Hülle von Elektronen besteht. Die Kernphysik der dreißiger Jahre hat uns gelehrt, die Atomkerne als Gebilde von Protonen und Neutronen aufzufassen. So waren

schließlich drei wichtigste Sorten von Elementarteilchen, die Protonen, Neutronen und Elektronen, als die letzten Bausteine aller Materie erkannt. Dann aber zeigten spätere Experimente, daß es noch manche andere Arten von Elementarteilchen gibt, die von den vorhergenannten in erster Linie dadurch sich unterscheiden, daß sie nur kurze Zeit existieren können, da sie sehr schnell radioaktiv zerfallen, d. h. sich in andere Teilchen umwandeln. Die Mesonen, die Hyperonen wurden entdeckt, und wir kennen heute etwa 30 verschiedene Sorten von Elementarteilchen, von denen die meisten nur eine sehr kurze Lebensdauer besitzen.

Mit diesen Erfahrungen waren zwei wichtige Fragen gestellt. Erstens: Sind diese Elementarteilchen, insbesondere Protonen, Neutronen, Elektronen wirklich die letzten, unteilbaren Bausteine der Materie, oder müssen auch sie wieder als zusammengesetzt aus kleineren Teilen aufgefaßt werden? Wenn sie aber schon die kleinsten Bausteine sind, warum lassen sie sich nicht noch weiter teilen? Zweitens: Warum gibt es gerade diese experimentell gefundenen Elementarteilchen, warum haben sie gerade die beobachteten Eigenschaften? Durch welche Naturgesetze sind ihre Massen und Ladungen, die Kräfte, mit denen sie aufeinander wirken, bestimmt?

Auf die erste Frage gibt die heutige Physik die bestimmte Antwort, daß die Elementarteilchen wirklich schon die letzten, kleinsten Einheiten der Materie darstellen; und sie gibt dafür auch eine zunächst etwas überraschende Begründung. Wie kann man feststellen, ob sich die Elementarteilchen nicht noch weiter teilen lassen? Die einzige Methode, dies zu untersuchen, ist doch wohl der Versuch, sie mit den stärksten Kräften weiter zu zerspalten. Da es natürlich keine Messer oder andere Werkzeuge gibt, mit denen die Teilung versucht werden könnte, bleibt als einzige Möglichkeit, Elementarteilchen mit hoher Geschwindigkeit aufeinanderprallen zu lassen. Man kann in der Tat Zusammenstöße zwischen Elementarteilchen höchster Energie herbeiführen. Die großen Beschleunigungsmaschinen, die heute in den verschiedensten Teilen der Welt gebaut werden, z. B. in Genf als europäische Gemeinschaftsarbeit, in Amerika, in Rußland, dienen eben diesem Zweck. Auch die in der Natur vorkommende kosmische Strahlung bewirkt solche Zusammenstöße. Dabei werden die Elementarteilchen auch tatsächlich zerlegt, oft in viele Teile auseinandergeschlagen, aber, und das ist das Überraschende, die Teile sind nicht kleiner oder leichter als die Elementargebilde, die zerschlagen wurden. Denn die hohe kinetische Energie der zusammenstoßenden Teilchen kann nach der Relativitätstheorie in Masse verwandelt werden, sie wird tatsächlich dazu benutzt, neue Elementarteilchen zu erzeugen. In Wirklichkeit findet also nicht eigentlich eine Spaltung der Elementarteilchen statt, sondern eine Erzeugung neuer solcher Teilchen aus der Bewegungsenergie der stoßenden Teilchen. So schafft die Einsteinsche Gleichung¹⁾: $E = mc^2$ die Möglichkeit dafür, daß die heute bekannten Elementarteilchen wirklich schon die kleinsten existierenden Gebilde sind.

Gleichzeitig erkennen wir dabei, daß die Elementarteilchen alle sozusagen aus dem gleichen Stoff gemacht sind, nämlich, wenn Sie so wollen, aus Energie.

¹⁾ m ist die Masse des Körpers, E seine Energie und c die Lichtgeschwindigkeit.

Hier kann man Anklänge an die Philosophie des HERAKLIT finden, nach dem das Feuer der Grundstoff ist, aus dem alle Dinge bestehen. Das Feuer ist gleichzeitig die treibende Kraft, die die Welt in Bewegung erhält, und man kann vielleicht, um zu unserer heutigen Auffassung zu kommen, Feuer und Energie identifizieren. Die Elementarteilchen der modernen Physik können genau wie die der platonischen Philosophie ineinander umgewandelt werden. Sie bestehen nicht selbst aus Materie, sondern sie sind die einzigen möglichen Formen der Materie. Die Energie wird zur Materie, indem sie sich in die Form eines Elementarteilchens begibt, indem sie sich in dieser Form manifestiert. Hier klingt die Beziehung zwischen Form und Stoff an, die in der Philosophie des ARISTOTELES eine so zentrale Rolle spielt. Damit sind wir auch schon bei der zweiten Frage angelangt: Warum gibt es gerade diese bestimmten Elementarteilchen und keine anderen?

Diese Frage ist identisch mit der Frage nach dem Naturgesetz, das die Eigenschaften der Elementarteilchen bestimmt; und dieses Naturgesetz muß die dritte natürliche Maßeinheit, die sogenannte „kleinste Länge“, enthalten. Die hier gestellten Probleme sind zwar noch keineswegs gelöst, aber es kann doch schon ein Vorschlag für eine solche Theorie der Elementarteilchen zur Diskussion gestellt werden, der durch die Forschung der kommenden Jahre nachgeprüft und entwickelt werden muß.

Zunächst muß hier über die Fortschritte in den vergangenen Jahren berichtet werden. Schon vor etwa 15 Jahren hat DIRAC in England auf die Möglichkeit hingewiesen, die mathematischen „Divergenzschwierigkeiten“ der Quantenfeldtheorie, über die ich vorhin kurz gesprochen habe, dadurch zu lösen, daß man eine neue imaginäre Einheit, eine Quadratwurzel aus -1 , in die mathematische Darstellung aufnimmt, oder, um es in einer genaueren mathematischen Sprache auszudrücken, daß man dem Hilbert-Raum der Quantenfeldtheorie eine indefinite Metrik gibt. Freilich bedeutet eine solche Einführung eine tiefgehende Strukturveränderung der Theorie, und kurze Zeit darauf hat PAULI in Zürich zeigen können, daß eine solche Theorie zunächst physikalisch nicht interpretiert werden kann. Denn die Größen, die sonst in der Quantentheorie die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses bedeuten, können in der Diracschen Formulierung negativ werden, und eine negative Wahrscheinlichkeit ist ein physikalisch sinnloser Begriff. Trotzdem haben wir dann in Göttingen vor etwa 5 Jahren diesen Diracschen Gedanken wieder aufgegriffen in der Hoffnung, daß der mathematische Formalismus sich in folgender Weise entwickeln lassen würde: Die Grundgleichung für die Materie muß ja, wie schon mehrfach betont wurde, jene Maßeinheit enthalten, die als Länge von der Größenordnung 10^{-13} cm eingeführt wurde. Sollte es nicht möglich sein, die indefinite Metrik in einer solchen Weise zu benutzen, daß die negativen Wahrscheinlichkeiten immer nur dann auftreten, wenn man nach dem physikalischen Verhalten in Raumdimensionen von der Größenordnung 10^{-13} cm fragt? Daß aber für Fragen, die sich auf sehr viel größere Räume und Zeitgebiete beziehen, alle berechneten Wahrscheinlichkeiten wieder von selbst positiv werden, so daß die Formeln eine physikalische Interpretation zulassen.

Damit wären die Schwierigkeiten beseitigt, denn nach Vorgängen in kleinsten Raumbereichen kann man eben nicht fragen; damit ist gemeint: Vorgänge in kleinsten Raum-Zeitbereichen können nicht unmittelbar beobachtet werden, und die Rückschlüsse von den Beobachtungen auf diese Vorgänge können nicht mehr mit den Begriffen der üblichen Physik gezogen werden. Daher entziehen sich diese Vorgänge jeder anschaulichen Beschreibung. Diese Möglichkeit ist dann in einem mathematisch vereinfachten Modell in den Einzelheiten studiert worden — ich erwähne hier Untersuchungen von MITTER, KORTÉL und ASCOLI in Göttingen —, und es hat sich gezeigt, daß eine solche Benutzung der Diracschen Vorschläge in dem einfachsten Fall, der mathematisch vollständig analysiert werden kann, tatsächlich widerspruchsfrei möglich ist. Auch stellte sich bei diesen Untersuchungen heraus, daß schon ein solches vereinfachtes Modell sehr wesentliche Züge jener einheitlichen Feldtheorie aufweist, die das Ziel der Untersuchung bilden muß. Zum Beispiel ergaben sich die elektromagnetischen Felder als Folge des Materiefeldes, und das Materiefeld manifestierte sich in Elementarteilchen, die ähnliche Eigenschaften aufwiesen wie die wirklich beobachteten.

Ein sehr wesentlicher Beitrag zum Problem der Materie war dann die durch die beiden chinesischen Physiker LEE und YANG gemachte Entdeckung, daß die elektromagnetischen Felder in einer ganz unerwarteten Weise mit einem den Elementarteilchen innewohnenden Schraubensinn verknüpft sind. Zum Beispiel gibt es positiv geladene, sogenannte „ π -Mesonen“, die radioaktiv zerfallen. Die beim Zerfall entstehenden μ -Mesonen und Elektronen und Neutrinos zeigen eine bestimmte Polarisierung, die in ihrem Sinn etwa einer Rechtsschraube entspricht. Es gibt keine positiv geladenen π -Mesonen, bei deren Zerfall der umgekehrte Schraubensinn ausgezeichnet wäre. Wohl aber gibt es negativ geladene π -Mesonen der gleichen Masse, und bei deren Zerfall bestimmt gerade der umgekehrte Schraubensinn die Polarisierung. Durch Spiegelung entsteht also aus einem Teilchen das zugehörige sogenannte „Antiteilchen“, das gerade die entgegengesetzte Ladung trägt. Diese Entdeckung hatte besonders interessante Konsequenzen für das Verständnis der Eigenschaften eines Elementarteilchens, dessen Existenz vor längerer Zeit von PAULI aus einer Analyse des β -Zerfalls der Elemente vorhergesagt worden war, des sogenannten Neutrinos. Beim Studium dieser Konsequenzen ist PAULI im vorigen Jahr auf eine besondere Transformationseigenschaft gestoßen, auf eine bis dahin nicht beachtete mathematische Symmetrie der NeutrinoWellengleichung. Da nun, wie schon bei der Beschreibung der platonischen Körper betont wurde, die mathematischen Symmetrien in der Theorie der Elementarteilchen eine besonders wichtige Rolle spielen, konnte man darauf vorbereitet sein, daß der eben genannten Symmetrie vielleicht eine über die spezielle NeutrinoGleichung hinausgehende Bedeutung zukommt.

Das Erfahrungsmaterial über die Elementarteilchen, das in den vergangenen 2 Jahrzehnten gesammelt worden ist, gibt über die Symmetrieeigenschaften in den Grundgleichungen der Materie dort, wenn auch etwas indirekt, Auskunft, wo es uns die sogenannten „Auswahlregeln und Erhaltungssätze“ liefert. Damit ist folgendes gemeint: Wenn wir aus der Erfahrung

wissen, welche Teilchen etwa sich in welche anderen radioaktiv umwandeln können, so kann man daraus Rückschlüsse über die Symmetrieeigenschaften der Teilchen und der ihnen zugrunde liegenden Gesetze ziehen. Bei dem Versuch, das vorhin genannte, in Göttingen entwickelte mathematische Modell einer Theorie der Materie so umzugestalten, daß es den beobachteten Auswahlregeln Rechnung trägt, waren wir auf eine Gleichung gestoßen, von der PAULI zeigen konnte, daß sie auch die von PAULI gefundenen Symmetrieeigenschaften enthält. Ferner hatte der türkische Physiker GÜRSEY darauf hingewiesen, daß diese Paulische Symmetrie offenbar eine charakteristische Eigenschaft des Systems der Elementarteilchen wiedergibt, die schon vor 25 Jahren gefunden worden war und mit dem Begriff „Isotopenspin“ oder „Isospin“, der hier nicht weiter erklärt werden soll, eine mathematische Formulierung gefunden hatte.

Damit konnte man eine Gleichung angeben, die um es vorsichtig auszudrücken — zum mindesten im ersten Augenblick so aussieht, als könnte sie alle uns bekannten Eigenschaften der Elementarteilchen darstellen, als könnte sie schon die richtige Gleichung der Materie sein. Die Gleichung lautet:

$$\gamma_\nu \frac{\partial}{\partial x_\nu} \psi \pm l^2 \gamma_\mu \gamma_5 \psi (\psi^\dagger \gamma_\mu \gamma_5 \psi) = 0.$$

In ihr bedeutet ψ (ein von den Raum- und Zeitkoordinaten abhängiger Feldoperator) die Materie; die γ_μ sind die einfachen, von DIRAC eingeführten Matrizen (mathematische Größen aus der Theorie der linearen Transformationen), l ist die natürliche Längeneinheit, von der mehrfach die Rede war. Daß die Lichtgeschwindigkeit und die Plancksche Konstante in der Gleichung nicht mehr sichtbar vorkommen, liegt einfach daran, daß man diese beiden Grundgrößen bereits als Maßeinheit benutzt, also gleich 1 gesetzt hat. Auch die Größe l kann natürlich in der gleichen Weise als Maßeinheit verwendet und gleich 1 gesetzt werden und tritt dann in der Gleichung nicht mehr auf.

Es muß an dieser Stelle betont werden, daß es sich bei dieser Gleichung zunächst um einen Vorschlag handelt, und daß erst die keineswegs einfache mathematische Analyse ihrer Konsequenzen im Vergleich mit den experimentellen Erfahrungen nach einigen Jahren ein sicheres Urteil darüber erlauben wird, wie weit man mit dieser Gleichung kommt.

Für den Augenblick ist es vielleicht wichtiger, die Denkmöglichkeiten zu studieren, die, ausgehend von der Planckschen Entdeckung, durch die geschilderte Entwicklung bis zu den Fortschritten der letzten Zeit entstanden sind. Wie sieht die Physik aus, wenn sich die Hoffnungen der Physiker an dieser Stelle erfüllen? Die erwähnte Gleichung enthält neben den drei natürlichen Maßeinheiten nur noch mathematische Symmetrieforderungen. Durch diese Forderungen scheint alles weitere bestimmt zu sein. Man muß eigentlich die Gleichung nur als eine besonders einfache Darstellung der Symmetrieforderungen, aber diese Forderungen als den eigentlichen Kern der Theorie betrachten. Ähnlich wie bei PLATO sieht es daher so aus, als liege dieser scheinbar so komplizierten Welt aus Elementarteilchen und Kraftfeldern eine einfache und durchsichtige mathematische Struktur zugrunde. Alle jenen Zusammenhänge, die wir sonst als Naturgesetze in den verschiedenen Bereichen der Physik

kennen, sollten sich aus dieser einen Struktur ableiten lassen.

An dieser Stelle hat natürlich die moderne Auffassung einen Grad von Strenge, der den griechischen Philosophen völlig ferngelegen hat, und man muß, um nicht mißverstanden zu werden, auch die tiefgehenden Unterschiede unserer heutigen Naturwissenschaft von der antiken betonen. Zunächst besteht ein wesentlicher Unterschied in der Methode, nämlich darin, daß wir systematisch Experimente anstellen und Theorien nur dann akzeptieren, wenn sie die Experimente wirklich in allen Einzelheiten darstellen. Dann aber äußert sich ein weiterer sehr wichtiger Unterschied in der Rolle, die der Zeitbegriff in der Physik seit GALILEI und NEWTON spielt.

Die Elementarteilchen in der Philosophie PLATONS erhielten ihre Symmetrie aus der sogenannten „Raumgruppe“, der Gruppe der Drehungen im dreidimensionalen Raum. Es handelt sich also dort um eine statische, unmittelbar anschauliche Symmetrie. Die neuzeitliche Physik aber bezieht die Zeit von Anfang an in ihre Naturbetrachtung ein. Seit NEWTON ist die Physik auf die Dynamik der Erscheinungen gerichtet. Sie geht von der Auffassung aus, daß in dieser sich ständig verändernden Welt nicht die geometrischen Formen das Bleibende sein können, sondern die Gesetze. Die Gesetze sind allerdings im Grunde auch nur abstraktere mathematische Formen, die sich aber eben auf Raum und Zeit beziehen. Ein Verständnis der Materie erscheint uns daher nur möglich, wenn man aus den Experimenten auf mathematisch faßbare Strukturen schließt, die Raum und Zeit in gleicher Weise betreffen.

Die endgültige Theorie der Materie wird, ähnlich wie bei PLATO, durch eine Reihe von wichtigen Symmetrieforderungen charakterisiert sein, die wir heute schon angeben können. Diese Symmetrien kann man nicht mehr einfach durch Figuren und Bilder erläutern, wie es bei den platonischen Körpern möglich war, wohl aber durch Gleichungen, und ich möchte einige der wichtigsten Gleichungen hier erwähnen, obwohl solche Darstellungen natürlich nur dem Mathematiker verständlich sein können.

Eine erste entscheidende Symmetrieeigenschaft wird die sogenannte „inhomogene Lorentz-Gruppe“ sein, die, wie Sie wissen, die Grundlage der speziellen Relativitätstheorie bildet. Eine etwas vereinfachte Darstellung lautet:

$$x' - x_0' = \frac{x - v t}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}; \quad t' - t_0' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Eine zweite, ebenso wichtige Gruppe ist die der Transformationen im Hilbert-Raum, die die Vertauschungsrelationen invariant lassen. Diese Gruppe ist die Grundlage der Quantentheorie. Eine ebenfalls etwas vereinfachte Darstellung lautet etwa:

$$\Psi_i \rangle = S_{ik} \Psi_k \rangle.$$

Ferner wird die sogenannte „Isospin-Gruppe“ und die mit der Erhaltung der Baryonenzahl verknüpfte Gruppe eine Rolle spielen, die, wie wir nach den Untersuchungen von PAULI und GÜRSEY vermuten, durch die Paulischen Transformationen

$$\psi' = a \psi + b \gamma_5 C^{-1} \psi^* \quad (|a|^2 + |b|^2 = 1)$$

und

$$q' = e^{i\pi/2} q$$

dargestellt werden. Schließlich gibt es noch wichtige Spiegelungssymmetrien, z. B. die Invarianz der Theorie bei Vorzeichenumkehr der Zeit und bei gleichzeitiger Raumspiegelung und Ladungsumkehr. Alle diese Symmetrien werden durch die vorhin erwähnte Gleichung dargestellt – ob schon in der richtigen Form, wird die Zukunft lehren.

Eine Theorie, die aus einer einfachen Grundgleichung für die Materie die Massen und die Eigenschaften der Elementarteilchen richtig wiedergibt, ist auch gleichzeitig eine einheitliche Feldtheorie. Der aus den Experimenten erkannte Umstand, daß alle Elementarteilchen sich ineinander umwandeln können, deutet darauf hin, daß es kaum möglich sein dürfte, etwa nur eine bestimmte Gruppe von Elementarteilchen auszusondern und nur für diese Gruppe eine mathematische Darstellung zu finden. Durch diese Erfahrung und durch die grundlegende Bedeutung der Symmetrieeigenschaften erhält jeder Versuch einer Theorie der Elementarteilchen, wie z. B. der in der obengenannten Gleichung enthaltene, einen eigentümlichen Charakter von Geschlossenheit. Man findet Strukturen, die so ineinander verknüpft und verschlungen sind, daß man eigentlich an keiner Stelle mehr Änderungen vornehmen kann, ohne alle Zusammenhänge in Frage zu stellen.

Man wird hier etwa an die kunstvollen Bandornamente arabischer Moscheen erinnert, in denen so viele Symmetrien gleichzeitig verwirklicht sind, daß man nicht ein einziges Blatt verändern könnte, ohne den Zusammenhang des Ganzen entscheidend zu stören. Und ähnlich wie jene Bandornamente den Geist der Religion ausdrücken, aus der sie entstanden sind, so spiegelt sich in den Symmetrieeigenschaften der Quan-

tenfeldtheorie der Geist der naturwissenschaftlichen Epoche, die durch PLANCKs Entdeckung eingeleitet worden ist.

Aber wir stehen an dieser Stelle mitten in einer Entwicklung, deren Ergebnisse man erst in einigen Jahren übersehen wird. Die Plancksche Entdeckung hat in dem halben Jahrhundert, dessen einzelne Stadien ich Ihnen zu schildern versucht habe, bis zu einer Stelle geführt, an der man das Ziel, nämlich das Verständnis der atomaren Struktur der Materie aus einfachen mathematischen Symmetrieeigenschaften, schon deutlich in den Umrissen zu erkennen glaubt. Selbst wenn man an die Entwicklung der letzten Jahre, von der ich gesprochen habe, mit all der Skepsis herangeht, die zu den obersten Pflichten des Naturwissenschaftlers gehört, so darf man doch wohl aussprechen, daß man hier auf Strukturen von ganz ungewöhnlicher Einfachheit, Geschlossenheit und Schönheit gestoßen ist, auf Strukturen, die uns deshalb besonders wichtig scheinen, weil sie nicht mehr ein spezielles Gebiet der Physik, sondern die Welt im ganzen betreffen.

Der 400. Geburtstag MAX PLANCKs fällt in eine Zeit, die, wenn man sie mit früheren Epochen vergleicht, in vielen Bereichen, z. B. denen der Politik, der Kunst, der Wertmaßstäbe, einen sehr chaotischen Eindruck macht. Es ist daher, gerade wenn man an eine so harmonische Persönlichkeit wie MAX PLANCK denkt, beruhigend, daß wenigstens in dem einen Bereich, dem PLANCK seine Lebensarbeit gewidmet hat, nichts Chaotisches zu finden ist, daß vielmehr hier Einfachheit und durchsichtige Klarheit noch ebenso bestimmend sind wie zur Zeit PLATONS oder KEPLERS oder NEWTONs.

Göttingen, Max-Planck-Institut für Physik

Max Planck als Mensch*)

VON WILHELM H. WESTPHAL, Berlin-Zehlendorf

Die hohe Ehre, daß ich heute über MAX PLANCK als Menschen sprechen darf, verdanke ich einzig der Tatsache, daß ich einer der wenigen noch lebenden Physiker bin, die ihm und seinem Haus fast ein halbes Jahrhundert lang freundschaftlich nahestehen durften. Vor etwa 50 Jahren betrat ich, mit einem Einführungsschreiben eines Bruders von Frau PLANCK versehen, zum erstenmal das Haus in der Wangenheimstraße im Berliner Villenvorort Grunewald. Von dem Tage an war ich häufiger Gast im Hause PLANCK, in dem Frau MARIE PLANCK, die aus der bekannten Familie MERCK stammte, mütterlich waltete, und eine herzliche Freundschaft verband mich bald mit den Zwillingstöchtern EMMA und GRETHE, dem Sohn KARL und den Kindern von PLANCKs Bruder ADALBERT. ERWIN, das vierte Kind, war beträchtlich jünger.

In diesem Hause herrschte ein fröhliches, geistig angeregtes und allem Schönen in Natur und Kunst aufgeschlossenes Leben. In nächster Nähe wohnten andere bedeutende Gelehrte, darunter der Theologe

und Kirchenhistoriker ADOLF VON HARNACK, dessen Schwager, der Historiker HANS DELBRÜCK, der Biologe OSKAR HERTWIG, der Mediziner KARL BONHOEFFER, und die Freundschaften der Eltern übertrugen sich auf die Kinder.

Das Leben im Hause PLANCK stand vor allem im Zeichen der Musik. PLANCK war ja hochmusikalisch und ein ausgezeichneter Pianist, und das musikalische Erbgut war auch auf seine beiden Töchter übergangen. Der weltberühmte Geiger JOSEPH JOACHIM hat oft und gern mit ihm musiziert. Ein tiefer Eindruck war es, wenn PLANCK und EINSTEIN, der ja ein Meister auf der Geige war, miteinander musizierten. Nach PLANCKs Tod schrieb sein Freund, der Theologe BERTHOLET: „Die Harmonie hat er sein Leben lang im Innern mit sich getragen, und was es an Wohllaut in der Welt gab, das löste in der Tiefe seines Wesens immer wieder ein klingendes Echo aus. Ich habe ihn öfter in Konzerten beobachtet: ein wundervoller Zug verklärter Beglückung ging über sein Gesicht, wo immer er, Tonschönheit dankbar lauschend, sich ungehemmtem Genuß hingeben durfte. Und wieder sah

*) Ansprache, gehalten bei der Feier von MAX PLANCKs 100. Geburtstag am 25. April 1958 in Berlin.