

## Was ist ein Elementarteilchen?

W. Heisenberg\*

Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, München

The question concerning the nature of elementary particles is discussed on the basis of the experimental facts and confronted with philosophical considerations. It is emphasized that certain ways of questioning have no meaning in the sub-nuclear domain, that in particular due to the relativistic structure of the dynamics it is not meaningful to talk about constituent parts of elementary particles.

Die Frage „Was ist ein Elementarteilchen?“ muß natürlich vor allem experimentell beantwortet werden. Daher will ich zuerst die wichtigsten experimentellen Ergebnisse der Elementarteilchenphysik aus den letzten fünfzig Jahren kurz zusammenfassend schildern und versuchen darzulegen, daß, wenn man die Experimente vorurteilslos betrachtet, die genannte Frage mit diesen Ergebnissen schon weitgehend beantwortet ist und daß man als Theoretiker nicht mehr viel dazuzufügen hat. Im zweiten Teil will ich dann ergänzend auf die philosophischen Probleme eingehen, die mit dem Begriff des Elementarteilchens verknüpft sind. Denn ich glaube, daß gewisse Fehlentwicklungen in der Theorie der Elementarteilchen – und ich fürchte, daß es solche Fehlentwicklungen gibt – dadurch bedingt sind, daß ihre Urheber zwar behaupten würden, sich nicht um Philosophie kümmern zu wollen, daß sie aber in Wirklichkeit unbewußt von einer schlechten Philosophie ausgehen und daher durch Vorurteile in unvernünftige Fragestellungen hineingeraten. Etwas überspitzt kann man vielleicht sagen, daß gute Physik unbewußt durch schlechte Philosophie verdorben worden sei. Schließlich will ich über diese problematischen Entwicklungen selbst sprechen, sie vergleichen mit Fehlentwicklungen in der Geschichte der Quantenmechanik, die ich selbst noch miterlebt habe, und Überlegungen darüber anstellen, wie man solche Irrwege vermeiden kann. Der Schluß des Vortrags soll also wieder mehr optimistisch sein.

### *Die wichtigsten experimentellen Ergebnisse und ihre theoretische Interpretation*

Also zunächst zu den experimentellen Tatsachen. Vor nicht ganz fünfzig Jahren hat Dirac in seiner Theorie

\* Nach einem Vortrag auf der Tagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft im März 1975.

des Elektrons vorhergesagt, daß es neben den Elektronen auch noch die dazugehörigen Antiteilchen, die Positronen, geben müßte; und wenige Jahre später wurde die Existenz der Positronen, ihre Entstehung bei der Paarerzeugung und damit die Existenz der sogenannten *Antimaterie* von Anderson und Blakett experimentell nachgewiesen. Das war eine Entdeckung allerersten Ranges. Denn bis dahin hatte man sich meistens vorgestellt, daß es zwei fundamentale Teilchensorten gibt, die Elektronen und die Protonen, die dadurch vor allen anderen ausgezeichnet seien, daß sie niemals verändert werden können, daß ihre Zahl also auch immer konstant sei, und die man eben deshalb Elementarteilchen genannt hatte. Alle Materie sollte letzten Endes aus Elektronen und Protonen aufgebaut sein. Der experimentelle Nachweis der Paarerzeugung und der Positronen zeigte, daß diese Vorstellung falsch war. Elektronen können erzeugt werden und wieder verschwinden; ihre Anzahl ist also keineswegs konstant; sie sind nicht elementar in dem früher angenommenen Sinn.

Der nächste wichtige Schritt war die Entdeckung der *künstlichen Radioaktivität* durch Fermi. Man lernte aus vielen Versuchen, daß ein Atomkern dann unter Aussendung von Teilchen in einen anderen Atomkern übergehen kann, wenn die Erhaltungssätze für Energie, Drehimpuls, elektrische Ladung usw. dies zulassen. Die Verwandlung von Energie in Materie, die schon in der Einsteinschen Relativitätstheorie als möglich erkannt worden war, ist also ein durchaus häufig zu beobachtendes Phänomen. Von einer Erhaltung der Teilchenzahl ist dabei keine Rede. Wohl aber gibt es physikalische Eigenschaften, die man durch Quantenzahlen charakterisieren kann – ich denke etwa an Drehimpuls oder elektrische Ladung –, wobei die Quantenzahlen dann positive und negative Werte annehmen können, und für diese gilt ein Erhaltungssatz.

In den Dreißiger Jahren gab es noch eine weitere wichtige experimentelle Entdeckung. Es wurde festgestellt, daß in der kosmischen Strahlung sehr energiereiche Teilchen vorkommen, die beim Zusammenstoß mit anderen Teilchen, etwa mit einem Proton in der Emulsion einer photographischen Platte, einen Schauer von vielen Sekundärteilchen auslösen können. Eine Zeitlang glaubten manche Physiker, daß solche Schauer nur durch eine Art Kaskadenbildung in Atomkernen entstehen können; später aber stellte sich heraus, daß es tatsächlich auch beim Zusammenstoß von nur zwei energiereichen Teilchen die von der Theorie vermutete *Vielfacherzeugung von Sekundärteilchen* gibt. Ende der Vierziger Jahre wurden von Powell die Pionen entdeckt, die in diesen Schauern die Hauptrolle spielen. Damit war gezeigt, daß beim Zusammenstoß sehr energiereicher Teilchen die Umwandlung von Energie in Materie ganz allgemein der entscheidende Vorgang ist, daß es also offenbar keinen Sinn mehr hat, von einer Teilung der ursprünglichen Partikel zu sprechen. Der Begriff des „Teilens“ hatte experimentell seinen Sinn verloren.

Diese neue Lage wurde in den Experimenten der Fünfziger und Sechziger Jahre immer wieder bestätigt; es wurden viele neue Teilchen entdeckt, langlebige und kurzlebige, und auf die Frage, woraus diese Teilchen bestehen, konnte es keine eindeutige Antwort mehr geben, weil diese Frage keinen vernünftigen Sinn mehr hat. Ein Proton z.B. könnte aus Neutron und Pion oder  $\Lambda$ -Hyperon und Kaon oder aus zwei Nukleonen und einem Antinukleon zusammengesetzt sein; am einfachsten wäre es zu sagen, daß ein Proton eben aus kontinuierlicher Materie besteht, und alle diese Aussagen sind gleich richtig oder gleich falsch. *Der Unterschied zwischen elementaren und zusammengesetzten Teilchen ist damit grundsätzlich verschwunden.* Und das ist wohl das wichtigste experimentelle Ergebnis der letzten fünfzig Jahre.

Infolge dieser Entwicklung haben die Experimente eine Analogie zwingend nahegelegt: Die Elementarteilchen sind etwas Ähnliches wie die stationären Zustände eines Atoms oder eines Moleküls. Es gibt ein ganzes Spektrum von Teilchen so wie es ein Spektrum von Zuständen, etwa des Eisenatoms oder der Moleküle, gibt, wobei man im letzteren Fall an die verschiedenen stationären Zustände eines Moleküls oder auch an die vielen verschiedenen möglichen Moleküle der Chemie denken kann. Bei den Teilchen wird man von einem Spektrum der „Materie“ sprechen. In der Tat haben die Experimente mit den großen Beschleunigern in den Sechziger und Siebziger Jahren bewiesen, daß diese Analogie auf alle bisherigen Erfahrungen paßt. So wie die stationären Zustände der Atome, so lassen sich auch die Teilchen durch Quantenzahlen charakterisieren, d.h. durch Symmetrie- oder Transformations-Eigenschaften, und die mit ihnen verbundenen exakten oder näherungsweise gültigen Erhaltungssätze entscheiden über die Möglichkeiten der Umwandlungen. So wie etwa die Transformationseigenschaften eines angeregten Wasserstoffatoms unter

räumlicher Drehung darüber entscheiden, ob es unter Aussendung eines Lichtquants in einen niederen Zustand übergehen kann, so wird auch die Frage, ob etwa ein  $\varphi$ -Boson unter Aussendung eines Pions in ein  $\rho$ -Boson zerfallen kann, durch solche Symmetrie-Eigenschaften entschieden. So wie es unter den stationären Zuständen eines Atoms solche mit sehr verschiedenen Lebensdauern gibt, so auch unter den Teilchen. Der Grundzustand eines Atoms ist stabil, er hat unendlich lange Lebensdauer, und das gleiche gilt für Teilchen wie Elektron, Proton, Deuteron usw. Diese stabilen Teilchen sind aber um nichts elementarer als die unstabilen. Der Grundzustand des Wasserstoffatoms folgt aus derselben Schrödinger-Gleichung, aus der auch die angeregten Zustände folgen. Auch Elektron und Lichtquant sind um nichts elementarer als etwa ein  $\Lambda$ -Hyperon.

Die experimentelle Teilchenphysik der letzten Jahre hat dann im Lauf der Entwicklung ähnliche Aufgaben erfüllt wie die Spektroskopie der frühen Zwanziger Jahre. So wie damals ein großes Tabellenwerk entstand, der sogenannte Paschen-Götze, der die stationären Zustände aller Atomhüllen sammelte, so gibt es jetzt die jährlich vervollständigten *Reviews of Particle Properties*, in denen die stationären Zustände der Materie und ihre Transformationseigenschaften registriert werden. Die Arbeit, ein solches umfangreiches Tabellenwerk zu schaffen, entspricht also etwa der sogenannten Himmelsdurchmusterung bei den Astronomen, und natürlich hofft jeder Beobachter, daß er einmal in seinem Sektor ein besonders interessantes Objekt findet.

Aber es gibt doch auch charakteristische Unterschiede zwischen der Atomhüllenphysik und der Teilchenphysik. In der Atomhülle hat man es mit so niedrigen Energien zu tun, daß die charakteristischen Züge der Relativitätstheorie vernachlässigt werden können; man kann also zur Beschreibung die unrelativistische Quantenmechanik benützen. Das bedeutet, daß in der Hüllenphysik einerseits und bei den Teilchen andererseits die maßgebenden Symmetriegruppen verschieden sein können. Die Galileigruppe der Hüllenphysik wird bei den Teilchen durch die Lorentzgruppe ersetzt; dazu kommen in der Teilchenphysik neue Gruppen wie die Isospingruppe, die der  $SU_2$ -Gruppe isomorph ist, dann die  $SU_3$ -Gruppe, die Skalengruppe und andere mehr. Es ist eine wichtige experimentelle Aufgabe, die maßgebenden Gruppen der Teilchenphysik zu bestimmen, und diese ist in den vergangenen zwanzig Jahren schon weitgehend gelöst worden.

Dabei kann man aus der Hüllenphysik lernen, daß man gerade bei den Gruppen, die offenbar nur näherungsweise gültige Symmetrien bezeichnen, zwei grundsätzlich verschiedene Typen unterscheiden kann. Denken wir etwa bei den optischen Spektren an die Gruppe  $O_3$  der räumlichen Drehungen und an die Gruppe  $O_3 \times O_3$ , die für die Multipllettstruktur in den Spektren maßgebend ist. Die Grundgleichungen der Quantenmechanik sind streng invariant gegenüber

der Gruppe der räumlichen Drehungen. Daher sind Zustände von Atomen mit höheren Drehimpulsen streng entartet, d.h. es gibt mehrere Zustände genau gleicher Energie. Nur wenn das Atom in ein äußeres elektromagnetisches Feld gesetzt wird, spalten die Zustände auf, und es entsteht, wie etwa beim Zeemann- oder Stark-Effekt, die bekannte Feinstruktur. Diese Entartung kann auch aufgehoben werden, wenn der Grundzustand des Systems nicht drehungsinvariant ist wie etwa die Grundzustände eines Kristalls oder eines Ferromagneten. In diesem Fall tritt auch eine Aufspaltung der Niveaus ein; die beiden Spinrichtungen eines Elektrons in einem Ferromagneten gehören nicht mehr genau zur gleichen Energie. Außerdem gibt es dann nach einem bekannten Theorem von Goldstone Bosonen, deren Energie mit wachsender Wellenlänge gegen Null geht, im Fall des Ferromagneten die Blochschen Spinwellen oder Magnonen.

Anders ist es bei der Gruppe  $O_3 \times O_3$ , aus der die bekannten Multipletts der optischen Spektren resultieren. Hier handelt es sich um eine Näherungssymmetrie, die dadurch zustande kommt, daß in einem bestimmten Bereich die Spin-Bahn-Wechselwirkungen klein sind, daß man also die Spins und die Bahnen der Elektronen gegeneinander verdrehen kann, ohne viel an der Wechselwirkung zu ändern. Die Symmetrie  $O_3 \times O_3$  ist also eine Folge der Dynamik des Systems, und sie ist daher auch nur in bestimmten Teilen des Spektrums eine brauchbare Näherung. Empirisch kann man die beiden Sorten der gestörten Symmetrien am deutlichsten dadurch unterscheiden, daß es bei den durch den Grundzustand gestörten fundamentalen Symmetrien die nach dem Goldstone-Theorem zugehörigen Bosonen der Ruhmasse Null oder Kräfte langer Reichweite geben muß. Wenn man sie findet, hat man Anlaß zu glauben, daß die Entartung des Grundzustandes hier eine wichtige Rolle spielt.

Überträgt man nun diese Erfahrungen aus der Atomhüllenphysik in die Teilchenphysik, so liegt es auf Grund der Experimente sehr nahe, die Lorentzgruppe und die Gruppe  $SU_2$ , d.h. die Isospingruppe, als fundamentale Symmetrien des zu Grunde liegenden Naturgesetzes zu interpretieren. Dann erscheinen Elektromagnetismus und Gravitation als die der Symmetriestörung durch den Grundzustand zugeordneten Kräfte langer Reichweite. Die höheren Gruppen  $SU_3$ ,  $SU_4$ ,  $SU_6$  oder  $SU_2 \times SU_2$ ,  $SU_3 \times SU_3$  usw. sollten dann als dynamische Symmetrien gelten so wie  $O_3 \times O_3$  in der Hüllenphysik. Bei der Dilatations- oder Skalengruppe kann man zweifeln, ob sie den fundamentalen Symmetrien zuzurechnen sei; sie wird durch die Existenz von Teilchen mit endlicher Masse und durch die von den Massen im Universum abhängige Gravitation gestört. Wegen der engen Beziehung zur Lorentzgruppe sollte man sie wohl zu den fundamentalen Symmetrien rechnen. Die eben skizzierte Zuordnung der gestörten Symmetrien zu den beiden Grundtypen wird, wie ich schon sagte, durch die experimentellen Ergebnisse nahegelegt, aber man wird

vielleicht noch nicht von einer endgültigen Fixierung sprechen können. Wichtig ist vor allem, daß man bei den Symmetriegruppen, die sich in der Phänomenologie der Spektren anbieten, die Frage stellen und womöglich beantworten muß, welchem der beiden Grundtypen sie angehören.

Noch auf eine Besonderheit der Hüllenphysik sei hingewiesen: Es gibt bei den optischen Spektren nicht kombinierende oder richtiger schwach kombinierende Termsysteme wie etwa das Parhelium- und das Orthohelium-Spektrum. In der Teilchenphysik wird man vielleicht die Einteilung des Fermionenspektrums in Baryonen und Leptonen mit dieser Art Besonderheit vergleichen können.

Die Analogie zwischen den stationären Zuständen eines Atoms oder Moleküls und den Partikeln der Elementarteilchenphysik ist also fast vollständig, und damit habe ich die Ausgangsfrage „Was ist ein Elementarteilchen?“, wie mir scheint, qualitativ auch vollständig beantwortet. Aber nur qualitativ! An den Theoretiker ist dann die weitere Frage gestellt, ob er dieses qualitative Verständnis auch durch quantitative Berechnungen untermauern kann. Dazu ist zunächst die Beantwortung einer Vorfrage notwendig: Was heißt es überhaupt, ein Spektrum quantitativ zu verstehen?

Dafür gibt es sowohl in der klassischen Physik als auch in der Quantenmechanik eine Reihe von Beispielen. Denken wir etwa an das Spektrum der elastischen Schwingungen einer Stahlplatte. Wenn man sich nicht mit einem qualitativen Verständnis begnügen will, wird man davon ausgehen, daß die Stahlplatte durch bestimmte elastische Eigenschaften charakterisiert werden kann, die sich mathematisch darstellen lassen. Wenn das gelungen ist, muß man noch die Randbedingungen hinzufügen, also z.B. dazusagen, daß die Platte kreisrund oder quadratisch, daß sie eingespannt oder nicht eingespannt ist, und daraus kann man, wenigstens im Prinzip, das Spektrum der elastischen oder akustischen Schwingungen berechnen. Zwar wird man wegen des Komplikationsgrades sicher nicht alle Schwingungen genau ausrechnen können, aber doch vielleicht die niedrigsten mit der geringsten Zahl von Knotenlinien.

Zwei Elemente sind also notwendig zum quantitativen Verständnis: die mathematisch genau formulierte Kenntnis des dynamischen Verhaltens der Platte und die Randbedingungen, die man als „kontingent“, d.h. durch die näheren Umstände bestimmt, betrachten kann; man könnte die Platte ja auch anders zuschneiden. Ähnlich ist es mit den elektrodynamischen Schwingungen eines Hohlraumresonators. Die Maxwell'schen Gleichungen bestimmen das dynamische Verhalten, und die Gestalt des Hohlraums definiert die Randbedingungen. Ähnlich ist es ferner bei dem optischen Spektrum des Eisenatoms. Die Schrödinger-Gleichung für ein System von einem Kern und 26 Elektronen bestimmt das dynamische Verhalten, dazu kommen die Randbedingungen, die in diesem Fall besagen, daß die Wellenfunktion im Unend-

lichen verschwinden soll. Wenn das Atom in einem engen Kasten eingeschlossen wäre, so ergäbe sich ein etwas verändertes Spektrum.

Überträgt man diese Erkenntnisse auf die Teilchenphysik, so kommt es also darauf an, zunächst die dynamischen Eigenschaften des Systems Materie experimentell zu ermitteln und mathematisch zu formulieren. Dann kommen als kontingentes Element die Randbedingungen hinzu, die hier im wesentlichen Aussagen über den sogenannten leeren Raum, d.h. über den Kosmos und über seine Symmetrie-Eigenschaften, zum Inhalt haben werden. Der erste Schritt muß jedenfalls der Versuch sein, ein Naturgesetz mathematisch zu formulieren, das die Dynamik der Materie festlegt. Im zweiten Schritt muß man Aussagen über die Randbedingungen machen. Denn ohne diese kann das Spektrum gar nicht definiert sein. Zum Beispiel würde ich vermuten, daß in einem „Schwarzen Loch“ der heutigen Astrophysik das Spektrum der Elementarteilchen völlig anders aussähe als bei uns. Leider kann man darüber nicht experimentieren.

Aber nun noch ein Wort über den entscheidenden ersten Schritt, nämlich die Formulierung des dynamischen Gesetzes. Es gibt Pessimisten unter den Teilchenphysikern, die glauben, daß es ein solches Naturgesetz, das die dynamischen Eigenschaften der Materie definiert, überhaupt nicht gibt. Mit einer solchen Ansicht kann ich, offen gestanden, gar nichts anfangen. Denn irgendwie muß die Dynamik der Materie doch sein, sonst gäbe es kein Spektrum; und dann sollte man sie auch mathematisch beschreiben können. Die pessimistische Auffassung würde bedeuten, daß die ganze Teilchenphysik darauf hinausliefe, am Schluß ein riesiges Tabellenwerk mit möglichst vielen stationären Zuständen der Materie, Übergangswahrscheinlichkeiten und dgl. vorzulegen, eine „Super-Review of Particle Properties“, also ein Tabellenwerk, in dem es nichts weiter zu verstehen gibt und das daher wohl auch von niemandem mehr gelesen wird. Aber es gibt auch nicht den geringsten Anlaß zu diesem Pessimismus, und an dieser Feststellung liegt mir besonders viel. Denn man beobachtet ja ein Teilchenspektrum mit scharfen Linien, also indirekt auch eine scharf definierte Dynamik der Materie. Die experimentellen Ergebnisse, die ich vorhin kurz skizziert habe, enthalten auch schon sehr bestimmte Hinweise auf die fundamentalen Invarianzeigenschaften dieses zugrunde liegenden Naturgesetzes, und aus den Dispersionsrelationen wissen wir eine ganze Menge über den Grad von Kausalität, der in diesem Gesetz formuliert ist. Wir haben also die wesentlichen Bestimmungsstücke des Naturgesetzes bereits in der Hand, und nachdem so viele andere Spektren in der Physik schließlich einigermaßen quantitativ verstanden worden sind, wird es trotz des hohen Komplikationsgrades auch hier möglich sein. Ich möchte an dieser Stelle – eben wegen der Kompliziertheit – nicht den speziellen Vorschlag diskutieren, den ich selbst zusammen mit Pauli vor langer Zeit für die mathematische Formulierung des zugrunde liegenden Gesetzes ge-

macht habe und von dem ich auch jetzt noch glaube, daß er die meisten Chancen hat, der richtige zu sein. Aber ich möchte mit allem Nachdruck darauf hinweisen, daß die Formulierung eines solchen Gesetzes die unabdingbare Voraussetzung dafür ist, daß man das Spektrum der Elementarteilchen versteht. Alles andere ist kein Verständnis; es ist kaum mehr als das Aufschlagen des Tabellenwerkes, und damit sollten wir zum mindesten als Theoretiker nicht zufrieden sein.

### *Philosophische Probleme*

Nun komme ich zu der Philosophie, von der aus bewußt oder unbewußt die Elementarteilchenphysik gesteuert wird. Seit 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Jahrtausenden wird von Philosophen und Naturforschern die Frage erörtert, was geschieht, wenn man versucht, die Materie immer weiter zu teilen. Was sind die kleinsten Bestandteile der Materie? Verschiedene Philosophen haben auf diese Frage sehr verschiedene Antworten gegeben, die alle ihren Einfluß auf die Geschichte der Naturwissenschaft ausgeübt haben. Die bekannteste ist die des Philosophen Demokrit. Bei dem Versuch, immer weiter zu teilen, stößt man schließlich auf unteilbare, unveränderliche Objekte, die Atome, und alle Stoffe sind aus Atomen zusammengesetzt. Lage und Bewegungen der Atome bestimmen die Qualität der Stoffe. Bei Aristoteles und seinen mittelalterlichen Nachfolgern ist der Begriff der kleinsten Teilchen nicht so scharf gefaßt. Es gibt hier zwar für jede Stoffart kleinste Teilchen – bei weiterem Teilen würden die Teile nicht mehr die charakteristischen Eigenschaften des Stoffes aufweisen –, aber diese kleinsten Teile sind kontinuierlich veränderbar wie die Stoffe selbst. Mathematisch sind die Stoffe also beliebig teilbar; die Materie wird als kontinuierlich vorgestellt.

Die deutlichste Gegenposition gegen Demokrit wird von Plato eingenommen. Bei dem Versuch, immer weiter zu teilen, stößt man nach Platos Meinung schließlich auf mathematische Formen: die regulären Körper der Stereometrie, die durch ihre Symmetrie-Eigenschaften definiert werden können, und die Dreiecke, aus denen man sie zusammensetzen kann. Diese Formen sind nicht selbst Materie, aber sie gestalten die Materie. Dem Element Erde z.B. liegt die Gestalt des Kubus zugrunde, dem Element Feuer die Gestalt des Tetraeders. Allen diesen Philosophien ist gemeinsam, daß sie irgendwie mit der Antinomie des unendlich Kleinen fertig werden wollen, die bekanntlich von Kant ausführlich besprochen worden ist.

Es gibt und gab natürlich auch naivere Versuche, diese Antinomie zu rationalisieren. So ist etwa von Biologen die Vorstellung entwickelt worden, daß im Samen eines Apfels ein unsichtbar kleiner Apfelbaum enthalten sei, daß dieser wieder Blüten und Früchte trage, in den Früchten wieder Samen stecken, in denen wieder ein noch kleinerer Apfelbaum verborgen

sei usw. ad infinitum. In der gleichen Weise haben wir am Anfang der Bohr-Rutherford'schen Theorie vom Atom als Planetensystem im Kleinen mit einigem Vergnügen die These entwickelt, daß auf den Planeten dieses Systems, den Elektronen, wieder ganz kleine Lebewesen wohnen, die Häuser bauen, Äcker bepflanzen und Atomphysik treiben, die dann auch zur These ihrer Atome als Planetensysteme im Kleinen kommen, usw. ad infinitum. Im Hintergrund steckt hier immer, wie ich schon sagte, die Kantsche Antinomie, daß es einerseits sehr schwer ist, sich vorzustellen, daß die Materie immer weiter geteilt werden kann, aber andererseits auch schwer ist, sich vorzustellen, daß diese Teilung einmal zwangsläufig ein Ende findet. Die Antinomie kommt, wie wir jetzt wissen, letzten Endes dadurch zustande, daß wir irrtümlich glauben, unsere Anschauung auch auf die Verhältnisse im ganz Kleinen anwenden zu können. Den stärksten Einfluß auf Physik und Chemie der letzten Jahrhunderte hat zweifellos die Atomlehre des Demokrit ausgeübt. Sie erlaubt eine anschauliche Beschreibung der chemischen Vorgänge im Kleinen. Die Atome lassen sich mit Massenpunkten der Newton'schen Mechanik vergleichen, und ein solcher Vergleich führt zu einer befriedigenden statistischen Theorie der Wärme. Zwar waren die Atome der Chemiker dann doch keine Massenpunkte, sondern Planetensysteme im Kleinen, und der Atomkern war aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt, aber Elektron, Proton und eventuell auch Neutron konnten, so glaubte man, doch wohl als die eigentlichen Atome, d.h. als die letzten unteilbaren Bausteine der Materie, angesehen werden. Die Demokritische Atomvorstellung war also ein integrierender Bestandteil des materialistischen Weltbildes des Physikers in den letzten hundert Jahren geworden; sie war leicht verständlich und einigermaßen anschaulich und bestimmte das physikalische Denken auch bei den Physikern, die mit Philosophie nichts zu tun haben wollten. An dieser Stelle möchte ich nun meinen Vorwurf begründen, daß heute in der Physik der Elementarteilchen gute Physik unbewußt durch schlechte Philosophie verdorben wird.

Es ist ja unvermeidlich, daß wir eine Sprache benutzen, die aus dieser traditionellen Philosophie stammt. Wir fragen: Woraus besteht das Proton? Kann man das Elektron teilen oder ist es unteilbar? Ist das Lichtquant einfach oder ist es zusammengesetzt? usw. Aber alle diese Fragen sind falsch gestellt, weil die Wörter „teilen“ oder „bestehen aus“ weitgehend ihren Sinn verloren haben. Es wäre also unsere Aufgabe, unsere Sprache und unser Denken, d.h. auch unsere naturwissenschaftliche Philosophie, dieser von den Experimenten geschaffenen neuen Lage anzupassen. Aber das ist leider sehr schwer. So schleichen sich in die Teilchenphysik immer wieder falsche Fragen und falsche Vorstellungen ein und führen zu den Fehlentwicklungen, über die ich gleich sprechen werde. Vorher aber noch eine Bemerkung zur Forderung nach Anschaulichkeit.

Es hat Philosophen gegeben, die die Anschaulichkeit für die Voraussetzung alles echten Verständnisses gehalten haben. So hat z.B. der Philosoph Dingler hier in München gegenüber der Relativitätstheorie die Ansicht vertreten, daß die anschauliche Euklidische Geometrie die einzig richtige Geometrie sei, denn wir setzen sie beim Bau unserer Meßapparate voraus; und mit dem letzteren hat Dingler auch recht. Also, so sagt er, müsse man die experimentellen Erfahrungen, die der allgemeinen Relativitätstheorie zugrunde liegen, anders beschreiben als mit einer von der Euklidischen abweichenden allgemeineren Riemannschen Geometrie; denn sonst verwickle man sich in Widersprüche. Aber diese Forderung ist offenbar übertrieben. Zur Rechtfertigung dessen, was wir experimentell tun, genügt es, daß in den Dimensionen unserer Apparaturen die Euklidische Geometrie in hinreichend guter Näherung gilt. Wir müssen uns also damit abfinden, daß die experimentellen Erfahrungen im ganz Kleinen und im ganz Großen uns kein anschauliches Bild mehr liefern, und wir müssen lernen, dort ohne Anschauung auszukommen. Wir erkennen dann, daß sich z.B. die besprochene Antinomie des Unendlich-Kleinen bei den Elementarteilchen in einer sehr subtilen Weise auflöst, einer Weise, an die weder Kant noch die antiken Philosophen denken können – nämlich dadurch, daß das Wort „teilen“ seinen Sinn verliert.

Wenn man die Erkenntnisse der heutigen Teilchenphysik mit irgendeiner früheren Philosophie vergleichen will, so könnte es nur die Philosophie Platos sein; denn die Teilchen der heutigen Physik sind Darstellungen von Symmetriegruppen, so lehrt es die Quantentheorie, und sie gleichen insofern den symmetrischen Körpern der platonischen Lehre.

#### *Problematische Fragestellungen in der Elementarteilchenphysik*

Aber wir wollten uns hier ja nicht mit Philosophie, sondern mit Physik beschäftigen, und daher will ich jetzt auf die Entwicklung in der theoretischen Teilchenphysik zu sprechen kommen, die meiner Ansicht nach von falschen Fragestellungen ausgeht. Da ist zunächst die These, daß die beobachteten Teilchen, wie Protonen, Pionen, Hyperonen und viele andere, aus kleineren, nicht beobachteten Teilchen, den Quarks, bestehen oder auch aus Partonen, Gluonen, charmed particles oder wie diese gedachten Teilchen alle heißen mögen. Hier ist offenbar die Frage gestellt worden: Aus was bestehen die Protonen? Aber es ist dabei vergessen worden, daß das Wort „bestehen aus“ nur dann einen halbwegs klaren Sinn gibt, wenn es gelingt, das betreffende Teilchen mit einem kleinen Energieaufwand in Bestandteile zu zerlegen, deren Ruhemasse sehr viel größer ist als dieser Energieaufwand; sonst hat das Wort „bestehen aus“ seinen Sinn verloren. Und so ist die Situation bei den Protonen. Ich kann nicht umhin, um dieses Sinnloswerden

eines scheinbar wohldefinierten Wortes zu demonstrieren, eine Geschichte zu erzählen, die Niels Bohr bei solchen Gelegenheiten gern zitiert hat. Ein kleiner Junge kommt in einen Laden mit einem Zwei-Pfennig-Stück in der Hand und sagt dem Kaufmann, er möchte gern für 2 Pfennige gemischte Bonbons haben. Der Kaufmann reicht ihm zwei Bonbons und sagt dazu: Mischen kannst Du Dir sie selber. Der Begriff „bestehen aus“ hat beim Proton genau soviel Sinn wie der Begriff „mischen“ in der Geschichte von dem kleinen Jungen.

Nun werden viele einwenden: Aber die Quark-Hypothese ist doch aus experimentellen Erfahrungen gewonnen worden, nämlich aus der Feststellung der empirischen Relevanz der  $SU_3$ -Gruppe, und außerdem bewährt sie sich bei der Deutung vieler Experimente auch über die Anwendung der  $SU_3$ -Gruppe hinaus. Dies soll nicht bestritten werden. Aber ich möchte ein Gegenbeispiel aus der Geschichte der Quantenmechanik anführen, die ich selber miterlebt habe; ein Gegenbeispiel, das die Schwäche dieser Art von Argumenten deutlich zeigt. Vor der Bohrschen Theorie war von vielen Physikern behauptet worden, daß ein Atom aus harmonischen Oszillatoren bestehen müsse. Denn das optische Spektrum enthält ja scharfe Linien, und die können nur von harmonischen Oszillatoren emittiert werden. Die Ladungen müßten in diesen Oszillatoren anderen  $e/m$ -Werten entsprechen als beim Elektron, und außerdem müßte es sehr viele Oszillatoren geben, da es auch sehr viele Linien im Spektrum gibt.

Ungeachtet dieser Schwierigkeiten konstruierte Woldemar Voigt in Göttingen im Jahr 1912 eine Theorie des anomalen Zeemann-Effekts der D-Linien im optischen Spektrum des Natriums, und zwar in folgender Weise: Er nahm zwei gekoppelte Oszillatoren an, die ohne äußeres Magnetfeld die Frequenzen der beiden D-Linien ergaben. Er konnte die Kopplung der Oszillatoren untereinander und mit dem äußeren Feld so einrichten, daß bei schwachen Magnetfeldern der anomale Zeemann-Effekt richtig herauskam und daß bei sehr starken Magnetfeldern auch der Paschen-Back-Effekt korrekt dargestellt wurde. Für das Zwischengebiet mittlerer Felder ergaben sich für die Frequenzen und Intensitäten lange und komplizierte Quadratwurzeln, also recht unübersichtliche Formeln, die aber die Experimente offenbar sehr genau wiedergaben. Fünfzehn Jahre später haben Jordan und ich uns die Mühe gemacht, das gleiche Problem nach den Methoden der quantenmechanischen Störungstheorie durchzurechnen. Zu unserer größten Überraschung bekamen wir exakt die alten Voigtschen Formeln heraus, sowohl was die Frequenzen als auch was die Intensitäten betrifft, und zwar auch in dem komplizierten Gebiet der mittleren Felder. Den Grund dafür konnten wir später gut einsehen; er war rein formal mathematischer Art. Die quantenmechanische Störungstheorie führt auf ein System von gekoppelten linearen Gleichungen, die Frequenzen bestimmen sich aus den Eigenwerten des Gleichungssystems. Ein System von

gekoppelten harmonischen Oszillatoren führt in der klassischen Theorie ebenfalls auf ein solches gekoppeltes lineares Gleichungssystem. Da man in der Voigtschen Theorie die wichtigsten Parameter angelegentlich hatte, war es also kein Wunder, daß das Richtige herauskam. Zum Verständnis des Atombaus hat aber die Voigtsche Theorie nichts beigetragen.

Warum ist dieser Versuch Voigts einerseits so erfolgreich und andererseits so vergeblich gewesen? Weil Voigt die D-Linien allein betrachten wollte, ohne vom ganzen Linienspektrum Kenntnis zu nehmen. Voigt hat einen bestimmten Aspekt der Oszillatorhypothese phänomenologisch benützt und alle übrigen Ungeheimheiten dieses Modells ignoriert oder bewußt im Nebel gelassen. Er hat also seine Hypothese einfach nicht wirklich ernst genommen. In der gleichen Weise fürchte ich, daß die Quark-Hypothese von ihren Urhebern gar nicht ernst genommen wird. Die Frage nach der Statistik der Quarks, nach den Kräften, die sie zusammenhalten, den Teilchen, die diesen Kräften entsprechen, nach den Gründen, warum die Quarks nie als freie Teilchen herauskommen, nach der Paarzeugung der Quarks im Inneren des Elementarteilchens, alle diese Fragen werden mehr oder weniger im Nebel gelassen. Wenn man die Quark-Hypothese wirklich ernst nehmen wollte, so müßte man einen präzisen mathematischen Ansatz für die Dynamik der Quarks und die sie zusammenhaltenden Kräfte machen und zeigen, daß dieser Ansatz wenigstens qualitativ die vielen verschiedenen heute bekannten Züge der Teilchenphysik richtig wiedergeben kann. Es darf keine Frage der Teilchenphysik geben, auf die dieser Ansatz nicht angewendet werden dürfte. Solche Versuche sind mir nicht bekannt, und ich fürchte auch, daß jeder derartige in präziser mathematischer Sprache dargestellte Versuch sich sehr schnell widerlegen ließe. Ich will meine Einwände also in Form von Fragen formulieren: „Trägt die Quark-Hypothese zum Verständnis des Teilchenspektrums wirklich mehr bei als seinerzeit die Voigtsche Hypothese der Oszillatoren zum Verständnis des Baus der Atomhülle beigetragen hat? Steckt hinter der Quark-Hypothese nicht doch die experimentell längst widerlegte Vorstellung, daß man einfache und zusammengesetzte Teilchen unterscheiden könne?“

Ich möchte noch kurz auf ein paar Einzelfragen eingehen. Wenn die  $SU_3$ -Gruppe für die Struktur des Teilchenspektrums eine wichtige Rolle spielt, und das muß man auf Grund der Experimente annehmen, so ist es wichtig zu entscheiden, ob es sich um eine fundamentale Symmetrie des zugrunde liegenden Naturgesetzes handelt oder um eine dynamische Symmetrie, die von vornherein nur näherungsweise gelten kann. Wenn diese Entscheidung im Unklaren gelassen wird, so bleiben auch alle weiteren Annahmen über die dem Spektrum zugrunde liegende Dynamik im Unklaren, und dann kann man nichts mehr verstehen. Bei den höheren Symmetrien wie  $SU_4$ ,  $SU_6$ ,  $SU_{12}$ ,  $SU_2 \times SU_2$  usw. handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um dynamische Symmetrien, die in der

Phänomenologie nützlich sein können; aber ihr heuristischer Wert könnte meines Erachtens mit dem heuristischen Wert der Zyklen und Epizyklen in der Astronomie des Ptolemäus verglichen werden. Sie lassen nur recht indirekt Rückschlüsse auf die Struktur des zugrunde liegenden Naturgesetzes zu.

Schließlich noch ein Wort zu den wichtigsten experimentellen Ergebnissen der letzten Jahre. Es sind neuerdings Bosonen relativ hoher Masse in der Gegend von 3–4 GeV und langer Lebensdauer entdeckt worden. Solche Zustände sind grundsätzlich durchaus zu erwarten, wie insbesondere Dürr betont hat. Ob man sie auf Grund der Besonderheit ihrer langen Lebensdauer näherungsweise als zusammengesetzt aus anderen schon bekannten Teilchen langer Lebensdauer auffassen kann, das ist natürlich eine schwierige dynamische Frage, in der die ganze Komplikation der Viel-Teilchen-Physik wirksam wird. Als eine völlig unnötige Spekulation würde mir allerdings der Versuch erscheinen, wieder neue Teilchen ad hoc einzuführen, aus denen die genannten Objekte bestehen sollen. Denn das wäre wieder die falsche Fragestellung, die nicht zum Verständnis des Spektrums beiträgt.

Ferner sind mit den Speicherringen in Genf und mit der Batavia-Maschine die totalen Wirkungsquerschnitte für Proton-Proton-Stöße bei sehr hohen Energien gemessen worden. Dabei hat sich ergeben, daß die Wirkungsquerschnitte etwa mit dem Quadrat des Logarithmus der Energie anwachsen, ein Verhalten, das für die asymptotische Region auch schon vor langer Zeit von der Theorie vermutet worden war. Diese Resultate, die sich inzwischen auch beim Stoß anderer Teilchen ergeben haben, machen es also wahrscheinlich, daß mit den großen Beschleunigern

das asymptotische Gebiet schon erreicht worden ist, daß man daher auch dort keine Überraschungen mehr zu erwarten hat.

Ganz allgemein sollte man bei neuen Experimenten nicht einen Deus ex machina erhoffen, der plötzlich das Spektrum der Teilchen verständlich macht. Denn die Experimente der letzten fünfzig Jahre geben schon eine qualitativ völlig befriedigende, widerspruchsfreie und geschlossene Antwort auf die Frage „Was ist ein Elementarteilchen?“. Die quantitativen Einzelheiten können – wie etwa in der Quantenchemie – nur mit viel physikalischer und mathematischer Kleinarbeit im Lauf der Jahre, aber nicht plötzlich geklärt werden.

Daher kann ich schließen mit einer optimistischen Vorschau auf die Entwicklungen in der Teilchenphysik, die mir erfolgversprechend scheinen. Neue experimentelle Ergebnisse sind natürlich immer wertvoll, auch wenn sie zunächst nur das Tabellenwerk erweitern; besonders interessant aber sind sie dann, wenn sie kritische Fragen der Theorie beantworten. In der Theorie wird man versuchen müssen, ohne alle halb philosophischen Vorurteile präzise Annahmen über die zugrunde liegende Dynamik der Materie zu machen. Diese muß man voll ernst nehmen, man darf sich also nicht mit vagen Hypothesen begnügen, bei denen das meiste im Nebel bleibt. Denn das Teilchenspektrum kann nur verstanden werden, wenn man die zugrunde liegende Dynamik der Materie kennt; um diese Dynamik geht es. Alles andere wäre nur eine Art Wortgemälde über das Tabellenwerk, und dann wäre das Tabellenwerk wohl inhaltsreicher als das Wortgemälde.

Eingegangen am 8. Oktober 1975