

BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

SITZUNGSBERICHTE

JAHRGANG

1967

MÜNCHEN 1968

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Die Entdeckung der Elementarteilchen als Beispiel für die Art naturwissenschaftlicher Wirklichkeitskenntnis

Von Fritz Bopp, München

Vorgetragen in der gemeinsamen Sitzung beider Klassen am 3. März 1967

Vor einiger Zeit hat mir ein ausländischer Kollege folgende Geschichte erzählt: Astronauten sind in ein neues Planetensystem vorgestoßen. Sie haben einen mit der Erde vergleichbaren Planeten entdeckt. Noch rechtzeitig vor der Landung ist es herausgekommen, daß er aus Antimaterie besteht. Da Lichtquanten mit beiderlei Materie verträglich sind, ist es möglich gewesen, sich mit den Menschen auf der Antierde über Funk zu verständigen. Sie haben sich als gute Physiker erwiesen. Darum haben die unseren gefragt: Wer macht bei Euch die Physik? – Antwort: Die Antisemiten! –

Auf dieser Erde nehmen die Juden, wie man weiß, in den Naturwissenschaften einen hervorragenden Platz ein. Obwohl es überall Naturforscher ersten Ranges gegeben hat und gibt, scheint der Weg zu naturwissenschaftlicher Erkenntnis jüdischem Geist eher adäquat zu sein als dem trotz Christentum mehr in der griechischen Tradition lebenden des Abendlandes. Die Antwort auf die Frage, warum dem so ist, mag vielschichtig sein und die Begründung auch nur einer einzigen These derselben nicht leicht. Doch gibt es einen Unterschied zwischen jüdischem und griechisch-christlichem Denken, der im Hinblick auf unser Thema Interesse verdient. Er zeigt sich im zweiten Gebot, das von den Juden beachtet wird und das im Lutherschen Katechismus fehlt, obwohl es im Heidelberger enthalten ist und obwohl wir in der Lutherbibel eine Übersetzung finden, die an Klarheit kaum Wünsche offen läßt: Du sollst Dir kein Bildnis, noch irgendein Gleichnis machen, weder des, das oben im Himmel, noch des, das unten auf der Erde oder des, das im Wasser unter der Erde ist. Bete sie nicht an und diene ihnen nicht. Denn ich, der Herr, Dein Gott, bin ein eifriger Gott.

Nach Martin Buber¹ richtet sich dieses Gebot nicht gegen die fremden Götter wie das erste, sondern dagegen, den eigenen Gott auf eine bestimmte Gestalt festzulegen, damit man ihn in jeder erkennen kann, in der er auf uns zukommt. Hier interessiert uns insbesondere die sachliche Komponente des Gebots, die durch das dreimalige „des, das“ unterstrichen wird und die auch Buber hervorhebt (l.c. p.148). Man könnte geradezu sagen: Mache Dir keine Weltbilder, die Du anbetest; denn Gottes Wirklichkeit geht über alle hinaus. Wer die Welt als Schöpfung versteht, ist so frei, seine Vorstellungen zu verwerfen, sobald offenbar wird, daß sie zu eng sind. Die Bereitschaft, die eigenen Ideen, säkularisiert gesprochen, der Wirklichkeit zu opfern, ist von Anfang an ein Wesenszug der Naturwissenschaftler, so schon bei Kopernikus und auch bei Kepler. Dieser machte sich, als es sich herausgestellt hatte, daß den Marsbewegungen mit den kopernikanischen Kreisen nicht beizukommen war, mit folgenden Worten erneut auf den Weg: „Nachdem uns die göttliche Güte in Tycho Brahe einen so sorgsam Beobachter geschenkt hat, daß sich aus seinen Beobachtungen der Fehler der Rechnung im Betrag von acht Minuten verrät, geziemt es sich, daß wir dankbaren Sinnes diese Wohltat Gottes anerkennen und ausnützen, d. h. wir sollen uns Mühe geben, endlich die wahre Form der Himmelsbewegungen aufzuspüren.“ Das Ergebnis seiner Bemühungen sind die wohlbekannten Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung.

Zur Skepsis gegen unsere Sinne ist nun auch die gegen unser Vorstellen und Denken getreten. Alle unsere der Erkenntnis dienenden geistigen Fähigkeiten laufen gleichsam leer, führen zu Phantasien, Ideologien oder Spekulationen, wenn wir das, was wir erkannt zu haben glauben, nicht der Kontrolle durch die Erfahrung unterwerfen, durch die wir uns über den Skeptizismus erheben. Was ist Erfahrung, was verleiht ihr eine solche Autorität?

Um diese Frage zu beantworten, will ich schildern, wie wir zu naturwissenschaftlicher Erkenntnis gelangen, zunächst allgemein und dann am Beispiel der Entdeckung der Elementarteilchen.

Erfahrungen, in denen wir Wirklichkeiten begegnen, die man sich vorher kaum im Traume hätte einfallen lassen, stehen zu-

¹ Martin Buber, Moses, Heidelberg 1952: Die Worte auf den Tafeln.

nächst unverbunden nebeneinander und bilden scheinbar ein Chaos.

In der Gestaltpsychologie wird die Fähigkeit des Menschen untersucht, selbst das völlig Ungeordnete gestaltet zu sehen. Man denke an die Drachen in Felsenmeeren, an die Gesichter in Tintenklecksen und dgl.. Dieser Fähigkeit des Menschen, seiner Phantasie, entspringen die Versuche, sich Vorstellungen zu bilden, mit denen er neue Erfahrungen in den Griff zu bekommen versucht.

Doch sind solche Vorstellungen zunächst nichts anderes als Geschöpfe seiner Einbildungskraft, Bilder, die er in das Chaos hineinträgt. Offensichtlich müssen seine Vorstellungen einer kritischen Prüfung standhalten, ehe man davon sprechen kann, sie seien Bilder der Wirklichkeit. Die kritische Läuterung seiner Vorstellungen vollzieht sich in zwei Stufen. Die Vorstellungen müssen vor dem Denken bestehen und mit der Erfahrung im Einklang sein.

Dabei kann man die zweite Stufe nicht betreten, bevor man die erste erklommen hat. Auf der ersten gelangen wir zur Philosophie und, wo wir den Gipfel erreichen, zur mathematischen Durchdringung unserer Vorstellungen, also zur Philosophie im Sinne Platons, zur Philosophie nach Art der Geometrie.

Die Konfrontation unserer Vorstellungen mit dem Denken führt dazu, daß nur solche Vorstellungen Bestand haben, die in sich stimmen, die, mathematisch gesprochen, widerspruchsfrei sind. Diese Aufgabe ist lösbar, wenn es gelingt, die Vorstellungen in wenigen Prinzipien oder Axiomen zu verankern, welche sie einerseits präzisieren und welche andererseits erlauben, das ganze in den Axiomen noch keimhaft enthaltene Ordnungsgefüge mittels logischen Schließens – wo möglich mathematisch – exakt abzuleiten.

Das Verhältnis der Axiome zu den Vorstellungen ist das der Evidenz. Die Evidenz ist kein Ersatz für Beweise. Sie hat ihr eigenes Recht und spielt dort eine Rolle, wo es noch keine Beweise geben kann, im voraxiomatischen Bereich, in dem es darum geht, von Vorstellungen zu einer Deduktionsbasis zu gelangen, die das Beweisen erst möglich macht. Axiome sind evident, wenn sie zu den Vorstellungen passen, die man mit ihnen präzisieren will. Im allgemeinen muß man so gewonnene Axiome noch von Wider-

sprüchen reinigen und ergänzen, letzteres damit sie eine vollständige Deduktionsbasis bilden. In beidem besteht die Präzisierung, die seit alters ein legitimer Bestandteil der Mathematik gewesen ist, weil erst durch sie jene Mathematisierung des Erkenntnisprozesses möglich wird, die schon Platon erträumt hat.

Wenden wir uns nun demjenigen Teil der Mathematik zu, der heutzutage so sehr im Vordergrund des Interesses steht, der Deduktion.

In der Physik ist vor allem die Frage wichtig: Welche Rolle spielt die Deduktion für die naturwissenschaftliche Erkenntnis? Um diese Frage beantworten zu können, müssen wir zu unserem Ausgangspunkt zurückkehren. Vorstellungen sind zunächst Erfindungen unserer Einbildungskraft, zu denen wir zwar durch Erfahrungen angeregt sind, von denen man aber nicht von vorneherein erwarten kann, daß sie irgend etwas mit der Wirklichkeit zu tun haben. Daran ändert sich durch die Mathematisierung nichts. Das hat schon Descartes klar gesehen. In seiner Methodenlehre sagt er dazu: „Ich bemerkte, daß jene große von aller Welt ihnen“, – den mathematischen Beweisen, – „zugeschriebene Gewißheit lediglich darauf beruht, daß man sie nach der eben von mir erwähnten Regel deutlich begreift. Zugleich aber bemerkte ich, daß in ihnen nichts enthalten sei, das mir die Existenz ihres Objektes sicher dartun könnte.“ Mathematik macht also aus Vorstellungen in sich stimmende Theorien, ändert aber nichts daran, daß sie als Produkte unserer Phantasie im allgemeinen nichts mit der Wirklichkeit zu tun haben. Aus Phantasien sind zunächst Spekulationen oder Ideologien geworden. Unsere geistigen Potenzen, das Vorstellungsvermögen und das Denken, führen allein nicht weiter.

Wir müssen vielmehr unsere Vorstellungen und die Ergebnisse unseres Denkens handelnd erproben durch Beobachtungen, durch Experimente, durch Anwendungen unserer Ideen in der Technik und nicht zuletzt auch im täglichen Leben. Dabei geht es nicht mehr um Aussagen des Typs: Aus A folgt B, sondern um prognostische Urteile von der Form: Wenn du dies tust, wird das geschehen. Erfahrung entscheidet über die Gültigkeit prognostischer Urteile. Es bedarf kaum der Erwähnung, daß wir im täglichen Leben ständig nach solchen handeln.

In den Naturwissenschaften leiten wir die noch zu erprobenden prognostischen Urteile aus unseren Theorien ab. Dabei hilft uns die deduktive Mathematik. Sie führt zu weit abliegenden Konsequenzen, von denen wir mit mathematischer Sicherheit wissen, daß sie richtig sind, wenn die Prinzipien, wenn die Axiome gelten. Das schafft doppelten Gewinn.

Erstens erlaubt es die Mathematik, das in den Axiomen keimhaft enthaltene Ordnungsgefüge voll zur Entfaltung zu bringen. Unser Vorstellungsvermögen wäre allein dazu kaum in der Lage. Auf diese Weise gelangen wir zu einer großen Zahl und zu vielfältigen prognostischen Urteilen, die bei ihrer Erprobung dazu beitragen zu sagen, daß unsere Vorstellungen mit der Erfahrung im Einklang sind. Die Sicherheit naturwissenschaftlicher Erkenntnis beruht primär nicht auf der Gewißheit des mathematischen Schließens, sondern auf der großen Breite der dadurch ermöglichten Verifikationen.

Zweitens bedürfen wir, ohne daß dies der letzten Feststellung widerspricht, der Gewißheit, die mathematisches Schließen verbürgt. Nur wenn wir wissen, daß der Weg von den Axiomen zuden prognostischen Urteilen sicher ist, können wir aussich nicht bewährenden Urteilen schließen, daß unsere Voraussetzungen, daß die Vorstellungen, von denen wir herkommen, noch unzulänglich sind.

In diesem Jahrhundert haben wir es öfters erlebt, daß vielfach bewährte Vorstellungen durch umfassendere ersetzt werden mußten. Dadurch wird einerseits deutlich, daß alle Wirklichkeitserkenntnis, da sie sich letztlich nur auf vielfältige Bewährungen stützt, keine absolute sein kann. Wirklichkeitserkenntnis ist immer ein Wagnis.

Andererseits zeigt sich aber auch, warum es auf dem Wege zur Wirklichkeitserkenntnis Fortschritte gibt. Die Vorstellungen, mit denen wir die Wirklichkeit in den Griff zu kriegen suchen, mögen sich wandeln. Die Bilder von der Wirklichkeit können nach 100 oder 1000 Jahren von unseren heutigen grundverschieden sein. Aber die prognostischen Urteile, die sich heute bei Erprobung bewährt haben, werden auch nach 100 oder 1000 Jahren gelten, sofern nur die Welt beständig ist.

Wandlungen unserer Vorstellungen sind also unerläßlich, weil neue prognostische Urteile hinzukommen, die von den alten Vor-

stellungen nicht erfaßt werden. Hierin zeigt sich, daß unsere Vorstellungen auch am Ende nichts anderes sind als Produkte unserer Einbildungskraft. Nicht in den Bildern, sondern in der mit ihnen erfaßten Wirklichkeitsordnung vollzieht sich bleibende Wirklichkeitserkenntnis.

Unsere Theorien handeln vom ‚Sosein‘, von der Art, wie wir uns das Sein der Dinge vorstellen. Das ist dem methodischen Zweifel Descartes' unterworfen und kann durch jede neue Erfahrung in Frage gestellt werden. Nur in dem Maße, wie sich unsere Vorstellungen im Handeln bewähren, erfassen wir etwas von der Daseinsordnung.

Am ‚Dasein‘ zu zweifeln wäre absurd, weil wir es mit jedem Schritt, den wir machen, anerkennen. Es ist, wie es ist, ob wir wollen oder nicht, und es kann gerade darum Gegenstand unserer Forschung sein.

Das Grundverhältnis des Naturwissenschaftlers zur Wirklichkeit ist das der Anerkennung im Handeln. Darauf beruht es, daß die ‚naiv realistische Einstellung‘ so vieler Physiker, die sich über alle Skepsis der Philosophen hinwegsetzen, am Ende besser fundiert ist als manche Philosophie. Was wir hier dargestellt haben, könnten wir Max Born folgend ‚kritischen Realismus‘ nennen: Mit den geistigen Potenzen des Vorstellens, des Denkens und des Wollens erfassen wir nicht, was Wirklichkeit ist, wohl aber in wachsendem Ausmaß Teilstrukturen der Wirklichkeitsordnung.

Wir erläutern das Gesagte am Beispiel der Geschichte der Entdeckung der Elementarteilchen. In den letzten dreißig Jahren ist eine neue Welt erschlossen worden, von der man noch nichts ahnte, als ich 1929 zu studieren begann. Dem Anfang begegnen wir schon 1856. Die Vorgeschichte reicht von 1895 bis 1932. Seitdem leben wir in einer Hoch-Zeit. Noch immer muß man mit überraschenden Entdeckungen rechnen. Wir können noch nicht sagen, daß wir die neue Welt schon im Griff haben. Es läßt sich aber auch nicht behaupten, daß wir von diesem Ziel noch weit entfernt sind. Wir haben also ein Gebiet vor uns, in dem wir Wirklichkeits-erkenntnis im status nascendi erleben.

Was Elementarteilchen sind, läßt sich nicht mit einer Definition sagen, die wir an den Anfang stellen. Wir müssen vielmehr die Situationen schildern, in denen wir Elementarteilchen begegnen.

Dazu müssen wir einiges über Atome ins Gedächtnis zurückrufen.

Heute nennen wir ‚Atome‘ die mit rein chemischen Mitteln erkennbaren Bausteine der Materie. Rund 100 Millionen Atome gehen auf einen Zentimeter. Wir müßten sie eigentlich nach einem Scherzwort von Sommerfeld ‚Tome‘ nennen. Denn sie sind noch zerlegbar. Es ist bekannt, daß jedes Atom aus einem Kern und einer Elektronenwolke besteht und daß fast die ganze Masse des Atoms im Kern ist, der 10000- bis 100000mal kleiner ist als das Atom.

Mit dem gerade erwähnten Elektron hatten die Physiker das erste jener Teilchen gefunden, die man heute ‚Elementarteilchen‘ nennt. Schon im Jahr 1856 wurden von Plücker die aus Elektronen bestehenden Kathodenstrahlen entdeckt. Aber erst um 1895 war es klar, daß man negativ geladene Teilchen vor sich hatte, deren Masse etwa 1837mal kleiner ist als die des leichtesten, des Wasserstoff-Atoms. Bei der Namenswahl stand die heute überholte Vorstellung Pate, nun habe man die von Materie befreite reine Elektrizität vor sich. Man hat schon damals die Ladung und die Masse der Elektronen bestimmt.

Ebenfalls kurz vor der Jahrhundertwende hat Becquerel die aus der Pechblende kommende radioaktive Strahlung entdeckt. Man hat bald darauf erkannt, daß es sich um zwei Arten von Strahlen handelt, die sogenannten α - und β -Strahlen. Später hat man noch die γ -Strahlen gefunden. Die β -Strahlen bestehen aus Elektronen. Es dauerte etwas länger, bis man erkannt hat, daß die α -Strahlen aus doppelt ionisierten Heliumatomen bestehen, aus Helium-Atomkernen, wie wir heute wissen. Die γ -Strahlen werden von energiereichen Lichtquanten gebildet. Auch die α - und β -Strahlen bestehen aus energiereichen Teilchen.

Sie wurden alsbald als Sonden benutzt, mit denen man das Innere der Atome untersuchte. Lenard hat mit β -Strahlen und Rutherford mit α -Strahlen gearbeitet. Beide sind zu dem Ergebnis gekommen, daß die Materie innerhalb der Atome nur ein kleines Raumgebiet erfüllt, daß also die Atome fast leer sind. Da die relativ schweren α -Teilchen praktisch unbeeinflusst von den Elektronen durch ein Atom hindurchgehen, konnte man mit ihnen insbesondere die Verteilung der schweren Materie untersuchen.

Darum führten die Versuche der Rutherfordschüler Geiger und Marsden 1911 zu dem bereits erwähnten Rutherfordschen Atommodell: Winziger Atomkern mit relativ ausgedehnter Elektronenhülle.

In den beiden folgenden Dezennien hat man vor allem den Aufbau der Elektronenhülle untersucht. Das Ergebnis ist die Quantenmechanik, auf die wir hier nicht eingehen können. Wenn sich auch die Kernphysik in dieser Zeit nur langsam entwickelt hat, so sind doch stetig Fortschritte erzielt worden, und um die Mitte der Zwanzigerjahre ist es klar gewesen, daß der Atomkern aus Teilchen von der Masse des Wasserstoffatoms, aus Protonen, besteht. Man hat angenommen, daß der Kern eine der Masse entsprechende Anzahl von Protonen enthalte und daß ein Teil seiner Ladung durch Kernelektronen neutralisiert werde.

Damit waren zwei Teilchen gefunden, das Proton und das Elektron, aus denen die Atome der Chemiker und damit alle materiellen Teilchen zu bestehen schienen. Man glaubte, nunmehr die eigentlichen Atome in Händen zu haben und gab ihnen, weil das Wort ‚Atom‘ einen Bedeutungswandel durchgemacht hat, einen neuen Namen: ‚Elementarteilchen‘.

Auch hier ist der Name geblieben, obwohl die Neubelebung des philosophischen Atomismus nicht lange möglich gewesen ist. Im Jahre 1932 hat Chadwick das Neutron entdeckt, ein elektrisch neutrales Teilchen, das nur ganz wenig schwerer ist als das Proton. Damit setzte in verschiedenen Richtungen eine stürmische Entwicklung ein.

Atomkerne aus Protonen und Elektronen sind quantenmechanisch nur schwer zu verstehen. Die mittlere kinetische Energie eines Elektrons kann nicht Null sein. Ihre untere Grenze wächst mit abnehmendem Bewegungsspielraum. In Atomkernen müßte die mittlere kinetische Energie der Kernelektronen 100 Millionen bis 10 Milliarden mal größer als in Atomen sein. Das liegt außerhalb aller Energien, mit denen man es in der Kernphysik zu tun hat. Darum haben unabhängig voneinander Heisenberg und Iwanenko angenommen, daß man das Neutron als neues Elementarteilchen akzeptieren müsse, daß der Atomkern nicht aus Protonen und Elektronen, sondern aus Protonen und Neutronen bestehe und nicht von elektrischen, sondern von Kernkräften zu-

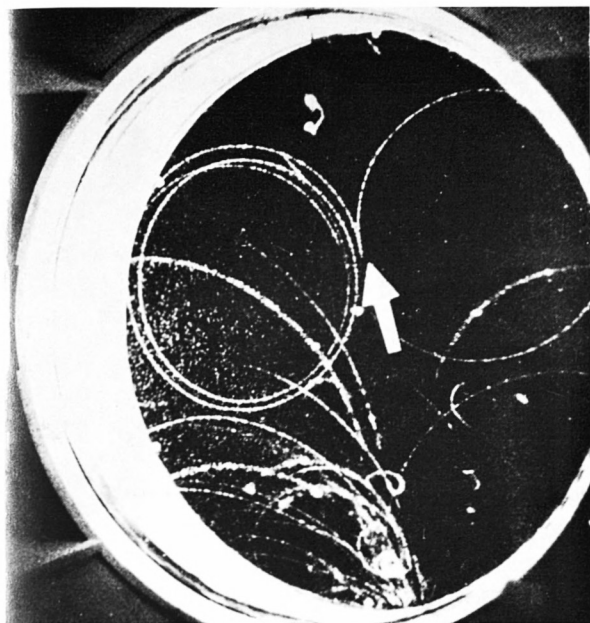


Fig. 1:
Erzeugung eines
Elektronenpaares

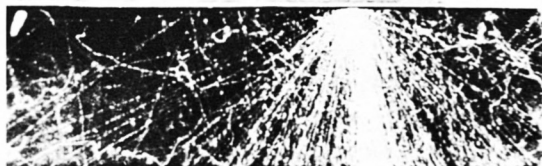
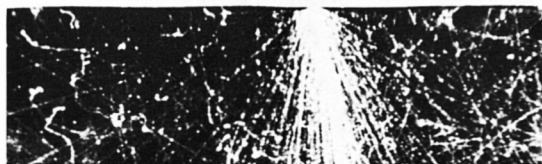
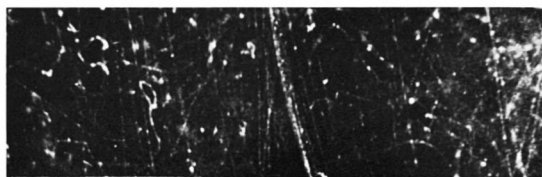


Fig. 2:
Schauer, ausgelöst von
der kosmischen Strahlung

sammengehalten werde. Damit war es möglich, Atomkerne quantenmechanisch zu untersuchen. Es war die Geburtsstunde der Kernphysik in modernem Sinn. Auch ihre rapide Weiterentwicklung brauchen wir hier nicht zu verfolgen.

Für die Theorie der Elementarteilchen war die Art, wie Heisenberg die Kernkräfte eingeführt hat, sehr folgenreich. Der Aufbau der Kerne aus Protonen und Neutronen hat das Problem der nuklearen Elektronen zunächst nur ausgeklammert, aber nicht gelöst. Denn es gibt β -Strahlen, d. h. Elektronenstrahlen, und ihre Energie stammt aus dem Atomkern. Dieser hat nach einem gewöhnlichen β -Zerfall eine um eine Einheit vergrößerte Ladung und eine etwas kleinere Masse. Der Übergang besteht in der Aussendung eines Elektrons und eines weiteren Teilchens, von dem wir noch reden werden, und in der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton.

Darum liegt es nahe, zu sagen, das Elektron müsse im Neutron stecken, so daß dieses Teilchen ähnlich wie ein Wasserstoff-Atom ein aus einem Proton und einem Elektron bestehendes Gebilde wäre, nur daß das Elektron im Neutron kernnah gebunden sein müßte. Doch ist gerade das ebensowenig wie beim Atomkern möglich.

Darum hat Heisenberg die sehr kühne und zukunftssträchtige Annahme gemacht, das Elektron sei nicht im Kern, es werde vielmehr bei der Umwandlung eines Neutrons n in ein Proton p erzeugt, es entstehe also beim Übergang

$$n \rightarrow p + e^- + ? \quad (1)$$

ähnlich wie ein Lichtquant beim Übergang eines angeregten Atoms in ein weniger energiereiches:

$$A^* \rightarrow A + \gamma. \quad (2)$$

Neutron und Proton sind hiernach ähnlich wie die Energiezustände eines Atoms vor und nach der Emission eines Lichtquants zwei verschiedene Quantenzustände desselben Teilchens, das von nun an Nukleon heißt. Das Nukleon kann also als Neutron oder Proton erscheinen, und beim Übergang von dem einen zu dem anderen Quantenzustand entsteht u. a. ein Elektron.

Damit sind zwei ganz entscheidende Fortschritte erzielt worden. Erstens ist das Lichtquant vollends als eines der Elementarteilchen anerkannt worden. Zweitens ist die Idee geboren worden, daß auch Teilchen mit Masse entstehen und vergehen können. Heute wissen wir, daß das für alle Elementarteilchen zutrifft, auch für das schwere Neutron und sogar für das stabile Proton. Materie kann zerstrahlen und aus Strahlung entstehen.

Man muß sich vergegenwärtigen, was diese Aussage bedeutet: Photonen und Elektronen können entstehen und vergehen. Es ist wie bei einem Zauberkünstler, der aus einem Zylinder Eier herausholt, obwohl man sich vorher überzeugt hat, daß keine drin waren. Wenn man Lichtquanten als Teilchen anerkennt, wenn man annimmt, daß die Elektronen erst beim β -Zerfall entstehen und nicht vorfabriziert im Neutron verborgen sind, verläßt man eine These, die uns als Fragment von Anaximenes überliefert ist und die der ganzen klassischen Physik zugrunde liegt: „Alles, was sich verändert, könnte sich nicht verändern, wenn es sich nicht bewegte.“

Bei der Heisenbergschen Annahme handelte es sich zunächst um eine Hypothese, allerdings um eine, die sich von Anfang an bestens bewährt hat. Bald darauf hat man neue Erzeugungs- und Vernichtungsprozesse entdeckt und sogar sichtbar gemacht. Wenn energiereiche elektrisch geladene Teilchen durch Luft laufen, gibt es zahlreiche Zusammenstöße zwischen den Teilchen und den Luftmolekülen, bei denen jene ein wenig von ihrer Energie verlieren, so viel, daß diese ionisiert, d. h., daß aus ihnen Elektronen herausgeschlagen werden. Wir haben also längs der Bahn des Teilchens eine Ionenspur. Enthält nun die Luft übersättigten, d. h. zur Nebelbildung neigenden Wasserdampf, aber noch keinen Nebel, so bilden sich längs der Ionenspur Nebeltröpfchen, die man durch seitliche Beleuchtung wie Sonnenstäubchen sichtbar machen kann. Das ist das Prinzip der Nebelkammer von Wilson.

In Fig. 1 sehen wir stark gekrümmte und verhältnismäßig dünne Spuren. Die Krümmung der Bahn der Teilchen ergibt sich aus der Ablenkung geladener Teilchen, die sich in einem Magnetfeld bewegen. Ferner kann man daraus und aus der Dichte der Spuren auf den Impuls der Teilchen und auf ihre Masse schließen. Uns interessieren insbesondere die beiden von der Spitze des dicken

Pfeils ausgehenden Spuren, von denen eine nach links und die andere nach rechts gekrümmt ist. Krümmung nach rechts oder Krümmung nach links bedeutet, daß eines der Teilchen positiv und das andere negativ geladen ist. Die beiden Spuren in dem Bild stellen also ein negatives und ein positives Teilchen dar, deren Massen gleich der des Elektrons sind. Es gibt also neben den negativen Elektronen auch positive, welche als erster C. D. Anderson 1932 in der kosmischen Strahlung gefunden hat, jener Strahlung, die aus ungewöhnlich energiereichen Teilchen besteht und die von außen auf die Erde kommt.

Bei den Positronen handelt es sich um Teilchen, die von Dirac auf Grund seiner Theorie des Elektrons fast vorausgesagt werden konnten. Sie sind den Elektronen sozusagen spiegelbildlich zugeordnet. Man spricht von Ladungskonjugation, weil die Ladung und ladungsähnliche Größen ihr Vorzeichen ändern. Elektronen und Positronen heißen Teilchen und Antiteilchen. Meistens haben wir Paare von Teilchen und Antiteilchen nebeneinander. Es gibt Protonen und Antiprotonen, Neutronen und Antineutronen usw. Einige Teilchen sind spiegelgleich, z. B. sind Lichtquanten mit ihren Antiteilchen identisch und darum, wie eingangs erwähnt, mit Materie und Antimaterie verträglich.

Wir müssen noch einmal zu den beiden von der Pfeilspitze ausgehenden Spuren zurückkehren. Ich habe schon gesagt, daß wir den Impuls und die Masse der Teilchen und damit auch ihre Energie bestimmen können. Woher kommt diese? Die Antwort ergibt sich, wenn wir den Versuch genauer ansehen. Wir schicken in die Wilsonkammer γ -Quanten bestimmter Energie. Diese hinterlassen zwar auch Spuren, jedoch nicht leicht erkennbare. Treffen Lichtquanten auf Atomkerne, so kann scheinbar aus dem Nichts ein Elektron-Positron-Paar entstehen. Dabei ist die Energie des Paares, wie man nachmessen kann, praktisch gleich der des ankommenden Lichtquants. Aus dem Lichtquant ist ein Elektronenpaar entstanden. Nunmehr haben wir eine Teilchenumwandlung unmittelbar vor Augen.

Sehr eindrucksvoll sind die Bilder von Teilchenschauern, die von äußerst energiereichen Teilchen der kosmischen Strahlung ausgelöst werden (Fig. 2). Bringt man mehrere Bleiplatten in eine Wilsonkammer, so löst ein in die erste Platte eindringendes Teil-

chen der kosmischen Strahlung kaskadenartig eine große Anzahl von Elektronen, Positronen und unsichtbar bleibenden γ -Quanten aus. Diese vermehren sich abermals beim Durchgang durch eine zweite Bleiplatte. Dann aber ist die Energie des Primärteilchens so weit aufgeteilt, daß die Absorption von Teilchen die Erzeugung neuer Teilchen überwiegt. Der Schauer nimmt wieder ab. Kein Zweifel: An die Stelle der Unwandelbarkeit ist die Umwandelbarkeit der Elementarteilchen getreten.

Natürlich kann man sich fragen, ob man hierbei nicht abermals erlebt, was einem bei den Atomen der Chemiker begegnet ist. Wir könnten glauben, daß die Umwandelbarkeit darauf hinweist, daß wir noch nicht bei den Elementarstrukturen angelangt sind. Diese Frage lassen wir zunächst offen, bemerken aber doch, daß es unter den bekannten Elementarteilchen keines gibt, das man im Sinne des philosophischen Atomismus als unteilbar betrachten könnte, wie u. a. daraus hervorgeht, daß mindestens alle schweren Teilchen ungefähr die nämliche Größe haben. Auch das Proton und das Neutron, von denen die Masse aller Materie hauptsächlich herrührt, machen keine Ausnahme. Denn es gibt auch Antiprotonen und Antineutronen und die Erzeugung von Paaren aus Protonen und Antiprotonen bzw. Neutronen und Antineutronen. Zwar sind Protonen und Antiprotonen stabile Teilchen, solange sie nicht zusammenstoßen. Es ist also durchaus denkbar, daß es Welten aus Antimaterie gibt. Die Antierde der Pythagoräer feiert hier auf ungeahnte Weise ihr Auferstehen. Wehe aber, wenn sich Erde und Antierde begegnen.

Es ist nicht möglich, dieser Entwicklung innerhalb eines Vortrags im einzelnen zu folgen. Im Jahre 1937 haben Anderson und Neddermeyer ein Teilchen entdeckt, das knapp 207mal schwerer ist als ein Elektron (206,765) und nahezu 9mal leichter als das Proton (8,8812). Es ist also ein Teilchen mittlerer Masse und hat von da her seinen Namen: „Meson“. Inzwischen hat es auch einen Vornamen erhalten: „ μ -Meson“. Beides ist in „Müon“ zusammengefaßt.

Diese Entdeckung war deshalb besonders aufregend, weil der japanische Physiker Yukawa 1935 eine Theorie der Kernkräfte entworfen hat, auf grund der er ein mittelschweres Teilchen vorausgesagt hat. Das Yukawateilchen sollte nach grober Abschät-

zung eine Masse von etwa 274 Elektronenmassen haben. Man hatte lange geglaubt, daß das Müon und das Yukawaquant identisch seien. Doch waren viele Eigenschaften konträr, so daß man während des Krieges in den Vereinigten Staaten von einer Mesonendämmerung gesprochen hat. Die Auflösung des Rätsels kam bald nach dem Krieg. Im Jahre 1947 beobachteten Lattes, Ochialini und Powell auf in großer Höhe exponierten photographischen Schichten mittelschwere Teilchen, „ π -Mesonen“ oder „Pionen“, wie man heute sagt, deren Masse 6,7mal kleiner ist als die der Protonen und 273mal größer als die der Elektronen. Die Pionen kommen wegen ihrer starken Wechselwirkung mit der Materie nicht bis zur Erde herunter. Und gerade diese starke Wechselwirkung braucht man für die Yukawateilchen. Man kann also die Pionen weitgehend mit den Yukawateilchen identifizieren. Die Müonen haben sich mehr und mehr als schwere Elektronen entpuppt. In allen Eigenschaften außer der Masse und davon abhängigen Größen stimmen Elektron und Müon exakt überein.

Ein wichtiges Teilchen, vielleicht das am meisten fundamentale von allen, ist das Neutrino. Die Beobachtung zeigt, daß das Elektron beim β -Zerfall nicht die ganze freiwerdende Energie übernimmt. Pauli hat daraus anfangs der Dreißigerjahre geschlossen, daß zugleich mit dem Elektron ein Teilchen entsteht, welches die fehlende Energie aufnimmt und welches sich wegen zu kleiner Wechselwirkung mit der Materie direkter Beobachtung entzieht. Man nennt dieses Teilchen „Neutrino“. Heute weiß man sehr viel über das Neutrino. Insbesondere kann man nun auch Wechselwirkungen mit der Materie beobachten, obwohl diese äußerst schwach sind. Beim Durchgang durch die ganze Erde werden von einer Billion Neutrinen mäßiger Energie nur etwa 2 absorbiert.

Anfangs der Fünfzigerjahre hat man in rascher Folge neue Elementarteilchen entdeckt. Heute sind es mehr als hundert. Die meisten von ihnen sind instabil. Zum Beispiel wandelt sich ein Neutron durch β -Zerfall gemäß (1) in ein Proton um. Die mittlere Lebensdauer beträgt 16,9 min. Andere Teilchen sind sehr viel kurzlebiger. Müonen leben rund 1 Millionstel Sekunde, Pionen sind etwa hundertmal und die A^0 -Teilchen etwa zehntausendmal kurzlebiger. Man muß aber bedenken, daß die Teilchen in

den herkömmlichen Experimenten nahezu mit Lichtgeschwindigkeit laufen, so daß sie noch durchaus beobachtbare Lebenswege haben, Λ^0 -Teilchen etwa 3cm. Darum können wir sie in Wilsonkammern oder Photoemulsionen bemerken, wenn auch im Falle der neutralen Λ^0 nur indirekt.

Neuerdings sind noch viel kleinere Lebensdauern beobachtet worden. Die kleinsten sind mit der Zeit vergleichbar, die ein Lichtquant zum Durchlaufen eines Protons braucht. Sie äußern sich nur noch darin, daß gewisse Umwandlungsprozesse für spezielle Werte der Energien der beteiligten Teilchen mit übergroßer Häufigkeit auftreten. Man spricht darum von Resonanzen. Doch haben diese kurzlebigen Erscheinungen alle Eigenschaften, die man von Teilchen her kennt.

Dort wo wir wenige fundamentale Bausteine der Materie erwartet haben, sind wir auf einen Mikrokosmos von unerwarteter Reichhaltigkeit der Strukturen gestoßen. Hinter allen Aussagen stehen konkrete, empirisch gegebene Fakten, die auch dann fortexistieren, wenn sich das, was wir über sie sagen, noch ändern sollte. Dabei haben wir nur die allerwichtigsten Fakten erwähnen können. Spin, Isospin, Durchbrechung der Parität und viele andere Begriffe, hinter denen Fakten stehen, haben wir überhaupt nicht genannt.

Wie können wir die Ordnungsstruktur dieser subnuklearen Welt erfassen? Parallel zu den Entdeckungen lief die Entwicklung adäquater Vorstellungen. Es ist völlig ausgeschlossen, hier die vielfach verschlungenen Wege zu verfolgen. Und ein Königsweg ist noch nicht erkennbar.

Immerhin kann man sagen, daß nicht mehr die Elementarteilchen selbst an der Schwelle zur Physik stehen. An ihre Stelle tritt eine Ordnung, deren Struktur die Mannigfaltigkeit der Elementarteilchen und von da her die Gesetze der Materie zu erfassen erlaubt. Es geht also primär nicht darum, über den Aufbau der Welt aus Elementarteilchen zu sprechen, sondern darum, die Welt der Elementarteilchen zu begreifen.

Bei dem Versuch, den gegenwärtigen Stand der Theorie der Elementarteilchen darzustellen, begegnen wir noch einmal und auf neue Weise dem Problem, daß es am Ende nicht auf die Vorstellungen, sondern nur auf die mit ihnen erfaßten Strukturen an-

kommt. Passende Vorstellungen sind nämlich durch die Strukturen keineswegs eindeutig bestimmt. Es kann verschiedenartige Vorstellungen geben, die zum gleichen Ordnungsgefüge führen und die darum die Wirklichkeit gleich gut darstellen. Der Mathematiker spricht in solchen Fällen von isomorphen Darstellungen. Sie sind im Hinblick auf die Wirklichkeitserkenntnis äquivalent, obwohl man von den Dingen, auf die sie bezogen sind, in ganz verschiedener Weise spricht.

Im allgemeinen setzt man sich über diese Schwierigkeit hinweg, indem man sich, geleitet von irgendwelchen Motiven, auf eine bestimmte Sprechweise einigt. In der Quantentheorie der Elementarteilchen ist man noch nicht so weit. Man muß also ausdrücklich angeben, welche Darstellung man benutzt. Ich selbst bevorzuge diejenige, die Dirac 1933 in seiner Theorie des Positrons vorgeschlagen hat, obwohl sie damals als künstlich erschien und obwohl sie inzwischen gezeigt hat, daß sie entbehrlich ist. Doch ist sie, da äquivalent, stets möglich.

Angesichts der großen Zahl verschiedenartiger Elementarteilchen verdient gerade die Diracdarstellung, die sogenannte Löchertheorie erneut Beachtung. Danach ist die Welt von einer großen Zahl von Teilchen erfüllt, die nicht unmittelbar mit den Elementarteilchen zu identifizieren sind. Wir nennen sie ‚Urfermionen‘. Der Physiker verbindet mit dem Begriff ‚Fermion‘ (in dem der Name des großen Italieners Fermi steckt) bestimmte Eigenschaften, von denen ich hier nicht zu sprechen brauche. Für uns genügt es zu wissen, daß es in jedem Raumpunkt im Mittel zwei Urfermionen gibt und daß maximal vier darin Platz haben. Diese Urfermionen bilden ein weltweites quantenmechanisches System, für das es eine große Anzahl von Quantenzuständen gibt, darunter einen tiefsten, den Grundzustand, den man bildhaft Diracsee nennt.

Tatsächlich befindet sich die Welt nicht in diesem Grundzustand, sondern in einem Zustand höherer Energie. Jedoch ist nach allem, was wir wissen, die Abweichung der wirklichen Welt vom Grundzustand relativ klein. Der mittlere Abstand der Elementarteilchen beträgt, wie nahe sie sich auch etwa in Atomkernen kommen mögen, einige Zentimeter. Darum ist es möglich, die Elementarteilchen isoliert zu betrachten. Man kann die Eigenschaften

der Elementarteilchen untersuchen, indem man annimmt, es gäbe im ganzen Diracsee nur ein einziges.

Bringen wir die Urfermionen in einem engen Bereich etwa von der Größe des Protons aus ihrem Gleichgewicht im Diracsee heraus, was mit einem gewissen Energieaufwand möglich ist, geschieht das nicht willkürlich, sondern nach den Gesetzen, denen die Urfermionen folgen, so gelangt man zu Gleichgewichtszuständen höherer Energie, zu neuen Quantenzuständen, von denen es eine große Zahl geben kann. Und jeder solche Quantenzustand liefert ein Elementarteilchen eigener Art. Es ist die alte Vorstellung von Heisenberg, Proton und Neutron als zwei Quantenzustände eines Teilchens zu betrachten, nun ausgedehnt auf alle Elementarteilchen. Auch dieser Gedanke, die Elementarteilchen als Quantenzustände eines weltweiten Systems zu verstehen, ist zuerst von Heisenberg schon gegen Ende der Vierzigerjahre propagiert worden, als noch wenige bereit waren, ihn zu akzeptieren. Heisenberg selbst spricht nicht von lokalen Störungen des Diracsees, sondern von solchen des ‚Urfeldes‘. Doch sind das im wesentlichen nur Unterschiede der Sprechweisen, auf die ich anfangs hingewiesen habe.

Was ich bisher geschildert habe, ist sehr vereinfacht. Wenn wir Urfermionen aus dem Diracsee herausnehmen, bleiben Leerstellen zurück, Löcher im See der Urfermionen, die sich ihrerseits wie Teilchen, genauer gesagt, wie Antiteilchen verhalten. Man kann also nicht von Teilchen reden, ohne gleichzeitig Antiteilchen ins Auge zu fassen. Außerdem muß man untersuchen, wie mehrere Elementarteilchen zusammenspielen, und von da zum Verhalten der Atomkerne und der Atome und schließlich zu dem der Makromaterie aufsteigen.

Das ist ein umfassendes Programm. Gegenwärtig kann man noch nicht sicher sagen, ob man mit den bisher ins Auge gefaßten Gesetzen für Urfermionen oder Urfelder die Eigenschaften der Elementarteilchen quantitativ erfaßt hat. Noch weiß man nicht einmal sicher, ob die benutzten mathematischen Methoden am Ende jeder Kritik standhalten. Doch gibt es ermutigende Anfänge. Erst in Zukunft wird man sehen, was Bestand hat und was man noch korrigieren muß. Aber das, was wir in Händen haben an Erfahrungen und an Konzepten, ist faszinierend genug, um viele zur Mitarbeit anzuregen.

In diesem Vortrag haben wir gezeigt, wie sich in wenigen Jahrzehnten vor uns eine neue Welt aufgetan hat, von der sich Philosophenweisheit nichts hat träumen lassen. Noch ist es eine offene Frage, wie weit wir diese Welt mit unseren gegenwärtigen Vorstellungen in den Griff kriegen. Aber an ihrer Faktizität – ich meine das Dasein – am Dasein, ist so wenig zu zweifeln wie an dem der Dinge, die uns hier umgeben. Beispielsweise steht es fest, daß durch Ihren Körper in jeder Minute etwa 50000 Teilchen der kosmischen Strahlung eindringen oder hindurchgehen, also rund 25 Milliarden pro Jahr. Es ist, um von etwas anderem zu sprechen als von Physik, Sache der Biologen, zu prüfen, ob sich daraus nachweisbare Strahlenschäden ergeben, ob die Strahlung etwa Anteil am Altern hat und wie weit sie die Mutationsrate beeinflußt.

Lassen Sie mich mit einem Wort von Martin Buber schließen, mit dem ich meine Grenzüberschreitungen zur Philosophie hin und über sie hinaus rechtfertigen möchte. In der Einleitung seines Vortrags „Schuld und Schuldgefühle“ sagt er: „Wohl hat sich im Gang der Geistesgeschichte jede Wissenschaft, die sich aus umfassenden Zusammenhängen löste und sich die Selbständigkeit des eigenen Bereiches sicherte, eben damit nach Gegenstand und Arbeitsweise streng und immer strenger begrenzt; aber der Forscher kann seine Verbindung mit der Wirklichkeit – die Verbindung, ohne die all sein Werk zum wohlgeordneten Spiel wird – nicht wahrhaft aufrecht erhalten, wenn er nicht immer wieder, wann immer es erforderlich ist, über die Grenzen hinausschaut, je und je in einen Bereich, der arbeitsmäßig nicht der seine ist und den er doch mit all seiner forschenden Kraft betrachten muß, um seiner Aufgabe gerecht zu werden.“