

### Elementarteilchen

von

Prof. Dr. WOLFGANG FINKELNBURG

1. Einleitung und Problemstellung
2. Die elementaren Bausteine der Materie
  - a) Das Proton
  - b) Das Neutron
  - c) Das Elektron
3. Der Aufbau der Kerne, die Isotopie und die einfachsten zusammengesetzten Kernteilchen
  - a) Kernaufbau und Isotopie
  - b) Das Deuteron
  - c) Das  $\alpha$ -Teilchen
4. Die übrigen Elementarteilchen
  - a) Das Positron
  - b) Künstliche Radioaktivität
  - c) Die Mesonen
  - d) Das Neutrino
  - e) Das Strahlungsquant (Photon)
5. Überblick über die Eigenschaften der Elementarteilchen
6. Die Theorie der Elementarteilchen und das Problem der universellen Naturkonstanten

#### 1. Einleitung und Problemstellung

In der modernen Physik und ihren auch den Chemiker in immer steigendem Maß interessierenden Zweigen wie der Isotopenlehre, der Kernchemie und der künstlichen Radioaktivität spielt das Problem der Elementarteilchen eine grundlegende Rolle, ja die Kenntnis der wichtigsten Eigenschaften und Wirkungen der Elementarteilchen oder Elementarbausteine unserer gesamten Welt ist für ihr Verständnis eigentlich unbedingte Voraussetzung. Aus diesem Grunde soll hier auf Wunsch der Redaktion eine Darstellung des Problems gegeben werden, in der alles für den Chemiker heute Wissenswerte übersichtlich zusammengefaßt ist. Das Problem der Elementarteilchen besitzt aber über die angedeuteten Gründe hinaus ein allgemeines Interesse deshalb, weil kein Atomphysiker daran zweifelt, daß im Zusammenhang mit der Erforschung der Höhenstrahlung und der neuesten Entwicklung der Kern-Experimentiertechnik neue, für die gesamte Physik grundlegende Entdeckungen gerade auf dem Gebiet der Elementarteilchen zu erwarten sind, und weil schließlich schon heute gerade die Lehre von den Elementarteilchen am deutlichsten die tiefgreifenden Änderungen widerspiegelt, die die Physik in den letzten Jahrzehnten durchgemacht hat.

Als „Elementarteilchen“ bezeichnen wir dabei diejenigen letzten Bausteine unserer stofflichen Welt sowie diejenigen bei physikalischen Vorgängen (Umsetzungen) auftretenden Teilchen, die wir nicht im eigentlichen Sinn als zusammengesetzt ansehen können. Mit diesen letzten Worten ist eine Einschränkung angedeutet, die wir erst im Lauf unserer Darstellung voll verstehen werden, wenn wir erfahren, daß auch die Elementarteilchen nicht schlechthin unveränderliche „Bausteine“ im alten rein mechanischen Sinn sind, von denen man das bis vor wenigen Jahren allgemein geglaubt hatte, sondern daß auch sie sich unter besonderen Umständen ineinander umwandeln, ja völlig in Energie verwandeln und aus Energie (Strahlung- oder kinetischer Energie) entstehen können.

Wir können also die Elementarteilchen ohne große Willkür einteilen in die Gruppe der das Proton, das Neutron und das Elektron umfassenden elementaren Bausteine der Materie, und in die Gruppe der in viel geringerer Häufigkeit nur bei atomaren Prozessen entstehenden übrigen Elementarteilchen, zu denen das positive Elektron oder Positron, die schweren Elektronen oder Mesonen, das Neutrino und endlich die Strahlungsquanten gehören.

Wir behandeln im folgenden zunächst die elementaren Atombausteine und ihre Bedeutung für den Aufbau der Materie, wobei von den zusammengesetzten Kernteilchen (bei denen es sich also nicht um Elementarteilchen handelt!) das Deuteron (der Kern des schweren Wasserstoffisotops) und das  $\alpha$ -Teilchen wegen ihrer Bedeutung für die Kernphysik hervorgehoben werden sollen und anschließend die übrigen Elementarteilchen mit der Fülle der zwischen ihnen und den normalerweise stabilen Elementarteilchen möglichen Umwandlungsvorgängen. Den Schluß bildet dann ein kurzer Überblick über die Aufgaben einer Theorie der Elementarteilchen im Zusammenhang mit dem ebenso wichtigen wie merkwürdigen Problem der universellen Naturkonstanten. Bei unserer Darstellung müssen wir uns weitgehend auf die Wiedergabe der Ergebnisse der physikalischen Forschung beschränken, während für die Beweise und Belege unserer Behauptungen auf die größeren Darstellungen der Atomphysik verwiesen sei<sup>1)</sup>.

#### 2. Die elementaren Bausteine der Materie

Unsere gesamte stoffliche Welt ist nach unserer heutigen, gut gesicherten Kenntnis aus nur drei Arten von Elementarbausteinen aufgebaut. Alle Atomkerne setzen sich ausschließlich aus Protonen und Neutronen zusammen, während die den Kern umgebende Atomhülle aus negativen Elektronen besteht, deren Zahl wegen der elektrischen Neutralität der Atome jeweils der der (positiv geladenen) Protonen im Kern gleich ist.

##### a) Das Proton

Als erster oder Ur-Elementarbaustein der Materie wurde das Proton (proton = das Erstel) erkannt, der Kern des einfachsten und leichtesten aller Atome, des Wasserstoffatoms. Durch Ionisation von H-Atomen in elektrischen Entladungen kann man freie Protonen leicht erzeugen (Kanalstrahlen) und aus ihrer Ablenkung im elektrischen und magnetischen Feld ihre beiden wichtigsten Eigenschaften, die elektrische Ladung und die Masse des Protons, bestimmen. Dabei haben sich, wie vorsichtshalber vielleicht erwähnt werden sollte, individuelle Unterschiede niemals feststellen lassen: alle Protonen zeigen bezüglich aller physikalischer Eigenschaften genau das gleiche Verhalten.

<sup>1)</sup> Für eine Darstellung der Physik der Kerne und Elementarteilchen vgl. W. Heisenberg, „Die Physik der Atomkerne“, Vieweg, Braunschweig 1943, für die allgemeinen Zusammenhänge mit der Atom- und Kernphysik etwa das demnächst im Springer-Verlag erscheinende Lehrbuch des Verfassers: „Einführung in die Atomphysik“

Die positive elektrische Ladung des Protons ist gleich der elektrischen Elementarladung

$$e = 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ el.stat.Einh.} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coul (Amp. sec)}$$

seine Masse beträgt

$$M_P = 1,6725 \cdot 10^{-24} \text{ Gramm}$$

Im allgem. wird die Masse von Atomen und atomaren Teilchen allerdings nicht in Gramm, sondern in Atomgewichtseinheiten, bezogen auf die Masse des Sauerstoffatoms gleich 16, angegeben. Wenn wir ganz exakt sein wollen, haben wir dabei das chemische und das physikalische Atomgewichtssystem zu unterscheiden. Dieser Unterschied rührt daher, daß das Element Sauerstoff ein Gemisch von drei verschiedenen Isotopen Atomen mit den Massen 16, 17 und 18 darstellt, und daß die Chemiker ihre Atomgewichte auf die mittlere Masse des auf der Erde vorkommenden Sauerstoff-Isotopengemisches = 16,0000 beziehen, die Physiker dagegen auf die Masse des Sauerstoffisotops 16 gleich 16,0000. Nur dem glücklichen Umstand, daß die Sauerstoffisotope der Massen 17 und 18 relativ zum Hauptisotop der Masse 16 sehr selten sind, zusammen nämlich nur 0,24% ausmachen, ist es zuzuschreiben, daß die chemischen und die physikalischen Atomgewichte sich um nur 0,027% unterscheiden, wobei die chemischen Atomgewichte natürlich wegen des Bezuges auf das Isotopengemisch als Einheit die kleineren sind. Dieses Atomgewicht des Protons beträgt

$$A_P = 1,00758 \pm 0,00002 \text{ physikal. Atomgew.-Einheiten}$$

Als nächste Eigenschaft des Protons könnte man nach seiner Größe, d. h. seinem Radius fragen. Bezüglich dieser räumlichen Ausdehnung aller Elementarteilchen müssen wir uns klar machen, daß sie viel weniger exakt definierbar ist als z. B. der Radius einer Billardkugel. Bei einer solchen ist der Radius durch die Feststellung definiert, daß beim Vorbeiflug zweier Kugeln ein ablenkender Zusammenstoß erfolgt, wenn der Abstand ihrer Mittelpunkte kleiner wird als  $2r$ , bei auch nur etwas größerem Abstand dagegen die Kugeln völlig unabgelenkt aneinander vorbeifliegen. Die Reichweite der „ablenkenden Kräfte“ ist also bei den Billardkugeln sehr exakt definiert und genau feststellbar; sie wird (vom Kugelmittelpunkt aus gerechnet) sinnvoll als Radius der Kugel bezeichnet. Bei atomaren Teilchen dagegen fehlt diese scharfe Definitionsmöglichkeit des Radius, weil die ablenkenden Kräfte mehr oder weniger langsam nach außen abklingen: die Angabe eines Teilchenradius ist daher stets mit einer gewissen Willkür verbunden. Beim Proton wie bei allen anderen geladenen Massenteilchen haben wir es nun bei Zusammenstößen mit zwei Arten von ablenkenden Kräften zu tun: der elektrostatischen *Coulomb*-Kraft, die mit  $1/r^2$  nach außen abfällt, und mit einer spezifischen Kernkraft, die eng mit dem Wesen des Teilchens selbst zusammenhängt und mit einer höheren Potenz von  $1/r$  ebenfalls nach außen abfällt. Als Radius des Protons bezeichnet man den Radius dieser typischen Kernkraft, wie man sie z. B. bei Stößen mit ungeladenen Teilchen (Neutronen, vgl. Abschn. b) messen kann, oder aus der Ablenkung geladener Teilchen, wenn man rechnerisch die elektrostatische Ablenkung eliminiert. Untersuchungen dieser Art haben für den so definierten „Radius“ des Protons den Wert

$$r_P = 1,3 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

ergeben, der nach einer Bemerkung des Verfassers<sup>1a)</sup> überraschenderweise innerhalb der Meßgenauigkeit mit der Protonenmasse  $M_P$  und den beiden universellen Naturkonstanten  $h$  (*Plancksches Wirkungsquantum*) und  $c$  (*Lichtgeschwindigkeit*) durch die Beziehung

$$r_P = \frac{h}{M_P c}$$

verknüpft ist und mit der in der neuesten Quantenmechanik von *Heisenberg* eingeführten universellen Naturkonstanten von der Dimension einer „kleinsten Länge“ gleicher Größenordnung in Zusammenhang zu stehen scheint.

Das Proton besitzt ferner nach spektroskopischen und anderen atomphysikalischen Untersuchungen einen mechanischen Eigen-

drehimpuls oder Drall, den sog. „Spin“ der Größe

$$s_P = M_P r^2 \omega = \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$$

es rotiert also als kleiner Kreisel mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  um seine eigene Achse. Teilweise durch diese Eigenrotation der mit dem Proton verknüpften elektrischen Ladung bedingt ist das magnetische Moment des Protons, das den Wert

$$\mu_P = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ Gauss} \cdot \text{cm}^3$$

besitzt. Das Proton verhält sich also auch wie ein kleiner Stabmagnet, dessen Achse mit der Drehachse des Protons übereinstimmt.

Der mechanische Spin ebenso wie das magnetische Eigenmoment des Protons machen sich nicht nur durch geringe Wirkungen auf die Elektronenhülle der Atome, in deren Kern das Proton eingebaut ist, und damit in den Atomspektren bemerkbar, sondern sind auch für das Verhalten der Protonen beim Einbau in größere Atomkerne von entscheidender Bedeutung, gehören also zu den wichtigsten Eigenschaften des Protons wie der Elementarteilchen ganz allgemein.

Von den äußeren Wirkungen des Protons erwähnen wir als wichtig für seinen Nachweis noch die Ionisationsfähigkeit, die es als elektrisch geladenes Teilchen besitzt: ein die Luft oder ganz allgemein Materie durchziehendes schnelles Proton vermag auf seinem Wege, infolge elektrischer Wechselwirkung mit den von ihm getroffenen Molekeln oder Atomen, diese zu ionisieren und kann durch die Messung dieser Ionisation in der Ionisationskammer bzw. dem Zählrohr, oder durch die Sichtbarmachung seiner Bahn in der Nebelkammer, nachgewiesen werden.

Das Proton verhält sich, ebenso wie die beiden gleich zu besprechenden Elementarteilchen Neutron und Elektron, als freies Teilchen etwa bei Gasentladungsvorgängen oder normalen Kernumsetzungen wie ein stabiles, nicht umwandelbares Teilchen, obwohl wir später hören werden, daß es in Atomkernen sowie bei gewissen sehr extremen Kernstößen charakteristische Umwandlungen erleben kann.

#### b) Das Neutron

Die Existenz des Neutrons als vielleicht des zweitwichtigsten Elementarteilchens ist erst 1932 von *Chadwick* aus Beobachtungen von *Bothe* und *Becker* erschlossen worden; wenig später erkannte dann *Heisenberg* seine grundlegende Bedeutung als des zweiten Elementarbausteins aller Atomkerne.

Das Neutron ist ein Elementarteilchen, das bis auf die fehlende elektrische Ladung in seinen Eigenschaften größte Ähnlichkeit mit dem Proton zeigt; man kann es in erster Näherung geradezu als elektrisch neutrales Proton ansehen. Seine Masse ist mit

$$M_N = 1,675 \cdot 10^{-24} \text{ Gramm}$$

bzw. sein Atomgewicht mit

$$A_N = 1,00895 \text{ physikal. Atomgew.-Einheiten}$$

nur rund 0,1% größer als die des Protons; auch sein Radius und sein mechanischer Eigendrehimpuls (Spin) stimmen mit den entsprechenden Größen des Protons, der erstere größenordnungsmäßig, der letztere genau überein. Das Neutron besitzt, wie sein Name sagt, also keine elektrische Ladung, merkwürdigerweise aber trotzdem ein magnetisches Eigenmoment der Größe

$$\mu_N = -0,9 \cdot 10^{-23} \text{ Gauss} \cdot \text{cm}^3$$

Das negative Vorzeichen dieses magnetischen Moments deutet an, daß es bezogen auf die Rotationsrichtung (bzw. den Vektor des Spins) umgekehrt orientiert ist wie das des Protons. Auf die Deutung dieser merkwürdigen Tatsache, daß das Neutron trotz seiner elektrischen Neutralität ein magnetisches Eigenmoment besitzt, können wir erst später eingehen.

Da das Neutron ungeladen ist, kann es auch beim Durchgang durch Materie diese nicht ionisieren. Es ist daher unmöglich, es direkt mit der Nebelkammer, dem Zählrohr oder der Ionisationskammer nachzuweisen, und es ist deshalb auch erst so spät entdeckt worden. Sein Nachweis geschieht heute indirekt nach zwei verschiedenen Methoden. Beim zentralen Stoß auf Protonen wasserstoffhaltiger Substanzen überträgt es nach den Ge-

<sup>1a)</sup> Naturwiss. 1947. (Im Druck).

setzen des elastischen Stoßes seine gesamte kinetische Energie auf das gestoßene Proton, das dann seinerseits als elektrisch geladenes schnelles Teilchen die Materie zu ionisieren vermag und daher nachweisbar ist. Bild 1 zeigt einen Beleg für diesen Prozeß beim Durchgang von Neutronen durch eine mit Methan gefüllte Nebelkammer: überall im Raum sind durch die unsichtbaren Neutronen aus getroffenen Methanmolekeln Protonen herausgeschlagen worden, deren Bahnen durch die Ionisation der Protonen in der Kammer sichtbar gemacht werden konnten.

Die zweite Nachweismethode für Neutronen (und zwar besonders für langsame Neutronen) beruht darauf, daß diese sich leicht an zahlreiche Atomkerne anlagern und diese dadurch zu künstlicher Radioaktivität, d. h. zur Aussendung schneller Elektronen, anregen. Einzelheiten über diesen Prozeß erfahren wir in Abschn. 4b. Das Neutron vermag nämlich als ungeladenes Teilchen leicht in alle Atomkerne einzudringen, während die positiven Protonen ebenso wie die als Stoßteilchen viel benutzten Deuteronen oder  $\alpha$ -Teilchen (vgl. Abschn. 3b u. 3c) wegen ihrer positiven Ladung von den positiven Atomkernen abgestoßen werden und daher selbst bei relativ großer kinetischer Energie (entsprechend einer Beschleunigung mit z. B. 1 Million Volt) nur



Bild 1

Durchgang von Neutronen durch eine mit 60% Methan und 40% Argon gefüllte Nebelkammer. Druck 3,5 atm.; Kammerdurchmesser 25 cm (aus Bothe, Gentner u. Meier-Leibnitz: Atlas typischer Nebelkammeraufnahmen)

in die leichteren Kerne geringer Kernladung einzudringen vermögen. Auf der leichten Eindringfähigkeit auch in die schwersten Atomkerne beruht die besondere Bedeutung der Neutronen für die Einleitung von Kernreaktionen. Bekanntlich beruht ja auch die Atombombe auf einem durch Neutronenbeschuß bewirkten

Zerfall des instabilen Urankerns  $^{238}_{92}\text{U}$ .

Erzeugt werden Neutronen bei zahlreichen Kernreaktionen, z. B. beim Schuß zweier Deuteronen, der in Abschn. 3b zu besprechenden Kerne des „schweren“ Wasserstoffisotops, gegeneinander (sog. „D-D-Reaktion“), wobei Neutronen und Heliumisotope der Masse 3 entstehen. Praktisch schießt man dabei mittels Hochspannung beschleunigte Deuteronen gegen eine Deuterium-Verbindung wie schweres Ammoniumchlorid ( $\text{ND}_4\text{Cl}$ ) oder schweres Eis ( $\text{D}_2\text{O}$ ).

Bevor wir auf die Rolle der Protonen und Neutronen beim Aufbau der Atomkerne, und damit auf die Erscheinung der Isotopie eingehen, betrachten wir erst noch das Elektron als dritten Elementarbaustein der Materie.

### c) Das Elektron

Die Möglichkeiten der Befreiung von Elektronen aus Atomen, Molekeln und Festkörpern sind allgemein bekannt: die Elektronen verdampfen aus erhitzten Metallen (Glühkathoden), werden durch kurzweiliges Licht aus Metalloberflächen befreit (Photoeffekt) und entstehen durch Ionisation von Gasmolekeln in

allen elektrischen Entladungen. In der Elektronenröhre der Hochfrequenztechnik, dem Kathodenstrahl- und Röntgenrohr, dem Elektronenmikroskop und der Fülle der anderen Elektronengeräte hat dieses Elementarteilchen bereits größte technische Bedeutung erlangt. Elektronen werden ferner als sog.  $\beta$ -Teilchen von natürlich wie künstlich radioaktiven Atomkernen emittiert, worauf wir noch zurückkommen.

Die Ablenkung der Elektronen im elektrischen und magnetischen Feld ergibt für ihre negative Ladung den gleichen Absolutwert wie für die positive Ladung des Protons, nämlich eine Elementarladung  $e$ , während die Ruhemasse des Elektrons (wir sprechen von Ruhemasse, weil die Masse ja nach der Relativitätstheorie mit wachsender Geschwindigkeit des Teilchens zunimmt) mit

$$m_e = 9,107 \cdot 10^{-28} \text{ Gramm}$$

bzw. sein „Atomgewicht“ mit

$$A_e = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ physikal. Atomgew.-Einheiten}$$

um den Faktor 1836,5 kleiner ist als die des Protons.

Ein Radius des Elektrons ist nach den oben beim Proton gemachten Ausführungen eigentlich garnicht definierbar, da die vom Elektron ausgeübten Kräfte rein elektrostatischer Natur zu sein scheinen und daher wie  $1/r^2$  bis ins Unendliche reichen, während die Existenz einer nicht elektrostatischen Energie und Masse des Elektrons zum mindestens sehr zweifelhaft ist. Wegen dieser Unsicherheit über die wahre „Struktur des Elektrons“, die übrigens eines der wichtigsten aktuellen Probleme der Theorie der Elementarteilchen darstellt, hat auch der sog. klassische Elektronenradius

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2,82 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

keine große physikalische Bedeutung; er ist gleich dem Radius einer mit der Elektronenladung  $e$  geladenen Kugel, deren elektrostatische Energie  $e^2/r$  gleich der Eigenenergie  $m_e c^2$  der Ruhemasse des Elektrons ist.

Wie das Proton und Neutron besitzt das Elektron einen mechanischen Eigendrehimpuls Spin der Größe  $\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$  (der übrigens am Elektron vom Goudsmit und Uhlenbeck 1925 entdeckt worden ist) und ein magnetisches Eigenmoment

$$\mu_e = \frac{e h}{4 \pi m_e c} = 9,273 \cdot 10^{-21} \text{ Gauss} \cdot \text{cm}^3,$$

das im Gegensatz zu den magnetischen Momenten des Protons und Neutrons ausschließlich auf der Rotation der Elektronenladung beruht und daher gemäß obiger Gleichung direkt aus der Atomtheorie folgt; es heißt ein Bohrsches Magneton. Die ungeheure Fülle der Wirkungen der Elektronenhüllen der Atome und Molekeln ist nur unter Berücksichtigung des Spins und des magnetischen Moments des Elektrons verständlich; so u. a. die chemische Bindung, der Bau des Periodischen Systems der Elemente und die Erscheinung des Ferromagnetismus der Eisenmetalle. Spin und magnetisches Moment gehören damit ersichtlich zu den wichtigsten Eigenschaften dieses Elementarteilchens.

### 3. Der Aufbau der Kerne, die Isotopie und die einfachsten zusammengesetzten Kernteilchen

Der Aufbau der Atome aus den behandelten Elementarteilchen ist bekannt: Das Fluoratom mit der Ordnungszahl 9 und dem Atomgewicht 19 beispielsweise besitzt einen Kern, der aus 9 Protonen und 10 Neutronen besteht, bei der runden Masse von 19 Atomgewichtseinheiten also 9 positive Ladungen trägt; und diese werden durch die ebenfalls 9 die Atomhülle bildenden Elektronen neutralisiert. In der symbolischen Schreibweise  $^{19}_9\text{F}$  bedeutet daher die unten links stehende Zahl stets die Zahl der Protonen im Kern, die gleich ist der Zahl der Elektronen der Atomhülle, die Zahl links oben dagegen die Summe der Protonen und Neutronen im Kern<sup>3)</sup>.

<sup>3)</sup> Mit Rücksicht auf zahlreiche physikalische Arbeiten und Bücher sei erwähnt, daß die Physiker vielfach des übersichtlicheren Druckes wegen die Massenzahl oben rechts an das Elementsymbol schreiben, z. B.  $^{19}\text{F}$ .

### a) Kernaufbau und Isotopie

Nun haben eine große Zahl von Elementen bekanntlich eine ganze Anzahl teils stabiler, teils radioaktiver Isotope. Das bedeutet, daß es beispielsweise von dem durch seine Ordnungszahl 92 eindeutig gekennzeichneten Element Uran mehrere, nur durch ihre verschiedenen Massen unterschiedene Atome gibt, die man Isotope nennt. Da die Atommasse aber wegen der oben erwähnten geringen Masse der Elektronen praktisch gleich der der Protonen und Neutronen im Kern ist, und da die Protonen-Zahl gleich der Ordnungszahl ist und damit das betreffende Element eindeutig charakterisiert —, folgt, daß die verschiedenen Isotope eines Elements sich nur durch die Zahl der Neutronen im Kern unterscheiden können. Das durch die Atombombe berühmt gewordene Uranisotop  $^{235}_{92}\text{U}$  hat also drei Neutronen weniger im Kern als das „normale“, d. h. häufigste Uranisotop  $^{238}_{92}\text{U}$ . Daß Isotope

Atome sich außer durch ihre Masse praktisch nicht unterscheiden, liegt daran, daß die Wirkungen des Atomkerns auf die Elektronenhülle in erster Linie elektrostatischer Natur sind und die Neutronen wegen ihrer elektrischen Neutralität daher auf die Eigenschaften des Atoms und besonders auf die äußeren Atom-eigenschaften bestimmende Elektronenhülle fast ohne Wirkung sind.

Es sei noch kurz auf die Isobaren hingewiesen. Als isobare Kerne bezeichnet man Kerne gleicher Masse, bei denen folglich die Summe der Protonen und Neutronen im Kern gleich ist. Während also Isotope stets zum gleichen Element gehören, gehören isobare Kerne stets zu verschiedenen chemischen Elementen. Für sie gelten die beiden aus der Kernsystematik folgenden *Mattauchschen Isobarensätze*, nach denen es bei ungeradem Atomgewicht überhaupt keine stabilen Isobaren gibt, bei geradem Atomgewicht dagegen mehrere, aber niemals solche, die sich in der Kernladung um eine Einheit unterscheiden. Isobar mit der Massenzahl 40 sind z. B. die Kerne  $^{40}_{18}\text{A}$ ,  $^{40}_{19}\text{K}$  und  $^{40}_{20}\text{Ca}$  von denen aber nur der erste und dritte stabil sind. Auf die Rolle der instabilen Kerne kommen wir in Abschn. 4b zurück. Als Isobare kann man auch das Proton und das Neutron ansehen.

### b) Das Deuteron

Das berühmteste und auch praktisch wichtigste Isotop, dessen Entdeckung durch *Urey*<sup>3)</sup> 1932 das größte Aufsehen erregte und zur Verleihung des Nobelpreises führte, ist das „schwere“

Wasserstoffisotop der Masse zwei,  $^2_1\text{H} = ^2_1\text{D}$ , dessen Kern sich von

dem des normalen Wasserstoffatoms  $^1_1\text{H}$ , dem Proton, also durch ein zusätzliches Neutron unterscheidet. Wegen seiner großen Bedeutung als „Indikator“ in der Chemie und Biologie hat man diesem isotypen Element, dem „schweren Wasserstoff“, den besonderen Namen Deuterium und das Symbol D gegeben, während sein Kern den Namen „Deuteron“ und das Symbol d erhalten hat. Das Deuteron besteht also aus einem Proton und einem Neutron und ist damit nächst dem Proton der leichteste und einfachst gebaute Kern. Es besitzt in der Kernphysik eine beachtliche Bedeutung, weil es durch Ionisierung von Deuterium in Gasentladungen leicht erzeugt und neben dem Proton, dem Neutron und dem gleich zu besprechenden  $\alpha$ -Teilchen nach Beschleunigung mittels Hochspannung als Kerngeschosß zur Anregung von Kernreaktionen verwendet werden kann. Dabei spaltet sich das Deuteron beim Auftreffen auf den Kern vielfach, wobei das Neutron in den Kern hineinschlüpft, während das Proton reflektiert wird. Die Bindungsenergie des Deuterons ist mit 2,26 Millionen e-Volt relativ gering, verglichen mit der mittleren Bindungsenergie der Protonen und Neutronen in den Atomkernen von durchschnittlich 8 MeV.

Der Vollständigkeit halber erwähnen wir schließlich, daß es noch ein drittes Wasserstoffisotop gibt, das zwei Neutronen im Kern besitzt, deshalb  $^3_1\text{H} = ^3_1\text{T}$  geschrieben wird und dessen Kern „Triton“ (daher Symbol T) genannt wird. Es ist aber nicht stabil, sondern verwandelt sich nach dem Abschn. 4b zu behandelnden

<sup>3)</sup> Siehe Nobel-Vortrag, diese Ztschr. 48, 315 [1935].

Mechanismus unter Elektronenemission in einen  $^3_2\text{He}$ -Kern, kommt daher in der Natur frei nicht vor.

### c) Das $\alpha$ -Teilchen

Neben dem Deuteron wurde als weiteres zusammengesetztes Kernteilchen schon das  $\alpha$ -Teilchen erwähnt. Es besteht (als Kern des Heliumatoms  $^4_2\text{He}$ ) aus zwei Protonen und 2 Neutronen und

ist zuerst dadurch bekannt geworden, daß es von zahlreichen natürlich radioaktiven Atomkernen am Ende des Periodischen Systems als Teil der radioaktiven Strahlung ausgesandt wird. Künstlich erzeugt man es durch doppelte Ionisierung (Abtrennung der beiden Hüllenelektronen) von Heliumatomen in kräftigen Gasentladungen und verwendet es dann ebenfalls nach Beschleunigung in Hochspannungsmaschinen (z. B. dem viel besprochenen Zyklotron) als Geschosß zur Anregung von Kernreaktionen.

Die besondere Bedeutung des  $\alpha$ -Teilchens für die Atomkerntheorie liegt darin, daß das  $\alpha$ -Teilchen der stabilste überhaupt existierende Kern, seine Bildung aus 2 Protonen und 2 Neutronen also die exothermste bekannte Kernreaktion überhaupt ist. Durch diese Reaktion, die (in etwas veränderter Form als katalysierte thermische Reaktion) in großem Umfang im Innern der Sonne und der meisten Fixsterne abläuft, wird bekanntlich der gewaltige Energieverlust, den diese Weltkörper durch Ausstrahlung dauernd erleiden, gedeckt<sup>3a)</sup>.

Aus der Tatsache der Existenz des Deuterons, des  $\alpha$ -Teilchens und der übrigen Atomkerne folgt bereits, daß die Protonen und Neutronen anziehende Kräfte aufeinander ausüben, durch deren Absättigung eben die stabilen Kerne entstehen. Die Natur dieser Kernkräfte hat sich noch nicht restlos aufklären lassen; wir kommen im Zusammenhang der instabilen Elementarteilchen später noch einmal auf diese Frage zurück. Da aber das  $\alpha$ -Teilchen sich aus zwei Protonen und zwei Neutronen unter größtmöglichem Energiegewinn bilden kann, erfolgt diese Bindung auch bereits im Innern der Atomkerne. Je 2 Protonen und Neutronen schließen sich also (nebenbei unter Absättigung ihrer magnetischen Eigenmomente (im Innern der Atomkerne zu einem  $\alpha$ -Teilchen zusammen, und nur die überschüssigen Protonen und Neutronen bleiben als solche im Kern.

So spielt das  $\alpha$ -Teilchen, obwohl nicht zu den Elementarbausteinen der Materie gehörig, als stabilstes zusammengesetztes Kernteilchen in der Natur wie in der praktischen Kernphysik doch eine hervorragende Rolle.

## 4. Die übrigen Elementarteilchen

Außer den behandelten Elementarbausteinen der Materie Proton, Neutron und Elektron gibt es noch eine Anzahl weiterer Elementarteilchen, die bei den verschiedensten atomaren Prozessen in Erscheinung treten, aber nach einer begrenzten Lebensdauer sich in Strahlung (Photonen) oder andere Elementarteilchen umwandeln. Unsere Kenntnis von ihnen entstammt zu einem grossen Teil der Höhenstrahlungsforschung. Wir müssen sie, obwohl sie sich umzuwandeln vermögen und damit nicht der üblichen Vorstellung „elementarer Bausteine“ entsprechen, als Elementarteilchen bezeichnen, weil sie nicht im eigentlichen Sinne zusammengesetzt sind. Bei der Besprechung dieser zweiten Gruppe wird sich zudem herausstellen, daß die oben besprochenen Elementarbausteine keineswegs die absolute Unveränderlichkeit besitzen, die man ihnen früher bedenkenlos zugeschrieben hatte.

### a) Das Positron

Als erstes der neuen selteneren Elementarteilchen wurde 1932 von *Anderson* in der aus dem Weltraum in unsere Erdatmosphäre einfallenden Höhenstrahlung das positive Elektron oder Positron mittels der Nebelkammer entdeckt, in der es sich durch seine den übrigen Elektronen entgegengesetzte Krümmung im Magnetfeld als positiv geladen erwies (vgl. die entgegengesetzten Krümmungen der beiden Positronen und Elektronen im Bild 2).

Die Masse des Positrons ist gleich der des Elektrons, ebenso der Betrag seiner Ladung, sein mechanischer Eigendrehimpuls (Spin) und sein magnetisches Moment. Das Positron unterscheidet sich also von dem normalen negativen Elektron ausschließlich durch seine entgegengesetzte, d. h. positive Ladung.

<sup>3a)</sup> Vgl. v. *Weizsäcker*, diese Ztschr. 55, 49, 253 [1942].

Die Untersuchung der naheliegenden Frage, warum sich das Positron so lange unserer Beobachtung entzogen hat, also im Vergleich zu den negativen Elektronen so selten ist, hat zu einer der aufregendsten Entdeckungen der modernen Physik geführt. Beim Zusammenstoß mit einem Elektron (und Elektronen sind ja als Bausteine der Materie überall in ungeheurer Zahl vorhanden!) verschwinden nämlich plötzlich das Positron und das Elektron, und am Ort des Verschwindens dieses „Elektronenpaares“ erscheint ein Strahlungsquant  $h\nu$ , dessen Energie gleich der den beiden verschwundenen Elektronenmassen  $2m_e$  entsprechenden Eigenenergie  $2m_e c^2$  zuzüglich der kinetischen Energie der zusammengestoßenen Elektronen (des Elektrons und des Positrons) ist. Beim Zusammenstoß eines Elektrons und eines Positrons findet also eine völlige „Zerstrahlung“ dieser beiden Elementarteilchen, d. h. eine völlige Umwandlung in Strahlungsenergie statt, womit die von der Relativitätstheorie behauptete Äquivalenz von Masse  $m$  und Energie  $E$  gemäß der grundlegenden Äquivalenzgleichung

$$E = m c^2$$

( $c$  = Lichtgeschwindigkeit) in eindrucksvollster Weise verifiziert erscheint, und zwar exakt quantitativ. Aber auch der Umkehrprozeß dieser Zerstrahlung ist bekannt und in der Nebelkammer besonders schön zu beobachten; man nennt ihn die „Paarerzeugung“. Ein Strahlungsquant, dessen Energie größer sein muß, als nach der Äquivalenzgleichung der Masse von Elektron + Positron entspricht, kann beim „Zusammenstoß“ mit einem Atomkern (der hierbei nur die Rolle eines Katalysators spielt!) ein Elektronenpaar, Elektron + Positron, erzeugen, wobei das Lichtquant selbst verschwindet, sich also materialisiert. In Bild 2 ist dieser Vorgang gleich zweimal zu

#### b) Die Emission von Elektronen und Positronen durch künstlich radioaktive Atomkerne

Daß die natürlich radioaktiven Kerne in Form der  $\beta$ -Strahlung zu einem großen Teil Elektronen emittieren, ist lange bekannt. Im Jahre 1934 entdeckte nun das Ehepaar *Joliot-Curie*<sup>4)</sup>, daß man durch Beschuß mit Neutronen und anderen Kernteilchen sowie als Folge gewisser Kernprozesse u. U. instabile Atomkerne erhält, die man als künstlich radioaktiv bezeichnet, weil sie unter spontaner Emission von radioaktiver Strahlung mehr oder weniger schnell sich in stabile Kerne verwandeln. Überraschend war der Befund, daß im Gegensatz zu den natürlich radioaktiven Substanzen bei den künstlich radioaktiven Kernen keine  $\alpha$ -Strahlung, sondern nur  $\beta$ -Strahlung auftritt, daß aber nur ein Teil der künstlich radioaktiven Kerne Elektronen emittiert, der andere Teil dagegen die eben besprochenen, von der Höhenstrahlung her bereits bekannten Positronen. Man spricht deshalb von  $\beta^-$ - und  $\beta^+$ -Aktivität und von  $\beta^-$ - und  $\beta^+$ -Strahlern.

Wie können nun diese Elementarteilchen, Elektronen und Positronen, vom Atomkern emittiert werden, wenn dieser doch selbst ausschließlich aus Protonen und Neutronen aufgebaut ist? Die von *Fermi* stammende, in ihren Grundzügen sicher richtige Deutung zeigt uns das Problem der Stabilität bzw. Instabilität auch der zunächst stabilen Elementarteilchen in einem ganz neuen Licht. So wie ein angeregtes Atom ein Lichtquant zu emittieren vermag, obwohl dieses doch auch nicht „in ihm drinsteckt“, können unter noch zu besprechenden Umständen Atomkerne auch Elektronen oder Positronen emittieren, obwohl diese normalerweise nicht im Kern „enthalten“ sind. Die Durchführung dieser Theorie führt zu einem ganz klaren Schluß: Ein Neutron im Kern kann sich unter Emission eines dabei erst entstehenden negativen Elektrons in ein Proton, ein Proton unter Emission eines Positrons in ein Neutron verwandeln. Hier ist aber auf einen wichtigen Unterschied im Verhalten von Proton und Neutron hinzuweisen. Da die Masse des Neutrons um mehr als die Elektronenmasse größer ist als die des Protons, kann das Neutron spontan in ein Proton und ein Elektron zerfallen (auf einem später noch zu besprechenden Umweg!), ist also in der üblichen Terminologie als radioaktiv zu bezeichnen. Das Proton dagegen ist wegen seiner kleineren Masse an sich stabil und kann sich nur in ein Neutron und ein Positron verwandeln, wenn es durch Wechselwirkung mit anderen Materialteilchen von diesen die erforderliche Energie übernehmen kann.

Wir führen unseren Gedanken noch etwas fort: ein Proton muß sich umgekehrt unter Absorption eines Elektrons auch in ein Neutron, ein Neutron unter Absorption eines Positrons auch in ein Proton verwandeln können. Auf dieser Grundlage ist nun von den Theoretikern eine Theorie der Bindung der Protonen und Neutronen im Kern aufgebaut worden, die letzten Endes darauf beruhen soll, daß die Protonen und Neutronen unter dauerndem Austausch von Elektronen und Positronen (bzw. der Abschn. 4 c noch zu besprechenden positiven und negativen Mesonen) sich ständig ineinander umwandeln, — und die exakte mathematische Durchführung der Theorie zeigt, daß dieser Austausch von leichten Elementarteilchen durch die schweren Elementarteilchen zu anziehenden „Austauschkraften“ führt, auf denen die Bindung in den Atomkernen beruht. Es liegt nun nahe zu fragen, ob es aus Symmetriegründen nicht auch ein negatives Proton (gelegentlich „Negatron“ genannt) gibt, das sich unter Elektronenemission oder Positronenabsorption in ein Neutron verwandeln könnte. Als Kernbaustein kommt ein solches Elementarteilchen offenbar im Gegensatz zu Proton und Neutron nicht infrage, obwohl sonst gegen seine Existenz theoretisch keine Bedenken bestehen. Seine Entdeckung ist auch vor einigen Jahren einmal behauptet worden, hat sich aber anscheinend nicht bestätigt, so daß diese Frage noch offen bleiben muß.

Unter welchen Bedingungen ist nun ein Kern radioaktiv, und wann sendet ein solcher radioaktiver Kern ein Elektron und wann ein Positron aus? Die Antwort hängt mit der angedeuteten Bindung im Kern zusammen. Nur die den stabilen Isotopen entsprechende relative Zahl von Protonen und Neutronen ergibt

<sup>4)</sup> S. Nobelvortrag, diese Ztschr. 40, 367 [1936].

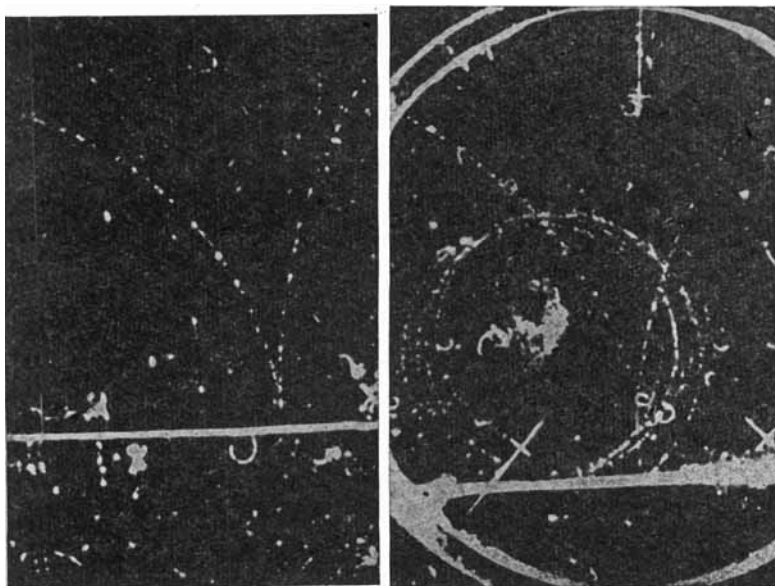


Bild 2  
a) Elektronenpaare von einer  $\gamma$ -Strahlung von 17,6 eMV; Magnetfeld 2500 Gauß — b) Elektronenpaar: negatives Elektron 7,9 eMV, positives Elektron 1,9 eMV;  $\gamma$ -Strahlung 10,8 eMV; Magnetfeld 2500 Gauß; Kammerdurchmesser 14 cm  
(aus Bothe, Gentner u. Meier-Leibnitz: Atlas typischer Nebelkammeraufnahmen) [Retouchiert]

sehen. In der in der Nebelkammer angeordneten Bleiplatte erzeugen zwei energiereiche Lichtquanten je ein Elektronenpaar, deren beide Partner sich durch gleiche Ionisierungsstärke und gleich große, aber entgegengesetzte Bahnkrümmung, als von gleicher Masse und Ladung, aber entgegengesetztem Vorzeichen der Ladung erweisen.

Wir möchten ausdrücklich darauf hinweisen, daß durch diese Prozesse der Paarerzeugung und Zerstrahlung auch die Stabilität des normalen negativen Elektrons in gewisser Weise eingeschränkt erscheint: es kann u. U. aus Strahlungsenergie erzeugt bzw. in diese verwandelt werden. Eine Erklärung dieser beiden interessanten Prozesse hat *Dirac* in seiner berühmten „Löchertheorie“ gegeben, für die aber auf die größeren Lehrbücher der Atomtheorie verwiesen werden muß.

offenbar einen stabilen Atomkern. Ist die Zahl der Neutronen im Kern im Vergleich zur Zahl der Protonen zu groß oder zu klein, so ist der Kern instabil. Im Fall einer zu großen Neutronenzahl kann sich dann das eine oder andere Neutron unter Emission eines Elektrons in ein Proton verwandeln (Umwandlung eines künstlich radioaktiven  $\beta^-$ -Strahlers), während im umgekehrten Fall zu geringer Neutronenzahl ein oder mehrere Protonen sich unter Positronenemission in Neutronen verwandeln werden ( $\beta^+$ -Aktivität). Jedes Element kann also außer in seinen stabilen Isotopen auch in instabilen, radioaktiven Isotopen auftreten, die positronenaktiv sind, wenn sie gegenüber dem stabilen Fall zu wenig Neutronen besitzen, elektronenaktiv dagegen, wenn ihre Neutronenzahl zu groß ist. Da solche  $\beta$ -Umwandlungen künstlich radioaktiver Atomkerne stets mit einer Vergrößerung oder Verminderung der Zahl der Kernprotonen verbunden sind, wandeln sich die entsprechenden radioaktiven Elemente in ihre im Periodischen System benachbarten Elemente um, und zwar Elektronenstrahler in die rechts von ihnen, Positronenstrahler in die links vom Ausgangselement stehenden Elemente (radioaktiver Verschiebungssatz). — Radioaktive Isotope entstehen beispielsweise auch bei der Uranspaltung, wo sie aber stets elektronenaktiv sind, da der Urankern eine wesentlich größere Zahl von Neutronen enthält als die bei seiner Spaltung entstehenden Elemente mittlerer Ordnungszahl in ihren stabilen Konfigurationen.

Wir sehen, daß auch die künstliche Radioaktivität aus den allgemeinen Eigenschaften der Elementarteilchen folgt und auf diese neues Licht wirft.

### c) Die Mesonen

Eine sehr merkwürdige Sorte von Elementarteilchen ist 1936 in der Höhenstrahlung entdeckt worden, die sog. „schweren Elektronen“ oder Mesonen, früher auch Mesotronen genannt. Ihr Name stammt daher, daß ihre Masse ein Mittelding (Meson = das mittlere) zwischen der des Protons und der des Elektrons ist. Die Mesonen treten wie die Elektronen mit beiderlei Vorzeichen ihrer elektrischen Ladung auf: man kennt positive und negative Mesonen. Der Betrag der Ladung ist gleich der der normalen Elektronen, also gleich einem elektrischen Elementarquantum.

Neuerdings hält man sogar die Existenz neutraler Mesonen, sog. „Neutrettos“ für wahrscheinlich und schreibt ihnen für das Zusammenwirken der Höhenstrahlprozesse eine bedeutende Rolle zu. Über die Mesonenmasse herrscht noch keine Klarheit. Während man früher als Ruhemasse des Mesons den Mittelwert der wenigen halbwegs sicheren Messungen von etwa 150 Elektronenmassen annahm, scheint es nach neuesten Messungen, als gäbe es mindestens zwei verschiedene Mesonenmassen in der Gegend von 120 und etwa 220 Elektronenmassen, vielleicht sogar noch mehr. Darüber hinaus aber gibt es anscheinend auch zwei Arten von Mesonen, die sich in anderer Hinsicht unterscheiden. Die Mesonen sind nämlich nicht stabil, sondern man kann sie als radioaktiv bezeichnen, da sie nach sehr kurzer Lebensdauer spontan in ein normales Elektron (bzw. Positron) und eines der gleich noch als Elementarteilchen zu besprechenden Neutrinos zerfallen, wobei die große, bei diesem Zerfall verschwindende Massendifferenz als kinetische Energie von diesen beiden Teilchen übernommen wird. Die Mesonen müßten, da sie so in zwei Elementarteilchen mit je halbzahligem Spin zerfallen, selbst einen ganzzahligen mechanischen Eigendrehimpuls besitzen, und zwar scheint es, als gäbe es Mesonen mit dem Spin 0 und solche mit dem Spin 1. Über das magnetische Moment der Mesonen ist noch nichts Sicheres bekannt.

Die mittlere Lebensdauer der in der Höhenstrahlung mittels der Nebelkammer beobachteten Mesonen beträgt etwa  $10^{-6}$  sec. Man hat aber sehr schwerwiegende Argumente für die Annahme, daß es auch Mesonen von nur  $10^{-8}$  sec Lebensdauer gibt, und zwar scheint es nach Höhenstrahluntersuchungen so, als besäßen die langlebigen Mesonen den Spin 1, die kurzlebigen den Spin 0. Wenn sich diese wegen der Schwierigkeit der Untersuchung der (immerhin sehr seltenen) Mesonen noch nicht ganz sicheren Ergebnisse bestätigen, gibt es also eine ganze Gruppe von verschiedenen Mesonen, die sich durch das Vorzeichen ihrer Ladung, durch verschiedene Massen und durch verschiedene Lebensdauern un-

terscheiden. Dieser merkwürdige Sachverhalt wird in gewisser Weise verständlicher, wenn man die Mesonen nach Heisenberg als „angeregte Zustände“ des Elektrons auffaßt. Ebenso wie ein angeregtes Atom einen größeren Energieinhalt besitzt als ein normales und sich unter Abgabe dieser Energiedifferenz in ein normales (und das die Energiedifferenz repräsentierende Lichtquant) zurückverwandeln kann, wären auch die Mesonen als angeregte Zustände des Elektrons anzusehen. Sie können sich unter Abgabe der nach dem Äquivalenzgesetz als Masse erscheinenden Anregungsenergie (und allerdings eines Neutrino, auf dessen Notwendigkeit wir gleich zu sprechen kommen) in den „Grundzustand“, das normale Elektron bzw. Positron, zurückverwandeln.

Man darf hoffen, daß unsere Kenntnis der Eigenschaften der Mesonen in Kürze dadurch wesentlich wachsen wird, daß nach amerikanischen Meldungen Mesonen jetzt mit der Elektronenschleuder (Betatron) erzeugt werden können, die Elektronen auf 100 MeV zu beschleunigen vermag, bzw. Röntgenstrahlung gleicher Energie liefert. Einzelheiten sind aber noch nicht bekannt geworden.

Mesonen können aber nicht nur einzeln entstehen, sondern gleichzeitig in großer Zahl durch Materialisation von kinetischer Energie in den Explosionsschauern der Höhenstrahlung. Diese extremsten Vorgänge der gesamten bekannten Physik treten auf, wenn ein einzelnes Proton, Neutron oder Meson von so großer kinetischer Energie, daß dieser nach der Äquivalenzgleichung materialisiert eine ganze Anzahl von Mesonen entsprechen, mit einem Atomkern (der wieder nur als Katalysator wirkt) zusammenstößt. Dabei kann sich dann die kinetische Energie des schnellen stoßenden Primärteilchens in einer großen Zahl von neu entstehenden Mesonen und Elektronen beider Vorzeichen, ja in extremen Fällen auch von Protonen und Neutronen, materialisieren. — Alle Elementarteilchen können also in den Explosionsschauern, und zwar in sehr beträchtlichen Zahlen, in einem Elementarakt aus kinetischer Energie „erzeugt“ werden. Bild 3 zeigt die Nebelkammeraufnahme eines solchen Explosionsschauers.

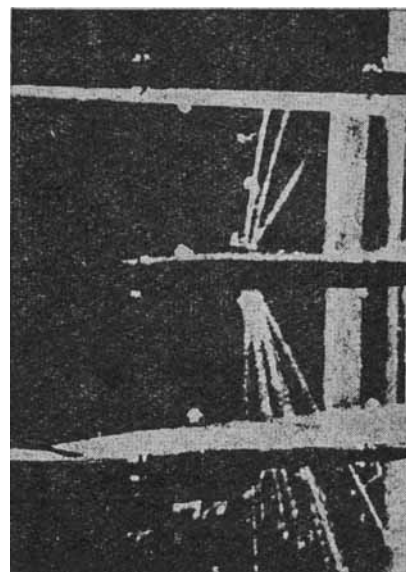


Bild 3  
Explosionsschauer mit schweren und leichten Teilchen. — Obere Pb-Platte 0,63 cm, mittlere 0,63 cm, untere 0,07 cm: Abstand zwischen den Pb-Platten je 6 cm.  
(aus Bothe, Gentner u. Meier-Leibnitz: Atlas typischer Nebelkammeraufnahmen)

Das Meson, und zwar anscheinend das kurzlebige, besitzt ein besonderes theoretisches Interesse deshalb, weil von Yukawa ein Elementarteilchen mit entsprechenden Eigenschaften bereits vor der Entdeckung des Mesons im Zusammenhang mit seiner Theorie der Kernkräfte gefordert worden war. Es lassen sich nämlich nicht nur gewisse Schwierigkeiten bei der Bindung der Protonen und Neutronen im Kern, sondern auch Unstimmigkeiten der erwähnten Fermischen Theorie des radioaktiven  $\beta$ -Zerfalls durch die Annahme beseitigen, daß Protonen und Neutronen primär nicht (wie Fermi angenommen hatte) Elektronen

bzw. Positronen und Neutrinos, sondern Mesonen emittieren, die erst nachträglich in Elektronen (beiderlei Vorzeichens) und die gleich zu behandelnden Neutrinos zerfallen.

Mit der Fähigkeit der Protonen und Neutronen, Mesonen zu emittieren, die dann später in Elektronen und Neutrinos zerfallen, hängt auch die oben erwähnte merkwürdige Tatsache zusammen, daß das Neutron trotz fehlender elektrischer Ladung ein magnetisches Eigenmoment besitzt, während das des Protons größer ist als man nach dem Betrag seines mechanischen Eigendrehimpulses erwarten sollte. Nach dieser anschaulich sehr schwer verständlich zu machenden Theorie deutet sich in der Existenz des magnetischen Moments des Neutrons dessen Fähigkeit an, in ein Proton und ein negatives Meson zu zerfallen. Das magnetische Moment würde in diesem Sinn also der Wirkung des bei der Neutronenumwandlung „entstehen könnenden“ Elektrons zuzuordnen sein. Für diese Theorie spricht, daß der Überschuß des magnetischen Moments des Protons über den seinem mechanischen Spin entsprechenden Wert, der in analoger Weise der Zerfallsmöglichkeit in ein Neutron und ein positives Meson zuzuordnen wäre, ebenso groß ist wie das (negative) magnetische Moment des Neutrons. — Wir sehen, daß zur Erklärung wichtigster Eigenschaften auch der anscheinend stabilen Elementarteilchen Proton und Neutron deren „Neigung zur Instabilität“ eine entscheidende, wenn auch vorläufig noch sehr schwer verständliche Rolle spielt.

#### d) Das Neutrino

Ein noch reichlich problematisches Elementarteilchen, das wir aber der Vollständigkeit halber doch behandeln müssen, ist schließlich das Neutrino. Es ist (oder besser: soll sein) ein Teilchen, dessen Ruhemasse Null oder doch nahezu Null ist, das also ähnlich wie das gleich zu behandelnde Lichtquant (Photon) im Ruhezustand nicht zu existieren scheint. Es besitzt ferner auch keine elektrische Ladung und wurde deshalb Neutrino = das kleine Neutron, oder besser das Neutron von minimaler Ruhemasse, getauft. Es besitzt aber wie die Elektronen, einen mechanischen Spin der Größe  $\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$ . Da es keine elektrische Ladung besitzt, kann das Neutrino (wie das Neutron) beim Durchgang durch Materie auch nicht ionisieren, ist also zum mindesten direkt nicht nachweisbar. Wie kommt man nun trotzdem zu der Behauptung der Existenz dieses mysteriösen Elementarteilchens? Es sind zwei verschiedene Argumente, die für seine Existenz sprechen, wenn wir nicht die Gültigkeit der Grundgesetze der Physik, und zwar des Energiesatzes und des Drehimpulssatzes, aufgeben wollen.

Bei sämtlichen künstlichen wie natürlichen radioaktiven  $\beta$ -Umwandlungen befinden sich die Kerne vor der Elektronenemission in einem bestimmten Energiezustand, und nach der Emission in einem anderen, aber wiederum exakt definierten Energiezustand. Wenn nun der Energiesatz gilt, woran zu zweifeln man sonst auch in der gesamten Atomphysik keinen Anlaß hat, dann müssen die von einer bestimmten Art radioaktiver Kerne emittierten Elektronen alle die gleiche Energie besitzen, nämlich die Differenz des erwähnten Anfangs- und des Endzustandes. Gerade das ist aber nach den Beobachtungen nicht der Fall; man findet vielmehr durchweg Elektronen, deren kinetische Energien zwischen einer der fraglichen Energiedifferenz entsprechenden oberen Energie und der Energie Null nach einer charakteristischen Kurve verteilt sind (sog. kontinuierliches  $\beta$ -Spektrum). Dieser Befund ist nur durch die Annahme erklärbar, daß gleichzeitig mit dem Elektron ein sonst nicht in Erscheinung tretendes Teilchen emittiert wird, das die restliche, vom Elektron nicht mitgenommene Energie übernimmt, eben das hypothetische Neutrino.

Ähnlich steht es mit dem zweiten auf die Existenz des Neutrino hinweisenden Befund, dem Kerndrehimpuls. Wenn ein Kern mit ganzzahligen Eigendrehimpuls (gemessen in Einheiten von  $\frac{h}{2\pi}$ ) ein Elektron mit dem Spin  $\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$  emittiert, so müßte der Restkern einen halbzahligen Spin besitzen. Das ist aber nicht der Fall. Wenn der auch in der Atomphysik sonst allgemein gültige Satz von der Erhaltung des Drehimpulses gültig bleiben soll, muß also zusammen mit dem Elektron ein „unsichtbares“ zwei-

tes Teilchen emittiert werden, das ebenfalls einen Drehimpuls von  $\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$  mitbekommt, eben das Neutrino.

Daß gemäß unseren Ausführungen am Ende von Absatz 4c an Stelle der Emission eines Elektrons und eines Neutrino auch ein Meson mit ganzzahligem Spin emittiert werden kann, das dann erst nachträglich in ein Elektron (oder Positron) und ein Neutrino zerfällt, ändert ersichtlich an dem Sachverhalt nichts Grundsätzliches.

So notwendig also das Neutrino vom theoretischen Standpunkt aus erscheint: einen sicheren experimentellen Nachweis seiner Existenz haben wir noch nicht. Einen gewissen experimentellen Hinweis auf seine Existenz können wir lediglich in dem Befund erblicken, daß nach Nebelkammer-Untersuchungen der Rückstoß  $\beta$ -strahlender Kerne bei der  $\beta$ -Emission größer sein soll, als er aus der alleinigen Emission des Elektrons folgen würde. So unbefriedigend die Frage seines sicheren Nachweises also immer noch ist, so sehr beschäftigt das Neutrino andererseits doch heute schon die Atomtheoretiker, namentlich im Hinblick auf die Theorie des letzten jetzt noch kurz zu behandelnden Elementarteilchens, des Lichtquants.

#### e) Das Strahlungsquant oder Photon

Es mag auf den ersten Blick überraschend erscheinen, daß wir auch das Licht- oder allgemeiner Strahlungsquant  $h\nu$  zu den Elementarteilchen rechnen. Aber das Photon besitzt ja, etwa nach Ausweis des Compton-Effekts, sehr eindeutige Teilcheneigenschaften, indem es wie eine Billiardkugel Zusammenstöße (mit Elektronen) erleben kann, bei denen die mechanischen Stoßgesetze gelten, und es muß andererseits im Sinne unserer anfänglichen Definition als „nicht im eigentlichen Sinn zusammengesetztes“ Teilchen, d. h. also als Elementarteilchen angesehen werden. Wir erinnern im übrigen daran, daß die oben behandelte, mit der künstlichen Radioaktivität zusammenhängende Eigenschaft der Elektronen, von Protonen bzw. Neutronen emittiert und absorbiert zu werden, eine solche Ähnlichkeit mit der entsprechenden Eigenschaft der Lichtquanten (Emission und Absorption durch die Elektronenhülle der Atome) gezeigt hat, daß der Unterschied dieser beiden Arten von Teilchen offenbar viel geringer ist als er auf den ersten Blick erscheint. Es wäre daher nicht berechtigt, das Elektron als Elementarteilchen zu bezeichnen, dem Photon aber diesen Titel zu versagen.

Die Eigenschaft, keine Ruhemasse zu besitzen, d. h. im Ruhezustand nicht zu existieren, teilt das Photon ja anscheinend mit dem Neutrino, ebenso die Ladungslosigkeit, während es sich von ihm durch seinen ganzzahligen mechanischen Spin vom Betrage 1 (auf dem z. B. die Polarisation des Lichtes beruht) unterscheidet. Es besitzt kein magnetisches Moment.

Die Emission von Lichtquanten durch Atome und Molekeln (genauer durch deren Elektronenhüllen) und ihre Absorption durch diese ist allgemein bekannt. Wir haben oben bei der Besprechung der Elektronenpaare auch bereits erwähnt, daß energiereiche Lichtquanten (und in der Höhenstrahlung gibt es solche, deren nach der Äquivalenzgleichung umgerechnete Energie die Masse des Protons um viele Zehnerpotenzen übersteigt) sich in Form von Elektronenpaaren (übrigens auch Mesonenpaaren und Schauern) materialisieren können. Auch der Umkehrprozeß, die Erzeugung energiereicher Photonen bei der Zerstrahlung von Elektronenpaaren, wurde bereits erwähnt. Mehr ist über die Lichtquanten als Elementarteilchen z.Zt. noch nicht zu sagen. — Tab. 1 gibt zusammenfassend die wichtigsten Daten der behandelten Teilchen.

### 5. Überblick über die Eigenschaften der Elementarteilchen

Betrachten wir rückschauend das Ergebnis unseres Überblicks über die Elementarteilchen, so müssen wir feststellen, daß diese sich durchaus nicht so verhalten, wie es die klassische Physik noch vor kurzem von „elementaren Bausteinen“ der Materie erwartet hatte. Wir haben es keineswegs mit einer Anzahl unveränderlicher, von einander unabhängiger Elementarbausteine zu tun, aus denen sich die Welt und ihr Geschehen aufbaut wie ein Bauwerk aus seinen Bausteinen. Die Elementarteilchen, und zwar auch die eingangs als „stabil“ bezeichneten, sind vielmehr etwas sehr unbeständiges! Sie können nicht nur völlig in Energie

verwandelt werden und aus ihr entstehen, — womit in für die moderne Physik charakteristischer Weise der starre Unterschied von Materie und Energie, wenn nicht beseitigt, so doch gemildert erscheint. Die Elementarteilchen verwandeln sich vor allem fast beliebig ineinander: Protonen und Neutronen emittieren und absorbieren Elektronen, Positronen und Neutrinos und wandeln sich dabei ineinander um; Mesonen zerfallen in Elektronen (bzw. Positronen) und Neutrinos und entstehen aus diesen, Elektronenpaare verwandeln sich in Photonen und umgekehrt. Diese wechselseitige Umwandelbarkeit scheint grundsätzlich zum Bild der Elementarteilchen zu gehören, und nirgends zeigt sich die tiefgreifende Wandlung in den Grundauffassungen der Physik während der letzten Jahrzehnte deutlicher als in unserer heutigen Auffassung der Elementarteilchen.

## 6. Die Theorie der Elementarteilchen und das Problem der universellen Naturkonstanten

Damit soll natürlich keineswegs gesagt sein, daß wir das hier entworfene Bild für befriedigend halten! Es wird sich durch die Forschung der kommenden Jahre, wie verschiedentlich angedeutet, noch in wesentlichen Punkten ändern und klären, und wird schließlich zu einer Theorie der Elementarteilchen führen, die die Beziehungen zwischen diesen in theoretisch befriedigender Weise (was keineswegs immer heißen wird: anschaulicher Weise) aufklären muß. Eine solche Theorie wird z. B. erklären müssen, warum Proton und Neutron in erster Näherung die gleiche Masse, und zwar gerade die Masse von rund  $1,67 \cdot 10^{-24}$  Gramm, besitzen, während die des Elektrons um den Faktor 1836,5 kleiner ist. Auch die offenbar nahen Beziehungen zwischen Neutrino und Lichtquant werden hier ebenso ihre Aufklärung finden müssen, wie etwa das anfang erwähnte Problem der Eigenenergie des Elektrons.

Mit dem Problem der Elementarteilchen eng verknüpft ist das der universellen Naturkonstanten, mit dem wir uns abschließend noch kurz befassen wollen. Ebenso wie wir die Frage zu beantworten versuchten, wie viele und welche Elementarteilchen an dem gesamten Geschehen unserer Welt beteiligt sind, ebenso kann man auch fragen, welche universellen Naturkonstanten dieses Geschehen eigentlich regeln bzw. zu seiner Darstellung erforderlich sind. Auch hier kommen wir auf eine überraschend geringe Zahl: es sind die folgenden sieben Naturkonstanten:

Das Plancksche Wirkungsquantum  $h = 6,624 \cdot 10^{-27} \text{ g cm}^2 \text{ sec}^{-1}$   
 Die Lichtgeschwindigkeit .....  $c = 2,99776 \cdot 10^{10} \text{ cm sec}^{-1}$   
 Die Heisenbergsche universelle Länge  $= 1 \approx 1 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$   
 Die Masse des Protons  $M_p = 1,6725 \cdot 10^{-24} \text{ g}$   
 Die Masse des Elektrons .....  $m_e = 9,107 \cdot 10^{-28} \text{ g}$   
 Die elektrische Elementarladung  $e = 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^{3/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-1}$   
 Die Gravitationskonstante ....  $f = 6,670 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ sec}^{-2}$

Mit Ausnahme der universellen kleinsten Länge  $l$  dürfen wir diese Naturkonstanten wohl als bekannt voraussetzen. Die „kleinste Länge“ aber ist als universelle Naturkonstante erkannt worden bei Heisenbergs Versuchen, die Explosionsschauer-Prozesse (Bild 3) durch eine Erweiterung der Quantenmechanik theoretisch zu erklären. Sie ist die Länge, auf die ein schnelles Teilchen im Stoß an einen Kern herankommen muß, damit eine Energiematerialisation in einem Explosionsschauer möglich ist. Ihr Betrag ist daher bisher nur größenordnungsmäßig zu etwa  $10^{-13} \text{ cm}$  bekannt.

Grundsätzlich können wir also mittels dieser 7 Naturkonstanten und wenigen sie teilweise enthaltenden physikalischen Grundgesetzen das Geschehen der gesamten physikalisch-chemischen Welt aus den Eigenschaften der Elementarteilchen ableiten. Dabei müssen die drei erstgenannten Naturkonstanten als die universellsten bezeichnet werden, weil sie allein in den entscheidenden Grundgleichungen der Quanten- und Feldphysik vorkommen. Sie bilden auch das naturgegebene physikalische Einheitensystem, aus denen die natürlichen Einheiten für Länge, Zeit und Masse zu  $l$ ,  $l/c$  und  $h/lc$  folgen.

Die Existenz von vier dimensionslosen Konstanten, die aus diesen sieben Naturkonstanten gebildet werden können, nämlich:

$$\begin{aligned} \frac{M_p}{m_e} &= 1836,5 \\ \frac{e^2}{hc} &= 1,162 \cdot 10^{-3} \\ \frac{h}{M_p l c} &= 1 \\ \frac{e^2}{f M_p m_e} &= 1,954 \cdot 10^{39} \end{aligned}$$

deutet aber darauf hin, daß die Zahl der unabhängigen Naturkonstanten sich sogar auf die drei erstgenannten universellen Konstanten reduzieren lassen müßte, wenn es einer künftigen Theorie der Elementarteilchen gelingt, die vier dimensionslosen Konstanten aus allgemeinen Gesetzen abzuleiten<sup>5)</sup>. Voraussetzung dafür wäre aber u. a. die noch ausstehende genaue Feststellung des Wertes der universellen kleinsten Länge  $l$ .

Es sind also gewaltige Perspektiven, die sich hier eröffnen, und wir erkennen, wie die Diskussion unserer heutigen Kenntnis der Elementarbausteine uns zwangsläufig in die tiefsten Tiefen der modernen Atomphysik geführt und uns gezeigt hat, wo die Physik in den kommenden Jahren ihre wichtigsten Fortschritte erwartet<sup>6)</sup>.

Eingeg. am 17. Dez. 1946 [A 31].

<sup>5)</sup> vergl. hierzu z. B. P. Jordan, Physik. Blätter 2, 35 [1947].

<sup>6)</sup> Herrn Dr. Höcker ist der Verfasser für zahlreiche Auskünfte über die neueste Entwicklung besonders der Höhenstrahlungsforschung zu Dank verpflichtet.

Tabelle 1  
Charakteristische Daten der Elementarteilchen, des Deuterons und des  $\alpha$ -Teilchens

Teilchen	Symbol	Ruhemasse			Ladung		Mechan. Spin Einheiten $h/2\pi$	Magnetisches Moment Gauss $\cdot \text{cm}^3$
		Gramm	Chemische Atomgewichts-Einheiten	Einheiten d. Ruhemasse d. Elektrons	Elektrische Elementar-Ladungen	Elektrostatische Einheiten		
Proton	p	$1,672 \cdot 10^{-24}$	1,00731	1837	+ 1	$4,803 \cdot 10^{-10}$	$\frac{1}{2}$	+ $1,41 \cdot 10^{-23}$
Neutron	n	$1,675 \cdot 10^{-24}$	1,00868	1837	0	0	$\frac{1}{2}$	— $9,77 \cdot 10^{-24}$
Elektron	$e^-$	$9,107 \cdot 10^{-28}$	$5,485 \cdot 10^{-4}$	1	— 1	— $4,803 \cdot 10^{-10}$	$\frac{1}{2}$	— $9,27 \cdot 10^{-21}$
Positron	$e^+$	$9,107 \cdot 10^{-28}$	$5,485 \cdot 10^{-4}$	1	+ 1	$4,803 \cdot 10^{-10}$	$\frac{1}{2}$	+ $9,27 \cdot 10^{-21}$
Meson	$\mu$	$\sim 1,1 \cdot 10^{-26}$ $\sim 2,0 \cdot 10^{-25}$	$\sim 0,07$ $\sim 0,12$	$\sim 120$ $\sim 220$	$\pm 1,0?$	$\pm 4,803 \cdot 10^{-10}$	0 oder 1	unbekannt
Neutrino	—	$\sim 0$	$\sim 0$	$\sim 0$	0	0	$\frac{1}{2}$	0
Photon	$h_\nu$	0	0	0	0	0	1	0
Deuteron-	d	$3,343 \cdot 10^{-24}$	2,014	3674	+ 1	$4,803 \cdot 10^{-10}$	1	+ $4,29 \cdot 10^{-24}$
$\alpha$ -Teilchen	$\alpha$	$6,644 \cdot 10^{-24}$	4,0027	7348	+ 2	$9,606 \cdot 10^{-10}$	0	0