

Der gegenwärtige Stand der Elementarteilchenforschung

Von PD Dr. M. TEUCHER

Physikalisches Institut der Universität Bern*

Die Physik der Elementarteilchen begann zu der Zeit, als man einsehen mußte, daß die Atome teilbar sind. Im RUTHERFORDSchen Atommodell wird der positiv geladene Kern von einer negativ geladenen Elektronenwolke umkreist. Da viele Atomgewichte annähernd ganzzahlig waren, lag der Versuch nahe, alle Atomkerne aus dem Proton, dem Kern des Wasserstoffatoms, aufzubauen. Dies scheiterte aber schon beim Helium, das wohl die Masse 4 (in Einheiten der Protonenmasse), aber nur die Kernladung 2 (in Einheiten der Elementarladung) besitzt. Der Ausweg, im Atomkern Elektronen neben den Protonen anzunehmen, mußte sowohl aus experimentellen als auch aus theoretischen Gründen abgelehnt werden. Erst die Entdeckung des Neutrons durch CHADWICK im Jahre 1932¹ – seine Existenz war allerdings von RUTHERFORD schon viel früher vermutet worden – brachte eine zwanglose Erklärungsmöglichkeit, nach der nur Protonen und Neutronen als Kernbausteine in den stabilen Atomkernen vorhanden sind. Der β -Zerfall

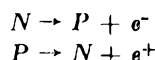
muß dann durch Umwandlung eines Neutrons in ein Proton und umgekehrt gedeutet werden. Während der erste Prozeß am freien Neutron mit Emission eines Elektrons möglich ist, kann der andere mit Emission eines positiven Elektrons (Positrons) nur in einem Atomkern vor sich gehen, wo Energie zur Verfügung steht. Da das Proton etwas leichter ist als das Neutron, kann seine Umwandlung in ein Neutron unter Positronenemission nur stattfinden, wenn die fehlende Energie von außen zugeführt wird. Das Positron ist ebenfalls im Jahre 1932 von ANDERSON² in der kosmischen Strahlung entdeckt worden. Damit ist eine der überraschendsten theoretischen Voraussagen bestätigt worden. DIRAC hatte 1928 bei seinen Bemühungen, eine relativistisch einwandfreie Theorie des Elektrons zu schaffen, eine Gleichung aufgestellt, die zwangsläufig zu der Forderung positiver Elektronen führte. Das Positron ist dabei als das Antiteilchen des Elektrons zu verstehen, d. h. wenn ein Positron auf ein Elektron trifft, so vernichten sich beide Teilchen gegenseitig unter Aussendung einer Vernichtungsstrahlung.

* Gegenwärtige Adresse: Department of Physics, The University of Oklahoma, Norman, Okla. (USA).

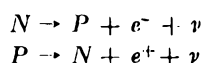
¹ J. CHADWICK, *Nature* 129 (1932) 312; *Proc. Roy. Soc. London (A)* 136 (1932) 692.

² C. D. ANDERSON, *Science* 76 (1932) 238; *Physic. Rev.* 43 (1933) 491.

Das oben angedeutete einfache Konzept des β -Zerfalls nach dem Schema



würde voraussetzen, daß es sich um einen Zwei-Teilchen-Zerfall handelt. Dieser würde sich in einem «Linienpektrum» für die ausgesandten β -Teilchen sichtbar machen, während in Wahrheit aber ein kontinuierliches Spektrum beobachtet wird, das auf einen Drei-Teilchen-Zerfall hindeutet. Nach einem älteren Vorschlag von PAULI hat dann FERMI im Jahre 1934 eine Theorie des β -Zerfalls gebracht, in der noch ein neutrales Teilchen, das er Neutrino nannte, emittiert wird. Dies Teilchen hat, wie wir heute wissen, mit großer Wahrscheinlichkeit die Ruhmasse Null, besitzt aber ebenso wie Proton, Neutron und Elektron einen halbzahlgigen Spin (Eigendrehimpuls in Einheiten von $h/2\pi$). Nach FERMI wird der β -Zerfall durch das Schema



beschrieben. Man kann dies nun vollkommen analog zur Emission von Lichtquanten in der Atomhülle verstehen. Dort springt ein Elektron von einem Zustand höherer Energie in einen tieferen (modellmäßig betrachtet: von einer äußeren Bahn in eine innere), wobei ein Lichtquant «erschaffen» wird. Ebenso springt hier ein Kernbaustein (Nukleon) aus einem «Zustand» («Proton» oder «Neutron») in einen anderen, wobei ein Elektron und ein Neutrino erschaffen werden. Der Quantensprung des Elektrons wird durch die Gesetze des elektromagnetischen Feldes beschrieben. Dieses ist auch in der Lage, die Kraftwirkungen zwischen zwei elektrisch geladenen Teilchen zu vermitteln. Die Kraftwirkung läßt sich aber auch im korpuskularen Bilde beschreiben, wonach von dem einen Teilchen virtuelle Photonen (γ -Quanten) emittiert und von dem anderen Teilchen wieder reabsorbiert werden.

Diese Analogie erweckt ganz bestimmte Vorstellungen über die Kräfte, die zwischen den Nukleonen im Atomkern herrschen sollen. Wir wollen den FERMI'schen Ansatz für den β -Zerfall hier nicht weiter verfolgen, da die durch Elektron und Neutrino vermittelten Kräfte viel schwächer sind als die Kernkräfte. Von diesen weiß man aus experimenteller Erfahrung, daß sie nur über eine sehr kurze Reichweite verfügen, daß sie von der Ladung der beteiligten Teilchen unabhängig sind und daß sie in einem Atomkern in demselben Maße abgesättigt sind wie etwa die Kräfte, die im Inneren einer Flüssigkeit auf ein Molekül wirken. In gewisser Näherung ist also der Energieinhalt eines Atomkernes proportional zu seinem Volumen, d.h. zu der Zahl der in ihm enthaltenen Nukleonen.

YUKAWA hat 1935 einen theoretischen Versuch zur Erklärung der Kernkräfte unternommen³, der sich enger

an die Analogie zum elektromagnetischen Feld anschließt als der FERMI'sche Ansatz, da bei ihm lediglich ein Teilchen ausgetauscht wird. Die Lichtquanten gehorchen bekanntlich einer Wellengleichung

$$\Delta\varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = 0.$$

Um zur Elektrostatik zu gelangen, muß man das von der Zeit abhängende Glied streichen, worauf die bekannte «Potentialgleichung»

$$\Delta\varphi = 0$$

stehen bleibt, die das COULOMB-Potential als Lösung hat:

$$\varphi = \frac{e}{r}.$$

Sie hat aber keine Lösungen, die mit wachsendem r schnell genug gegen Null gehen, um die kurze Reichweite der Kernkräfte zu beschreiben. Zu diesem Zwecke erweiterte YUKAWA die Wellengleichung um ein Glied, das proportional zu φ ist:

$$\Delta\varphi - \kappa^2\varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = 0.$$

Diese neue Gleichung hat nun die Lösung

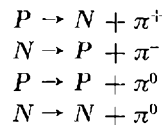
$$\varphi = g \frac{e^{-\kappa r}}{r},$$

die genau die gewünschte kurze Reichweite für die Kernkräfte ergibt. Dabei bedeutet g eine noch willkürliche Konstante, während κ durch die experimentelle Erfahrung zu ungefähr 10^{-13} cm festgelegt wird. Daraus muß man nun die physikalischen Eigenschaften des Kernfeldes ableiten. Die YUKAWA-Gleichung kann man als eine relativistische SCHRÖDINGER-Gleichung (KLEIN-GORDON-Gleichung) für die als «Quanten» des Kernfeldes wirkenden, jetzt nicht mehr masselosen Teilchen ansehen. Man kann diese Gleichung am einfachsten erhalten, wenn man die aus der Relativitätstheorie bekannte Beziehung zwischen Impuls p und Energie E eines Teilchens der Ruhmasse m in der Form

$$E^2 - c^2p^2 - m^2c^4 = 0$$

hinschreibt und nach den Vorschriften der Quantenmechanik p und E durch die Operatoren $-i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ und $+i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ ersetzt. Den so entstandenen neuen Operator wendet man dann auf φ an, wodurch die YUKAWA-Gleichung entsteht, wenn man noch $\kappa^{-1} = \frac{\hbar}{mc}$ setzt. Diese Größe muß man jetzt als die COMPTON-Wellenlänge der YUKAWA-Teilchen der Masse m ansehen. Aus der experimentell ermittelten Reichweite der Kernkräfte folgt dann für m ein Wert von der Größenordnung $300 m_e$ (Elektronenmasse = m_e) (im folgenden wird für die YUKAWA-Teilchen das Symbol π verwendet). Da die Kernkräfte von der Ladung unabhängig sein sollen, müssen die folgenden Prozesse

³ H. YUKAWA, *Proc. Physic.-Math. Soc. Japan* 17 (1935) 48.



möglich sein, d.h. die YUKAWA-Teilchen müssen mit positiver und negativer elektrischer Ladung und auch ungeladen vorkommen. Dieser Formalismus erklärt jedoch noch nicht den β -Zerfall. Diesen versuchte YUKAWA durch die Annahme, daß die π -Teilchen radioaktiv in Elektron und Neutrino zerfallen, in seine Theorie einzuordnen.

In Jahre 1937 entdeckte ANDERSON wiederum in der kosmischen Strahlung ein geladenes Teilchen, dessen Masse zwischen der des Elektrons und des Protons lag und das daher den Namen «Meson» erhielt⁴. Damit gewann mit einem Schläge die vorher selbst von theoretischen Physikern nur wenig beachtete YUKAWAsche Theorie eine vollkommen neue Bedeutung auch für die Experimentalphysik. Sie hat von da an die Experimente befruchtet und geleitet. Um so betrüblicher war es daher, daß die bald einsetzenden Massenmessungen der Mesonen sehr wohl Übereinstimmung mit der YUKAWAschen Voraussage brachten, daß ihr Verhalten gegenüber Kernmaterie aber vollkommen unverständlich war. Sollten die Mesonen nach YUKAWA gerade die starken Kernkräfte vermitteln, so zeigten sie experimentell eine bisher nicht gekannte Durchdringungsfähigkeit, die auf eine extrem kleine Wechselwirkung mit der Kernmaterie hindeutete. Ihre Instabilität konnte auch experimentell nachgewiesen werden. Die dabei gemessene mittlere Lebensdauer betrug aber nicht – wie von YUKAWA erwartet – 10^{-8} sec, sondern erwies sich als etwa hundertmal länger. Diese Widersprüche konnten erst 1947 aufgeklärt werden, als es LATTES, OCCHIALINI und POWELL gelang, den sogenannten π - μ -Zerfall zu entdecken⁵. Danach gab es also zwei verschiedene Mesonen, das schwerere π -Meson mit $273 m_e$, das nach einer mittleren Lebensdauer von $2,5 \cdot 10^{-8}$ sec in das leichtere μ -Meson mit $207 m_e$ zerfällt, das dann seinerseits nach $2,15 \cdot 10^{-6}$ sec in ein Elektron zerfällt. Beim π -Zerfall beobachtete man in allen Fällen, daß die μ -Mesonen mit der gleichen Energie von 4,16 MeV emittiert wurden. Daraus muß man unter Berücksichtigung von Energie- und Impulsatz schließen, daß das ebenfalls wegfliegende neutrale Teilchen ein Neutrino ist. Das Elektron aus dem μ -Zerfall besitzt hingegen ein kontinuierliches Spektrum, was auf zwei gleichzeitig emittierte Neutrinos hinweist. Kurz nach dieser Entdeckung gelang es schließlich sogar, das neutrale π -Meson aufzufinden, das allerdings nur eine Lebensdauer von 10^{-15} sec besitzt, die sich jedoch aus einer verfeinerten Mesontheorie plausibel machen ließ. Die π -Mesonen werden, wie die Experimente bewiesen

haben, in Zusammenstößen von Kernteilchen produziert. Sie sind auch wesentlich weniger durchdringungsfähig als die von ANDERSON beobachteten Teilchen und stehen in starker Wechselwirkung mit der Materie. Daher lag es nahe, die π -Mesonen mit den YUKAWA-Teilchen zu identifizieren, während sich ANDERSONS Mesonen als die μ -Mesonen herausgestellt haben.

Diese Vorstellung über die Natur der Kernkräfte zwingt nun auch dazu, eine ganz bestimmte Vorstellung über die Struktur der «freien» Nukleonen anzunehmen. Das Elektron wird von seinem COULOMB-Feld umgeben. Im korpuskularen Bild heißt das, um das Elektron herum befinden sich «virtuelle» Photonen. Diese Bezeichnung rührt von der Tatsache her, daß man die Lichtquanten am freien Elektron nicht beobachten kann. Fliegt dieses aber mit großer Geschwindigkeit am COULOMB-Feld eines anderen elektrisch geladenen Teilchens vorüber, so kann es bei der auftretenden Beschleunigung einen Teil seines Feldes, also seiner bisher virtuellen Lichtquanten, «abstreifen». Dieser Vorgang ist als Bremsstrahlung schneller Elektronen wohlbekannt, und die emittierten Photonen sind experimentell nachweisbar. Ähnlich kann man sich auch die Erzeugung von π -Mesonen vorstellen. Ein «freies» Nukleon ist also auch von einem «Feld» virtueller π -Mesonen umgeben, die bei hochenergetischen Zusammenstößen mit anderen Nukleonen in Freiheit gesetzt werden können. Nur dann kann nämlich auf Kosten der kinetischen Energie die notwendige Energie aufgebracht werden, die für die Ruhmasse der zu «erschaffenden» reellen Mesonen erforderlich ist.

Das hier über die Rolle der π -Mesonen entwickelte Bild scheint auf den ersten Blick recht befriedigend. Jedoch sind bereits in demselben Jahre, in dem das π -Meson überhaupt entdeckt worden ist, Tatsachen gefunden worden, die das Bild wieder zu sprengen drohen. Im Jahre 1947 fanden ROCHESTER und BUTLER das erste V-förmige Ereignis auf WILSON-Kammer-Aufnahmen, das als Zerfall eines neutralen schweren instabilen Teilchens gedeutet werden mußte⁶. Zwei Jahre später fand die Bristol-Gruppe auf photographischen Emulsionen, die auf dem Jungfrauoch der kosmischen Strahlung ausgesetzt worden waren, die Spur eines geladenen Teilchens, das zur Ruhe kam und dabei in drei ebenfalls geladene Teilchen zerfiel⁷. Eines davon konnte als π -Meson identifiziert werden, für die beiden anderen konnte dies als sehr wahrscheinlich begründet werden. Dieses Teilchen besaß eine Masse von etwa $1000 m_e$. Damit war das erste schwere Meson sicher nachgewiesen worden. Bald gelang der Beweis, daß instabile Teilchen auch mit Massen existieren, die größer als die des Protons sind. Diese werden heute Hyperonen genannt. Die Physik der schweren Mesonen und Hyperonen hat in den Jahren nach 1947 vor allem die Physiker beschäf-

⁴ S. H. NEDDERMEYER und C. D. ANDERSON, *Physic. Rev.* 51 (1937) 884.

⁵ C. M. LATTES, G. P. S. OCCHIALINI und C. F. POWELL, *Nature* 160 (1947) 486; *Proc. Physic. Soc.* 61 (1948) 173.

⁶ G. D. ROCHESTER und C. C. BUTLER, *Nature* 160 (1947) 855.

⁷ R. BROWN, U. CAMERINI, P. H. FOWLER, H. MUIRHEAD, C. F. POWELL und D. RITSON, *Nature* 163 (1947) 82.

tigt, die sich mit der kosmischen Strahlung befaßten. Daher sind auch sämtliche bis heute bekannten schweren Mesonen und Hyperonen in der kosmischen Strahlung entdeckt worden. Inzwischen ist allerdings die Hauptarbeit auf diesem Gebiet der Physik in andere Hände übergegangen. Damit hat sich ein Vorgang wiederholt, der sich schon einmal 1947 bei den π -Mesonen ereignet hatte. Zur Zeit, als diese von LATTES, OCCHIALINI und POWELL in der kosmischen Strahlung entdeckt worden waren, besaß die Universität von Kalifornien bereits ein Synchrocyclotron von 184 inch Durchmesser, mit dem die künstliche Erzeugung von π -Mesonen energetisch möglich sein sollte. Nach einigen mißlungenen Versuchen gelang dann auch GARDENER und LATTES der Nachweis⁸. Damit war mit einem Schlage die Physik der π -Mesonen an die großen Beschleunigungsmaschinen übergegangen, weil dort die Teilchen unter kontrollierbaren Bedingungen und in viel größerer Intensität erzeugt werden konnten, als das in der kosmischen Strahlung möglich war. Diese erlebte aber mit den schweren Mesonen und den Hyperonen noch einmal eine ungeahnte Blüte der Elementarteilchenforschung. Die Physiker an den großen Beschleunigungsmaschinen lernten daraus aber sofort, daß sie energiereichere Maschinen bauen mußten. So entstand zunächst das Cosmotron in Brookhaven (Endenergie der Protonen $3 \cdot 10^9$ eV) und später das Bevatron in Berkeley ($6 \cdot 10^9$ eV). Damit konnten die großen Beschleuniger auch die Physik der schweren Mesonen und Hyperonen an sich reißen. Das

Bevatron war aber schon sehr viel weitsichtiger projiziert worden: Damit sollten nicht nur schwere Mesonen

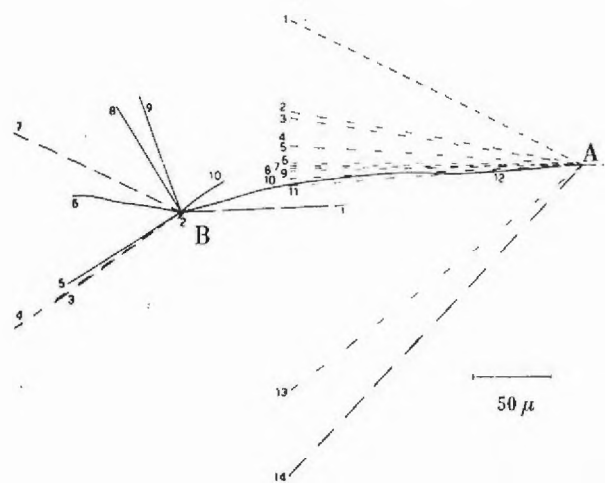


Abb. 2. Erzeugung und Annihilation eines Antiprotons¹³. Das Ereignis wurde in einer photographischen Platte beobachtet, die bei einem Ballonflug in 29 km Höhe der kosmischen Strahlung exponiert wurde. Ein einfach geladenes Teilchen löst im Punkte A einen «Schauer» von 12 dünnen Spuren aus. Außerdem wird noch eine graue Spur (Nr. 14) und eine schwarze Spur (Nr. 12) produziert. Diese löst nach 308μ eine weitere Kernzertrümmerung B aus, die 10 Spuren aufweist. Aus den Eigenschaften von Spur 12 muß man schließen, daß es sich um ein Teilchen von der Masse des Protons handelt. Die in der Kernzertrümmerung B «sichtbare» Energie beträgt etwa 10^6 eV und deutet darauf hin, daß es sich um die Annihilation eines Antiprotons handelt.

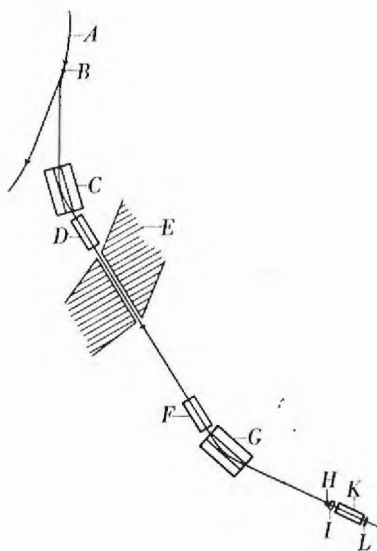


Abb. 1. Nachweis von Antiprotonen in Berkeley⁹. Die Meßanordnung wählt auf magnetischem Wege negative Teilchen eines bestimmten Impulses aus, an denen eine Laufzeitmessung durchgeführt wird. Damit läßt sich die Masse der nachgewiesenen Teilchen messen, die auf $\pm 2\%$ mit der Masse des Protons identisch ist. - A Protonenstrahl des Bevatrons; B Kupfertarget; C, G Ablenkmagneten; D, F Fokussierungsmagneten; E Bevatron-Abschirmung; H, L Szintillationszähler; I, K ČERENKOV-Zähler

erzeugt werden, sondern es sollte auch die Frage nach der Existenz von Antiprotonen gelöst werden. Diese Teilchen waren bisher nicht in der kosmischen Strahlung entdeckt worden, ihre Existenz war aber seit Jahren vermutet worden. In Anlehnung an die DIRAC-Gleichung, die ja nur für Elektronen gültig ist, war vermutet worden, daß sich die Protonen ähnlich verhalten sollten, d.h. daß zum gewöhnlichen Proton auch ein Antiteilchen existieren sollte, das dieselbe Masse, aber negative Ladung hat. Die Vernichtungsstrahlung von Elektron und Positron besteht aus γ -Quanten. Das ist natürlich, da diese das COULOMB-Feld repräsentieren, das für die Kräfte zwischen den beiden Teilchen verantwortlich ist. Entsprechend sollte die Vernichtungsstrahlung von Proton und Antiproton aus π -Mesonen bestehen, da diese die Quanten des Kernfeldes bilden, das für die Kernkräfte verantwortlich ist, während die elektrischen Kräfte hier gar keine Rolle spielen. Die Erzeugung der Antiprotonen ist im Herbst 1955 in Berkeley durch CHAMBERLAIN, SEGRE, WIEGAND und YPSILANTIS in überzeugender Weise mittels einer großen Zählrohrapparatur nachgewiesen worden⁹. Dabei wurden aber auch kernphotographische Emulsionen exponiert, um darinnen die Zerstrahlung von Antiprotonen aufzusuchen. Derartige Prozesse sind mit den vorher vermuteten Eigenschaften von den mit der Durchmusterung der Photoplatten beschäftigten Forschergruppen in Ber-

⁸ E. GARDENER und C. M. G. LATTES, *Science* 107 (1948) 270.

⁹ O. CHAMBERLAIN, E. SEGRE, C. WIEGAND, TH. YPSILANTIS, *Physic. Rev.* 100 (1955) 947.

keley und Rom beobachtet worden¹⁰. In der kosmischen Strahlung sind bis heute drei derartige Ereignisse gefunden worden, eines von der M.I.T.-Gruppe mit einer WILSON-Kammer¹¹, zwei von Rom¹² und Bern¹³ mit photographischen Emulsionen.

Nach der Entdeckung des Antiprotons besteht kein Grund, an der Existenz des Antineutrons zu zweifeln. Dies kann sich vom Neutron natürlich nicht hinsichtlich der Ladung unterscheiden, wie das bei Proton und Antiproton der Fall ist. Man darf jedoch erwarten, daß das Antineutron – verglichen mit dem Neutron – das umgekehrte magnetische Moment besitzt. Der Nachweis dieses Teilchens, an dem augenblicklich vor allem in Berkeley gearbeitet wird, dürfte recht schwierig sein*.

Neuere Ergebnisse und Probleme

Eine klare Definition des Begriffes «Elementarteilchen» scheint augenblicklich noch nicht möglich zu sein. Man versteht heute darunter nach ganz phänomenologischen Gesichtspunkten einfach alle Teilchen, die leichter sind als das Deuteron. Dieses ist bekanntlich aus einem Proton und einem Neutron zusammengesetzt. Dabei wird aber vorläufig vollkommen offen gelassen, ob sich unter den schweren Mesonen und Hyperonen nicht auch derartige zusammengesetzte Teilchen befinden könnten. Die Möglichkeit, daß mit fortschreitender Forschung noch Hyperonen aufgefunden werden könnten, deren Masse schwerer als die des Deuterons ist, kann durch nichts ausgeschlossen werden.

Man teilt die Elementarteilchen in verschiedene Gruppen ein:

1. Teilchen ohne Ruhmasse.
2. Elektronen und Positronen (*e*).
3. Leichte Mesonen (*L*).
4. Schwere Mesonen (*K*).
5. Nukleonen und Antinukleonen (*N*).
6. Hyperonen (*Y*).

Die ersten drei Gruppen sowie die Nukleonen gehören heute zum «gesicherten Bestand» der Physik, wenn damit auch keineswegs gesagt werden soll, daß wir schon alles von ihnen wüßten. Im Brennpunkt des wissenschaftlichen Interesses stehen jedoch schwere Mesonen, Hyperonen und Antinukleonen. Für die Erforschung ihrer Eigenschaften werden augenblicklich in allen Län-

* Nach Pressemeldungen ist der Nachweis gerade dieser Tage den Physikern in Berkeley geglückt.

¹⁰ O. CHAMBERLAIN, W. W. CHUPP, G. GOLDHABER, E. SEGRE, C. WIEGAND, E. AMALDI, G. BARONI, C. CASTAGNOLI, C. FRANZINETTI und A. MANFREDINI, *Physic. Rev.* 101 (1956) 909. O. CHAMBERLAIN, W. W. CHUPP, A. G. EKSPONG, G. GOLDHABER, S. GOLDHABER, E. J. LOFGREN, E. SEGRE und C. WIEGAND, *Physic. Rev.* 102 (1956) 920.

¹¹ H. S. BRIDGE, H. COURANT, H. DE STAEBLER und B. ROSSI, *Physic. Rev.* 95 (1954) 1101.

¹² E. AMALDI, C. CASTAGNOLI, G. CORTINI, C. FRANZINETTI und A. MANFREDINI, *Nuovo Cimento* 1 (1955) 492.

¹³ M. TEUCHER, H. WINZELER und E. LOHRMANN, *Nuovo Cimento* 3 (1956) 228.

dern ungeheure Summen aufgewendet. Gigantische Beschleunigungsmaschinen sind bereits im Betrieb, größere sind im Bau. Die Arbeiten werden vor allem mit dem Cosmotron und dem Bevatron (Protonensynchrotrons mit einer Endenergie von 3 bzw. 6 GeV) ausgeführt. In Kürze wird eine noch mächtigere Anlage in Rußland in Betrieb genommen, die Protonen von 10 GeV (1 GeV = 10⁹ eV) liefern soll. Von der Größe dieses Apparates kann man sich vielleicht eine Vorstellung machen, wenn man den Durchmesser des Ringmagneten von 60 m überdenkt, der ein Gewicht von 36 000 Tonnen haben wird. Das vom CERN in Genf geplante und im Bau befindliche Protonensynchrotron von 25 GeV dürfte frühestens 1960, das in Brookhaven projektierte für 33 GeV wahrscheinlich zum gleichen Zeitpunkt betriebsbereit sein.

Die erste Frage bei einem neuen Teilchen ist stets: Welches sind seine Eigenschaften? Auf diese Weise sind ja auch alle schweren Mesonen und Hyperonen entdeckt worden. Man fand bei Untersuchungen mit WILSONSchen Nebelkammern (neuerdings werden auch sogenannte BUBBLE-Kammern verwendet), bei Expositionen mit kernphotographischen Emulsionen und bei Messungen mit Zählapparaturen (GEIGER-, Proportional-, Szintillations- und ČERENKOV-Zählern) Spuren von Teilchen, die nicht in das bekannte Bild eingeordnet werden konnten. Man mißt dann Ladung und Masse, untersucht, ob sie stabil sind oder radioaktiv nach einer bestimmten Lebensdauer zerfallen, welches ihre Zerfallsprodukte sind usw. Dieser Teil der Forschung ist also mehr beschreibender Natur. In Tab. 1 wurden alle heute bekannten und hinreichend gesicherten Elementarteilchen aufgenommen, ohne jedoch jede einzelne Zahl durch ein Literaturzitat zu belegen, weil diese Bibliographie den Rahmen dieses Berichtes sprengen müßte und weil schon verschiedene Zusammenstellungen existieren¹⁴. In jedem Jahre wird von der Universität von Rochester (N. Y.) eine internationale Konferenz über hochenergetische Kernphysik abgehalten. In den Berichten über ihre Verhandlungen kann man den jährlichen Fortschritt auf dem Gebiet der Elementarteilchenforschung am besten nachlesen¹⁵.

Beim Studium der Tabelle fällt sofort auf, daß alle *K*-Mesonen praktisch die gleiche Masse haben. Die Meßergebnisse lassen heute noch keine Entscheidung der Frage zu, ob dies exakt gültig ist oder ob noch kleine Unterschiede bestehen. Ebenso verwunderlich ist zunächst, daß auch alle Lebensdauern der *K*-Mesonen nur sehr wenig voneinander abweichen. In dieser Hinsicht herrschen bei den Hyperonen ganz ähnliche Verhältnisse.

Ein weiterer Gesichtspunkt der Forschung ist die Frage nach der Erzeugung der neuen Teilchen: Wie und

¹⁴ M. M. SHAPIRO, *Amer. J. Physics* 24 (1956) 196. A. M. SHAPIRO, *Rev. Mod. Physics* 20 (1956) 164.

¹⁵ *Proceedings of the Sixth Annual Rochester Conference, 1956*, Interscience Publishers, Inc., New York 1956.

unter welchen Bedingungen entstehen sie? Zum Schlusse bleibt noch: Was geschieht mit ihnen, wenn sie auf andere Teilchen treffen?

Damit kommen wir von der rein beschreibenden Forschung schon etwas weiter: Wir versuchen die neuen Teilchen in einen größeren Rahmen einzuordnen. Um das Ergebnis vorwegzunehmen: Heute existiert noch keine befriedigende Theorie der Elementarteilchen. Wir verstehen noch nicht, warum es so viele Teilchen gibt und warum sie genau die Eigenschaften besitzen, die wir an ihnen beobachten. Jedoch sind wir durchaus in der Lage, einige wesentliche Probleme zu formulieren, die für die weiteren Untersuchungen wegleitend sind:

Die frühesten Untersuchungen über die «neuen Teilchen» (in der englischen Literatur *strange particles*), worunter schwere Mesonen und Hyperonen zu verstehen sind, brachten gute Kenntnis über das heute als Λ^0 klassifizierte V -Teilchen. Es zerfällt in ein Proton und ein π -Meson und besitzt eine mittlere Lebensdauer von etwa 10^{-10} sec. Es wird in Zusammenstößen hochenergetischer Nukleonen oder π -Mesonen mit anderen Nukleonen erzeugt. Alle diese Teilchen stehen miteinander in «starker» Wechselwirkung. Daher ist es vom theoretischen Standpunkt aus zunächst gar nicht zu verstehen, warum das Λ^0 eine so lange Lebensdauer von 10^{-10} sec besitzt, wo man aus kernphysikalischen Überlegungen

Tab. 1

Teilchenart	Symbol	Masse m_e	Zerfall	Q-Wert [MeV]	Mittlere Lebensdauer [sec]
Lichtquant	γ	0	stabil	0	∞
Neutrino	ν	< 0,0005	stabil	0	∞
Elektron	e^-	1	stabil	0	∞
Positron	e^+	1	stabil	0	∞
μ -Mesonen	$\left\{ \begin{array}{l} \mu^- \\ \mu^+ \end{array} \right.$	$206,7 \pm 0,2$ $206,7 \pm 0,2$	$e^- + \nu + \nu$ $e^+ + \nu + \nu$	$105,1 \pm 0,1$	$(2,22 \pm 0,02) \cdot 10^{-6}$
π -Mesonen	$\left\{ \begin{array}{l} \pi^- \\ \pi^+ \\ \pi^0 \end{array} \right.$	$272,8 \pm 0,3$ $273,3 \pm 0,2$ $264,3 \pm 0,7$	$\mu^- + \nu$ $\mu^+ + \nu$ $\gamma + \gamma$	$33,8 \pm 0,2$ $34,1 \pm 0,15$ $135,0 \pm 0,3$	$(2,55 \pm 0,19) \cdot 10^{-8}$ $(2,53 \pm 0,10) \cdot 10^{-8}$ $\sim 10^{-15}$
Schwere Mesonen	τ^+ (1)	$966,1 \pm 2$	$\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$	$75,0 \pm 0,8$	$(1,27 \pm 0,12) \cdot 10^{-8}$ $\sim 10^{-8}$
	τ^+ ($\equiv K_{\tau^+}$)	965 ± 7	$\pi^+ + \pi^0 + \pi^0$	84,1	$(1,17 \pm 0,08) \cdot 10^{-8}$ $\sim 10^{-8}$
	$K_{\mu^+}^+$	966 ± 2	$\mu^+ + \nu$	388,0	$\sim 10^{-8}$
	$K_{\mu^+}^+$ ($\equiv \kappa$)	964 ± 5	$\mu^+ + \pi^0 + \nu$	253,0	$\sim 10^{-8}$
	$K_{\tau^+}^+$	967 ± 9	$e^+ + (\pi^0 + \nu)$	—	$\sim 10^{-8}$
	$K_{\pi^+}^+$ ($\equiv \chi$)	966 ± 2	$\pi^+ + \pi^0$	219,1	$(1,21 \pm 0,11) \cdot 10^{-8}$ $(1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}$
	Θ^0	965 ± 10	$\left\{ \begin{array}{l} \pi^+ + \pi^- \\ (\pi^0 + \pi^0) \end{array} \right.$	214 ± 5	$(0,95 \pm 0,36) \cdot 10^{-8}$
Nukleonen	$\left\{ \begin{array}{l} p^+ \\ n \end{array} \right.$	$1836,12 \pm 0,02$ $1838,65 \pm 0,02$	stabil $p^+ + e^- + \nu$	0 $0,7830 \pm 0,0009$	∞ $(1,11 \pm 0,22) \cdot 10^{-3}$
	Antinukleonen	$\left\{ \begin{array}{l} p^- \\ n \end{array} \right.$ (3)			
Hyperonen	Λ^0	$2181,5 \pm 2$	$p^+ + \pi^-$ $(n + \pi^0)$	$36,9 \pm 1$	$(3,7 \pm 0,6) \cdot 10^{-10}$ $(1,4 \pm 1,0) \cdot 10^{-10}$
	Σ^-	$\sim 2339 \pm 5$	$n + \pi^-$		$(3,4 \pm 1,4) \cdot 10^{-11}$
	Σ^+	$2326,9 \pm 3$	$p^+ + \pi^0$ $n + \pi^+$	$115,8 \pm 1$ $109,9 \pm 1$	$(\sim 10^{-12})$ $\sim 10^{-10}$
	(Σ^0) Ξ^-	2586 ± 7	$(\Lambda^0 + \gamma)$ $\Lambda^0 + \pi^-$	67 ± 3	

(1) Der Zerfall negativer τ -Mesonen ist mit Sicherheit beobachtet worden. Auch von verschiedenen anderen K^- -Mesonen scheinen Zerfälle zu existieren.
 (2) Darunter sind K -Mesonen zu verstehen, die von Atomkernen eingefangen werden.
 (3) Innerhalb von $\pm 2\%$ mit der gewöhnlichen Protonenmasse identisch.

viel eher auf 10^{-23} sec schließen würde. Vor derselben Schwierigkeit stand man später bei allen noch entdeckten neuen Teilchen.

Eine weitere Merkwürdigkeit bestand in der Tatsache, daß die meisten der in der kosmischen Strahlung beobachteten schweren Mesonen positiv geladen waren. Die negativen bilden nur einen kleinen Bruchteil.

Die Schwierigkeit mit der Lebensdauer versuchten 1953 FERMI und FEYNMAN zu umgehen, indem sie das A_0 als ein virtuelles System von einem Proton und einem π -Meson auffaßten und ihm einen sehr hohen Bahndrehimpuls zuordneten. Auf diese Weise läßt sich verstehen, daß der Zerfall langsam abläuft. Da die Erzeugung von Teilchen mit so hohen Bahndrehimpulsen aber beträchtlichen Schwierigkeiten begegnet, stellte PAIS die Hypothese auf, daß die neuen Teilchen immer in Paaren erzeugt werden, die gerade entgegengesetzten Drehimpuls besitzen¹⁶. Die zunächst durch keinerlei experimentelle Evidenz gestützte PAISsche Theorie erhielt durch die ersten Arbeiten des gerade in Betrieb genommenen Cosmotrons eine ungeahnte Bestätigung: Man fand tatsächlich verschiedene Fälle von paarweiser Erzeugung. Dabei stellten sich aber neue Merkwürdigkeiten ein: Nicht alle zwischen den in unserer Tabelle aufgeführten Teilchen möglichen Kombinationen werden in der Natur realisiert. Um diese «Auswahlregeln» zu beschreiben, führte GELL-MANN¹⁷ (und unabhängig von ihm NISHIJIMA¹⁸) eine neue «Quantenzahl» S ein, die vom sogenannten Isotopenspin abgeleitet worden ist. Dieser stellt einen theoretischen Formalismus zur Beschreibung der Ladungsunabhängigkeit der Kernkräfte dar. In Tab.2 haben wir nach GELL-MANN alle Elementarteilchen mit dem zugehörigen S eingetragen. Man teilt nun sämtliche möglichen Prozesse in drei Gruppen ein:

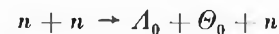
1. starke Wechselwirkungen (z.B. Erzeugung von Mesonen und Hyperonen in Kernzusammenstößen),
2. elektromagnetische Wechselwirkungen (d.h. Prozesse, die nur mit der Emission von Photonen verbunden sind),
3. schwache Wechselwirkungen (z.B. alle Zerfälle von Elementarteilchen).

Bei allen starken Wechselwirkungen, die sich in der für Kerndimensionen charakteristischen Zeit von der Größenordnung 10^{-23} sec abspielen, muß S streng erhalten bleiben. Aus diesem Grunde ist beispielsweise der Prozeß



bisher nicht beobachtet worden, da auf der linken Seite $S = 0$, auf der rechten hingegen -2 stehen würde. Dafür ist aber der Prozeß

¹⁶ A. PAIS, *Physica* 19 (1953) 869.
¹⁷ M. GELL-MANN und A. PAIS, *Proceedings of the 1954 Glasgow Conference on Nuclear and Meson Physics*, Pergamon Press, London 1955.
¹⁸ T. NAKANO und K. NISHIJIMA, *Progr. Theoret. Physics* (Japan) 10 (1953) 581.



möglich und beobachtet worden. Man kann sich jetzt an Hand der Tab.2 sofort überlegen, welche Kombinationen von paarweiser Erzeugung möglich sind, welche nicht.

Tab. 2

Teilchenfamilie	Symbol	S
π -Mesonen	π^+, π^0, π^-	0
Schwere Mesonen .	$\left\{ \begin{array}{l} K^+ \\ \Theta^0 \\ K^0 \\ K^- \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} +1 \\ \\ \\ -1 \end{array} \right\}$
Nukleonen	$\left\{ \begin{array}{l} p^+ \\ n \end{array} \right\}$	0
Antinukleonen . .	$\left\{ \begin{array}{l} \bar{p}^- \\ \bar{n} \end{array} \right\}$	0
Hyperonen	$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda^0 \\ \Sigma^+ \\ \Sigma^0 \\ \Sigma^- \\ \Xi^0 \\ \Xi^- \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} -1 \\ \\ -1 \\ \\ -2 \end{array} \right\}$

Dabei ist aber zu bemerken, daß wir in der Tab.2 vorläufig nur vier K -Mesonen aufgeführt haben. Es ist noch nicht klar, ob diese Einteilung schon ausreicht und ob die in Tab.1 eingezeichneten acht verschiedenen K -Mesonen nur verschiedene Modifikationen darstellen. Die beiden neutralen Hyperonen Σ^0 und Ξ^0 sind von GELL-MANN zunächst nur theoretisch gefordert worden; für das Σ^0 gibt es heute schon gewisse Beweise, nicht aber für Ξ^0 . Der Nachweis des letzteren würde sich aber auch experimentell sehr schwierig gestalten. Die strenge Erhaltung für S gilt natürlich nicht nur bei der Produktion von neuen Teilchen, sondern auch bei ihrem Zusammentreffen mit Kernmaterie, beispielsweise beim Kerneinfang von abgebremsten negativen K -Mesonen und Hyperonen. Derartige Vorgänge sind von den negativen π -Mesonen her wohlbekannt. Dort stellt das π -Meson seine Ruhmasse dem einfangenden Atomkern als Anregungsenergie zur Verfügung, und es kommt zu kleinen Kernverdampfungen. Man hätte analog dazu erwartet, daß sich solche Prozesse auch mit negativen K -Mesonen und Hyperonen abspielen sollten. Da jedoch deren Ruhmasse wesentlich größer ist als die der π -Mesonen, hoffte man auf entsprechend energiereichere Kernverdampfungen. Wie man nun aber aus Tab.2 ablesen kann, ist ein bloßer Einfang eines K -Mesons von einem Nukleon mit der Erhaltung von S unverträglich. Daher müssen bei einem solchen Prozeß stets Hyperonen emittiert werden, z. B.



Das Schema der Tab.2 gestattet aber auch sofort, den experimentell gefundenen großen positiven Überschuß der *K*-Mesonen zu verstehen. Die positiven *K*-Mesonen können jederzeit in Nukleon-Nukleon-Zusammenstößen gemeinsam mit einem Hyperon erzeugt werden, nicht aber die negativen *K*-Mesonen. Für diese bleibt nur die Möglichkeit, gemeinsam mit einem positiven *K*-Meson produziert zu werden. Dieser Vorgang ist aus energetischen Gründen jedoch sehr viel unwahrscheinlicher als die paarweise Erzeugung eines positiven *K*-Mesons mit einem Hyperon. Man kann heute noch nicht sagen, daß die experimentellen Befunde das GELL-MANNSche Schema bestätigt haben. Wir kennen aber vorläufig auch keine einzige Tatsache, die ihm widersprechen würde.

Bei den als schwachen Wechselwirkungen klassifizierten Zerfallsprozessen der *K*-Mesonen und Hyperonen wird *S* hingegen nicht erhalten. Man vermutet, daß hierbei eine Auswahlregel von der Art $\Delta S = \pm 1$ gelten wird. Diese Vorgänge können dann in Zeiträumen vor sich gehen, die viel länger als die für Kerndimensionen charakteristische Zeit sind. Das GELL-MANNSche Schema sagt aber noch nichts darüber aus, warum es so viele verschiedene Zerfallsarten von *K*-Mesonen gibt. Wir sind auch nicht sicher, ob alle in Tab.1 eingezeichneten Zerfälle, die zum größten Teile bisher nur für die positiven *K*-Mesonen nachgewiesen worden sind, auch bei den negativen vorkommen. Hier bietet sich also noch ein sehr weites Feld der physikalischen Forschung. Es ist vielleicht überhaupt etwas kühn, das Schema der Tab.2 schon als eine Theorie zu bezeichnen. Es ist viel eher ein Versuch, die beobachtbaren Prozesse zu ordnen, wenn es auch verschiedene Vorgänge richtig vorausgesagt hat. Es stellt aber noch gar keinen Versuch dar, die ungeheure Vielzahl von Teilchen wirklich physikalisch zu

verstehen. Um einen Vergleich mit der Entwicklung der Physik der Atomhülle zu bringen: Wir wissen heute noch nicht, ob dem GELL-MANNSchen Schema schon die Rolle der BALMER-Formel zukommt, die in der Vielfalt der Spektrallinien Ordnung schaffte. Jedenfalls sind wir in der Physik der Elementarteilchen noch lange nicht bei dem Zustand der BOHRSchen Theorie für die Atomhülle angekommen.

Um damit zu dem Ausgangspunkt unserer Betrachtungen im ersten Teil zurückzukommen: Die Kernkräfte sind heute noch nicht verstanden. Wir wissen, daß dafür hauptsächlich die π -Mesonen eine Rolle spielen. Wie weit auch die *K*-Mesonen beteiligt sind, läßt sich noch nicht sagen. Die neu gewonnene Möglichkeit, mit Antinukleonen zu experimentieren, weist sehr viele neue Wege für die Forschung. Es läßt sich nicht sagen, ob dadurch das bisherige Bild noch weiter kompliziert wird oder ob wir vielleicht einer Lösung aller offenen Fragen entgegengeführt werden.

Dieser Bericht wollte über die experimentellen Ergebnisse der Elementarteilchenforschung berichten. Für jemanden, der in der alten Tradition der scharfen Unterteilung von experimenteller und theoretischer Physik aufgewachsen ist, mag das unverständlich sein, weil sehr viel von theoretischen Dingen die Rede war. Es zeigt sich aber gerade in der Physik der Elementarteilchen immer mehr, daß die alte scharfe Teilung überholt ist. Eine rein beschreibende Forschung ist nicht mehr möglich. Wenn man die Erscheinungen nicht versteht, kann man sich auch keine zweckmäßigen Experimente ausdenken. So ist die Forschung auf dem Gebiete der Elementarteilchen ein sehr deutliches Beispiel dafür, daß es eigentlich nur eine Physik gibt, in der man Theorie und Experiment gleich gut beherrschen soll.