

Zeitschrift: Schweizer Monatshefte : Zeitschrift für Politik, Wirtschaft, Kultur
Herausgeber: Gesellschaft Schweizer Monatshefte
Band: 42 (1962-1963)
Heft: 1

Artikel: Probleme der modernen Physik : die Elementarteilchen
Autor: Enz, Charles P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-161334>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 19.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Probleme der modernen Physik: Die Elementarteilchen

CHARLES P. ENZ

Es steht wohl schon heute fest, daß den exakten Naturwissenschaften, also Biologie, Chemie und Physik mit all ihren Verzweigungen und Verästelungen, in der Geistesgeschichte unseres Jahrhunderts ein zentraler Platz zukommen wird. Bei dieser Feststellung haben wir uns auf die geistigen Werte beschränkt und so die technologische Revolution, die ja Hand in Hand mit der Entwicklung der Naturwissenschaften vor sich geht, außer acht gelassen, obschon moderne Forschung ohne die Hilfe der Technologie undenkbar ist.

Hier wollen wir versuchen, Einblick in einen schmalen Ausschnitt aus dieser Ideenwelt zu vermitteln, welcher mit dem Stichwort «Elementarteilchen» umschrieben wird. Dabei haben wir uns zu einer mehr oder weniger historischen Darstellung entschlossen, welche uns als die am leichtesten verständliche erscheint, weil man gewissermaßen der Geburt der Ideen beiwohnen kann.

Theoretische Grundlagen

Die grundlegenden und revolutionierenden Erkenntnisse der modernen Physik, nämlich in erster Linie die *spezielle Relativitätstheorie* und die *Quantentheorie*, stammen aus den ersten drei Dezennien unseres Jahrhunderts. Wir wollen einleitend kurz das Revolutionierende der Ideen dieser Theorien skizzieren.

In der speziellen Relativitätstheorie ist es einerseits die Erkenntnis, daß infolge der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes eine Vermischung von Raum und Zeit, oder besser: eine Verwischung der qualitativen Unterschiede derselben, statthat, welche sich in den sogenannten Lorentz-Transformationen ausdrückt. Andererseits aber förderte diese Theorie *Einsteins* die Erkenntnis zutage, daß träge Masse eine hochkonzentrierte Form von Energie ist, eine Erkenntnis, die ja in den Atombombenexplosionen eine erschreckende Realität angenommen hat.

Das Neue der Quantentheorie liegt in der Erkenntnis, daß im submikroskopischen Bereich prinzipielle Grenzen der Meßbarkeit existieren, die mit einer merkwürdigen Wellennatur der Materie zusammenhängen, oder genauer: mit einem allen physikalischen Dingen inhärenten Dualismus zwischen Wellen- und Teilchenbild. Diese Grenzen drücken sich dadurch aus, daß alle physikalischen Aussagen mit einer Wahrscheinlichkeit behaftet sind.

Schon diese Andeutungen zeigen, daß sich die Physik schon sehr weit vom Bereich der alltäglichen Erfahrungen entfernt hat, wie sie uns direkt durch unsere fünf Sinne zukommen. Für diese Feststellung gibt es eine kompakte Formulierung: Sowohl die spezielle Relativitätstheorie wie die Quantentheorie sind nämlich charakterisierbar durch je eine fundamentale universelle Konstante. In der ersteren ist es der Wert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum:

$$c = 2,99793 \cdot 10^{10} \text{ cm/sec }^1,$$

welche schon im 18. Jahrhundert gemessen worden war. c spielt die Rolle einer absoluten Grenzgeschwindigkeit, die von keinem materiellen Körper je ganz erreicht werden kann. — Die charakteristische Konstante der Quantentheorie ist das sogenannte Wirkungsquantum:

$$h = 6,625 \cdot 10^{-27} \text{ Gramm} \cdot \text{cm}^2/\text{sec }^1,$$

welches *Planck* im Jahre 1900 einzuführen gezwungen war, um das Strahlungsspektrum eines heißen, ideal schwarzen Körpers zu erklären. h hat die Bedeutung eines Proportionalitätsfaktors zwischen der Teilchen-Energie und der Wellen-Frequenz einerseits und zwischen dem Teilchen-Impuls und der reziproken Wellen-Länge andererseits (*de Brogli*, 1924). Die vor dem 20. Jahrhundert entwickelten physikalischen Theorien, welche unseren alltäglichen Erfahrungen noch viel näher liegen, lassen sich nun dadurch charakterisieren, daß in ihnen formal c unendlich groß ist und h den Wert null hat.

Eine etwas anschaulichere Weise, diese Entfernung der modernen Physik von alltäglichen Maßstäben zu sehen, ergibt sich durch eine Betrachtung der Ausdehnung physikalischer Phänomene in Raum und Zeit, wozu letzteren ja nach Kant die Qualität zukommt, die reinen Formen unserer sinnlichen Anschauung zu sein. Auch hier sind ziemlich präzise quantitative Aussagen möglich. Ein natürlicher Maßstab für raum-zeitliche Abstände, welche wir mit unseren Sinnesorganen feststellen können, sind der Zentimeter (cm) und die Sekunde (sec). Andererseits ist zum Beispiel die Ausdehnung des einfachsten Atoms, desjenigen von Wasserstoff, H, etwa 10^{-8} cm, und seine charakteristischen Zeiten (die Lebensdauern der angeregten Zustände) sind etwa 10^{-8} sec. Die Abmessungen der Atome sind bestimmt durch die Atomhülle, welche von den elektrisch negativen Elektronen gebildet ist (eines bei H) und die für das chemische Verhalten der Atome verantwortlich ist. Die elektrisch positiven Atomkerne sind um einen weiteren Schritt von den antropomorphen Dimensionen entfernt. Zum Beispiel mißt ein H-Kern etwa 10^{-13} cm. Trotzdem sind alle Atomkerne 2000- bis 3000mal schwerer als ihre Hülle.

Wir werden später sehen, daß die Ausdehnung von 10^{-13} cm der Grenze

¹ Ausgeschrieben ist der Faktor 10^{10} , die Zahl Eins gefolgt von 10 Nullen vor dem Komma; 10^{-27} ist die Zahl Eins an 27ster Stelle hinter dem Komma.

schon ziemlich nahe kommt, unterhalb derer es nach den heutigen experimentellen wie theoretischen Kenntnissen keinen Sinn mehr hat, von Abständen zu sprechen, das heißt unterhalb derer es heute prinzipiell nicht mehr möglich ist, eine Struktur der Materie zu erkennen. Diese Grenze ist etwa bei 10^{-14} cm. Entsprechend ist die untere Grenze für Zeitintervalle etwa bei 10^{-23} sec. In diesem raum-zeitlichen Bereich treffen wir die Elementarteilchen an.

Die Existenz einer unteren Grenze für die Erkennbarkeit einer räumlichen Struktur ist philosophisch von Interesse. Denn sie bedeutet, daß der Gedanke einer fortgesetzten Teilbarkeit der Materie in der modernen Physik keinen Platz hat. Die Atomhypothese der alten Griechen, vor allem Demokrits, erhält so einen neuen Sinn im Bereich der Elementarteilchen. Während aber die griechischen Atome mit dem Paradox behaftet sind, daß sie in den leeren Raum eingebettet sind, der selber offenbar unbeschränkt teilbar ist, ist die heutige «unteilbarkeit» eine Folge der Quantentheorie selbst. In der Tat hat der endliche Wert der Planckschen Konstanten h zur Folge, daß der Ort eines Teilchens der Masse m prinzipiell nicht exakt bestimmbar ist. Eine ungefähre untere Grenze für die Lokalisierbarkeit (die allerdings noch von der Art des Experimentes abhängt) ist gegeben durch die sogenannte Compton-Wellenlänge h/mc . Während nun diese Länge für die Atome höchstens $1,3 \cdot 10^{-13}$ cm beträgt, wird sie im Bereich der Elementarteilchen gerade vergleichbar mit der Abmessung des Teilchens. Nur für die schwereren der Elementarteilchen, für die also h/mc am kleinsten ist, konnte bis heute eine Struktur bestimmt werden. Dies ist auch der tiefere Grund dafür, daß, wenigstens beim heutigen Stand der Theorie, die Unterscheidung in «elementare» und «zusammengesetzte» Teilchen nicht verstanden werden kann, während in der Chemie der Unterschied zwischen Element und Verbindung eindeutig ist. — Die erwähnten Strukturuntersuchungen bilden übrigens den Gegenstand für die eine Hälfte des Physik-Nobelpreises 1961 (Prof. Hofstadter, USA).

Heute kennt man mit Sicherheit 30 Elementarteilchen, die man in einer Tabelle, ähnlich dem periodischen System der Elemente, anordnen kann (s. unten). Das hervorstechendste Merkmal dieser Teilchen ist ihre Verwandelbarkeit. Das heißt es existieren *Reaktionen* zwischen den Teilchen, ähnlich denen zwischen den chemischen Stoffen. Diese Reaktionen könnte man in einem gewissen Sinne, der weiter unten klarer werden wird, als die zeitliche Struktur der Teilchen bezeichnen, in Analogie zur oben diskutierten räumlichen Struktur. Infolge der früher erwähnten «Vermischung» von Raum und Zeit, welche die Relativitätstheorie lehrt, sind diese Strukturen streng genommen allerdings an ein spezielles Bezugssystem gebunden, nämlich dasjenige, in welchem das Teilchen, beziehungsweise der Schwerpunkt vor der Reaktion ruht.

Es ist instruktiv, die Teilchenreaktionen einzuteilen in *induzierte*, bei denen zwei Teilchen miteinander reagieren, und *spontane*, bei denen ein einzelnes Teilchen in andere Teilchen zerfällt. Infolge der spontanen Zerfälle der Teil-

chen sind diese durch eine mittlere Lebensdauer gekennzeichnet. Man nennt *stabile* Teilchen solche, bei denen keine Zerfälle festgestellt werden können, so daß ihre Lebensdauer von der Größenordnung des Alters der Welt sein muß. Letzteres wird heute auf etwa $5 \cdot 10^9$ Jahre, das heißt $2 \cdot 10^{17}$ sec geschätzt, wobei allerdings die Frage, ob die Welt einen Anfang hatte, oder ob die angegebene Zahl lediglich eine charakteristische Periode der Evolution angibt, nicht entschieden ist.

Die ersten Elementarteilchen

Historisch begann die Entdeckung der ersten Elementarteilchen an der Schwelle unseres Jahrhunderts. Naturgemäß fand man zuerst stabile Teilchen, denn die unbeschränkte Lebensdauer ist der Grund für ihre Häufigkeit und relativ leichte Beobachtbarkeit. Zwei Hilfsmittel waren bei diesen ersten Entdeckungen von Bedeutung, einerseits die Technik der Kathodenstrahl-Röhre, andererseits die Entdeckung der Radioaktivität durch *Bequerel* im Jahre 1896. 1897 gelang *J. J. Thomson* der Nachweis des freien *Elektrons*, e^- , des Teilchens der negativen Kathodenstrahlen. 1911 drang *Rutherford* durch seine Streuversuche mit radioaktiven Quellen zum Atomkern vor und legte so die Bahn frei für die Entdeckung des *Protons*, p , das mit dem Kern des H-Atoms identisch ist. Natürlich kam dies nicht alles Schlag auf Schlag. Vielmehr traten Elektron und Proton, wenn auch noch nicht voll erkannt, schon um die Mitte des 19. Jahrhunderts als Träger negativer und positiver elektrischer Ladung in der Elektrolyse in Erscheinung. Mehrere Jahre vor Rutherfords Entdeckung gelang auch der Nachweis der positiven Wasserstoff-Ionen H^+ , also auch Protonen, als Teilchen der sogenannten Kanalstrahlen, welche auch in Kathodenstrahl-Röhren erzeugt werden.

Proton und Elektron weisen eine gewisse Symmetrie auf, indem ihre elektrische Ladung vom gleichen Betrage

$$e = 1,6021 \cdot 10^{-20} \text{ elektromagn. Einh.},$$

aber entgegengesetztem Vorzeichen ist. Dieser Symmetrie maß man eine Zeitlang tiefere Bedeutung bei, auf die wir noch zu sprechen kommen werden. In ihren Massen sind die beiden Teilchen aber stark unsymmetrisch. Diejenige des Elektrons ist

$$m_e = 9,108 \cdot 10^{-28} \text{ Gramm},$$

während die Protonmasse

$$m_p = 1836,0 \cdot m_e$$

beträgt.

Die Entdeckung des dritten stabilen Teilchens, des *Lichtquants* oder *Photons*,

γ , ergab sich aus einer theoretischen Notlage, welcher zunächst die oben erwähnte Plancksche Quantenhypothese entsprang. Erst *Einstein* brachte aber durch seine Erklärung des lichtelektrischen Effektes 1905 vollständige Klarheit darüber, daß die «Quantelung», das heißt die Partikeleigenschaft, beim Licht selbst zu suchen ist. Unter Licht ist hier elektromagnetische Strahlung jeglicher Wellenlänge zu verstehen, also zum Beispiel auch die ebenfalls mit Hilfe der Kathodenstrahlen 1895 entdeckten *Röntgen*-Strahlen und die 1900 von *Villard* gefundene radioaktive γ -Strahlung. Das Photon besitzt weder Ladung noch Masse. Letzteres ist eine notwendige Bedingung dafür, daß Photonen sich stets mit Lichtgeschwindigkeit bewegen.

Was nun die Stabilitätsfrage der drei Teilchen p , e^- und γ betrifft, so ist sie bei letzterem am besten einzusehen. In der Tat folgt sie empirisch aus der einfachen Tatsache, daß es Photonen sind, welche uns Kunde von den Sternen und Spiralnebeln bringen. Die am weitesten entfernten Spiralnebel, welche heute durch das 5-Meter-Spiegelteleskop auf Mount Palomar in Kalifornien gerade noch sichtbar sind, befinden sich in einer Entfernung von etwa $2,5 \cdot 10^9$ Lichtjahren oder umgerechnet $2,4 \cdot 10^{27}$ cm. Das Licht von diesen Horizonten unserer Welt ist somit bis zu uns während einer Zeit unterwegs, welche vergleichbar ist mit dem Weltalter von $5 \cdot 10^9$ Jahren.

Theoretisch hängt die Stabilität eines Teilchens immer zusammen mit einem *Erhaltungssatz*, das heißt einem Gesetz, welches aussagt, daß eine gewisse physikalische Größe sich in den Reaktionen zwischen den Teilchen niemals ändert. Die Idee, daß gewisse Dinge sich nicht verändern, ist natürlich sehr alt. In der Physik tritt sie als quantitatives Gesetz unseres Wissens zum ersten Male in Erscheinung in der Form des berühmten Satzes der Erhaltung der Energie, welchen man wohl als eine der großen Leistungen der Physik des 19. Jahrhunderts bezeichnen kann.

Zusammen mit dem früher erwähnten Einsteinschen Resultat, daß Masse eine Form von Energie ist, genügt der Erhaltungssatz der Energie bereits zur theoretischen Begründung der Stabilität des Photons. Denn aus der Tatsache, daß das Photon Masse null hat, folgt, daß es keine noch leichteren Teilchen gibt, in welche es zerfallen könnte.

Die Stabilität des Elektrons folgt aus einem andern, nicht minder fundamentalen Erhaltungssatz, nämlich aus der Erhaltung der elektrischen Ladung. Denn das Elektron ist das leichteste aller bekannten geladenen Teilchen, weshalb es offensichtlich verhindert ist, in andere noch leichtere Teilchen zu zerfallen. Der Erhaltungssatz, welcher das Proton stabil macht, ist die Erhaltung der Teilchenzahl für eine Gruppe von Teilchen, die man Baryonen oder schwere Teilchen nennt und die wir weiter unten kennen lernen werden. Experimentell wurde die Stabilitätsfrage beim Proton erst vor wenigen Jahren untersucht. Man fand eine untere Grenze für dessen Lebensdauer mit dem Wert $4 \cdot 10^{23}$ Jahre.

Weitere stabile Teilchen

Die nächsten Entdeckungen von Teilchen kamen anfangs der dreißiger Jahre. 1932 fand *Anderson* ein Teilchen, welches das genaue Spiegelbild des Elektrons ist, das heißt welches dieselbe Masse und die entgegengesetzte Ladung von e^- hat, das *Positron*, e^+ . Die Existenz dieses *Antiteilchens* von e^- wurde schon 1929 von *Dirac* auf Grund theoretischer Überlegungen postuliert. Doch glaubte *Dirac* anfangs, auf Grund der oben erwähnten Symmetrie zwischen e^- und p , daß das Proton dieses Antiteilchen sein könnte. Heute gehört die Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie zu den fundamentalen Gesetzen der Physik. In der Tat wurde im Laufe der Jahre zu jedem Teilchen auch sein Antiteilchen gefunden. Teilchen und Antiteilchen haben dieselbe Masse, entgegengesetzte Ladung oder Ladung null und, mit Ausnahme der K^0 -Mesonen (s. unten), auch gleiche Lebensdauern. Das Positron ist somit ebenfalls stabil, das heißt es kann nicht spontan zerfallen. Dagegen macht es natürlich induzierte Reaktionen, zum Beispiel kann es mit einem Elektron unter Emission von zwei Photonen annihilieren, in Formeln

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma.$$

Annihilationen dieser Art sind typisch für alle Teilchen und Antiteilchen.

Im gleichen Jahr wie das Positron erfolgte die Entdeckung des *Neutrons*, n , durch *Chadwick*, wodurch auch der Bau der Atomkerne abgeklärt wurde. Denn es zeigte sich, daß Protonen und Neutronen, die man zusammenfassend auch als *Nukleonen*, N , bezeichnet, die Bausteine der Kerne sind. Das Neutron hat eine Masse von

$$m_n = 1838,6 \cdot m_e.$$

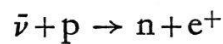
Im freien Neutron haben wir das erste Beispiel eines instabilen Teilchens vor uns. Die Instabilität ist aber gering und somit seine Lebensdauer lang; nach neueren Messungen beträgt sie 17 Minuten. Die Instabilität des Neutrons ist der Grund für die Beta-Radioaktivität gewisser Kerne. Daß trotzdem die meisten Kerne stabil sind, kommt daher, daß es sich hier um gebundene Neutronen handelt.

Das Studium der Beta-Radioaktivität führte in derselben Zeit zur Vermutung der Existenz eines weiteren Teilchens, des *Neutrino*, ν . Im Jahre 1930 postulierte *Pauli* dieses Teilchen zur Rettung der Erhaltungssätze für Energie und Impuls im Beta-Zerfall, und 1933 entwickelte *Fermi* die Theorie dieser Prozesse. Nach der heutigen Konvention über die Teilchen-Antiteilchen-Rolle des Neutrinos schreibt sich der Beta-Zerfall des Neutrons

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu},$$

wo $\bar{\nu}$ das Antineutrino bedeutet. Vor wenigen Jahren ist es *Cowan* und *Reines*

unter großem experimentellen Aufwand gelungen, das freie Antineutrino einwandfrei nachzuweisen. Dabei wurde die durch ein $\bar{\nu}$ induzierte Reaktion



benutzt. Als Quelle diente der $\bar{\nu}$ -Strom eines großen Atomreaktors. Die Uran-Spaltung in einem Reaktor liefert nämlich viele Neutronen und Beta-radioaktive Atomkerne, welche nach der obigen Reaktion Antineutrinos produzieren. Der Grund für die große Schwierigkeit dieses Experiments liegt darin, daß die Neutrinos eine extrem schwache Wechselwirkung mit Materie haben; ein Neutrino oder Antineutrino kann praktisch ungestört das Weltall durchlaufen. Aus diesem Grunde kommt diesen Teilchen heute auch in der Astrophysik eine gewisse Bedeutung zu. Sie spielen dort für die Kernreaktionen in den Sternen sozusagen die Rolle einer Kühlschubstanz, indem sie ungehindert Energie aus dem Stern wegtransportieren können. Dabei ist die Masse der Neutrinos ziemlich sicher exakt null, wie die der Photonen, so daß dieser Energietransport mit Lichtgeschwindigkeit erfolgt.

Wie beim Photon folgt aus der verschwindenden Masse, daß das Neutrino stabil ist. Weitere stabile Teilchen sind nicht bekannt. Ein anderer gemeinsamer Zug von Photon und Neutrino ist ihre elektrische Neutralität. Die beiden Teilchen unterscheiden sich aber durch eine bisher noch nicht erwähnte fundamentale Eigenschaft der Elementarteilchen.

Es handelt sich um die *Statistik* der Teilchen, das heißt der Art und Weise, ununterscheidbare gleiche Teilchen ihren möglichen Zuständen zuzuordnen. Entsprechend der von *Bose* beziehungsweise *Fermi* angegebenen Möglichkeiten lassen sich die Elementarteilchen in zwei Klassen einteilen, die *Bosonen* und die *Fermionen*. Wie ferner *Pauli* gezeigt hat, hängt die Statistik mit dem *Spin* oder Eigen-Drehimpuls zusammen, welcher eine gewisse Rotationssymmetrie angibt: Bosonen haben Spin 0, 1, 2, . . . , Fermionen aber $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$, Während nun das Photon den Spin 1 hat und somit ein Boson ist, ist der Spin von n, p, e^- , ν und deren Antiteilchen $\frac{1}{2}$; diese Teilchen sind also Fermionen.

Die leichten Mesonen

Die folgenden Entdeckungen von Teilchen kamen aus Untersuchungen der *kosmischen Strahlung*, deren Existenz 1912 von *Heß* erkannt worden ist. Als Ursprung dieser Strahlung kommen außer der Sonne vor allem die Sterne unseres Milchstraßensystems (Galaxis) in Frage. Doch kann man heute auch eine extragalaktische Herkunft nicht ausschließen. Außer für die von der Sonne stammende Strahlung kommen natürlich nur stabile Partikel in Frage. Heute weiß man aus Ballon-, Raketen- und Satellitenflügen, daß die primäre kosmische Strahlung, welche auf die Atmosphäre unseres Planeten auftrifft,

hauptsächlich aus leichten Atomkernen, überwiegend Protonen, besteht. Beim Eindringen in die Atmosphäre ereignen sich alle möglichen induzierten Reaktionen, so daß die sekundäre kosmische Strahlung, welche auf die Erdoberfläche gelangt, praktisch aus allen existierenden Teilchen zusammengesetzt ist. Dabei verschwinden natürlich diejenigen mit der kürzesten Lebensdauer zuerst. Um diesem Verschwinden einigermaßen zu entgehen, hatte man Hochgebirgsstationen wie das Jungfraujoch eingerichtet.

Im Jahre 1936 fand man bei Untersuchungen mit *Wilson*schen Nebelkammern ein neues geladenes Teilchen, dessen Masse zwischen derjenigen der Nukleonen und derjenigen des Elektrons lag, was ihm den Namen *Meson* eintrug. Damit schien dasjenige Teilchen gefunden zu sein, welches ein Jahr vorher von *Yukawa* zur Erklärung der Kräfte zwischen Protonen und Neutronen im Atomkern vorgeschlagen worden war. In der Folge stellte sich allerdings heraus, daß dieses neue Teilchen keine genügend starke Wechselwirkung mit den Kernen hat, um als Vermittler der Kernkräfte in Frage zu kommen. Das Dilemma wurde 1947 gelöst, als *Lattes*, *Occhialini* und *Powell*, mit Hilfe der gerade neu entwickelten Technik der Kernemulsionen (strahlungssensible Schichten wie auf Photoplaten), ein zweites Meson fanden, dem sie den Namen *Pi-Meson*, π^\pm , gaben, während sie das früher entdeckte *Mü-Meson*, μ^\pm , nannten. Die Indizes geben an, daß jedes dieser Teilchen mit beiden Ladungen $\pm e$ vorkommt, nämlich als Teilchen und Antiteilchen. Die Massen dieser Mesonen sind:

$$m_\mu = 207 \cdot m_e, \quad m_\pi = 273 \cdot m_e.$$

Das Pi-Meson oder *Pion* zeigte starke Wechselwirkung mit Nukleonen und war somit das von *Yukawa* vermutete Teilchen. Seine Lebensdauer ist kurz und beträgt nur 10^{-8} sec. Es zerfällt vorwiegend nach der Reaktion

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu; \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu},$$

in 0,1‰ der Fälle aber auch nach dem Modus (welcher erst 1958 im europäischen Forschungszentrum CERN in Genf gefunden worden ist)

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu; \quad \pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}.$$

Das Mü-Meson oder *Müon* hat eine wesentlich längere Lebensdauer, was der Grund für seine frühere Entdeckung ist. Es zerfällt in 10^{-6} sec gemäß

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu + \bar{\nu}.$$

Das Pion hat Spin 0, ist also ein Boson, während das Müon ein Teilchen mit Spin $\frac{1}{2}$ und somit ein Fermion ist.

Bereits im Jahre 1936 konstatierte man bei sorgfältigem Studium der Streuung von Protonen an Wasserstoff, daß zwischen zwei Protonen eine

Kraft gleicher Stärke wirkt wie zwischen Proton und Neutron, daß also die Kernkräfte ladungsunabhängig sind. Die Übertragung der Yukawaschen Idee auf die p-p-Kraft zwingt nun aber zur Annahme eines neutralen Teilchens mit ungefähr gleicher Masse wie das π^\pm . Dieses *neutrale Pion*, π^0 , wurde 1950 gefunden. Seine Masse ist

$$m_{\pi^0} = 264 \cdot m_e.$$

Das neutrale Pion zerfällt in zwei γ und hat die kürzeste Lebensdauer von allen 30 heute bekannten Teilchen; sie beträgt etwa 10^{-16} sec. Diese Lebensdauer wurde erst 1960 gemessen; es handelt sich dabei um das kürzeste je gemessene Zeitintervall. Direkt gemessen wurden die Längen und Winkel der Spuren, welche der Zerfall eines K^+ -Mesons (s. unten) in der Kernemulsion hinterläßt. Das π^0 ist außer dem γ das einzige bekannte Teilchen, das mit seinem Antiteilchen identisch ist. Es ist wie π^+ und π^- ein Boson mit Spin 0.

Strange Particles

Im selben Jahr, in dem das geladene Pion gefunden wurde, beobachteten *Rochester* und *Butler* in einer Nebelkammer seltsame V-förmige Spuren, welche von Teilchen mit Masse um $1000 \cdot m_p$ verursacht sein mußten. Dies waren die ersten Exemplare von *K-Mesonen*. Später wurden auch in Kernemulsionen ungewöhnliche Ereignisse gefunden. 1951 fand die Gruppe von *Butler* eine V-Spur neuer Art, welche auf ein Teilchen schließen ließ, dessen Masse wesentlich größer sein mußte als diejenige der Nukleonen. Es war das erste Exemplar eines *Hyperons* (Λ^0), wobei der Name auf die hyper-schwere Masse hindeutet.

Aus einem Grund, auf den wir weiter unten zu sprechen kommen werden, nennt man heute diese neuesten Teilchen *strange particles*, welches der englische Ausdruck für seltsame Teilchen ist. Dazu gehören als erste Gruppe die schon erwähnten *K-Mesonen* oder *Kaonen* K^0 und K^+ mit Ladung 0 und $+\epsilon$ sowie deren Antiteilchen \bar{K}^0 und K^- . Es handelt sich um Bosonen mit Spin 0 und Massen mit den ungefähren Werten

$$m_K = 966 \cdot m_e, \quad m_{K^0} = 974 \cdot m_e.$$

Die Lebensdauer der geladenen Kaonen ist 10^{-8} sec. Es existieren mehrere verschiedene Zerfallsmoden, ein Umstand, der die Identifizierung dieser Teilchen sehr erschwert hatte. Die wichtigsten sind:

$$\begin{aligned} K^\pm &\rightarrow 3\pi && (8\%), && \tau\text{-Modus} \\ K^\pm &\rightarrow 2\pi && (27\%), && \theta\text{-Modus} \\ K^\pm &\rightarrow \mu^\pm + \nu && (59\%) \end{aligned}$$

Die Zerfallsgesetze der neutralen Kaonen K^0 und \overline{K}^0 sind besonders kompliziert, da nicht diese Teilchen durch eine Lebensdauer charakterisiert sind, sondern gewisse Superpositionen derselben, die man mit K_1^0 und K_2^0 bezeichnet. Dies ist der weiter oben erwähnte Ausnahmefall. Die Lebensdauer von K_1^0 beträgt 10^{-10} sec, diejenige von K_2^0 jedoch 10^{-7} sec. Der Zerfall geht überwiegend in zwei Pionen.

Weiter gehört zu den strange particles die Gruppe der hyper-schweren Teilchen oder *Hyperonen*, nämlich das schon erwähnte *Lambda*, Λ^0 , drei *Sigma*, Σ^+ , Σ^0 , Σ^- , und zwei *Xi* oder Kaskaden-Teilchen, Ξ^0 , Ξ^- (der Index gibt wieder die Ladung an). Es handelt sich um Fermionen mit Spin $\frac{1}{2}$ (dieser Wert ist allerdings bei den Xi noch nicht experimentell bestätigt). Die Massenwerte sind ungefähr

$$\begin{aligned} m_{\Lambda} &= 2182 \cdot m_e \\ m_{\Sigma^+} &= 2328 \cdot m_e, & m_{\Sigma^0} &= 2330 \cdot m_e, & m_{\Sigma^-} &= 2342 \cdot m_e \\ m_{\Xi^0} &= 2579 \cdot m_e, & m_{\Xi^-} &= 2583 \cdot m_e \end{aligned}$$

Mit Ausnahme des Σ^0 haben alle Hyperonen eine Lebensdauer um 10^{-10} sec, und die überwiegenden Zerfallsmoden sind:

$$\Xi \rightarrow \Lambda^0 + \pi, \quad \Sigma^{\pm} \rightarrow N + \pi, \quad \Lambda^0 \rightarrow N + \pi.$$

Das Σ^0 zerfällt gemäß

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma,$$

was seine Lebensdauer ähnlich wie beim π^0 um mindestens eine Zehnerpotenz heruntersetzt.

Obschon alle strange particles zuerst in der kosmischen Strahlung gefunden worden sind, stammt die meiste hier gegebene Information von künstlich erzeugten Teilchen. Schon 1930 erzeugten *Cockroft* und *Walton* durch elektrostatische Beschleunigung Protonen-Strahlen relativ hoher Energie, welche in der Folge an die Stelle der natürlichen radioaktiven Quellen traten. Ebenfalls 1930 baute *E. O. Lawrence* das erste Cyclotron, welches der Vorläufer der heutigen Synchrotrons ist. Es handelt sich dabei um Zirkularbeschleuniger, in welchen die geladenen Teilchen durch ein Magnetfeld auf einer Kreisbahn gehalten werden und pro Umlauf zwei oder mehrere elektrostatische Beschleunigungen erfahren. Bei den modernen Protonen- oder Elektronen-Synchrotrons ist die Energie der beschleunigten Teilchen so hoch, daß deren Geschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit c schon bis auf wenige Prozent nahe kommt. Bei den zwei größten heute existierenden Proton-Synchrotrons, denjenigen im europäischen Forschungszentrum CERN in Genf und im amerikanischen Nationallaboratorium von Brookhaven, ist die Geschwindigkeit sogar um weniger als 10/100 kleiner als c . Bei diesen Energien können alle

30 Teilchen künstlich erzeugt werden. Im Gegensatz zur kosmischen Strahlung hat man dabei zeitlich, räumlich und energetisch kontrollierbare Versuchsbedingungen, das heißt man besitzt einen wohldefinierten Teilchenstrahl.

An einer dieser Maschinen, dem Bevatron in Berkeley, Kalifornien, wurde 1955 zum ersten Male ein schweres Antiteilchen, das *Antiproton*, \bar{p} , nachgewiesen. Auf diese Entdeckung war man natürlich gefaßt, aber das Experiment war ein Triumph der modernen Zählertechnik. Schon ein Jahr später konnte man am Bevatron auch das *Antineutron*, \bar{n} , nachweisen, und in den letzten Jahren folgten die *Antihyperonen* $\bar{\Lambda}^0$ und $\bar{\Sigma}^-$. Auch an der Existenz der übrigen Antihyperonen $\bar{\Sigma}^0$, $\bar{\Sigma}^+$, \bar{E}^- , \bar{E}^0 zweifelt heute niemand mehr.

Gesetzmäßigkeiten

Hiemit ist die Liste der heute bekannten Elementarteilchen vollständig (s. die Tabelle). Von den Eigenschaften dieser Teilchen haben wir aber bis jetzt nur einen kleinen Teil beschrieben. Wir charakterisierten sie durch ihre Masse, Ladung, Spin und Lebensdauer und beschrieben ihre Zerfallsgesetze, das heißt ihre spontanen Reaktionen. Die induzierten Reaktionen haben wir

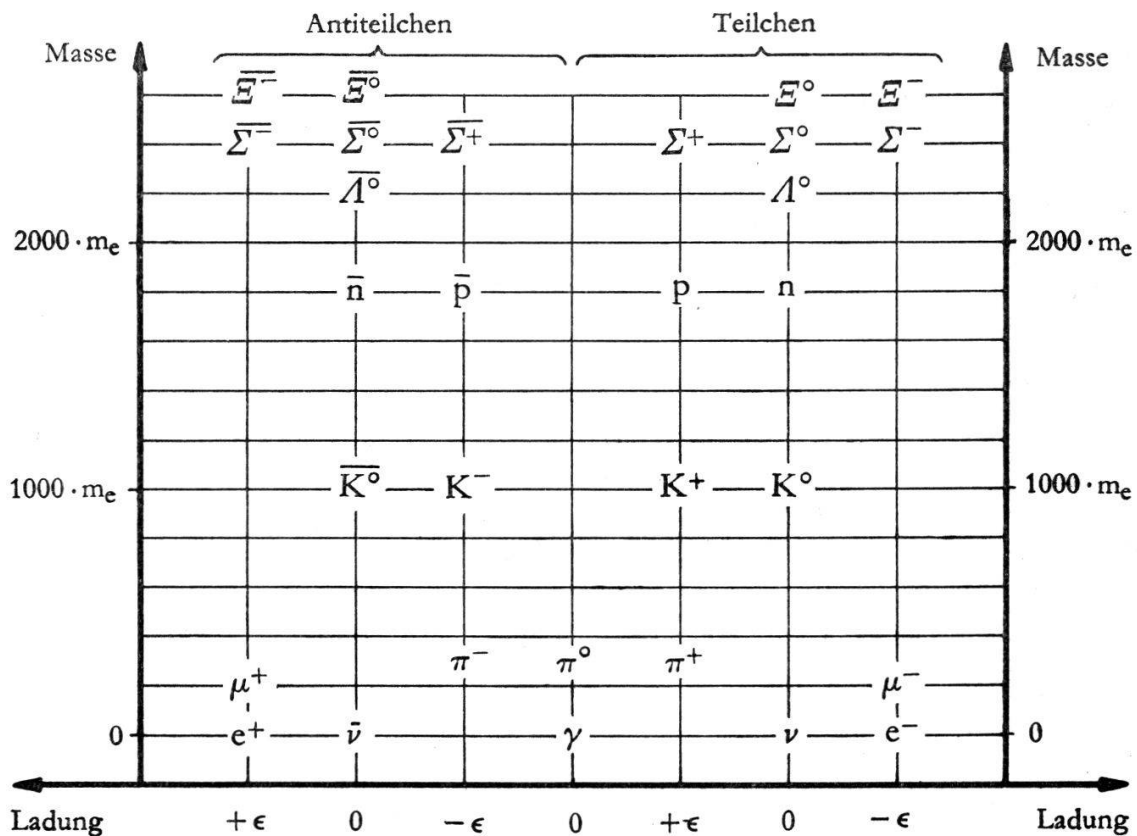


Tabelle der Elementarteilchen

aber noch kaum erwähnt. Es zeigt sich nun, daß diese im allgemeinen bedeutend schneller vor sich gehen als die spontanen, welche ja (mit Ausnahme der Zerfälle in Photonen) durch Zerfallszeiten beziehungsweise Lebensdauern von mindestens 10^{-10} sec gekennzeichnet sind. Demgegenüber sind die induzierten «Erzeugungszeiten» für π - und K-Mesonen und Baryonen von der Größenordnung 10^{-23} sec. Es ist dies die anfangs erwähnte Grenze, unterhalb derer es nicht mehr sinnvoll scheint, von zeitlichen Abständen zu sprechen. Solche Zeiten sind natürlich auch nicht mehr direkt meßbar.

Wir haben also die erstaunliche Tatsache vor uns, daß im allgemeinen spontane Zerfallsprozesse durch *schwache Wechselwirkungen*, dagegen induzierte Erzeugungsprozesse durch *starke Wechselwirkungen* verursacht sind. Quantitativ ist das Verhältnis von starken zu schwachen Wechselwirkungen etwa 10^{12} bis 10^{13} . Ein wichtiges und auch historisch das erste Beispiel einer starken Wechselwirkung ist diejenige zwischen Nukleonen und Pionen, welche für die Kernkräfte verantwortlich ist.

Diese Beschreibung bedarf noch einiger Präzisierungen. Erstens vermitteln auch die schwachen Wechselwirkungen indirekte Reaktionen, wie zum Beispiel die oben erwähnte Reaktion zum Nachweis des freien Antineutrino



oder der Einfang eines negativen Müons durch einen Kern mit Z Protonen und $A-Z$ Neutronen



Als Erzeugungsprozesse sind sie aber zu schwach, um von Interesse zu sein. Dagegen spielen aber gewisse Zerfallsreaktionen zur Erzeugung von Teilchen eine Rolle; zum Beispiel werden Müonen im Laboratorium meist durch Zerfall von Pionen im Flug nach der früher erwähnten Reaktion



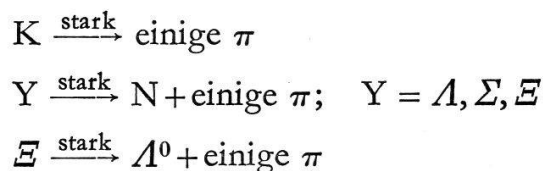
erzeugt.

Ferner bilden alle Reaktionen, an denen Photonen beteiligt sind, das heißt wo die *elektro-magnetische Wechselwirkung* mit im Spiel ist, eine Ausnahme, wie schon aus den extrem kurzen Lebensdauern von π^0 und Σ^0 ersichtlich ist. In der Tat nehmen in der *Hierarchie der Wechselwirkungen* die elektro-magnetischen einen Platz zwischen den starken und den schwachen ein und spielen daher sowohl für Erzeugungs- wie für Zerfallsprozesse eine Rolle. Diese Ausnahmestellung gilt übrigens auch in historischer Hinsicht. Denn die Quantentheorie des elektro-magnetischen Feldes ist die älteste und bestfundierte Feldtheorie und diente für die Entwicklung der Feldtheorien sowohl der schwachen wie der starken Wechselwirkungen als Vorbild.

Wir wollen die Eigenschaften der Teilchen bezüglich ihrer Wechselwirkungen zusammenfassen: Die *Photonen* nehmen, wie erwähnt, eine Ausnahmestellung ein, indem sie die elektro-magnetische Wechselwirkung vermitteln. Als nächste betrachten wir die Gruppe der *leichten Fermionen* oder *Leptonen* ν , e^- , μ^- und der Antileptonen $\bar{\nu}$, e^+ , μ^+ . Sie haben unter sich und mit anderen Teilchen lediglich schwache und elektro-magnetische Wechselwirkungen. Ihre Isoliertheit als Gruppe ist noch dadurch verstärkt, daß ein Erhaltungssatz für die Leptonenzahl (Anzahl Leptonen minus Anzahl Antileptonen) zu gelten scheint. Die nächst schwerere Gruppe von Teilchen sind die *Bosonen* π und K . Sie haben alle Arten von Wechselwirkungen; ihre Teilchenzahl genügt keinem Erhaltungssatz. Als letzte Gruppe haben wir die *schweren Fermionen* oder *Baryonen*, nämlich die *Nukleonen*, N , und *Hyperonen*, Y , welche ebenfalls alle Arten von Wechselwirkungen aufweisen. Zudem gilt für sie der früher erwähnte fundamentale Erhaltungssatz für die Baryonenzahl (Anzahl Baryonen minus Anzahl Antibaryonen), welcher die Stabilität des Protons garantiert.

Es stellt sich nun die Frage, warum die Teilchen mit starker Wechselwirkung, also die Baryonen und Bosonen, nicht auch stark zerfallen, das heißt warum ihre Lebensdauer nicht von der Größenordnung der Erzeugungszeiten ist, also etwa 10^{-23} sec. Die Antwort ist leicht für die Pionen und Nukleonen: Die Pionen sind die leichtesten Teilchen mit starker Wechselwirkung. Das Proton aber ist stabil. Andererseits ist die Massendifferenz zwischen Neutron und Proton viel zu klein ($2,5 \cdot m_e$), als daß das Neutron (stark) in ein Proton und ein Pion zerfallen könnte.

Die Frage bleibt aber unbeantwortet für die strange particles. Konkreter: Warum existieren keine Zerfälle



(Der Zerfall eines Hyperons in ein Nukleon und ein Kaon ist wegen der zu kleinen Massendifferenz zwischen Y und N ausgeschlossen.) Die Nichtexistenz der angegebenen Zerfälle bleibt im Rahmen der bisher beschriebenen Gesetze ein Rätsel. Darin liegt die Seltsamkeit (strangeness) dieser Teilchen. Das Rätsel wurde 1952 von *Pais* auf verblüffend einfache Weise gelöst, nämlich durch die Hypothese, daß die strange particles stets assoziiert, das heißt paarweise, erzeugt werden. Da der Zerfall jedes Teilchens aber individuell erfolgt, ist eine Umkehrung der paarweisen Erzeugung nicht möglich, der starke Zerfall also verhindert. Dieses Gesetz der *assozierten Produktion* ist bisher durch alle Experimente bestätigt worden.

Diese assoziierte Produktion hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der Erzeugung eines Teilchen-Antiteilchen-Paares. So wie bei letzterem Phänomen ein Erhaltungssatz, nämlich für die Teilchenzahl (z. B. Leptonenzahl oder Baryonenzahl), eine Rolle spielt, kann man auch für die assoziierte Produktion eine Zahl einführen, die einem Erhaltungssatz genügt. Man nennt diese Zahl die *Strangeness*. Die erwähnte Analogie erweist sich nun allerdings als sehr oberflächlich, da nämlich die «Strangeness» im Unterschied etwa zur Leptonen- oder Baryonenzahl keine absolut erhaltene Größe ist. Strangeness-Erhaltung gilt nur für starke und elektro-magnetische, nicht aber für schwache Wechselwirkungen.

Die «Strangeness» ist nicht das erste Beispiel einer nur teilweise erhaltenen Größe. In der Tat gibt es nur für die stark wechselwirkenden Teilchen eine befriedigende Einteilung in *Ladungsmultipletts*: (E^0, E^-) , $(\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-)$, (Λ^0) , (p, n) , (K^+, K^0) , (π^+, π^0, π^-) . Diese Gruppierung wird durch eine dem gewöhnlichen Spin analoge Größe, den isotopen Spin oder *Isospin* beschrieben. Es war schon lange bekannt, daß dieser von *Heisenberg* 1932 zur Beschreibung der Ladungssymmetrie von Proton und Neutron eingeführte Isospin nur bei starken Wechselwirkungen erhalten ist, dagegen nicht bei elektro-magnetischen und schwachen. Da nun einem Erhaltungssatz stets eine mathematische Symmetrie entspricht, zeigt sich in der Hierarchie der Wechselwirkungen die verblüffende Tatsache, daß eine Abnahme des Grades der Symmetrie mit einer Abnahme der Stärke der Wechselwirkung parallel geht. Diese Symmetrie-Abnahme, wie überhaupt die Hierarchie der Wechselwirkungen, ist heute noch gar nicht zu verstehen. Jedenfalls aber spielen die starken Wechselwirkungen eine dominierende Rolle, indem ihre hohe Symmetrie eine *Klassifikation* der Baryonen und Bosonen nach Isospin und Strangeness ermöglichen. Diese Klassifikation wurde 1953 unabhängig voneinander von *Gell-Mann* und *Nishijima* angegeben.

Auch die schwachen Wechselwirkungen weisen übrigens gewisse Symmetrien auf, von denen die Erhaltung der Leptonenzahl und die «Universalität», das heißt die numerische Gleichheit der Stärke aller Wechselwirkungen von Leptonen unter sich und mit Nukleonen, die ältesten Beispiele sind. In den letzten Jahren haben sich aber bei den schwachen Wechselwirkungen überraschende neue Perspektiven eröffnet. Anfang 1957 kam es durch die tieforschürfenden Untersuchungen von *Lee* und *Yang* zu einer der größten Sensationen in der Geschichte der modernen Physik: Die Spiegelungssymmetrie, von der jedermann angenommen hatte, daß sie zu den unumstößlichen Gesetzen gehöre, erwies sich in den schwachen Wechselwirkungen als verletzt, und zwar maximal. Doch zeigte sich bald, daß gerade die Tatsache der maximalen Verletzung wieder einer Symmetrie entspricht. Heute lassen sich bei den schwachen Wechselwirkungen Symmetrien neuer Art erkennen, die man als *Auswahlregeln* bezeichnen kann.

Ausblick

Damit haben wir uns in unserer Darstellung der Geschichte der Elementarteilchen dem heutigen Stand der Forschung genähert, und es bleibt uns, einen gewissen Überblick über die noch ungelösten und neu auftauchenden Probleme zu geben. Es braucht wohl nicht besonders betont zu werden, daß es sich hierbei um eine schwierige und sicher nicht ganz objektiv lösbare Aufgabe handelt.

Nicht neu ist die Frage, warum die Natur offenbar nur Teilchen mit den niedrigsten Werten 0, $\frac{1}{2}$, 1 des Spins hervorbringt, da doch beim heutigen Stand der Theorie alle halbzahligen Werte in Frage kommen. Ein vielleicht noch größeres Rätsel ist die Tatsache, daß die elektrische Ladung nur in einem einzigen Wert e (oder null) vorkommt. Nach neuesten Messungen ist die Übereinstimmung des Absolutwertes der Ladung des Protons mit demjenigen des Elektrons mit einer Genauigkeit von 10^{-19} gesichert, während für das Müon die Übereinstimmung mit einer Genauigkeit von 10^{-4} feststeht.

Das Ladungsquantum e hängt mit einer merkwürdigen dimensionslosen universellen Naturkonstanten zusammen, der Feinstruktur-Konstanten

$$\frac{2\pi e^2}{hc} = \frac{1}{137,037},$$

welche ein Maß für die Stärke der elektro-magnetischen Wechselwirkung ist. Entsprechend läßt sich die Stärke der anderen Wechselwirkungen durch eine Zahl beschreiben, welche für die starken Wechselwirkungen von der Größenordnung 1, für die schwachen von der Größenordnung 10^{-12} ist. Eine Theorie, welche diese Kopplungsstärken «erklärt», das heißt als Resultat eines mathematischen Problems liefert, existiert noch nicht.

Dasselbe gilt für die Massenwerte der Teilchen. Immerhin hat man, vor allem durch *Heisenbergs* Arbeiten, heute schon gewisse Vorstellungen, wie eine solche Theorie aussehen könnte. Nach Heisenberg sollen die vielen Teilchen samt ihren Wechselwirkungen lediglich verschiedene Manifestationen ein und desselben «Urfeldes» sein. Dieses Urfeld genügt einer nichtlinearen Gleichung, welche als einzige wesentliche Naturkonstante eine universelle Länge enthält. Wegen der Nichtlinearität ist es im Prinzip möglich, daß aus dieser Gleichung nichttriviale Zahlen in Form von Massenwerten und Kopplungskonstanten resultieren. Die Schwierigkeiten des mathematischen Problems sind aber vorläufig noch unüberwindbar.

Man kann sich natürlich auch fragen, ob die Heisenberg-Gleichung der richtige Weg ist, selbst wenn man die Urfeld-Idee noch gelten lassen will. Es ist aber nicht ausgeschlossen, daß auch diese Idee noch zu konservativ ist, daß man nämlich Nichtlinearitäten in einem globalen Sinne betrachten soll. Dies ist möglich durch eine Revolutionierung unserer Raumvorstellung, indem

man dem Raum andere topologische Zusammenhangs-Verhältnisse zuschreibt. (Es wäre dies seit Kant die dritte Revolutionierung, wenn man die Minkowski-Welt der speziellen Relativitätstheorie als die erste und das Riemannsche gekrümmte Raum-Zeit-Kontinuum der allgemeinen Relativitätstheorie als die zweite bezeichnet.) Diese Idee wird im Sinne einer Mikro-Struktur («Wurmlöcher») von *Wheeler* und *Misner* verfolgt. In globalem Sinn kommt sie in theoretischen Versuchen von *Finkelstein* zum Ausdruck. Auch die alte *Diracsche* Idee der magnetischen Monopole, deren Existenz oder Nichtexistenz man neuerdings experimentell prüfen will, gehört in diesen Zusammenhang.

Bei den zuletzt erwähnten Tendenzen handelt es sich gewissermaßen um Versuche einer Geometrisierung der Teilchen-Physik. In diesem Zusammenhang ist auch das Problem der *Gravitation*, das heißt der Massenanziehung zu erwähnen. Wir sind uns von *Newton* her und in neuerer Zeit durch die allgemeine Relativitätstheorie *Einsteins* gewohnt, in der Gravitation ein auf kosmische Dimensionen abgestimmtes Gesetz zu sehen. Es fragt sich, was ihre Bedeutung im Bereich der Elementarteilchen ist. Im Rahmen der oben erwähnten Hierarchie der Wechselwirkungen käme der Gravitation die Rolle einer extrem schwachen Wechselwirkung zu, deren Stärke durch eine Zahl der Größenordnung 10^{-38} charakterisiert ist. Es fragt sich auch, ob das Gravitationsfeld Anlaß zu neuen Teilchen, den Gravitonen, gibt. Diese hätten Ähnlichkeit mit den Photonen, indem sie Masse und Ladung null, aber Spin 2 besäßen.

Natürlich stellt sich ganz prinzipiell die Frage, ob die heutige Liste der Teilchen vollständig ist. Seit etwa Ende 1960 hat die Frage dadurch besondere Aktualität erlangt, daß bei verschiedenen induzierten Reaktionen von Baryonen und Bosonen Maxima in Funktion der Energie der einfallenden Teilchen, sogenannte *Resonanzen*, entdeckt worden sind. Es ist nun im Prinzip möglich, diese Resonanzen als Manifestationen neuer Teilchen zu interpretieren. Diese Teilchen würden aber via starker Wechselwirkungen zerfallen, hätten also eine Lebensdauer von etwa 10^{-23} sec. Wegen dieser extremen Instabilität wird allerdings der Begriff Teilchen sehr unsicher. Das rasch anwachsende Material über die oben erwähnten *Resonanzen* rechtfertigt vielleicht die folgende, zwar sehr provisorische (dies nicht nur in bezug auf die Zahlen, sondern auch auf die Bezeichnungen) Zwischenbilanz. In der Zusammenstellung ist jede Resonanz durch ihren (wenn mehrere bekannt sind, durch den häufigsten) Zerfallsmodus, ihre ungefähre Masse m und, wo bekannt, durch die ungefähre «Lebensdauer» T charakterisiert. Der Index gibt den Wert des Isospins an.

a) «*Angeregte Zustände*»: Es handelt sich um Resonanzen, bei denen ein schwereres Teilchen ein oder mehrere leichtere Teilchen «bindet».

$$\begin{array}{lll}
 Y_0^{***} \rightarrow N + \bar{K}; & m = m_N + m_K + 2,7 \cdot m_\pi; & T = 0,55 \cdot 10^{-23} \text{ sec} \\
 Y_0^{**} \rightarrow \Sigma + \pi; & m = m_\Sigma + 2,3 \cdot m_\pi; & T = 4,1 \cdot 10^{-23} \text{ sec} \\
 Y_0^* \rightarrow \Sigma + \pi; & m = m_\Sigma + 1,5 \cdot m_\pi &
 \end{array}$$

$$\begin{array}{lll}
Y_1^* & \rightarrow \Lambda + \pi; & m = m_\Lambda + 1,9 \cdot m_\pi; & T = 1,2 \cdot 10^{-23} \text{ sec} \\
N_{5/2}^* & \rightarrow N + \pi; & m = m_N + 5,3 \cdot m_\pi & \\
N_{3/2}^{**} & \rightarrow N + \pi; & m = m_N + 4,1 \cdot m_\pi & \\
N_{3/2}^* & \rightarrow N + \pi; & m = m_N + 2,1 \cdot m_\pi & \\
K_{1/2}^* & \rightarrow K + \pi; & m = m_K + 2,8 \cdot m_\pi; & T = 4,1 \cdot 10^{-23} \text{ sec}
\end{array}$$

b) «*Vektor-Mesonen*»: Es handelt sich um Pionen-Resonanzen, die vielleicht eine wichtige Rolle als Vermittler der starken Wechselwirkungen spielen.

$$\begin{array}{lll}
\omega_0 & \rightarrow 3 \pi; & m = 5,6 \cdot m_\pi; & T = 2,5 \cdot 10^{-23} \text{ sec} \\
\rho_1 & \rightarrow 2 \pi; & m = 5,4 \cdot m_\pi; & T = 3,3 \cdot 10^{-23} \text{ sec} \\
\zeta_1 & \rightarrow 2 \pi; & m = 4,1 \cdot m_\pi; & T = 1,6 \cdot 10^{-23} \text{ sec} \\
\eta_0 & \rightarrow 3 \pi; & m = 3,9 \cdot m_\pi; & T = 5,5 \cdot 10^{-23} \text{ sec}
\end{array}$$

Eine Frage von kosmischer Tragweite betrifft die Realisierung der Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie in der uns bekannten Welt. Diese Realisierung ist nämlich stark unsymmetrisch, da die stabile Materie nur aus Teilchen, nämlich aus Nukleonen und Elektronen, aufgebaut ist, nicht aber aus Antiteilchen. Es handelt sich hier also um einen Fall einer Diskrepanz zwischen einem exakten Symmetriegesetz und seiner unsymmetrischen Realisierung in der Welt. Solche Fälle sind auch in anderen Zweigen der Naturwissenschaften bekannt. Zum Beispiel ist die Links-Rechts-Symmetrie in der Biologie nicht überall realisiert. Eine solche Situation stellt immer die Frage nach den Anfangsbedingungen, welche in unserem Falle die Frage nach der Entstehung der Materie ist. Man kann sich zum Beispiel denken, daß die Entstehung der Welt in einer explosionsartigen oder kontinuierlichen (steady state theory) Trennung von Materie und Antimaterie bestanden hat, so daß es zu unserer Welt noch irgendwo eine Antiwelt geben müßte. Durch das zu uns gelangende Licht wäre ein Anti-Spiralnebel von einem Spiralnebel eben wegen des Symmetriegesetzes nicht zu unterscheiden, da das Photon mit seinem Antiteilchen identisch ist. Dagegen wäre eine Unterscheidung mit Hilfe von Neutrinos im Prinzip (wenn auch nicht praktisch) möglich.

Damit haben wir von den Teilchen bis zu den Grenzen des Kosmos sowohl im Raum wie in der Zeit 40 Zehnerpotenzen durchmessen. Wie *Dirac* und *Jordan* bemerkt haben, tritt diese Zahl 10^{40} noch in anderen Verhältnissen von kosmischen zu Teilchengrößen auf, was diese Forscher zu sehr originellen Theorien angeregt hat. Hier wollen wir aber diesen Pfaden nicht weiter folgen, sondern zurückkehren zu den alltäglichen Dimensionen von 1 cm und 1 sec.