

Joachim Heintze



Joachim Heintze

Professor Heintze wurde 1926 in Berlin geboren. Dem Besuch des Schillergymnasiums folgten von März 1944 bis Mai 1945 der Reichsarbeitsdienst und der Wehrdienst. Von Juni bis Dezember 1945 machte unser Referent eine Rundfunkmechaniker-Lehre in Schwerin. Im Frühjahr 1946 nahm Herr Heintze das Studium der Physik an der Technischen Universität Berlin-Charlottenburg auf. Nach dem Vordiplom wechselte unser Referent nach Göttingen und studierte zunächst am Max-Planck-Institut für Physik; ab dem Sommersemester 1949 auch an der Universität. Der Studienabschluß erfolgte im März 1951 mit dem Diplom. Anschließend wurde Herr Heintze Doktorand bei Professor Haxel und übersiedelte nach Heidelberg. Im Juli 1953 wurde er an der Universität Heidelberg zum Dr.rer.nat. promoviert. Die Arbeit behandelte das Thema "Natürliche Radioaktivität der Kerne Vanadium 50, Indium 113, Tellur 123 und Kalium 40". Unser Referent war von 1953 bis 1959 wissenschaftlicher Assistent am II. Physikalischen Institut der Universität Heidelberg. Während dieser Zeit erfolgte 1958 die Habilitation im Fach Physik.

In den Jahren 1959 bis 1964 war Professor Heintze am Kernforschungszentrum CERN in Genf tätig; und zwar zunächst als Research Associate und ab 1961 als Senior Physicist. Im November 1964 wurde Herr Heintze als Nachfolger von Professor Kopfermann zum Ordinarius und Direktor des I. Physikalischen Instituts an der Universität Heidelberg berufen. Professor Heintze hat es gemeinsam mit Professor Soergel in einzigartiger Weise verstanden, in Heidelberg die Voraussetzungen für die Entwicklung und den Bau neuartiger Teilchendetektoren zu schaffen und mit Heidelberger Studenten hochaktuelle Forschung am CERN in Genf und bei DESY in Hamburg zu betreiben. Als Dekan der Fakultät veranlaßte er die Gründung des Instituts für Umweltp Physik und den Neubau der Physikhörsäle im Neuenheimer Feld. Im September 1991 erfolgte seine Emeritierung.

43 Jahre Elementarteilchenphysik

Vielen Dank, Herr Brix, für die außerordentlich freundliche und liebenswürdige Einführung. Auch Herrn Marx möchte ich sehr herzlich dafür danken, daß er diese Vortragsreihe veranstaltet. Ich sehe mit großem Interesse dem entgegen, was meine älteren Kollegen aus der ehemaligen Naturwissenschaftlich-Mathematischen Fakultät über ihr berufliches Leben berichten werden; die "alte Fakultät" hat uns ja alle in große menschliche Nähe gebracht, ohne daß wir fachlich allzuviel voneinander wußten.

Erinnerungen enthalten stets allerlei Erfreuliches und weniger Erfreuliches. In meinem beruflichen Leben gibt es aber eines, das ich ganz vorbehaltlos als erfreulich einstufen kann: daß es mir vergönnt war, die großartige Entwicklung der Physik der Elementarteilchen mitzuerleben. Und darüber möchte ich Ihnen jetzt berichten.

Als ich das Licht der Welt erblickte, im Jahre 1926, war die Physik der Elementarteilchen noch wirklich eine ganz einfache Sache: Die Welt bestand aus Elektronen und Protonen, es gab auch das Photon, obgleich wahrscheinlich damals noch niemand auf die Idee verfallen wäre, das Photon als elementares Teilchen zu rechnen. Nun, die Liste hat sich dann im folgenden Jahrzehnt langsam, aber stetig erweitert. 1930 postulierte Pauli das Neutrino, um die experimentellen Befunde beim Betazerfall der Atomkerne zu erklären. 1932 merkte man, daß es im Atomkern keine Elektronen, sondern zusätzlich zu den Protonen auch neutrale, etwa gleich schwere Teilchen gibt, die Neutronen. Im selben Jahr wurde das Positron, also das positiv geladene Elektron, in der Höhenstrahlung entdeckt. Das Neutron war eine Überraschung, das Positron war hingegen schon von Dirac in gewisser Weise vorhergesagt worden. Insofern war das keine totale Überraschung, wenn auch wohl kaum jemand geglaubt hatte, daß es diese "Antiteilchen" tatsächlich geben könnte. 1934 gelang es Yukawa, einem japanischen Theoretiker, den ersten Ansatz für eine Theorie der Kernkraft zu machen. Kernkräfte sind kurzreichweitig, und in diesem Zusammenhang steht, daß sie durch ein Austauschteilchen vermittelt werden, das eine

Masse hat, die zwischen der des Elektrons und der des Protons liegen sollte. Yukawa berechnete, daß diese Masse ungefähr 300 Elektronenmassen beträgt. 1937 wurde in der Höhenstrahlung ein Teilchen entdeckt, das etwa dieser Masse entsprach. Man nannte es damals ganz einfach das Meson, heute nennt man es das Myon. Es hat 200 Elektronenmassen und ist auch, wie Yukawa vorhergesagt hatte, instabil: Es zerfällt mit einer Lebensdauer von $2 \mu\text{s}$ in ein Elektron und zwei Neutrinos. Ebenfalls im Jahre 1934 stellte Enrico Fermi eine Theorie des Betazerfalls auf, der schwachen Wechselwirkung, so genannt im Gegensatz zur starken Wechselwirkung, der Kernkraft. Fermis Theorie war in mancher Hinsicht der Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung nachgebildet, der Quantenelektrodynamik, die schon zu Anfang der dreißiger Jahre entstanden war. Es sollte jedoch beim Betazerfall kein Austauschteilchen geben, sondern eine Kontaktwechselwirkung zwischen den beteiligten Elementarteilchen Proton, Neutron, Elektron und Neutrino. Damit schienen nicht nur die elementaren Teilchen bekannt zu sein, sondern zumindest in Ansätzen auch die Theorien der elementaren Wechselwirkungen.

Die vierziger Jahre

Dieses Szenario hielt bis zum Jahre 1947, denn während der Kriegsjahre hat sich auf diesem Forschungsgebiet nicht allzu viel getan. 1947 muß man aber als das gloriose Jahr des Neuaufbruches in der Physik der Elementarteilchen bezeichnen. Zunächst wurde entdeckt, daß das Myon nicht das Yukawa-Teilchen sein kann, weil es nämlich keine starke Wechselwirkung mit den Atomkernen aufweist. Im gleichen Jahr entdeckte man aber, Gott sei Dank, ein anderes Teilchen, das die geforderten Eigenschaften hat: das sogenannte π -Meson. Das mußte das Yukawa-Teilchen sein. Schließlich wurden im Jahr 1947 in der Höhenstrahlung die V-Teilchen entdeckt, etwas ganz Unerwartetes und Unerklärliches, auf das ich in Kürze zurückkommen werde. Herr Marx hat angeregt, man solle auch über seine Studienzeit berichten, und sagen, wie man überhaupt auf die Idee verfallen ist, sein Fach

zu studieren. Das will ich jetzt hier einschieben und auch gleich sagen, wie ich - 1947 war ich ja erst 21 Jahre alt - mit den eben genannten Entdeckungen in Kontakt gekommen bin. In meinem Elternhaus gab es Juristerei und Geisteswissenschaften, eigentlich keine Naturwissenschaften, wohl aber intensive Naturbeobachtung und Diskussionen über alles Mögliche. Das hat wohl bewirkt, daß ich mich schon als Junge lebhaft für Naturwissenschaft und Technik interessierte. Aus der Schule stammt jedenfalls keine Anregung zur Physik. Das einzige, woran ich mich aus dem Physik-Unterricht noch erinnere, ist, wie uns unser Lehrer ohne nähere Erklärung mitteilte, daß die Einheit der Kapazität ein Zentimeter ist und realisiert wird durch eine Kugel von einem Zentimeter Radius. Das kam mir sehr komisch vor, zumal ich als Radiobastler sehr wohl wußte, daß zu einem Kondensator immer zwei Platten gehören. Im übrigen wurde diesem Unterricht durch die Luftwaffenhelferei ein baldiges Ende gesetzt.

Nach dem Kriege, den ich noch ein Jahr lang als Soldat mitmachen mußte, begann ich an der Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg das Studium der Elektrotechnik. Ich habe das mit großer Begeisterung getan. Es ist überhaupt ganz unvorstellbar, wie diese mit Hunger und Kälte reichlich geschlagene Zeit so phantastisch schön war. Der Kontrast zwischen Studium und Freiheit gegenüber dem gräßlichen Krieg und der schrecklichen Nazizeit war fabelhaft. Wenn ich nur die Gebäude der Hochschule betrat, war ich sozusagen wie bezaubert.

Das Studium der Elektrotechnik begann mit einem Grundstudium "Allgemeiner Maschinenbau". Ich fand das, was uns dort geboten wurde - Werkstoffkunde, Maschinenelemente, Technische Mechanik, dazu Mathematik, Physik und Chemie und diverse Nebenfächer - außerordentlich interessant, besonders auch die zuerst genannten ingenieurwissenschaftlichen Fächer. Der Studienplan umfaßte 48 Wochenstunden (Vorlesungen, Praktika, Präsenzübungen), dazu kam etwa der gleiche Zeitaufwand zu Hause für Übungsaufgaben, Zeichnungen, Nacharbeiten von Vorlesungen. Letzteres war besonders wichtig, denn es gab praktisch keine Lehrbücher. Wie man mit diesem Pensum zurechtkommt, lernte man aber schon während des ersten Semesters.

Obgleich der Maschinenbau mich sehr interessierte und ich kein einziges weiteres Studiensemester nennen könnte, in dem ich so viel gelernt habe wie in diesem ersten, beschloß ich doch, vom zweiten Semester an Physik zu studieren, und zwar nicht etwa angeregt durch die Physikvorlesung, sondern durch das physikalische Praktikum und die mit Beispielen aus der Physik gespickte Mathematik-Vorlesung von Professor E. Mohr. Mein Vater war sehr gegen den Studienfachwechsel. Er war der Meinung, daß Physik eine brotlose Kunst wäre, fast ein Exotenfach wie Assyrologie. Damals dachte man, Physik kann man nur studieren, wenn man Lehrer werden will oder Universitätsprofessor, und weder das eine noch das andere hatte ich vor. Immerhin hatte ich aber gemerkt, daß es bereits damals vereinzelt auch Industrie-Physiker gab, und so ließ ich mich nicht abhalten.

Nach dem Vordiplom ging ich nach Göttingen. Als ich den Bahnhof Göttingen verließ, gefiel mir diese Stadt und ihre Atmosphäre so gut, daß ich sagte: "Hier bin ich und hier bleibe ich." Das erwies sich als nicht so einfach, denn ich bekam erst einmal keinen Studienplatz. Ich hatte aber Freunde in Göttingen und die rieten mir: "Wenn du hier nicht studieren kannst, dann geh doch zum Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik, vielleicht können sie dich da irgendwie gebrauchen." Dieses Institut, heute heißt es Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik und befindet sich in München, war nämlich gegen Ende des Krieges von Berlin nach Göttingen verlegt worden.

Ich ging hin, in der Vorstellung mich in irgendeiner Weise nützlich machen zu können und geriet dort an Herrn Haxel, der hier in der ersten Reihe sitzt und der mich auch tatsächlich engagierte (natürlich ohne Bezahlung). Ich konnte also in Göttingen bleiben und ich kam sogleich mit einer Fülle von interessanten Dingen in Kontakt. Zunächst drückte mir Herr Haxel einige Elektronik-Kästen, die frisch aus der Institutswerkstatt kamen, in die Hand und sagte mir, ich solle die jetzt mal prüfen und damit eine Zählrohr-Koinzidenzschaltung aufbauen. Er erklärte mir natürlich, was das ist, und wie das im Prinzip funktionieren sollte. Als Impulsgeber diente ein auf Spannung gelegtes Bananensteckerkabel, mit dem man an die Eingangsbuchse tippte. Das war, wie auch die übrige Laborausstattung sehr urig, aber

nachdem ich damit dank meiner Erfahrungen in der Radiotechnik ganz gut zurecht kam, avancierte ich, ehe ich mich versah, zum Diplomanden. Physikstudenten waren nämlich damals, kurz nach dem Kriege, am Max-Planck-Institut noch eine Rarität. Meine Arbeit betraf das Zerfallsschema des ^{40}K , eine Frage, die für die Bestimmung der Lebensdauer des ^{40}K und damit für die Geophysik und Geochronologie wichtig war. Ich lernte nicht nur, wie das kernphysikalisch zusammenhing, sondern auch die Zählrohrtechnik von der Pieke auf und aus erster Hand, vom Geigerschüler Haxel. Die Arbeit im Labor faszinierte mich vollständig, was zur Folge hatte, daß ich keine einzige von Richard Beckers hervorragenden Vorlesungen über theoretische Physik gehört habe. Das war eine schwere Sünde, aber man kann nicht zwei Herren dienen. Das Notwendigste in der Theorie habe ich später aus Büchern gelernt. Neben der Laborarbeit gab es noch ein anderes Moment, das mich von den Veranstaltungen der Universität weitgehend fernhielt: In diesem Max-Planck-Institut gab es Heisenberg, Max von Laue, Carl Friedrich von Weiszäcker, Haxel, Houtermans, den Astrophysiker Biermann und noch einige andere Größen der Wissenschaft. In der Experimentierhalle liefen einige Höhenstrahlexperimente, von Haxel aufgebaut; Herr Teucher schleppte Photoplatten auf die Zugspitze, die dann im Institut entwickelt und mit dem Mikroskop nach interessanten Ereignissen durchmustert wurden. Jede Woche gab es ein Institutsseminar, an dem insgesamt vielleicht 25 Leute teilnahmen, und da wurden die neuen Entdeckungen in der Elementarteilchenphysik intensiv diskutiert. Ich saß natürlich nur als stilles Mäuschen dabei, aber ich bin auf diese Weise vom Herbst 1948 an fast an der Quelle mit der Elementarteilchenphysik in Kontakt gekommen. Ich konnte ganz gut verstehen, was gesprochen wurde, denn damals ging es zunächst einmal um die Klärung der Phänomene.

Ich möchte in diesem Vortrag auch versuchen, ein wenig die Geschichte der Experimentiertechnik zu beleuchten. Als Beispiel für ein Zählrohr-Experiment betrachten wir die Versuchsanordnung, mit der Conversi, Pancini und Piccioni bewiesen, daß das Myon eben nicht das Yukawa-Meson sein kann (Abb. 1). Dieses Experiment hat mich zeitlebens zutiefst beeindruckt.

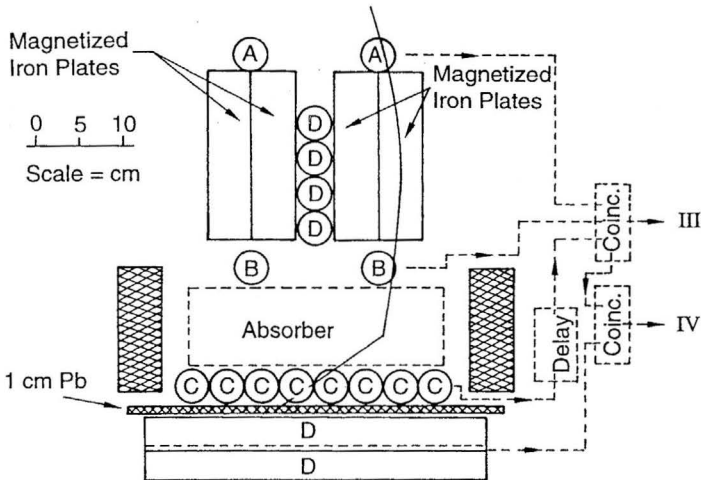


Abb. 1: Apparatur von Conversi et al. zur Untersuchung des Myon-Zerfalls in Materie.

Myonen aus der Höhenstrahlung fallen von oben ein und treffen zwei Zählrohre A und B, zwischen denen sich magnetisiertes Eisen befindet. Darunter befinden sich ein Absorber und weitere Zählrohren C und D. Durch eine elektronische Antikoinzidenzschaltung werden Myonen selektiert, die in dem Absorber zur Ruhe kommen. Beim Eintritt in die Apparatur müssen sie eine entsprechende Energie haben. Solche Myonen werden aber im magnetisierten Eisen derart abgelenkt, daß je nach der Polung des Magneten entweder nur positive oder nur negative Myonen registriert werden. Dann schaut man, ob sie zerfallen oder nicht, indem man die Zerfallselektronen in verzögerter Koinzidenz nachweist. Positive Myonen sollten jedenfalls zerfallen, negative Myonen müssen dagegen am Ende ihrer Bahn von einem Atomkern eingefangen werden. Wenn sie mit dem Yukawa-Teilchen identisch wären, müßten sie innerhalb von 10^{-20} sec mit dem Kern reagieren. Es zeigte sich aber, daß auch negative Myonen in der Apparatur zerfallen; sie müssen also ein Zeit von der Größenordnung 10^{-6} Sekunden in einem Atomkern überlebt haben!

Zunächst einmal beeindruckt das Grundkonzept des Experiments. Dann aber, damit es auch wirklich funktioniert, muß jede Einzelheit außerordentlich geschickt ausgedacht und dimensioniert werden. Was mir besonders imponierte, war die Koinzidenz mit einem Auflösungsvermögen von einer Mikrosekunde - in Göttingen versuchten wir nämlich auch schnelle Koinzidenzen zu bauen. Heutzutage sind einige Nanosekunden kein Problem, aber eine Mikrosekunde war damals, mit der Elektronenröhre, technisch fast unerreichbar.

Ein Experiment dieser Art ist auch heute noch typisch für ein sogenanntes "Zähler-Experiment": Der einfallende Teilchenstrahl wird magnetisch analysiert und in ein "Target" gebracht; das Target ist wiederum mit Detektoren umgeben, zum Nachweis der Zerfalls- oder Reaktionsprodukte. Geändert hat sich nicht die Grundphilosophie der Experimente, nur die technische Ausführung der Detektoren und natürlich die Elektronik. Das "Zählen" der Ereignisse geschah übrigens damals mit höchst raffiniert gebauten mechanischen Zählwerken. Ein guter Experimentalphysiker mußte auch ein guter Uhrmacher sein.

Eine zweite Technik war damals der Nachweis und die genaue Vermessung von Teilchenspuren in photographischer Emulsion. Eigens für die Höhenstrahlungsforschung wurden Photoplatten mit sehr dicken und hochempfindlichen Emulsionsschichten entwickelt. Mit dieser Technik wurde 1947 von Lattes, Muirhead, Occhialini und Powell das π -Meson entdeckt. In der Photoplatte wurde ein Höhenstrahlteilchen beobachtet, das zur Ruhe kommt und zerfällt. Das Tochterteilchen kommt nach einer Flugstrecke von 600 μm ebenfalls zur Ruhe und zerfällt unter Aussendung eines Teilchens, das nur eine sehr dünne Spur hinterläßt. Aus der Körnchendichte, aus der Streuung und aus der Reichweite der Teilchen kann man die Massen ermitteln. Man stellt fest, daß es sich um die Zerfallskette $\pi \rightarrow \mu + \nu$, $\mu \rightarrow e + \nu + \nu$ handelt, mit den Massen $m_\pi \approx 300 m_e$, $m_\mu \approx 200 m_e$. Daß es sich bei den Neutralteilchen um Neutrinos handelt, war zunächst nur eine Vermutung; daß beim π -Zerfall nur eines, beim μ -Zerfall aber zwei Neutrinos auftreten, konnte aber bald durch Studium der Zerfallskinetik festgestellt werden. Daß das π -Meson tatsächlich das Yukawa-Teilchen ist, sieht man daran, daß es am Ende seiner Bahn häufig einen so ge-

nannten Stern macht, d.h. es wird von einem Kern eingefangen und bringt dann diesen Kern zur Explosion.

Ich erinnere mich gut daran, wie diese Phänomene im Göttinger Institutseminar diskutiert wurden; auch gab es hitzige Diskussionen darüber, wie wohl jene Ereignisse zu deuten wären, bei denen man am Bahnende des Mesons weder ein Zerfallsteilchen noch einen Stern, sondern nur eine kleine Verdickung, einen sogenannten "Blob" erkennen konnte. Erst viel später stellte sich heraus, daß der "Blob" durch Auger-Elektronen bei der Bildung eines mesonischen Atoms zustande kommt, und daß sich nach dem Einfang eines Myons im Atomkern die Reaktion $\mu^- + p \rightarrow n + \nu$ abspielt, aber auf diese Idee ist damals noch niemand gekommen.

Die dritte Experimentiertechnik war der Einsatz der Wilsonschen Nebelkammer. Die Expansion der Kammer, die zur Tröpfchenbildung entlang der Teilchenspur führt, muß nach dem Teilchendurchgang erfolgen. Daher kann man die Expansion mit einer Zählrohanordnung so steuern, daß nur bestimmte Ereignistypen, z.B. stoppende Myonen oder die durch sehr energiereiche Höhenstrahlteilchen ausgelösten "Schauer" registriert werden. Mit dieser Technik wurden die oben erwähnten V-Teilchen entdeckt. Man sieht unterhalb einer in der Nebelkammer angebrachten Platte einen Schauer und daneben das V-Teilchen, ein Gebilde wie ein nach unten gedrehtes V (Abb. 2). Da sieht der Fachmann auf den ersten Blick, daß das etwas ganz Neues sein muß, denn daß etwa ein Neutron eine Reaktion im Gas auslöst, ist viel zu unwahrscheinlich. Es muß ein Teilchen sein, das in der dicken Platte entstanden ist und das nach einer Flugstrecke von ein paar Zentimetern wieder zerfällt, ein neutrales Teilchen, dessen Spur man in der Nebelkammer nicht sieht.

Das waren also die großen Entdeckungen der vierziger Jahre: Das Myon ist nicht das Yukawa-Meson, sondern es ist wohl eher als ein schwergewichtiger Vetter des Elektrons anzusehen. Als Yukawa-Teilchen gibt es das π -Meson, und schließlich gibt es noch die V-Teilchen, die etwas ganz Neuartiges zu sein scheinen.

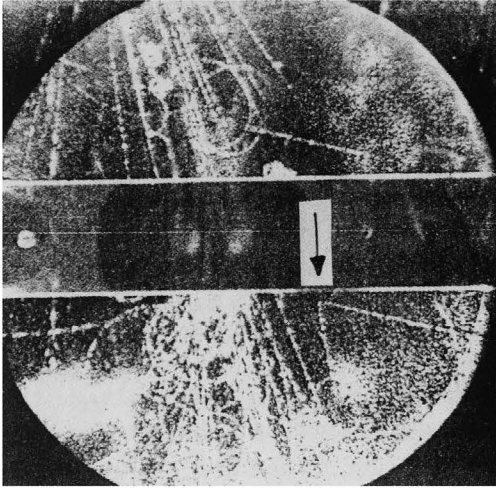


Abb. 2: Ein V-Teilchen in der Wilsonschen Nebelkammer.

Die fünfziger Jahre: Elementarteilchenphysik mit Beschleunigern und Sturz der Parität

Enrico Fermi baute in Chicago ein Zyklotron, mit dem man π -Mesonen in großer Zahl erzeugen konnte. Etwas später wurde in Brookhaven das Cosmotron gebaut, ein Protonensynchrotron, mit dem auch die Erzeugung von V-Teilchen gelang. Erst Experimente an diesen Beschleunigern machten es möglich, die Physik der neuentdeckten Teilchen auf eine quantitative Basis zu stellen.

Bei den näheren Untersuchungen der π -Mesonen stellte Fermi die erstaunliche Tatsache fest, daß der Wirkungsquerschnitt für die Streuung von π -Mesonen am Proton keineswegs gleichmäßig mit der Energie des π -Mesons ansteigt oder abfällt, sondern daß es einen Höcker auf der Kurve gibt mit der bekannten Form einer Resonanzkurve. Man könnte geneigt sein, dies als Anregungszustand des Pro-

tons zu deuten. Da aber ein Elementarteilchen keine inneren Freiheitsgrade haben sollte, war damals die Interpretation, daß es ein weiteres Elementarteilchen gibt, genannt Δ , das aufgrund seiner Masse in ein Proton und ein π -Meson zerfallen kann: $\pi + p \rightarrow \Delta \rightarrow p + \pi$. Die Breite der "Resonanz" ergibt sich mit der bei starken Wechselwirkungen erwarteten kurzen Lebensdauer des Δ -Teilchens ($\approx 10^{-20}$ s) und der Heisenbergschen Unschärfe-Relation.

Mit diesem Phänomen und mit den anderen Entdeckungen in der π -Mesonenphysik machte ich auf folgende Weise nähere Bekanntschaft: Ich war inzwischen nach Heidelberg gekommen, da ich nach meinem Diplom 1951 mit Herrn Haxel als Doktorand nach Heidelberg ging. Eines schönen Tages, Anfang der 50er Jahre, ging die Tür auf und Professor Kopfermann trat in mein Zimmer und sagte: "Herr Heintze, da gibt es jetzt diese interessanten Resultate über die π -Mesonen, halten Sie doch bitte in 4 Wochen im physikalischen Kolloquium einen Vortrag über π -Mesonen". Das war für mich gar nicht einfach, weil ich mich immer noch mit dem Zerfall von langlebigen, natürlich radioaktiven Isotopen beschäftigte. Ich mußte mich gewaltig auf die Hosen setzen, aber so rauh waren damals die Sitten, und ich habe auf diese Weise auch in Heidelberg nicht den Kontakt zur Elementarteilchenphysik verloren.

Auch bei den V-Teilchen gab es aufregende neue Erkenntnisse. Noch mit den Höhenstrahllexperimenten war es gelungen, die Massen der Teilchen zu bestimmen. Man stellte fest, daß es sowohl im Massenbereich der Mesonen (also zwischen Elektron und Proton) solche Teilchen gibt, als auch V-Teilchen, die schwerer sind als ein Proton, sogenannte Hyperonen. Alle diese Teilchen haben die überaus seltsame Eigenschaft, daß sie durch die starke Wechselwirkung erzeugt werden, aber nur aufgrund der schwachen Wechselwirkung wieder zerfallen können, selbst wenn die Zerfallsprodukte wiederum stark wechselwirkende Teilchen sind. Das ließ sich noch mit der Nebelkammer und der Höhenstrahlung einwandfrei feststellen. Die Wahrscheinlichkeiten für Prozesse der starken und der schwachen Wechselwirkung unterscheiden sich um viele, viele Größenordnungen. Es ist sehr seltsam, daß ein Teilchen bei der Erzeugung andere Wechselwirkungen

aufweist als beim Zerfall. Die V-Teilchen wurden deshalb alsbald auch "seltsame Teilchen" oder "strange particles" genannt.

Das Rätsel der Seltsamkeit wurde von Pais und von Gell-Mann durch die Hypothese gelöst, daß es eine assoziierte Produktion gibt, daß man also in einer Reaktion immer zwei unterschiedlich seltsame Teilchen machen muß. Stößt beispielsweise ein π^- -Meson auf ein Proton, so wird ein neutrales K-Meson - das ist ein seltsames Teilchen aus dem Mesonen-Bereich - zusammen mit einem neutralen Hyperon, dem Λ -Teilchen, erzeugt. Den Teilchen wird eine neue Quantenzahl zugeordnet, Strangeness $S = -1$ für das Λ -Teilchen, $S = +1$ für das K-Meson. Proton und π -Mesonen sollen die Strangeness $S = 0$ haben. Es wird nun postuliert, daß die Strangeness bei starken Wechselwirkungen erhalten bleiben muß, nicht aber bei schwachen Wechselwirkungen. Der Erzeugungsprozeß $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$ kann daher mit der starken Wechselwirkung ablaufen, die Summe der Strangeness ist rechts und links gleich Null. Bei den Zerfallsprozessen $\Lambda \rightarrow \pi^- + p$, $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ändert sich hingegen die Strangeness, hier kann nur die schwache Wechselwirkung zum Zuge kommen. Daß die Reaktionen wie angegeben ablaufen, wurde alsbald am Cosmotron experimentel nachgewiesen. Das Rätsel der Seltsamkeit war damit zumindest phänomenologisch geklärt.

Es gab noch ein anderes Rätsel im Zusammenhang mit den seltsamen Teilchen: das sogenannte θ - τ -puzzle. Noch mit Höhenstrahlung und Nebelkammer hatte man entdeckt, daß es ein V-Teilchen gibt, welches in 2 π -Mesonen zerfällt, genannt θ , und eines, welches in 3 π -Mesonen zerfällt, genannt τ . Die Massen von diesen beiden Teilchen waren ähnlich, und je genauer man maß, desto dichter rückten die Massen zusammen. Ich erinnere mich noch an Diskussionen im Göttinger Seminar, wo es darum ging, ob es sich nicht einfach um zwei verschiedene Zerfallsarten ein und desselben Teilchens handeln könnte.

Eine genauere Analyse der experimentellen Daten zeigte jedoch, daß das so einfach nicht geht. Es schien zwei unterschiedliche Teilchen gleicher Masse zu geben. Nun, daß zwei verschiedene Teilchen die gleiche Masse haben sollen, ist außerordentlich kurios, und das führte

zu einer Entdeckung, die sozusagen einem Erdbeben in der Physik gleich kam. 1956 zeigten Lee und Yang, zwei sino-amerikanische Theoretiker, daß θ und τ doch ein und dasselbe Teilchen sein könnten, wenn man annimmt, daß bei schwachen Wechselwirkungen die Parität nicht erhalten ist. Sie zeigten auch, daß es für einen solchen Erhaltungssatz im Bereich der schwachen Wechselwirkung keine experimentelle Evidenz gab, auch nicht im Bereich des seit Jahrzehnten genau untersuchten Betazerfalls der Atomkerne. Das war ein absolut monströser Vorschlag, denn er impliziert, daß in einem elementaren Naturgesetz ein Schraubensinn bevorzugt wäre. In anschaulichen Worten ausgedrückt: daß der liebe Gott ein Linkshänder ist, vielleicht auch ein Rechtshänder, aber daß er jedenfalls bei der Abfassung der Gesetze der schwachen Wechselwirkung für einen bestimmten Drehsinn eine Vorliebe zeigte. Das war etwas, was man allgemein für absurd hielt.

Lee und Yang schlugen auch ein Experiment vor, mit dem man die Paritätserhaltung beim Betazerfall prüfen konnte: Man muß ein radioaktives Präparat bis dicht über den absoluten Nullpunkt abkühlen, die Spins der Atomkerne in einem starken Magnetfeld ausrichten und dann nachschauen, ob mehr Betateilchen in Richtung des Spins oder entgegengesetzt dazu emittiert werden - ein sehr schwieriges Experiment.

Ich hatte die Arbeit von Lee und Yang gelesen, was mich natürlich infolge meiner lückenhaften Kenntnisse in der Theoretischen Physik viel Schweiß kostete. Aber nachdem ich sie schließlich verstanden hatte, kam ich zu dem Schluß, daß im Falle einer Paritätsverletzung die Betateilchen eine longitudinale Polarisation aufweisen müßten, d.h. sie müßten den Atomkern mit einer bevorzugten Spinrichtung verlassen, entweder in Flugrichtung (rechtsdrehend) oder entgegengesetzt (linksdrehend) polarisiert. Mit den in Jensens Vorlesung über relativistische Quantenmechanik erworbenen Kenntnissen in der " α -Gymnastik", d.h. im Umgang mit den Dirac-Matrizen, schaffte ich es sogar, die Polarisation der Elektronen mit Lee und Yangs Ansatz für die Paritätsverletzung auszurechnen. Ich überlegte mir auch, wie man die Polarisation auf recht einfache Weise messen konnte und ging mit

diesen Erkenntnissen zu Professor Jensen. Ich hatte mich zwar verrechnet, aber im Prinzip stimmte das Ergebnis. Dennoch, sagte Jensen, wäre alles Unsinn, was ich mir überlegt hätte. Die Parität sei unter allen Umständen erhalten, und ich möge mich doch mit vernünftigeren Sachen beschäftigen. Das habe ich dann auch getan, aber es gab Leute, die den Vorschlag von Lee und Yang ernst nahmen: Frau Wu in den USA tat sich mit einigen Tieftemperatur-Physikern zusammen und konnte auf dem von Lee und Yang vorgeschlagenen Wege zeigen, daß beim Betazerfall tatsächlich die Parität nicht erhalten ist! Wohl selten hat eine Entdeckung in der Physik solch eine Furore gemacht.

Ich holte daraufhin meine Pläne für den Nachweis der Elektronenpolarisation aus der Schublade und baute die Apparatur auf. Es war ein großes Erlebnis, wie tatsächlich auf Anhieb der Effekt der Paritätsverletzung zu sehen war. In Abbildung 3 ist die Apparatur gezeigt. Um die longitudinale Polarisation nachzuweisen, muß man sie zunächst in eine transversale verwandeln. Dies kann man durch Ablenkung der Teilchen in elektrischen Feldern erreichen. Dabei behält der Elektronenspin im wesentlichen seine ursprüngliche Richtung bei. Die einfachste Weise, eine solche Ablenkung zu realisieren, ist die Vielfachstreuung, die wiederholte Coulomb-Streuung der Elektronen um kleine Winkel. Das geschieht in einem dicken Kupferblech. Die Elektronen werden nun nochmals gestreut, diesmal aber in einer Einzelstreuung an einer dünnen Goldfolie. Wenn die Elektronen polarisiert sind, erwartet man bei dieser zweiten Streuung eine starke Rechts-Links-Asymmetrie bezüglich der Ebene, in der der Elektronenspin liegt. Diese Asymmetrie kann man messen, indem man den oberen Teil der Apparatur gegen den unteren dreht. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis; es wird ein sehr großer Effekt beobachtet. Die quantitative Auswertung zeigt, daß die Betateilchen praktisch vollständig polarisiert sein müssen und zwar linkshändig. Das heißt, es liegt sogar die maximal mögliche Paritätsverletzung beim Betazerfall vor! Nun, das war nach dem Experiment von C.S. Wu et al. nichts Neues mehr.

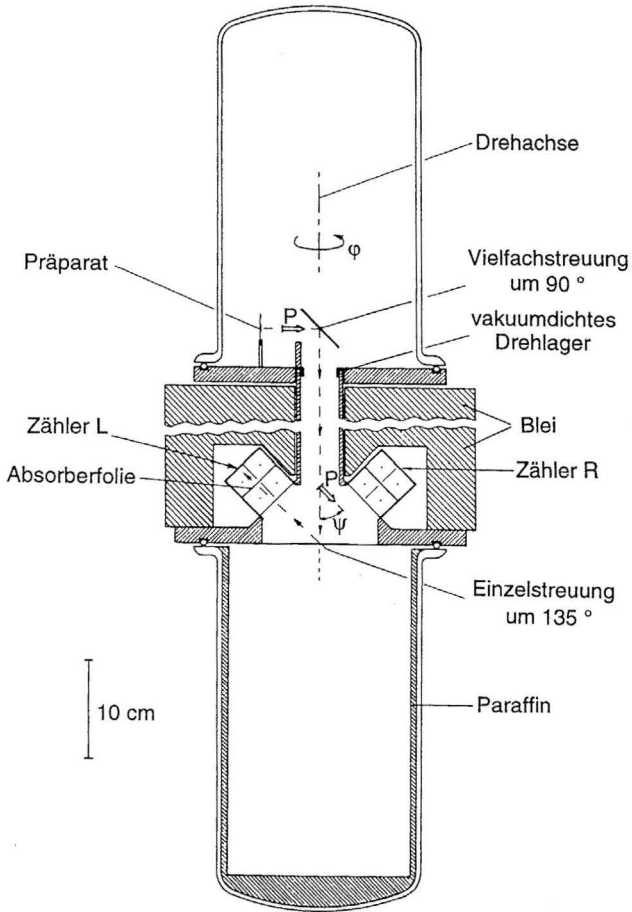
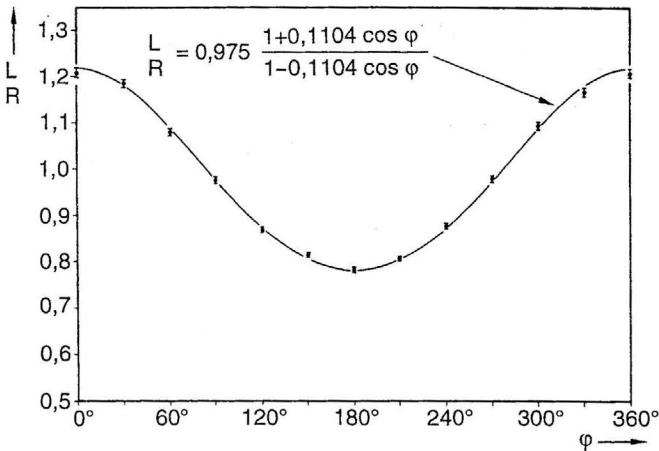


Abb. 3: Apparatur zur Messung der Elektronenpolarisation beim Betazerfall

Abb. 4: Zählratenverhältnis L/R als Funktion des Winkels φ .

Meine Arbeit wurde dann bei der *Zeitschrift für Physik* eingereicht - eine Zeitschrift, die damals selbst in Deutschland kaum jemand las - und dort erschien sie erst nach Monaten, so daß ich nicht einmal der erste war, der die Polarisation der Betateilchen nachweisen konnte; auch andere hatten bemerkt, daß es diesen Effekt geben mußte. Hätte ich auf Jensen nicht gehört, so wäre ich wahrscheinlich ein berühmter Mann geworden. Ich erwähne das nicht etwa, um Jensen irgendeinen Vorwurf zu machen, sondern nur um deutlich zu machen, daß man selber schuld ist, wenn man sich etwas ausreden läßt. Man ist selber schuld und niemand anders.

Auch auf dem Gebiet der elektromagnetischen Wechselwirkungen von Elementarteilchen gab es in den fünfziger Jahren bedeutende Fortschritte: In den USA gelang es, Linearbeschleuniger zu bauen, mit denen man Elektronen auf mehrere 100 MeV beschleunigen konnte. Durch elastische Streuung dieser Elektronen an Atomkernen konnte man die Ladungsverteilung im Kern ausmessen, auch die im Wasserstoffkern, dem Proton. Es zeigte sich, daß auch Proton und Neutron räumlich ausgedehnte Teilchen mit einem Radius von $1,3 \times 10^{-13}$ cm

sind. Wie sieht es im Inneren der Teilchen aus? Ist der Radius auf eine Wolke von virtuellen π -Mesonen zurückzuführen? Fragen, die damals ungeklärt blieben.

Wie sah die apparative Entwicklung in den fünfziger Jahren aus? Auch an den Beschleunigern ging es mit Zähler-Experimenten und Spurenkammern als zwei disjunkten Forschungsmethoden weiter. Das Zählrohr wurde durch Szintillationszähler, die Wilsonsche Nebelkammer durch die Blaskammer ersetzt. Letztere konnte viel schneller arbeiten, im Sekundenrhythmus der Beschleuniger, und man konnte sie überdies mit flüssigem Wasserstoff füllen, so daß man nun ein fast ideales Instrument für das Studium der Reaktionen am Proton hatte. Es änderte sich auch die Technik, wie man mit der anschwellenden Datenflut fertig wurde. In das Zählerexperiment zog mit dem "Unter-setzer", auf englisch "scaler", die Digitalelektronik ein. Damit konnte das zum Rennpferd hochgezüchtete mechanische Zählwerk in den Ruhestand gehen. Es war übrigens verblüffend schwierig, mit den damaligen Elektronenröhren eine solche Schaltung zum einwandfreien Laufen zu bringen. Ich bilde mir ein, daß wir unter den ersten waren, die das schafften. Bei den "Blaskammerern" zog eine Armee von "scanning girls" ein, die Filmrolle nach Filmrolle durchmustern und nach Maßgabe der Physiker die interessanten Ereignisse vermessen mußten. Das Weitere erfolgte dann mit Papier und Bleistift, allenfalls unter Zuhilfenahme eines Rechenschiebers oder eines elektromechanischen Tischrechners.

Die sechziger Jahre: Das Verständnis der schwachen Wechselwirkungen schreitet fort und das Quark-Zeitalter bricht an

Anknüpfend an die Experimente zur Paritätsverletzung gab es eine theoretische Arbeit, die besagte, daß die Kopplung beim Betazerfall eine (V-A)-Kopplung sein soll. V steht für eine Vektorkopplung, wie man sie schon von der elektromagnetischen Wechselwirkung her kennt, A steht für Axialvektorkopplung. Man kann die (V-A)-Theorie charakterisieren, ohne auf das theoretische Formelwerk einzugehen:

Linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen nehmen an der schwachen Wechselwirkung teil; rechtshändige Teilchen und links-händige Antiteilchen sind überhaupt blind für die schwache Wechselwirkung. Diese Arbeit von Feynman und Gell-Mann erwies sich als ein enorm wichtiger Schritt in der Elementarteilchenphysik. Die (V-A)-Hypothese war seinerzeit allerdings ein Schwimmen gegen den Strom, denn es gab experimentelle Methoden, die Form der Betazerfallswechselwirkung festzustellen, und man war damals aufgrund von Experimenten am ${}^6\text{He}$ fest überzeugt, daß die Betazerfallswechselwirkung nicht diese Vektor-minus-Axialvektor-Form hat. Feynman und Gell-Mann begründeten ihre Hypothese im wesentlichen damit, daß sich mit der (V-A)-Wechselwirkung die Theorie wunderschön formulieren läßt. Überhaupt muß man sagen, die theoretischen Physiker sind in erster Linie Ästheten. Theorien müssen mathematisch stimmen, das ist schon richtig, aber vor allen Dingen müssen sie schön sein. Es muß schön sein - was in der theoretischen Physik schön und elegant zu formulieren ist, ist meistens auch in der Natur realisiert. Das ist ein Kriterium, das erstaunlich gut funktioniert. Am Schluß der (V-A)-Arbeit steht: "These theoretical arguments seem to the authors to be strong enough to suggest that the disagreement with the ${}^6\text{He}$ recoil experiment and with some other less accurate experiments indicates that these experiments are wrong. The $\pi \rightarrow e + \nu$ problem may have a more subtle solution." Hier ist zuletzt angesprochen, daß nach der (V-A)-Theorie ein π -Meson nicht nur in Myon und Neutrino, sondern auch in ein Elektron und ein Neutrino zerfallen können muß, und zwar mit dem Verzweigungsverhältnis: $1,27 \times 10^{-4}$. Das Experiment hatte aber ergeben, daß dieser Zerfall selbst auf dem Niveau von 10^{-5} nicht beobachtet wird!

Feynman und Gell-Mann behielten recht: Alsbald zeigte sich, daß das ${}^6\text{He}$ -Experiment falsch war, ja sogar das $\pi \rightarrow e \nu$ -Experiment war falsch. Beim CERN konnten Fidecaro, Merrison et al. nachweisen, daß die V-A-Vorhersage stimmte.

Um diese Zeit kam ein neuer Gedanke auf, ebenfalls von Gell-Mann vorgeschlagen, nämlich die Erhaltung des Vektorstroms bei der schwachen Wechselwirkung. Diese Hypothese stellt einen unmittelba-

ren Zusammenhang zwischen der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung her, der bewirkt, daß die starke Wechselwirkung der Teilchen die Vektor-Kopplungskonstante des Betazerfalls ebensowenig modifiziert wie die elektrische Ladung. Wenn ein Proton aufgrund seiner starken Wechselwirkung virtuell in ein Neutron und ein π^+ -Meson übergeht, ändert das die Ladung des Protons nicht, denn aufgrund der Ladungserhaltung muß das π^+ -Meson die gleiche Ladung haben wie das ursprüngliche Proton. Ebenso soll das π^+ -Meson die gleiche "schwache Ladung" mitschleppen. Es muß dann auch einen Betazerfall $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu$ geben mit einer Zerfallskonstante, die sich aus Daten des Kern-Betazerfalls genau berechnen läßt. Das Ergebnis ist eine Vorhersage für das Verzweigungsverhältnis:

$$\frac{\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu}{\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu} = 1,2 \times 10^{-8}.$$

Das Verzweigungsverhältnis ist winzig, aber seine quantitative Messung hätte einen direkten Beweis für Gell-Manns Hypothese geliefert, die übrigens als eine erste Vorstufe für das heutige Standardmodell der elektroschwachen Wechselwirkung angesehen werden kann. Nur wurde damals die Messung eines Verzweigungsverhältnisses von 10^{-8} für platterdings unmöglich gehalten, was verständlich ist, weil man gerade eben die größte Mühe gehabt hatte, auf dem Niveau von 10^{-4} den seltenen Zerfall $\pi \rightarrow e + \nu$ nachzuweisen.

Im Jahre 1959 war ich zum CERN gekommen. Ich schloß mich der von Herrn Citron geleiteten Arbeitsgruppe an, die ein Experiment vorbereitete, bei dem es um die elastische Streuung von Myonen an Atomkernen ging. Der Vergleich mit der Elektronenstreuung, die ich vorhin erwähnt hatte, sollte zeigen, ob das Myon eine Extrawechselwirkung besitzt, die vielleicht auch seine höhere Masse erklären könnte, oder ob das Elektron unerklärtermaßen einen schwereren Vetter hat. Die Beteiligung an diesem Experiment war für mich nicht nur physikalisch sehr interessant, sie bot mir auch die Gelegenheit, das Handwerk des Experimentierens am Beschleuniger gründlich zu ler-

nen. Als das Experiment zu Ende ging (mit dem Ergebnis: das Myon zeigt keine andere Wechselwirkung als das Elektron), sah ich mich nach anderen Ufern um und begann, über Möglichkeiten nachzudenken, den $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e \nu$ -Zerfall nachzuweisen. In diesem Bemühen traf ich mich mit Carlo Rubbia, der heute Generaldirektor des CERN ist und mit Volker Soergel aus Freiburg, der eigens für dieses Experiment zum CERN gekommen war. Es gelang uns, mit unserem Experimentiervorschlag durchzudringen (was gar nicht einfach war), und noch verstärkt durch Pierre Depommier aus Grenoble und durch Klaus Winter das Experiment aufzubauen, und es funktionierte tatsächlich. Rubbia hat zwar nur die Anfangsphase mitgemacht, aber wir haben doch viel von ihm profitiert. Nicht so sehr auf dem rein experimentellen Gebiet, als vielmehr bei der Entwicklung einer Strategie für die Analyse: "We must construct a logical tree...". Die korrekte Abschätzung des Untergrunds ist natürlich sehr wichtig bei einem solchen Experiment. Schließlich erreichten wir für das Verzweungsverhältnis des $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e \nu$ -Zerfalls eine Meßgenauigkeit von besser als 10 %. Das Resultat stimmte mit der Vorhersage der Vektorstrom-Erhaltung überein.

Ich sollte vielleicht noch ein paar Worte über die Schwierigkeiten sagen, die wir hatten, um mit unserem Experiment zugelassen zu werden. Es galt nicht nur die zuständigen Gremien davon zu überzeugen, daß das Experiment funktionieren könnte. Auch die Gründung einer neuen Forschungsgruppe war etwas Besonderes. Die "schedule meetings", auf denen die Maschinenzeit verteilt wurde, glichen manchmal einer offenen Feldschlacht. Die Gruppenleiter hatten damals beim CERN etwa eine Stellung wie die Herzöge im mittelalterlichen Deutschland, und es war gar nicht einfach, in diesen erlauchten Kreis vorzudringen. Es glückte auch schließlich nur durch die Intervention von Victor Weißkopf, dem Generaldirektor des CERN, den wir von der Qualität unseres Experimentiervorschlags überzeugen konnten.

Zurück zu den schwachen Wechselwirkungen. Ein großes Ereignis schon in den frühen sechziger Jahren war der Nachweis von Reaktionen hochenergetischer Neutrinos. Bereits das erste Neutrinoexperiment

ment führte zu einer wichtigen Entdeckung: Es gibt zwei verschiedene Arten von Neutrinos, das Myon-Neutrino (ν_μ) und das Elektron-Neutrino (ν_e).

Beim Betazerfall von Elementarteilchen waren die Zerfallsprozesse $n \rightarrow p e \bar{\nu}_e$, $\mu \rightarrow \nu_\mu e \bar{\nu}_e$ und $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ experimentell sorgfältig untersucht und theoretisch im Rahmen der (V-A)-Theorie wohl verstanden. Wie stand es nun mit den Betazerfallsprozessen der seltsamen Teilchen? Gewöhnlich zerfallen sie in Hadronen, z.B. $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$. Man hatte aber in der Blaskammer in der Tat auch Betazerfallsprozesse beobachtet, wie $K \rightarrow \pi + e + \nu$ und $\Lambda \rightarrow p + e + \nu$. Die Zerfallswahrscheinlichkeiten betragen aber nur ein paar Prozent von dem, was nach der (V-A)-Theorie zu erwarten gewesen wäre!

Zur Erklärung dieser merkwürdigen Beobachtung machte Cabibbo, ein junger italienischer Theoretiker, folgenden Vorschlag: Die Kopplungsstärke der schwachen Wechselwirkung ist in vollem Umfang nur beim μ -Zerfall zu beobachten. Bei den anderen Betazerfallsprozessen teilt sich die Kopplungsstärke auf die Zerfälle der seltsamen Teilchen (K, Λ ,...) und der nicht-seltsamen Teilchen (π , n,...) auf, derart, daß letztere das meiste abbekommen. Mit der (V-A)-Theorie und mit Hilfe der SU(3)-Symmetrie (ich werde später darauf zurückkommen, was darunter zu verstehen ist) konnte dann Cabibbo die Betazerfälle aller Teilchen berechnen, wobei seine Theorie drei freie Parameter aufwies, die durch Anpassung an die experimentellen Daten zu bestimmen waren.

Mit den vorliegenden Daten war eine recht genaue Bestimmung dieser Parameter möglich, nicht aber eine Überbestimmung: Erst wenn mehr Meßgrößen als freie Parameter vorhanden sind, kann man die Richtigkeit einer Theorie prüfen. Wir (d.h. Herr Soergel und ich) bauten deshalb mit unserer Gruppe ein Experiment auf, um auch den Betazerfall des Ξ -Hyperons, eines Teilchens mit der "Strangeness" $S = -2$, nachzuweisen und zu untersuchen. Mit einigen Modifikationen wurde die gleiche Apparatur dann anschließend für eine detaillierte Untersuchung des Betazerfalls des Λ -Hyperons eingesetzt. Man kann transversal polarisierte Λ -Teilchen erzeugen, und damit konnten wir nicht nur die Übergangswahrscheinlichkeit, sondern auch die Winkelkorre-

lationen der Zerfallsteilchen bezüglich des Λ -Spins messen. Damit konnten wir den (V-A)-Charakter der Wechselwirkung wie auch die Cabibbo-Theorie in vollem Umfang bestätigen. Zur experimentellen Technik will ich später noch etwas sagen.

Wie sah in den sechziger Jahren die Entwicklung auf dem Gebiet der stark wechselwirkenden Teilchen aus? Es stellte sich heraus, daß die Δ -Resonanz kein Einzelfall war, sondern daß es eine große Zahl baryonischer und mesonischer "Resonanzen" gab. Wie auch die Δ -Resonanz wurden sie als Elementarteilchen betrachtet, die mit den Baryonen Proton, Neutron, Λ sowie mit den π - und K-Mesonen im Prinzip gleichberechtigt sind. 1961 brachten Gell-Mann und Nishijima zunächst einmal Ordnung in das sich anbahnende Chaos. Mit dem mathematischen Formalismus der "SU(3)-Symmetrie" konnten die Teilchen in Multipletts gruppiert werden, mit gruppentheoretischen Methoden, wie man sie früher schon mit Erfolg in der Atomspektroskopie angewandt hatte. Es ergaben sich aus der SU(3)-Symmetrie auch gewisse Relationen zwischen den Massen und anderen Eigenschaften der Teilchen. Ein Beispiel hatte ich schon bei der Cabibbo-Theorie erwähnt.

Drei Jahre später kamen Gell-Mann und gleichzeitig Zweig, ein junger Theoretiker beim CERN, auf die Idee, daß man genau diese SU(3)-Symmetrie erhält, wenn man annimmt, daß alle diese Teilchen aus Konstituenten zusammengesetzt sind, von Gell-Mann "Quarks" und von Zweig "Aces" genannt. Diese Konstituenten müssen eine sehr merkwürdige Eigenschaft haben, nämlich eine nicht ganzzahlige elektrische Ladung. Man benötigt ein "up"-Quark (u) mit der Ladung $+2/3 e$, ein "down"-Quark (d) und ein "strange" Quark (s), beide mit der Ladung $-1/3 e$. Die Antiteilchen, genannt Antiquarks, haben das entgegengesetzte Ladungsvorzeichen. Die Mesonen bestehen aus Quark und Antiquark, die Baryonen aus drei Quarks. Man spricht heutzutage nur von Quarks und denkt dabei an Gell-Mann, aber ich erinnere mich noch genau, wie Zweig, vor Erregung an allen Gliedern zitternd, am Tage nach dem Bekanntwerden von Gell-Manns Arbeit im großen Hörsaal beim CERN seine Arbeit vortrug. Das ist schon hart für einen jungen Theoretiker, wenn ihm der Ruhm für eine solche

Sache von einem der ganz Großen direkt vor der Nase weggeschnappt wird. Zweig hat seine Arbeit nie publiziert, es gibt nur einen CERN-Report darüber. Der wird auch heute noch in anständigen Lehrbüchern neben Gell-Manns Arbeit zitiert.

Die Quarks verursachten fast so ein Erdbeben wie die Paritätsverletzung. Man suchte überall nach freien Quarks, an Beschleunigern, in der Höhenstrahlung, in den Laborbüchern des alten Milikan und fand keine. Diese eindrittel oder zweidrittel geladenen Teilchen müßte man irgendwo finden! Die Physiker begannen sich wieder auf ihre Kenntnisse in Physikalischer Chemie zu besinnen, aber es half nichts. Es gab keine freien Quarks. Aber das Quark-Modell, mit Hilfe dessen man die Mesonen und die Baryonen aufbauen konnte, entwickelte sich prächtig. Alle beobachteten baryonischen und mesonischen Resonanzen - gegen Ende des Jahrzehnts waren es schon weit über 100 - ließen sich zwanglos einordnen. Außerdem erlaubte das Quarkmodell noch viel weiterreichende Folgerungen, als die SU(3)-Symmetrie allein. Da man aber keine freien Quarks gefunden hatte, hielten die meisten Physiker die Quarks doch mehr für ein mathematisches Werkzeug, und nicht für Wirklichkeit. Heisenberg beispielsweise hat bis zu seinem Tode die Quarks für Unfug gehalten. Die Einschätzung der Quarks als mathematische Hilfsmittel änderte sich erst gegen Ende des Jahrzehnts, als bei der tief unelastischen Streuung energiereicher Elektronen an Protonen sehr große Wirkungsquerschnitte beobachtet wurden, die darauf hinwiesen, daß in einem Proton irgendwelche punktförmigen Teilchen herumschwimmen, die man zunächst Partonen nannte, und die mit den Quarks identisch sein könnten.

Auch in der experimentellen Technik gab es in den sechziger Jahren enorme Fortschritte. Der Transistor verdrängte die Elektronenröhre. Sowohl die unvergleichlich bessere elektronische Stabilität der Transistorschaltungen als auch die höhere Packungsdichte ermöglichte bei den Zählerexperimenten einen qualitativ neuen Experimentierstil. Das alte Grundprinzip der Zählerexperimente wurde zwar beibehalten, aber die Zahl und Komplexität der Detektorelemente konnte gewaltig gesteigert werden. Beim CERN wurde meines Wissens das erste komplette Elektronik-System auf Transistor-Basis von Herrn Kiessler,

dem Techniker der Citron-Gruppe aufgebaut, und dadurch gehörten wir, in der Endphase des Myon-Streuexperiment und beim $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e \nu$ -Zerfallsexperiment zu den ersten, die von der neuen Technik profitieren konnten.

Die zweite große Neuerung war die Entwicklung von Spurenkammern, die in den Versuchsaufbau eines Zählerexperiments integriert werden konnten. Der erste Vertreter dieser Gattung war die Funkenkammer, in der sich nach Anlegen eines Hochspannungspulses entlang der Teilchenspur eine Kette von Funken bildete. Die Meßgenauigkeit blieb zwar hinter dem zurück, was man mit der Blaskammer erreichen konnte, aber man hatte den großen Vorteil, daß die Funkenkammer selektiv bestimmte Ereignisse registrierte, wenn der Hochspannungspuls durch die übrigen Detektoren des Experiments ausgelöst wurde. Die Blaskammer konnte dagegen nur blindlings ausgelöst und photographiert werden, denn die Expansion der Flüssigkeit mußte vor dem Eintritt des Strahls in die Kammer erfolgen.

Als Beispiel für ein Funkenkammer-Experiment zeigt Abbildung 5 die Anordnung der Detektoren, die wir zur Untersuchung des Λ -Betazerfalls aufgebaut hatten. Die Funkenkammern sind mit S bezeichnet, mit C Detektoren, die unter Ausnutzung des Cerenkov-Effekts selektiv auf die Geschwindigkeit der Teilchen ansprechen, mit H Szintillationszähler - "Hodoskope", mit denen die Topologie der Teilchenspuren grob definiert wurde.

In Wirklichkeit sah eine solche Apparatur weniger säuberlich und wohlgeordnet aus: Auf engstem Raum waren die verschiedenen Detektor-Elemente zusammengeschachtelt, so daß man an manche Teile der Apparatur nur kriechend gelangen konnte, umgeben von Stahlrohren und Kabelsträngen. Die Elektronik war in einer Hütte außerhalb der für den Strahlenschutz errichteten Betonwand installiert; man konnte hinter dem Gewirr der Verbindungskabel die Elektronik selbst kaum sehen. Ein solches Experiment war sozusagen "Experimentalphysik total": Hochspannungstechnik für die Funkenkammern, Optik für ein kompliziertes Spiegelsystem, mit dessen Hilfe die Funken photographiert werden konnten, Vermessungstechnik, bei den Cerenkov-Zählern kam es abermals auf die Optik an, sowie auf den Umgang

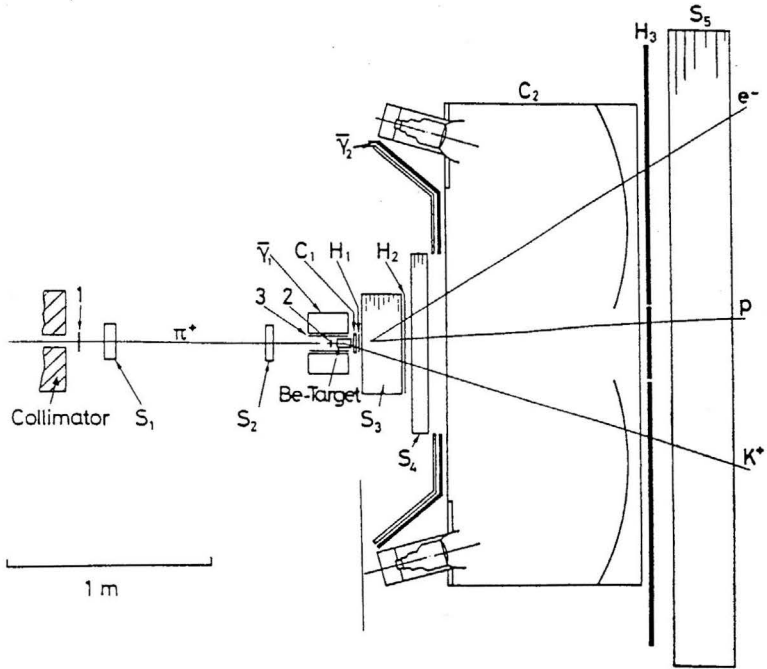


Abb. 5: Apparatur zur Untersuchung des Λ -Betazerfalls.

mit Flüssigkeiten, die fast jeden Klebstoff auflösten, und mit brennbaren Gasen, Fotomultiplier, Scintillatoren, Analog- und Digitalelektronik usw. Das Aufregendste war aber das Einfahren des Experiments, bei dem es darum ging, zu verstehen, was sich in der Apparatur abspielt und wie sie zu modifizieren ist, daß sie das leistet, was man bei der Planung des Experiments berechnet und im "Proposal" versprochen hatte. Ist hier noch ein Szintillationszähler oder ein Bleiabsorber anzubringen? Müssen wir die Laufzeit jenes Signals in der Elektronik noch um 2 oder 3 Nanosekunden verkürzen? Ist dort noch eine Diskriminatorschwelle zu verändern? Warum funktioniert der Cerenkov-Zähler nicht wie erwartet ... ein iterativer Prozeß, der sich

wochenlang hinzog und ein volles Verständnis sowohl der Detektorelemente als auch der möglichen Teilchenreaktionen erforderte.

Im Jahr 1964 war ich als Nachfolger von Prof. Kopfermann nach Heidelberg gekommen. Wir konnten unsere Experimente beim CERN fortführen, weil auch Herr Soergel bald einen Ruf nach Heidelberg erhielt, und wir konnten uns bei der gemeinsamen Arbeit in Heidelberg und in Genf abwechseln. In Heidelberg galt es, einen ordentlichen Beitrag zur Lehre zu leisten, das Institut zu leiten, eine leistungsfähige Elektronik-Werkstatt und vor allem eine Arbeitsgruppe "Hochenergie-Physik" aufzubauen, für die Vorbereitung unserer Experimente beim CERN, aber auch für apparative Neuentwicklungen. In Genf mußte die dortige Arbeitsgruppe durch alle Schwierigkeiten des Experiments und der Experiment-Auswertung gesteuert werden - das war schon ein Arbeitspensum für zwei Professoren.

Das schönste Ergebnis der apparativen Arbeiten in Heidelberg war sicher die 1968/69 von A.H. Walenta (damals Diplomand) erfundene Driftkammer, eine auf dem Zählrohrprinzip basierende Spurenkammer, die in den siebziger und achtziger Jahren die Funkenkammer und die Blasenkammer aus der Experimentiertechnik verdrängte. Ich stand der Entwicklung erst sehr skeptisch gegenüber, weil ich nicht recht glaubte, daß die Driftzeitmessung an vielen Zähldrähten in unserem finanziellen und technischen Rahmen machbar war. Ich hatte dann aber großes Vergnügen daran, mit Herrn Walenta zusammen an der Vervollkommnung der Driftkammer zu arbeiten. Wir setzten Driftkammern zuerst 1970/71 bei einem Experiment zum Nachweis des seltenen K-Zerfalls $K \rightarrow e + \nu$ ein (ein Pendant zu dem vorhin erwähnten $\pi \rightarrow e + \nu$ -Zerfall). Ich erinnere mich noch, daß wir die Pläne zum Einsatz dieses damals noch unbekanntes Instruments vor den CERN-Komitees sorgfältig geheim hielten, damit unser Proposal nicht wegen "unproven techniques" abgelehnt wurde.

Die Halbleiter-Elektronik brachte nicht nur in der Meßtechnik den großen Sprung nach vorn, auch bei der Datenerfassung und -verarbeitung gab es durch die Einführung des "Computers" eine Revolution. Sowohl beim Einsatz von on-line Prozeßrechnern als auch bei der Nutzung der Großrechner spielte die Hochenergiephysik eine Vorrei-

terrolle. Die Driftkammer war, wie auch die 1968 von G. Charpak erfundene Vieldraht-Proportionalammer, dieser neuen Technik in idealer Weise angepaßt.

Die siebziger Jahre: Neutrale schwache Ströme, farbige Quarks und "Charm" in der Elementarteilchenphysik

Im Zusammenhang mit der Cabibbo-Theorie des Betazerfalls war von einer mysteriösen "Aufteilung der Kopplungsstärke" die Rede gewesen. Das läßt sich viel klarer und sehr elegant im Rahmen des Quark-Modells formulieren: Man erhält die Cabibbo-Theorie, wenn man annimmt, daß bei den schwachen Wechselwirkungen der d-Quark und der s-Quark kombiniert in der Art einer quantenmechanischen Zustandsmischung auftreten: $d' = d \cos \vartheta_c + s \sin \vartheta_c$. Der Mischungswinkel ϑ_c wird auch Cabibbo-Winkel genannt. Der einzige Haken bei diesem Ansatz ist, daß nun unweigerlich "neutrale" schwache Ströme auftreten, so genannt, weil es nun auch Betazerfallsprozesse geben soll, bei denen sich die Ladung des zerfallenden Hadrons nicht ändert, und solche Prozesse waren nicht beobachtet worden. Das wäre kein Problem bei Zerfallsprozessen ohne Strangenessänderung; sie würden durch Prozesse der starken Wechselwirkung vollständig maskiert. Wenn sich aber die Strangeness ändert, sieht das anders aus: Der Zerfall $K^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu} \nu$ sollte ebenso häufig sein wie der Zerfall $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$, er wird aber nicht beobachtet. Was stimmt hier nicht?

Einen Ausweg fanden 1970 Glashow, Iliopoulos und Maiani: Man kann die unerwünschten Prozesse algebraisch weghexen, wenn man annimmt, daß es noch ein viertes Quarkteilchen gibt, genannt "Charm-Quark". Ich muß gestehen, daß mir dieser Vorschlag als ein ziemlich übler Griff in die Trickkiste der Theoretischen Physik vorkam. Nun, der neutrale Strom (ohne Strangeness-Änderung) wurde 1972 in einem Neutrino-Experiment beim CERN entdeckt - die letzte Großtat der Blasenkammerphysik. Damit war der Weg frei für die kurz zuvor von Weinberg, Salam und Glashow vorgeschlagene Theorie der "elektroschwachen" Wechselwirkungen, die zwei der fundamentalen Wech-

selwirkungen zusammenfaßte. Nach dieser Theorie sollte es bei der schwachen Wechselwirkung drei Austauschteilchen geben: W^+ und W^- , die die geladenen schwachen Ströme tragen, und das Z^0 -Teilchen für den neutralen Strom. Mit den Ergebnissen des Neutrino-experiments konnte man die Masse der "intermediären Bosonen" vorhersagen: Sie sollten fast 100mal schwerer als ein Proton sein. Damit waren sie zunächst einmal dem direkten Nachweis entrückt. Die Abwesenheit des neutralen "Strangeness-Wechselstroms" blieb aber weiter ein Mysterium, denn die Charm-Hypothese wurde wohl von vielen nicht erst genommen.

Anders verhielt es sich mit einer zweiten Erweiterung des Quarkmodells, die von Gell-Mann vorgeschlagen wurde. Das ursprüngliche Quarkmodell wies einen häßlichen Konflikt mit dem Pauli-Prinzip auf, nach dem sich keine zwei Teilchen im gleichen Quantenzustand befinden können, sofern es sich um identische Spin $\frac{1}{2}$ -Teilchen handelt. Genau das schien aber zu passieren, wenn man die Baryonen mit dem Quarkmodell erklären wollte. Beim doppelt positiv geladenen Δ -Teilchen müßte man sogar annehmen, daß sich gleich drei u-Quarks im gleichen Quantenzustand befinden! Über diesen Punkt gab es jahrelang hitzige Diskussionen. Gell-Mann schlug eine Patentlösung vor: Die drei Quarks unterscheiden sich voneinander in einer noch verborgenen Eigenschaft, die Gell-Mann "Farbe", z.B. rot, grün, und blau, nannte. Auch das war solange keine besonders befriedigende Hypothese, bis es Gell-Mann, Fritzsche und Leutwyler gelang, auf dem Farbkonzept eine neue Theorie der starken Wechselwirkung aufzubauen, die "Quanten-Chromodynamik" (QCD). Die drei "Farben" dienen hier zur Kennzeichnung der Qualität der "starken" Ladung, ähnlich wie man die Art der elektrischen Ladung durch plus und minus kennzeichnet.

Die Austauschteilchen der QCD nennt man Gluonen. Sie sind elektrisch neutral, tragen aber Farbladung. Mit der QCD kann man auch das zweite große Rätsel der Quarkphysik lösen: Mindestens qualitativ kann man die Frage beantworten, warum keine freien Quarks beobachtet werden, warum also die Quarks in den Baryonen und Mesonen eingesperrt sind; man bezeichnet das als das "confinement" der

Quarks. Überträgt man bei einer Teilchenreaktion auf ein Quark einen sehr hohen Impuls, kann es das confinement nicht durchbrechen, weil sich ständig aus der chromodynamischen Feldenergie neue Quark-Antiquarkpaare bilden, die sich zu Mesonen, mitunter auch zu Baryon-Antibaryonpaaren zusammenschließen. Dieser Vorgang wird mit dem wenig treffenden Ausdruck "Quarkfragmentation" bezeichnet. Mit der QCD lag endlich eine Theorie der starken Wechselwirkung vor. Nun war es eine Aufgabe für die Experimentalphysiker, zu prüfen, ob diese Theorie auch stimmt, insbesondere herauszufinden, ob man Quarks und Gluonen als Bausteine der Materie nicht doch nachweisen kann.

Mit der Welt der farbigen Quarks machte ich Bekanntschaft in einem Vortrag, den Gell-Mann beim CERN hielt. Der Vortrag gipfelte in einem Appell an die Experimentalphysiker: Das wichtigste Experiment überhaupt sei die Messung des totalen Wirkungsquerschnitts für die Erzeugung von Hadronen in der e^+e^- -Vernichtung bei hoher Energie. Das sei das experimentum crucis für die Theorie der farbigen Quarks. Dieser Wirkungsquerschnitt läßt sich nämlich auf einfache und leicht durchschaubare Weise berechnen, wenn man annimmt, daß die Hadronenproduktion primär über die Reaktion $e^+ + e^- \rightarrow$ Quark + Antiquark abläuft, und wenn man die Quarks als punktförmige, d.h. strukturlose Elementarteilchen voraussetzt.

Kurz zuvor hatte Zichichi beim CERN einen Vortrag gehalten, in dem er über sein Experiment am Speicherring ADONE in Frascati berichtete - das war der erste e^+e^- -Speicherring, mit dem man Elektronen und Positronen mit Energien oberhalb von 1 GeV zur Kollision bringen konnte. Eigentlich erwartete man damals von solchen Anlagen nur eine genauere Prüfung der Quanten-Elektrodynamik sowie einige Aufschlüsse über die elektromagnetischen Formfaktoren der Hadronen. Zichichi hatte jedoch beobachtet, daß deutlich mehr Hadronen erzeugt werden, als nach diesen Vorstellungen zu erwarten waren.

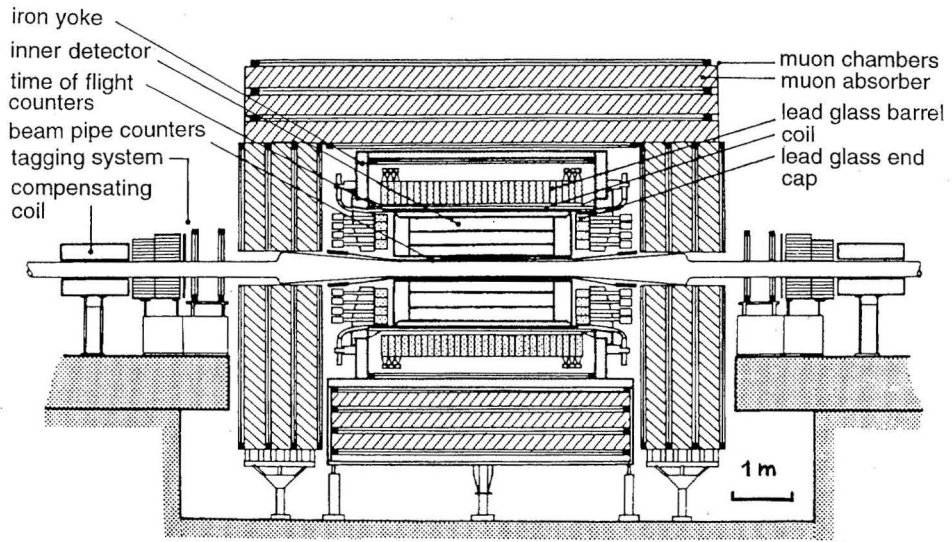
Schon nach Zichichis Vortrag hatte ich mir vorgenommen, mich mit einem Teil unserer Gruppe der e^+e^- -Physik zuzuwenden. Bei DESY in Hamburg war damals gerade der e^+e^- -Speicherring DORIS im Bau, und wir wollten bei DORIS ein Experiment zur Messung des

totalen Wirkungsquerschnitts für die Hadronenproduktion durchführen. Bestärkt durch Gell-Manns Vortrag machten wir uns an die Arbeit. Für unsere Gruppe war das ziemlich problematisch, denn unser Experimentierprogramm beim CERN war keineswegs abgeschlossen, und die Symbiose mit Herrn Soergel mußte vorerst unterbrochen werden. So war denn auch nur eine kurze Eskapade nach Hamburg geplant. Das kam aber gründlich anders.

Kurz vor Inbetriebnahme von DORIS platzte mal wieder eine Bombe in der Elementarteilchenphysik, diesmal gezündet von Experimentalphysikern: In den USA wurde das J/ψ -Teilchen entdeckt, das sich im Wirkungsquerschnitt der e^+e^- -Vernichtung als eine nadelscharfe Überhöhung bei einer Schwerpunktsenergie von 3,097 GeV bemerkbar macht, mit einem Anstieg der Reaktionsrate um einen Faktor 100! Auch bei DESY wurde alsbald die Untersuchung dieses Phänomens in Angriff genommen. Es folgten hektische Zeiten für Experimentatoren wie für Theoretiker, und bald stellte sich heraus, daß es sich um den gebundenen Zustand eines neuen schweren Quarkteilchens mit seinem Antiteilchen handelte, und zwar des von Glashow et al. vorhergesagten Charm-Quarks!

Dieses Quark-Antiquark-System, auch Charmonium genannt, erwies sich im wahrsten Sinne des Wortes als das Wasserstoff-Atom der Elementarteilchenphysik, denn es zeigte sich, daß es Anregungszustände besaß, deren Niveauschema dem des H-Atoms verblüffend ähnlich war. Die Spektroskopie des Charmoniums ermöglichte, das Potential der zwischen Quark und Antiquark wirkenden Farbkraft auszumessen; das Studium der Zerfallskanäle gab neue Einblicke in die Mechanismen hadronischer Reaktionen. Auch für die Welt der Leptonen gab es eine Überraschung: Unter den Zerfallsprodukten konnte man auch ein neues schweres Lepton identifizieren, das τ -Lepton, noch 17mal schwerer als das Myon! Vor allem wurde letztendlich Gell-Manns Vermutung über den Verlauf des totalen Wirkungsquerschnitts für die Hadronenproduktion in e^+e^- -Reaktionen in vollem Umfang bestätigt: Oberhalb der Charmonium-Zustände zeigt der Wirkungsquerschnitt einen Verlauf, aus dem sich ablesen läßt, daß in die-

sem Massenbereich vier Quarkteilchen mit jeweils 3 Farben existieren, die genau die erwarteten $1/3$ und $2/3$ Elementarladungen tragen. Damit hatte die große Zeit der e^+e^- -Speicherringe begonnen. Bei DESY konnte ein noch größerer Speicherring gebaut werden, PETRA, mit dem Schwerpunktsenergien über 40 GeV erreicht werden konnten, und von dem man eine Fortsetzung der so erfolgreichen e^+e^- -Physik erwartete. Auch in der Experimentiertechnik gab es eine große Umstellung: Die Zeit der auf eine bestimmte Fragestellung gerichteten Experimente ging zu Ende. An ihre Stelle traten "Universal-Detektoren", die an den Wechselwirkungszonen der Speicherringe aufgestellt alle Reaktionen erfassen und im möglichsten Detail registrieren konnten. Damit kam auch die Arbeit in kleinen Gruppen von ca. 10 Physikern zu einem Ende. Unser vorhin erwähntes Experiment zur Bestimmung der totalen Wirkungsquerschnitte bei e^+e^- -Reaktionen war noch so angelegt. Es hat für den gedachten Zweck auch hervorragend funktioniert, aber den unerwarteten Anforderungen der J/ψ -Spektroskopie war es nicht gut angepaßt. Gleiches gilt für unsere Gruppenstärke, denn für den gewohnten Rhythmus - 1 Jahr Experiment-Vorbereitung, über 1 Jahr verteilt Meßperioden in Zeitabschnitten von jeweils ein paar Wochen, 1 bis 2 Jahre Auswertung - war in der Speicherring-Physik kein Platz mehr. Der Bau eines Universal-detektors ist eine große Aufgabe, die nur in der Zusammenarbeit mehrerer Institutionen gelöst werden kann. Der Detektor muß vom ersten Tage an funktionieren. Er ist kaum zugänglich in der Wechselwirkungszone eingebaut. Die für die Rekonstruktion der Ereignisse erforderlichen Programme müssen schon zu Beginn des Experiments vorhanden sein. An die Stelle des Experimentierens, das ich vorhin am Beispiel des Λ -Betazerfallsexperiments (Abb. 5) zu schildern versuchte, trat die Aufgabe, das Verhalten eines Detektors, der möglichst nicht verändert werden sollte, und der fast pausenlos das ganze Jahr über Daten lieferte, allmählich bei der Datenanalyse zu verstehen. Wir machten bei PETRA mit dem neuen Arbeitsstil Bekanntschaft. Zusammen mit Arbeitsgruppen aus Hamburg, England und Japan wurde der Universaldetektor JADE gebaut (Abb. 6). Dem Ideal (Nachweis aller geladener Teilchen und aller Photonen mit dem



iron yoke
 inner detector
 time of flight
 counters
 beam pipe counters
 tagging system
 compensating
 coil

muon chambers
 muon absorber
 lead glass barrel
 coil
 lead glass end
 cap

Abb. 6: Der JADE-Detektor

Raumwinkel $\Omega \approx 4\pi$, Impulsmessung und Teilchenidentifikation bei den geladenen Teilchen, Energiemessung bei den Photonen) kam dieser Detektor ziemlich nahe. Jedes Institut konnte eine wohldefinierte Komponente zum Detektor beitragen. Wir bauten in Heidelberg den Spurendetektor des Experiments mitsamt der Auslese-Elektronik, die sogenannte Jetkammer, einen neuartigen Driftkammertyp, der sich besonders für die Speicherringphysik eignet. Das war ein hartes Stück Arbeit, bei dem ich nicht nur meine Fähigkeiten als Physiker, sondern auch als Ingenieur, Handwerker und Organisator einsetzen mußte.

Die JADE-Kollaboration umfaßte 60-70 Physiker. Es zeigte sich, daß auch in einer solchen Kollaboration ein höchst ersprießliches Arbeiten möglich ist: Jeder Einzelne konnte zeigen, was er kann, und fand auch die Anerkennung für seine Arbeit. Die Physik bei PETRA erwies sich als so reichhaltig, daß an interessanten Einzelproblemen kein Mangel war. Für mich war das JADE-Experiment eigentlich das schönste in meiner Physiker-Laufbahn. Damit sind wir aber in den achtziger Jahren angelangt.

1980 bis heute: Das Zeitalter des Standardmodells

Mit den achtziger Jahren treten wir in das Zeitalter des "Standard-Modells" der Elementarteilchen ein, das bis heute andauert. Die elementaren Wechselwirkungen werden durch die QCD und die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung beschrieben. Die elementaren Teilchen lassen sich in je drei Familien von Leptonen und Quarks gruppieren: Das Elektron, das Myon und das τ -Lepton, jeweils gepaart mit seinem Neutrino auf der einen Seite, "up"- und "down"-Quark, "Charm"- und "Strange"-Quark, "top"- und "bottom"-Quark auf der anderen. (Die Entdeckungsgeschichte des b-Quarks, $b = \text{bottom}$, hatte ich im vorigen Kapitel unterschlagen, das t-Quark ist zwar noch nicht nachgewiesen, man hat aber gute Gründe für die Annahme, daß es tatsächlich existiert). Zu den Leptonen und Quarks kommt als dritte Spezies die Gruppe der Austauscheteilchen: die

Gluonen, das sind die Austauschteilchen der QCD, das Photon sowie die W^+ , W^- und Z^0 -Bosonen.

Die direkte Erzeugung der W - und Z -Bosonen gelang 1983 beim CERN. Damit war die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung im wesentlichen konsolidiert. Die Quanten-Chromodynamik wurde vor allem bei PETRA auf eine solide Basis gestellt. Es war äußerst spannend und ein großes Vergnügen, mit dem JADE-Detektor an dieser Forschung mitzuwirken. Das erste und wichtigste Resultat von PETRA war der experimentelle Beweis für die Existenz der Gluonen. Auch QCD-Prozesse höherer Ordnung, für die quantitative Prüfung der Theorie äußerst wichtig, konnten wir nachweisen. Schließlich konnten wir die Einzelheiten des vorhin schon im Zusammenhang mit dem confinement erwähnten Fragmentationsprozesses erforschen und genauer zu verstehen lernen. Quarks und Gluonen entwickelten sich zu Teilchen, die man fast direkt sehen kann. Abbildung 7a zeigt ein Beispiel für ein "2-jet-Ereignis", typisch für die Reaktion $e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q}$; Abbildung 7b ein besonders schönes "3-jet-Ereignis", zurückzuführen auf die Reaktion $e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q} + g$, die ein Analogon zu dem bekannten Prozeß der elektromagnetischen Bremsstrahlung darstellt. q und \bar{q} stehen für Quark und Antiquark, g für Gluon. Die deutlich sichtbaren "jets" sind Garben von Teilchen, überwiegend π -Mesonen, die bei der Fragmentation der Quarks und der Gluonen entstehen. Es gab auch ab und zu große Aufregungen wie z.B. bei der Beobachtung von "1-jet-Ereignissen" (Abb. 7c). Es stellte sich aber stets heraus, daß auch solche exotischen Ereignisse mit dem Standard-Modell erklärt werden können, wenn auch auf etwas subtilere Weise. Animiert durch die Entdeckung der W - und Z -Bosonen und durch die Erfolge von PETRA, begann CERN mit dem Bau des e^+e^- -Speicherrings LEP, mit dem Z^0 -Teilchen zu Hunderttausenden erzeugt werden können. Das eröffnete natürlich ganz neue Forschungsmöglichkeiten, die auch unsere Gruppe wieder nach Genf zog. Ende 1989 begann der Experimentierbetrieb. Das erste wesentliche Ergebnis war, daß es nur drei Arten von Neutrinos gibt. Man kann daraus schließen, daß mit den drei bereits bekannten Familien von Leptonen und Quarks tatsächlich ein Abschluß erreicht ist.- ein sehr wichtiges Resultat. Im

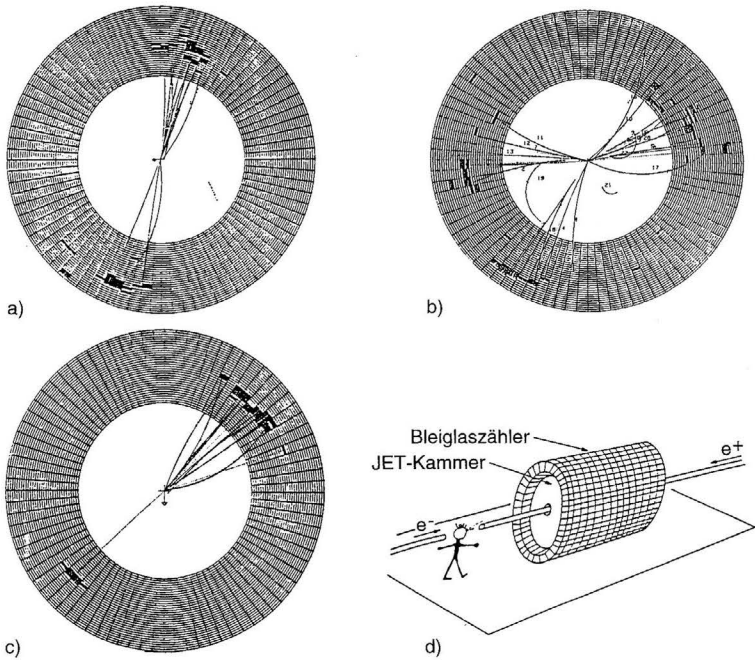


Abb. 7: a,b,c zeigen die perspektivische Rekonstruktion von Ereignissen, die mit der JADE-Jetkammer registriert wurden; d zeigt den Standort des fiktiven Betrachters.

übrigen ermöglicht die "Z⁰-Fabrik" LEP, durch Präzisionsmessungen das Standard-Modell einer sehr genauen Prüfung zu unterziehen. Bisher konnte noch kein Riß im Gebäude entdeckt werden. Das ist etwas unbefriedigend, weil das Standardmodell der Elementarteilchen nicht der Weisheit letzter Schluß sein kann. Zu groß ist die Zahl der Parameter, die in das Standardmodell als "elementare Naturkonstanten" eingehen. Die Massen der Leptonen und der Quarks sind ein Beispiel, der vorhin erwähnte Cabibbo-Winkel ϑ_c ein anderes. Auch sind noch nicht alle Ingredienzen des Standard-Modells beisammen: Damit im

Standard-Modell die Teilchen eine Masse bekommen können, braucht man das sogenannte Higgs-Teilchen; sein experimenteller Nachweis steht noch aus. Überdies versichern uns die Theoretiker, daß bei der Formulierung des Standardmodells künstliche Annahmen gemacht werden müssen, die der Rechtfertigung durch eine tiefer liegende Theorie bedürfen. Es erhebt sich also die interessante Frage: Wie sieht die Physik jenseits des Standard-Modells aus? Es gibt eine Reihe von Ansätzen für eine solche Theorie. Einige konnten schon durch Experimente bei PETRA und LEP praktisch ausgeschlossen werden, andere sind noch im Rennen und man hofft entweder noch bei LEP oder aber an zukünftigen Beschleunigern neue Aufschlüsse zu bekommen. Ob das gelingt, wird die Zukunft lehren.

Ein Vortrag über das Thema *43 Jahre Physik der Elementarteilchen*, ist eigentlich so etwas, wie ein Vortrag über "Die landschaftlichen Schönheiten der Schweiz". Man redet über das Matterhorn über den Vierwaldstätter See, noch etwas über den Schweizer Jura, und dann fragt man sich, welche Information man eigentlich übertragen hat. Vielleicht konnte ich Ihnen aber doch nahebringen, daß sich in diesen 43 Jahren eine phänomenale Entwicklung in der Elementarteilchenphysik abgespielt hat, die zu verfolgen schon ein intellektuelles Abenteuer ersten Ranges war.

Man sagt, daß Physik auch Spaß machen muß. Die Frage stellt sich: Hat sie mir Spaß gemacht? Ich muß sagen, beim Entstehen dieses herrlichen Gedankengebäudes - das Ganze kann man sich auch wie die Inszenierung und Aufführung eines Theaterstücks vorstellen - nicht nur als Zuschauer, sondern auch als Schauspieler auf der Bühne mitzuwirken, natürlich nicht in einer Hauptrolle, auch nicht gerade als Statist, sondern in einer hübschen kleinen Nebenrolle, das hat schon großen Spaß gemacht. Das kann ich Ihnen versichern.