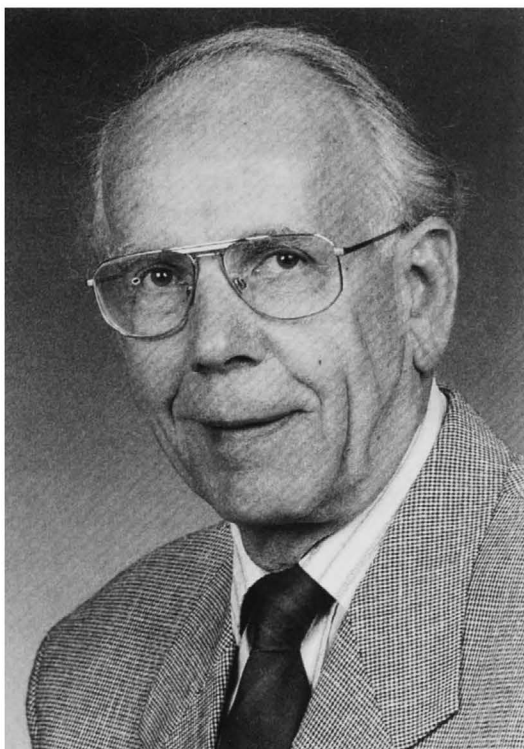


Berthold Stech



## Berthold Stech

Professor Stech wurde 1924 in Karlsruhe geboren. Er begann 1946 mit dem Studium der Physik an der Universität Heidelberg und promovierte 1951 bei Walter Bothe mit einer experimentellen Arbeit über den Einfluß von Alphastrahlen auf Festkörper. Anschließend wurde unser Referent Assistent bei Hans Jensen am Institut für theoretische Physik. In dieser Zeit publizierte Herr Stech Arbeiten über die Gamma-Strahlung isomerer Kerne und zur Theorie des Betazerfalls. Nach einer Gastvorlesung in Trondheim habilitierte sich Herr Stech 1956 in Heidelberg und ging anschließend an das "California Institute of Technology" in Pasadena. 1958 folgte er einem Ruf auf ein Extraordinariat für theoretische Physik an der Universität Heidelberg, das 1959 - nach Ablehnung auswärtiger Berufungen - in ein Ordinariat umgewandelt wurde. Trotz weiterer ehrenvoller Berufungen blieb Professor Stech in Heidelberg, doch wurde seine Heidelberger Zeit vielfach durch Forschungsaufenthalte und Gastprofessuren unterbrochen (Boulder, La Jolla, Hamburg, Ankara, Kopenhagen, Porto Alegre, Santa Barbara, Stanford und häufig am CERN in Genf).

Professor Stech war viele Jahre Direktor des Instituts für theoretische Physik in Heidelberg. Er war von 1970 bis 1971 Dekan der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg und mehrere Jahre Mitglied des Wissenschaftlichen Rates von DESY in Hamburg. Im Jahre 1987 wurde er zum Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften gewählt.

Professor Stech war Mitherausgeber von *Nuclear Physics* und *Zeitschrift für Physik C*. Seine Arbeiten und diejenigen seiner Mitarbeiter betreffen die Hochenergiephysik, die Eigenschaften der Elementarteilchen und ihre Zerfallsreaktionen.





## Elementare Teilchen und Kräfte der Physik - Verständnis und Probleme gestern und heute

Lieber Herr Kollege Marx, ich bedanke mich sehr, daß ich an dieser Vortragsreihe teilnehmen und hier vortragen darf. Ich tue dies sehr gern. Aber zunächst zu Ihnen, Herr Heintze. Es hat mich sehr gefreut, Sie mit Krawatte zu sehen - und dies mir zu Ehren! Sie haben mit Ihren einleitenden Worten mein Selbstbewußtsein sehr gestärkt, aber Sie haben natürlich stark übertrieben. Ich kann nur sagen, man teile das Ganze durch den berühmten Faktor  $\pi$ , dann würde es etwa richtig. Herr Heintze, ich schätze Sie und Ihre Arbeiten mehr als ich sagen kann und freue mich, hier verkünden zu können, was ich gerade erst erfuhr, nämlich, daß Sie den Max-Born-Preis zuerkannt bekommen haben. Dies ist ein sehr bedeutender Preis in der Physik; ich gratuliere Ihnen ganz herzlich dazu.

Meine sehr verehrten Damen und Herren, ich darf Ihnen heute über die Entwicklung der Elementarteilchenphysik der letzten 45 Jahre und über meine Teilnahme daran berichten. Mein Bericht wird allerdings sehr einseitig sein und nur die Teile herausgreifen, mit denen ich durch meine Arbeiten stärker verbunden war.

Wie Herr Heintze bereits erwähnte, kam ich im Winter 1945/46 nach Heidelberg, um hier zu studieren. Warum nach Heidelberg? Nun, das lag daran, daß ich als Junge einmal mit meinen Eltern Heidelberg besuchte und von Stadt und Fluß begeistert war. Während des Krieges schrieb ich sogar meinem Vater, er möchte mich doch an der Universität Heidelberg einschreiben, obwohl keine Hoffnung auf Freistellung bestand. Als ich in Heidelberg ankam, galt mein Abschlußzeugnis nicht und ich mußte ein sogenanntes Vorsemester belegen. Die Abschlußprüfung gelang, jedoch nicht mit Glanz und Gloria, denn nach der Zeit als Soldat hatte ich schon meine Schwierigkeiten mit Latein und Geschichte. Warum entschloß ich mich für das Studium der Physik? In der Schule wurde ein Gedankenexperiment von Robert Meyer über die Äquivalenz von Wärme und mechanischer Energie besprochen. Ich konnte den Gedanken dann nachvollziehen, habe die richtige

Zahl herausbekommen und hatte dadurch ein anregendes Erfolgserlebnis. Anschließend bekam ich ein Buch in die Hand mit dem Titel *Umsturz im Weltbild der Physik*. In diesem Buch war die Rede von der Relativitätstheorie, von gekrümmten Räumen und von Unschärferelationen. Ich habe dies alles nicht verstanden, war aber fasziniert davon.

Mein Studium nach der Rückkehr aus der Gefangenschaft wurde durch finanzielle Opfer meiner Eltern und Geschwister ermöglicht. 1946 waren die Hörsäle der Universität überfüllt mit zurückgekehrten und vielfach auch verwundeten Kriegsteilnehmern. Trotz schwieriger Lebensverhältnisse - wir hatten nur selten genug zu essen - war es eine wunderbare Zeit. Wir Studenten genossen die völlig ungewohnte Freiheit, wir mußten keinem Befehl mehr folgen und konnten frei entscheiden, was wir tun und lassen wollten. Ich hatte zusammen mit einem Studenten der Volkswirtschaft ein Zimmer im Collegium Academicum, wo sich jetzt die Universitätsverwaltung befindet. Im Collegium Academicum habe ich Freunde gefunden, wir haben viel gefeiert und getanzt, denn wir hatten außerordentlich viel nachzuholen. Aber es wurde auch sehr viel gearbeitet. Meinen ersten Besuch des großen Physik-Hörsaals am Philosophenweg werde ich nie vergessen. Von oben, im überfüllten Hörsaal, sah ich tief unten den weißhaarigen Professor Bothe, wie er wie ein großer Zaubermeister mit merkwürdigen Geräten hantierte. Ich habe fast nichts verstanden und bin deshalb zum kleinen Hörsaal gegangen. Dort las Professor Walter Wessel als Gastprofessor die theoretische Mechanik. Es gab viel weniger Studenten, da diese Vorlesung für Hörer des 3. Semesters gedacht war. Ich blieb dabei und habe in der Tat von Wessel sehr viel profitiert. Die Vorlesung war außerordentlich anregend und weckte mein Interesse für theoretische Arbeiten. Wessel ging allerdings nach diesem Semester in die Vereinigten Staaten und kam erst sehr viel später als Professor für theoretische Mechanik nach Heidelberg zurück. Bis 1949, als Hans Jensen nach Heidelberg berufen wurde, gab es in Heidelberg keine Lehrer mehr für theoretische Physik. In der Mathematik konnte ich ebenfalls von guten Vorlesungen profitieren, insbesondere von einer sehr klaren und wunderschönen Vorlesung von Professor

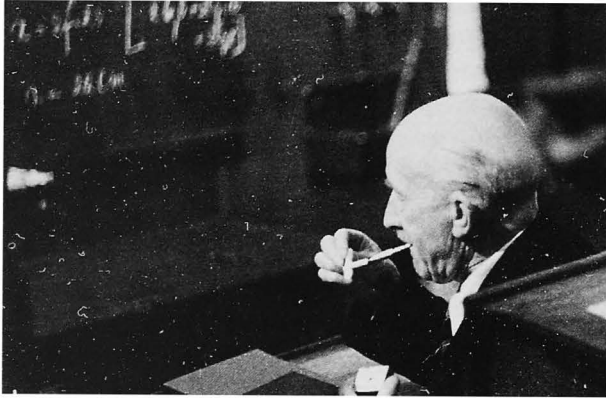


Abb. 1: W. Bothe "in typischer Haltung"

Seifert. Nach zwei Semestern gab es - so war es damals üblich - eine Semestralprüfung bei Bothe. Diese Prüfung entschied, ob man weiter Physik studieren konnte oder nicht. Für Diplom- und Doktorarbeiten gab es kaum Geräte, wir mußten unsere Glasapparaturen selber blasen aus altem im Speicher herumliegenden Glas. Meist brach das Zeug auseinander, sobald es abgekühlt war. Das Arbeitsgebiet des Physikalischen Instituts unter Bothe war die Kernphysik. Einige Einschränkungen der Forschung, die die Alliierten gemacht hatten, wurden sehr bald aufgehoben. Auf dem ersten Bild, das ich Ihnen zeigen möchte, sehen Sie Professor Bothe in typischer Haltung (Abb. 1). Herr Guber, damals Assistent bei Bothe, der heute hier unter den Zuhörern ist, wird sich sicherlich noch lebhaft an diese heroische Epoche erinnern. Die Aufnahme stammt allerdings aus einer etwas späteren Zeit, anlässlich einer Feier zum 60. Geburtstag von Walter Bothe im Jahre 1951, auf die ich noch zurückkommen werde.

Ich untersuchte am Physikalischen Institut - wie von Herrn Heintze bereits erwähnt - Strukturänderungen von Kristallen bei intensivem Beschuß mit Alphateilchen. Es war bekannt, daß sich diese Kristalle unter Beschuß verfärben, aber man hatte keinen Aufschluß darüber,

inwieweit sich ihre atomaren Strukturen durch den Beschuß verändern. Bothe, mein Doktorvater, war in dieser Zeit alleiniger Lehrstuhlinhaber und hatte gleichzeitig auch noch die kernphysikalische Abteilung des damaligen Kaiser-Wilhelm-Instituts für medizinische Forschung in der Jahnstraße zu leiten. Es ist beinahe unglaublich, wie viel er leisten konnte, und daß er dazu noch imstande war, für eine außergewöhnlich gute persönliche und wissenschaftliche Atmosphäre in beiden großen Instituten zu sorgen.

Bothe bemühte sich sehr, Hans Jensen aus Hannover für Heidelberg zu gewinnen, doch die Landesregierung zögerte lange. Als Asta-Vertreter bin ich damals mit einem Kommilitonen zum Mitbegründer der Rhein-Neckar-Zeitung, zum alten Herrn Knorr, gegangen, um einen geharnischten Artikel zu lancieren. Herr Knorr wies uns zuerst zu recht: Wir hätten als ehemalige Soldaten noch kein Demokratieverständnis, wir sollten erst die Ursachen und Möglichkeiten recherchieren, bevor wir massiv die Landesregierung angreifen. Er hatte recht, hörte uns aber trotzdem zu, fuhr selbst nach Stuttgart, und wenig später konnten die Berufungsverhandlungen mit Jensen abgeschlossen werden. Als Vorausabteilung kam zunächst Helmut Steinwedel, ein Assistent von Jensen, und kurz danach Jensen selbst. Damit gab es zum erstenmal nach Kriegsende einen Lehrstuhl für Theoretische Physik an der Universität Heidelberg. Die wissenschaftliche und menschliche Atmosphäre am Physikalischen Institut Philosophenweg 12 - auch die Theorie war dort noch untergebracht - war großartig. Das Institut war für uns Studenten eine richtige Heimat, wo wir den ganzen Tag und die halbe Nacht verbrachten. Hier war immer jemand, Professor, Assistent oder Student, der notfalls mit Rat und Tat zur Verfügung stand. Den brauchte ich auch, als ich einmal - das war noch während meiner Diplomarbeit - nachts um ein Uhr eine dicke Quecksilberkugel fallen ließ.

Schon als Studenten durften wir am wöchentlichen Teenachmittag teilnehmen, wo Bothe, Jensen, Maier-Leibnitz und später auch Haxel und Schmelzer die neuesten Experimente und die neuesten Veröffentlichungen vortrugen. Die meisten Diskussionen drehten sich um kernphysikalische Messungen und Effekte und ich durfte erleben, mit wel-

cher Sorgfalt und Akribie Jensen jedes Kernniveau, jede einzelne Übergangswahrscheinlichkeit durchdiskutierte und welches beinahe unglaubliche Wissen Bothe, Maier-Leibnitz und Haxel besaßen. Ich erlebte, wie Abschätzungen vorgenommen, Hypothesen aufgestellt und wieder verworfen wurden, es war immer spannend. Die eigenen Arbeiten durften wir auf der, so glaube ich, ersten Tagung nach dem Krieg, in Bad Nauheim vortragen. Hier kann ich ein Bild von Professor Sommerfeld zeigen, dem ich dort zum ersten und zum einzigen Mal begegnet bin (Abb. 2). Er überreicht Professor Müller, der das erste Feldelektronenmikroskop gebaut hat, eine Medaille. Das nächste Bild (Abb. 3) zeige ich hier nur, um zu beweisen, daß ich wirklich Experimentalphysiker war.

Sie sehen, wie groß meine Hochachtung vor der Experimentalphysik ist, sonst würde ich meine damalige Tätigkeit als Experimentalphysiker nicht so betonen. Wenn ich Herrn Heintze vor seinen hochentwickelten Detektoren sehe, am CERN oder hier, und erlebe, wieviel raffinierte und komplizierte Komponenten von ihm verstanden und beherrscht werden, kann ich nur staunen und bewundern.



Abb. 2: A. Sommerfeld (li.) mit E.W. Müller (re.)



Abb. 3: B. Stech

Wegen des untadeligen Verhaltens von Bothe und Jensen während der Nazizeit kamen bald wieder internationale Gäste nach Heidelberg. Bothes 60. Geburtstag war Anlaß zu einer Tagung und einem Fest, einige Bilder davon möchte ich Ihnen zeigen: In Abbildung 4 sehen Sie Wolfgang Pauli, zum erstenmal nach dem Krieg wieder in Deutschland, im Gespräch mit Hans Jensen auf dem Balkon des Instituts. Das nächste Bild zeigt Pauli zusammen mit Heisenberg. Beide stehen sich schon etwas kritischer gegenüber. Im Hintergrund links ist Professor Nordheim zu sehen. Auch er mußte in der Hitlerzeit emigrieren und war nun zum ersten Mal wieder in Deutschland.



Abb. 4: W. Pauli (re.) und H. Jensen (li.) auf dem Balkon des Physikalischen Instituts



Abb 5: W. Pauli (re.) mit W. Heisenberg (li.), L.W. Nordheim (im Hintergrund li.)

Auf dem nächsten Bild (Abb. 6) sehen Sie Lise Meitner auf einer Bootsfahrt auf dem Neckar, die aus Anlaß von Bothes Geburtstag stattfand. Abbildung 7 zeigt Bothe im Gespräch mit Professor Kossel, der in Tübingen lehrte.

Auf Abbildung 8 sehen Sie Bothe zusammen mit Frau Maier-Leibnitz auf dem Weg zum abendlichen Fest. Ich füge hier noch ein Bild von Professor Pohl aus Göttingen ein (Abb. 9). Es ist später entstanden, nämlich zum 60. Geburtstag von Hans Kopfermann, dem Nachfolger von Bothe. Pohl erklärt hier den Noch-nicht-Emeriti die korrekte Altersbezeichnung: Man ist ein Senior zwischen 45 und 60, und ein Senex, ein Greis, ab 60. Ein weiteres Bild aus dieser Epoche (Abb. 10) zeigt Herrn Schmelzer, später ebenfalls Professor in Heidelberg, wie er etwas skeptisch auf seine gerade gebaute Apparatur schaut.

Nach meiner Promotion bei Bothe bot Jensen mir an, mit einem Stipendium bei ihm zu arbeiten. Es ist ein bißchen viel von mir die Rede hier, aber es geht kaum anders, wenn man über eigene Erlebnisse im Zusammenhang mit der Physik dieser Zeit berichten soll. Bothe war

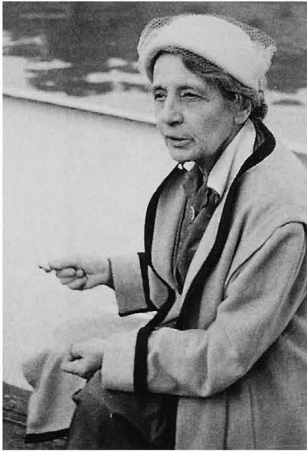


Abb. 6: L. Meitner



Abb. 7: W. Bothe (li.) mit W. Kossel



Abb. 8: W. Bothe mit Frau Maier-Leibnitz



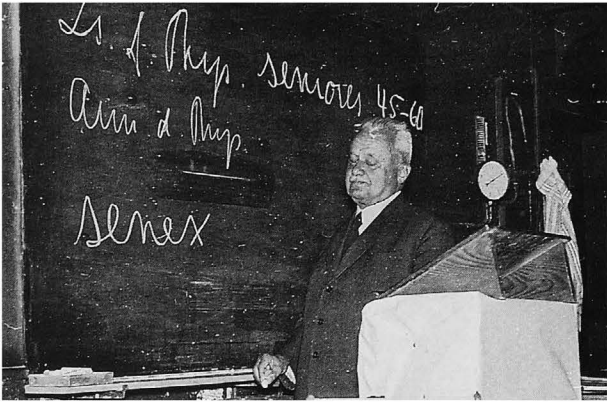


Abb. 9: R. Pohl



Abb. 10: C. Schmelzer

dagegen, er sagte zu mir: "Dann müssen Sie Ihr ganzes weiteres Leben Matricelemente ausrechnen, anstatt Experimente auszuführen". Er hatte natürlich recht, aber was macht es, wenn die Arbeit interessant ist und Freude bereitet. Nach Arbeiten über die Multipolstrahlung isomerer Kerne arbeitete ich mit Hans Jensen an der Theorie des Betazerfalls. Die Betazerfallsauswahlregeln waren von Jensen intensiv benutzt worden, um Kerneigenschaften zu bestimmen. Wir wußten jedoch, daß das "Untersuchungsinstrument Betazerfall" selbst noch ungenügend verstanden ist und kümmerten uns nun um die Struktur dieser Wechselwirkung. Es war meine erste Berührung mit reiner Elementarteilchenphysik.

Jensen und ich postulierten 1955 eine neue und damals ungewohnte Symmetrie, die heute chirale Symmetrie heißt. Ich weiß noch, wie aufgeregt ich war, als ich Pauli, der gerade in Heidelberg zu Besuch war, diese Spekulation vortragen durfte. Pauli wackelte zwar zuerst mit seinem Kopf, fand den Ansatz schließlich aber doch sehr interessant. Während der Zusammenarbeit mit Jensen fragte mich dieser einmal: "Warum formulieren Sie die  $\gamma_5$ -Symmetrie-Operation für Teilchenpaare und nicht separat für jedes einzelne Teilchen?" Ich sagte wie aus der Kanone geschossen, dann würden wir die Paritätserhaltung maximal verletzen. Da habe ich etwas verpaßt! Hätten wir diese erweiterte  $\gamma_5$ -Symmetrie ausgenutzt, so hätten wir Paritätsverletzung und V-A-Theorie schon zwei Jahre vor ihrer Entdeckung postulieren können. Von der sonstigen Teilchenphysik wußte ich zu diesem Zeitpunkt noch sehr wenig. Ich wußte, daß es  $\pi$ -Mesonen und Myonen gab, aber vom  $\theta$ - $\tau$ -Puzzle, das den ersten Hinweis auf die Verletzung der Paritätssymmetrie gab, hatte ich noch nichts gehört oder gelesen. Von den heute Hadronen genannten Elementarteilchen waren damals das Proton und Neutron bekannt, aber auch schon das  $\Lambda$ -Hyperon, die K-Mesonen, damals  $\theta$  und  $\tau$  genannt, und die  $\pi$ -Mesonen. Es war bekannt, daß diese Teilchen sehr starke Kräfte aufeinander ausüben und daß für deren Beschreibung vermutlich die Theorie von Yukawa zuständig ist. Definitive Aussagen konnten nicht gemacht werden, doch ergab sich ein qualitatives Verständnis vieler Reaktionen durch die Verwendung statischer Näherungen und von Potentialmodellen.

Bei den Leptonen, den Elektronen, Elektron-Neutrinos, Myonen und Myon-Neutrinos sah es besser aus. Schon 1933 hatte Fermi einen Ansatz für die Wechselwirkung von Leptonen und Nukleonen vorgeschlagen, der sich außerordentlich bewährt hat und auch auf die Wechselwirkung der Leptonen untereinander angewandt werden konnte. Ein großer Vorteil ist hier die Kleinheit der Kopplungskonstanten, die es erlaubt, Reaktionen, die von dieser schwachen Wechselwirkung herrühren, mittels Störungstheorie zu behandeln. Allerdings wurde erst 1962 festgestellt, daß Elektronneutrino und Myon-Neutrino zwei verschiedene Teilchen sind. Auch die Ankopplung der seltsamen Teilchen brachte noch Probleme.

In den 50er Jahren war also die Zahl der Elementarteilchen noch klein, und mit einigem Mut konnten die  $\pi$ -Mesonen als gebundene Zustände von Neutron oder Proton mit ihren Antiteilchen angesehen werden und die K-Mesonen entsprechend als gebundene Zustände von Neutron bzw. Proton mit dem Anti- $\Lambda$ -Teilchen. Die Zahl der fundamentalen Teilchen reduzierte sich damit auf Neutron, Proton und  $\Lambda$  und die Leptonen. Darüber hinaus zeigte sich eine interessante Universalität der Wechselwirkung von Teilchenpaaren, sowohl im starken wie im schwachen Sektor. Man war also in einer wunderbaren Situation und konnte glauben, daß die Gesetze der Physik bereits weitgehend verstanden sind: Aus wenigen Elementarteilchen und mit bekannten Kräften lassen sich die Kerne, die Atome und schließlich alle Materie aufbauen. Es zeigte sich jedoch bald, daß die Nukleonen keine strukturlosen Elementarteilchen darstellen und ihre Wechselwirkungen sehr komplex sind. Das angeführte Bild war noch unvollkommen. Die starken Kräfte zwischen einzelnen Nukleonen und von Nukleonen im Kern blieben unverstanden. Das Schalenmodell der Kerne von Haxel, Jensen und Suess und von Maria Goeppert-Mayer entwickelt, beschrieb die Struktur der Kerne, aber nur auf eine phänomenologische Weise. Im Sommer 1956 gab ich darüber - in Vertretung von Jensen - eine Vorlesungsreihe in Mexico City.

Es folgen einige Bilder aus dieser Zeit, die bekannte Physiker zeigen. Auf dem ersten Bild dieser Reihe (Abb. 11), sehen Sie im Vordergrund, zweiter von rechts, Professor R. Peierls, einen erfolgreichen

und hochangesehenen theoretischen Physiker. Der Herr in der dritten Reihe ganz links ist Professor M. Moshinski, der Leiter der Latin-American Sommerschule. Als Student war Sheldon Glashow dabei, zweite Reihe, rechts außen, der später zusammen mit Weinberg und Salam den Nobelpreis für die Aufdeckung des Zusammenhangs von schwacher und elektromagnetischer Wechselwirkung erhielt. Einige der Experimentalphysiker werden auch Pierre Lehmann, zweite Reihe, links außen, erkennen, der später ein bekannter französischer Hochenergiephysiker wurde.

Von Mexico bin ich zunächst nach Los Alamos und dann mit dem Greyhound Bus nach Seattle gefahren, wo im Herbst 1956 eine wichtige Konferenz stattfand. Auch hiervon möchte ich einige Bilder zeigen. Auf Abbildung 12 sehen Sie Robert Oppenheimer, ein bedeutender theoretischer Physiker und Leiter des Atomprogramms der Vereinigten Staaten während des 2. Weltkrieges.

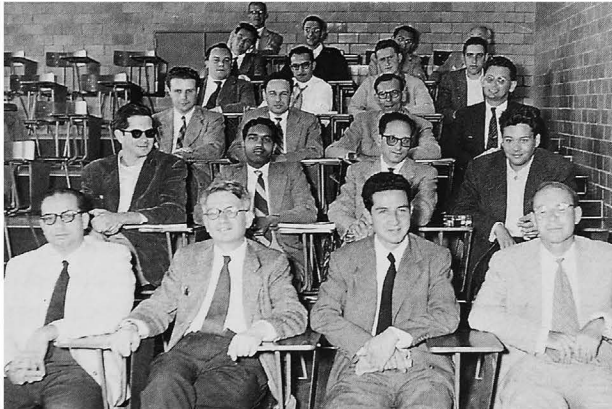


Abb. 11: R. Peierls (1. Reihe, 2.v.re.), S. Glashow (2. Reihe, re. außen)  
P. Lehmann (2. Reihe, li. außen), M. Moshinski (3. Reihe li., außen)

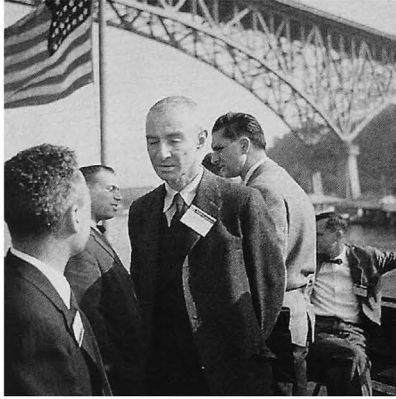


Abb. 12: R. Oppenheimer

Abbildung 13 zeigt Georg Gamow, bekannt durch seine kernphysikalischen Arbeiten und die Erklärung der Alphazerfälle der Kerne. Abbildung 14 zeigt Geoffrey Chew, Autor wichtiger Arbeiten zu  $\pi$ -Meson-Nukleon-Reaktionen, im Gespräch mit Jensen, der direkt von Heidelberg nach Seattle gekommen war.



Abb. 13: G. Gamow

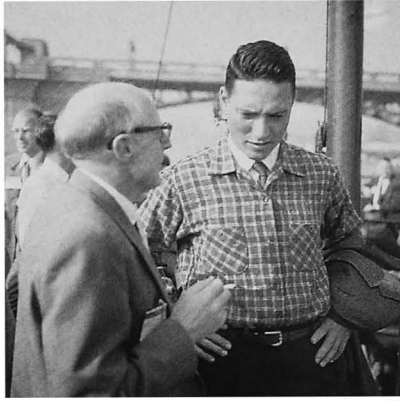


Abb. 14: G. Chew (li.) mit H. Jensen (re.)

In Abbildung 15 sehen Sie den Star der Konferenz im dunklen Anzug, C.N. Yang, der auf dieser Konferenz eine Arbeit präsentierte, in der er und T.D. Lee die Frage nach einer möglichen Paritätsverletzung bei schwachen Zerfällen, die das  $\theta$ - $\tau$ -Puzzle erklären könnte, aufwarf.

Er betonte vor allem, daß eine solche Verletzung der Rechts-Links-Symmetrie - sofern sie wirklich existiert - bei Betazerfällen unmittelbar zu meßbaren Effekten führen würde. Dieser Vortrag hat mich natürlich ganz besonders interessiert, da Jensen und ich, wie schon erwähnt, viel über die Struktur der schwachen Wechselwirkung nachgedacht hatten. Nach Abschluß der Konferenz war Feynman so freundlich, Jensen und mich von Seattle nach Pasadena zum Caltech in seinem Auto mitzunehmen. Es war eine Zweitagestour.

Abbildung 16 zeigt Jensen und Feynman beim Verlassen eines Motels. Sie studieren hier nicht die Betazerfälle, sondern die Straßenkarte. Auf dieser Fahrt und in Pasadena haben wir natürlich intensiv über die schwachen Wechselwirkungen diskutiert. Feynman glaubte zu dieser Zeit nicht an eine Verletzung der Paritätssymmetrie. Auch unsere - noch paritätserhaltende - chirale Symmetrie, die Jensen unmittelbar nach Ankunft in Pasadena in einem Kolloquiumsvortrag präsentierte,



Abb. 15: C.N. Yang (3. von li.)



Abb. 16: H. Jensen (vorne) und R. Feynman

stieß zunächst ebenfalls auf wenig Gegenliebe, besonders nicht bei Gell-Mann. Das Gegenargument war, daß die chirale Symmetrie wegen der Störung durch die Massenterme keine akzeptable Symmetrie

sei. Ich entgegnete, daß die Symmetrieforderung nur die Wechselwirkungsterme betreffen sollte, wurde aber etwas entmutigt und unsicher. Nach der Entdeckung der Paritätsverletzung war eine Erweiterung unserer Symmetrieforderung sehr naheliegend. Hier gab es jedoch zusätzlich Zweifel, da diese Erweiterung eine V-A-Kopplung forderte im Gegensatz zu einer Messung des  $\text{He}^6$ -Rückstoßspektrums, die eine Tensorkopplung ergab und sich erst später als falsch herausstellte. Feynman und Gell-Mann waren im Sommer 1959 dann jedoch mutig genug, ihre ursprünglichen Gegenargumente zu ignorieren, das  $\text{He}^6$ -Rückstoßexperiment zu bezweifeln und, wie zur selben Zeit auch Marshak und Sudershan, die V-A-Theorie zu postulieren. Herr Heintze sagte in seinem Vortrag vor einigen Tagen: "Man ist selbst schuld, wenn man sich von einem berühmten Mann etwas ausreden läßt". Ich bin schuldiger, denn ich habe mir nicht nur von einem, sondern von zwei berühmten Männern und noch von einem experimentellen Ergebnis etwas ausreden lassen. Dennoch war ich in Kalifornien sehr glücklich. Ich habe viel erlebt, viel gelernt und profitiert von der lebendigen Atmosphäre am Caltech, von der Zusammenarbeit mit anderen Fellows und von den Diskussionen mit Gell-Mann und Feynman. Gell-Mann hielt unter anderem eine Vorlesung über das neue Gebiet der K-Mesonen und über die faszinierende Entdeckung der Teilchenumwandlung des  $\text{K}^0$ -Mesons in sein eigenes Antiteilchen. Mit den Freunden am Caltech habe ich natürlich auch viel unternommen und interessante Ausflüge gemacht. Auf Abbildung 17 sieht man, wie Dick Feynman abends in der Wüste trommelt und daß er bei den Damen viel Anklang fand. Das nächste Bild (Abb. 18) habe ich gegen Schluß meines Aufenthaltes, Ende 1957 oder Anfang 1958, aufgenommen. Es war ein Ausflug, bei dem Murray Gell-Mann, Volker Soergel, der gerade neu an das Kellogg-Laboratorium gekommen war und Felix Boehm dabei waren. Mit Letzterem haben Kurt Alder, Åage Winther und ich eingehend  $\beta$ - $\gamma$ -Korrelationsexperimente durchgesprochen, die über die Struktur der schwachen Wechselwirkung weiteren Aufschluß gaben. Bei einem dieser Experimente habe ich sogar aktiv mitgewirkt. Meine Hauptaufgabe war, mit der radioaktiven Quelle schnellstens vom Van-de-Graaff-Generator zum Labor zu spurten, bevor die





Abb. 17: R. Feynman



Abb. 18: M. Gell-Mann, V. Soergel (stehend), F. Boehm (im Vordergrund)

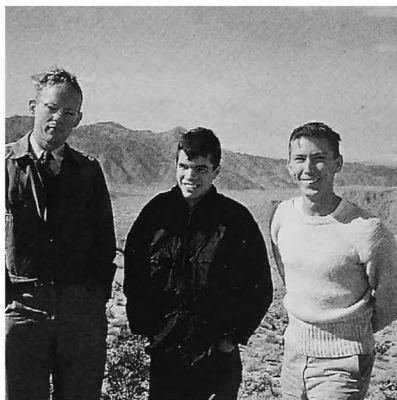


Abb. 19: K. Wilson

Quelle zu weit abgeklungen war. Das zugehörige Experiment klärte die Frage nach der Polarisation der beim schwachen Zerfall emittierten Positronen. Kurz bevor ich Pasadena verließ, kam ein junger Student namens Kenneth Wilson zum Caltech. Er kaufte mein Auto. Ich zeige ihn auf dem nächsten Bild (Abb. 19) natürlich nicht deshalb, sondern weil er später durch grundlegende Arbeiten über Gittertheorien und Phasenübergänge berühmt wurde. Ebenfalls Nobelpreisträger wurde William Fowler (Abb. 20) dessen am Caltech durchgeführte Arbeiten über die Entstehung der Elemente große Bedeutung erlangten. Das Bild stammt allerdings nicht aus der Zeit meines Aufenthaltes in Kalifornien, sondern entstand bei einem späteren Vortrag Fowlers in Heidelberg.

Bevor ich Pasadena verließ, um kurze Zeit am Argonne National Laboratorium zu arbeiten, erreichte mich eine Anfrage von Jensen, ob ich nach Heidelberg auf ein Extraordinariat kommen würde. Ich ging mit Freuden darauf ein. Zurück in Heidelberg, widmete ich mich voll der Teilchenphysik, und Jensen ebnete mir den Weg dazu. Zunächst beschäftigte mich weiterhin die chirale Invarianz, und ich hatte die Idee, daß diese auch in der starken Wechselwirkung eine Rolle spielen

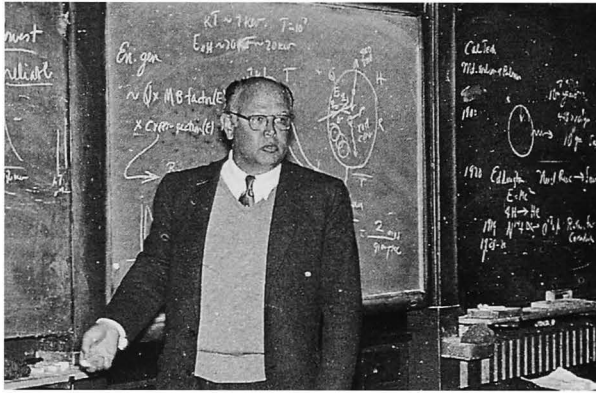


Abb. 20: W. Fowler

könnte. In einer Arbeit mit Kramer und Rollnik zeigten wir, daß dies im Falle der  $\pi$ -Meson-Nukleon-Wechselwirkung zu nichtlinearen Ausdrücken im  $\pi$ -Meson-Feld führt. Leider waren wir in der Ausführung unseres Vorhabens nicht vollständig konsequent und arbeiteten nach den ersten Veröffentlichungen nicht weiter daran. Erst mehrere Jahre später wurde diese Idee von Wess und Zumino aufgegriffen und neue Ideen hinzugefügt, insbesondere auch von Cronin, Coleman und Weinberg. Heute ist die chirale Symmetrie und die Möglichkeit, chirale Störungstheorie zu treiben eine Konsequenz der Quantenchromodynamik und dadurch wohlfundiert. Diese Symmetrie ermöglicht es, viele Meßgrößen durch wenige Parameter auszudrücken und miteinander in Verbindung zu bringen, vor allem im Niederenergiebereich, wo direkte Berechnungen noch nicht möglich sind.

Ende der 50er und Anfang der 60er Jahre wurden bei hochenergetischen Stößen an den neuen Beschleunigern eine ganze Reihe kurzlebiger neuer Teilchen entdeckt. Dies führte zu einer Explosion in der Anzahl der bekannten Elementarteilchen. Die gefundenen Teilchen waren jedoch keine Bruchstücke der beschossenen Teilchen, sondern wiederum Baryonen und Mesonen, die stark oder schwach wieder in

die ursprünglichen Teilchen zerfallen. Die theoretische Behandlung von Streuprozessen hoher Energie wurde sehr schwierig, da alle die neuen Teilchen mit zu berücksichtigen waren. Die Wunschvorstellung von einem Aufbau der Materie aus wenigen elementaren Bausteinen schien nicht mehr haltbar. Nur eine Behandlungsmethode zeichnete sich damals ab, der sogenannte Bootstrap-Mechanismus, der von Chew vorgeschlagen wurde. Die Idee war folgende: Man gibt die Massen und Kopplungskonstanten der neuen Teilchen vor, um über deren Austausch die Kräfte zwischen den Streuteilchen zu erhalten und fordert gleichzeitig die Unitarität der S-Matrix und Mikrokausalität. Die daraus entstehenden Beziehungen sollten nun wiederum die eingangs verwendeten Parameter, wie Kopplungen und Massen, wenigstens teilweise reproduzieren und damit festlegen. Auf diese Weise wollte man die Zahl der unbekanntenen Größen verringern, also sparen. Aus diesem Grunde arbeitete ich in Kalifornien mit einem jungen Schotten zusammen. Wir griffen die damals heiße Frage auf, ob das Proton selbst als gebundener Zustand aus Proton und  $\pi$ -Meson aufgefaßt werden kann. Zusammen mit Josef Rothleitner, der heute in Innsbruck lehrt, habe ich diese Frage in Heidelberg weiter verfolgt. Die damals auch von anderen Bearbeitern erhaltenen Beziehungen zwischen Teilchenmassen und Kopplungen waren interessant und nützlich, sie haben jedoch keinen größeren Durchbruch gebracht. Die starke Wechselwirkung blieb unverstanden.

Etwas Hoffnung auf eine Erklärung der Vielfalt der neuen Teilchen brachte die Entdeckung der SU(3)-Symmetrie durch Gell-Mann und andere. Die zugehörigen Symmetrirelationen brachten zwar kein tieferes Verständnis der Dynamik, erlaubten jedoch, die Teilchen zu ordnen und Massen und Eigenschaften eines noch unentdeckten Teilchens, des  $\Omega^-$ -Teilchens, richtig vorherzusagen. Auch bezüglich der schwachen Wechselwirkung wurden Fortschritte erzielt: Die Struktur dieser Wechselwirkung (heute würden wir sagen der effektiven Wechselwirkung bei niederen Energien) wurde weitgehend aufgeklärt. Sehr bedeutsam auf diesem Weg war die Bestätigung der Hypothese vom erhaltenen Vektorstrom der schwachen Wechselwirkung durch die sehr sorgfältigen Messungen von Heinze und Soergel am CERN. Von

Gell-Mann und Levy und in größerem Detail von Cabibbo konnte dann gezeigt werden, daß alle damals bekannten schwachen Zerfälle durch eine merkwürdige Mischung von zwei geladenen Strömen mit verschiedenen Quantenzahlen beschrieben werden können.

Die folgenden Jahre von 1964 bis 1976 brachten eine sehr aufregende Zeit. In dieser Epoche entstand das sogenannte Quark-Parton-Bild, das schließlich zum heutigen Standardmodell der elektroschwachen und starken Wechselwirkung führte. Zunächst gab es jedoch viele ungeklärte Fragen. Eine Frage, die auch uns damals sehr beschäftigte, war: Können innere Symmetrien von Teilchen wie die Gell-Mannsche SU(3)-Symmetrie mit dem Teilchenspin, also einer kinematischen Größe, verknüpft werden? Nachdem eine Reihe falscher Arbeiten - glücklicherweise nicht von unserem Institut - dazu erschienen waren, stellte sich heraus, daß dies nur sehr eingeschränkt möglich ist. Einige Resultate blieben jedoch gültig, und eines davon haben Herr Dosch und ich erzielt: Wir konnten zeigen, daß das Verhältnis des magnetischen Formfaktors des Neutrons zum magnetischen Formfaktor des Protons unabhängig vom Impulsübertrag im Symmetrielimens minus  $2/3$  ergeben muß. Eine andere damals oft genug aufgeworfene Frage war: Warum ist das Neutron schwerer als das Proton und das ungeladene K-Meson schwerer als das geladene K-Meson? Merkwürdigerweise ist das Neutron nur ein klein wenig, weniger als 1 MeV, schwerer als das Wasserstoffatom. Wäre dies umgekehrt, so wäre Wasserstoff instabil, und unsere Welt könnte nicht existieren. Die Beschäftigung mit diesem Problem war interessante Physik, eine Erklärung blieb jedoch aus. Auch heute gibt es noch keine Erklärung, das Problem konnte nur auf ein tieferes Niveau verlagert werden. Die entsprechende Frage heißt jetzt: Warum ist die Masse des down-Quarks schwerer als diejenige des up-Quarks?

Eine neue Sensation stellte die experimentelle Entdeckung der Verletzung der CP-Invarianz dar, die auch eine Verletzung der bis dahin als gültig angesehenen Zeitumkehrinvarianz bedeutet. Dieses Resultat besagt, daß nach einer Bewegungsumkehr der ursprüngliche Zustand nicht mehr erreicht wird, jedenfalls nicht bei höchster Präzision der Messung. Der Ursprung dieses besonders interessanten Tatbestandes

ist heute immer noch nicht geklärt. Das moderne Standardmodell kann jedoch über einen vom Experiment festgelegten Parameter die entsprechenden Effekte beschreiben, bisher jedenfalls. Ein Ziel der modernen Forschung ist es, neues Licht in dieses sehr fundamentale Phänomen zu bringen.

In Heidelberg haben wir damals eingehend über die Ströme, die in schwachen Zerfällen gemessen werden, und gleichzeitig Symmetrieströme der starken Wechselwirkung sind, gearbeitet. Herr Gromes und Herr Rothe, die daran mitgewirkt haben, sind heute hier unter meinen Zuhörern. Auch Herr Dahmen, jetzt an der Universität Siegen, hat wichtige Beiträge dazu erbracht. Wir untersuchten die Algebra dieser Ströme und die Möglichkeit ihrer lokalen Saturierung. Von Interesse war auch der Zusammenhang von schwachen Ladungen mit Integralen über Wirkungsquerschnitte von Prozessen der starken Wechselwirkung, also von ganz unterschiedlichen Reaktionen - ein Zusammenhang, der zuerst von Goldberger und Treiman sowie Adler und Weisberger erkannt wurde. Die entsprechenden Beziehungen sind heute leicht mit Hilfe des Quark-Parton-Modells zu verstehen, konnten damals jedoch nur in unsystematischer Weise bearbeitet werden.

Ich komme jetzt auf die Quark-Hypothese zu sprechen und möchte Sie dabei etwas mit den Schwierigkeiten bekanntmachen, mit denen man damals zu kämpfen hatte. Gell-Mann und Zweig vermuteten bereits 1964, daß es vielleicht doch Subteilchen mit merkwürdigen drittzahligen Ladungen gibt, aus denen Protonen,  $\pi$ -Mesonen und all die vielen neuen Hadronen zusammengesetzt sind. Aber auch Gell-Mann war nicht überzeugt, daß diese sogenannten Quarks existieren, sie traten ja im Experiment nicht in Erscheinung. Er deutete sie zwischenzeitlich als hilfreiche mathematische Symbole, mit denen man allerdings gut und sinnvoll umgehen kann. Viele Fragen waren damals offen. Warum findet man diese Teilchen nicht? Sind sie sehr schwer? Was hält sie zusammen? Als Ursachen möglicher Kräfte kamen zunächst nur der Austausch von  $\rho$ -Mesonen,  $\omega$ - und  $\Phi$ -Mesonen in Frage. Diese Quark-Hypothese wurde wegen der bestehenden konzeptionellen Schwierigkeiten nicht allgemein akzeptiert; trotz der Autorität von Gell-Mann. Formfaktormessungen am Proton zeigten allerdings schon

früher, daß das Proton kein Punktteilchen ist, sondern eine endliche Ausdehnung von etwa  $10^{-13}$  cm besitzt. Man sprach damals vielfach von dieser Größe als einer elementaren Länge, die die Größe aller anderen Teilchen festlegen würde. Der Durchbruch kam 1969 von der experimentellen Seite her: Die Analyse der tiefinelastischen Elektron-Proton-Ströme ergab, daß das Proton eine körnige, offenbar von Punktteilchen herrührende innere Struktur besitzt. Das Nukleon besteht daher aus elementaren, viel kleineren Konstituenten, die man Partonen nennt. Eine interessante Frage war dann: Sind Partonen, die Ladung tragen Quarks mit dritzzahligen Ladungen? Anfang der 70er Jahre war es keinesfalls evident, daß die Konstituenten des Protons dritzzahlige Ladungen haben. Es war damals noch möglich, widerspruchsfreie Theorien mit Partonen, die ganzzahlige Ladungen tragen, zu formulieren. Ich selbst hatte zeitweilig spekuliert, daß diese Subteilchen instabile Teilchen mit ganzzahliger Ladung sein könnten, die nur über die starke Bindung im Verband ein stabiles Nukleon bilden. Gell-Mann und andere machten eine noch radikalere Annahme, die schließlich zum Erfolg führte. Sie postulierten, daß die Partonen mit halbzahligem Spin dreifach entartete Quarks darstellen. Diese Quarks tragen daher neben ihrer dritzzahligen Ladung eine neue Quantenzahl, Farbe genannt. Die Wechselwirkung sollte dann nicht von den vorhin genannten Vektorbosonen  $\rho$ ,  $\omega$  und  $\Phi$  bewirkt werden, sondern von neuen hypothetischen Teilchen, den Gluonen, die ebenfalls Farbe tragen, aber genau wie die Quarks verborgen bleiben, also nicht als freie Teilchen auftreten können.

Es war ein großer Schritt in die Abstraktion, der sich jedoch bewährt hat. Er führte zu einer konsistenten Theorie der starken Wechselwirkung, Quantenchromodynamik genannt. Natürlich gab es zunächst Einwände. Ich selbst hatte große Schwierigkeiten zu glauben, daß die Quarks dreifach entartet sind mit exakt gleicher Masse. Bis dahin war keine innere Symmetrie bekannt, die in voller Strenge gültig ist. Die Isospinsymmetrie, die Proton und Neutron verknüpft, ist keine strenge Symmetrie. Die  $SU(3)$ -Symmetrie ist eine noch stärker gebrochene Symmetrie wie auch die chirale Symmetrie. Auch die CP-Symmetrie ist gebrochen. Eine gebrochene Farbsymmetrie schien mir daher wahr-

scheinlicher. 1974 wurden Fragen dieser Art akut. Völlig unerwartet wurde zunächst in Brookhaven und dann auch am SLAC eine sehr scharfe Resonanz bei der hohen Energie von 3,1 GeV entdeckt, das  $J/\psi$ -Teilchen. Zwei Alternativen waren prinzipiell möglich: es konnte sich um einen Zustand aus neuen schweren Quarks handeln, Charm-Quarks genannt, um ein Charm-Anticharm-System. Es konnte sich jedoch auch um eine Farbanregung bekannter Teilchen handeln, sofern die Farbsymmetrie keine strenge Erhaltungsgröße ist. Ich selbst wie auch einige andere Autoren setzte damals auf die Möglichkeit einer Farbanregung. Ich konnte sogar einige experimentelle Resultate richtig vorhersagen, dennoch war es die falsche Theorie. Dies ist ein Beispiel dafür, daß theoretische Überlegungen oftmals mehrere Möglichkeiten offen lassen, und sich der richtige Sachverhalt erst bei weiteren Konsistenzüberlegungen und besserer experimenteller Information herausstellt.

Die Existenz schwerer Mesonen erlaubte zahlreiche Experimente und eröffnete damit die Möglichkeit, die Quark-Hypothese in allen Einzelheiten zu testen. Die Existenz von Quarks wurde zur unumstößlichen Gewißheit. 1975 wurde ein neues Lepton,  $\tau$  genannt, entdeckt, das viel schwerer als die bisher bekannten Leptonen ist. Bald darauf, 1977, beobachtete man auch ein neues schweres Meson, etwa dreimal so schwer wie das  $J/\psi$ -Teilchen. Es konnte als ein Bindungszustand eines schweren b-Quarks mit seinem Antiquark gedeutet werden, wobei b für bottom oder beauty steht.

In der Zwischenzeit hatte sich auch auf dem Gebiet der schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung viel getan. Es war gelungen, eine einheitliche Theorie zu formulieren, die diese beiden Wechselwirkungen zusammenfassend beschreibt. Die schwachen Kräfte werden durch den Austausch von Vektorbosonen erzeugt. Diesmal jedoch nicht durch den Austausch von masselosen Teilchen wie Photonen oder Gluonen, sondern von Teilchen mit hoher Masse, was zu einer Unterdrückung zugehöriger Übergangsraten führt. Glashow hatte bereits 1961 eine Theorie vorgeschlagen, in der 4 Vektorbosonen auftreten. Zwei davon,  $W^+$  und  $W^-$  tragen elektrische Ladung und sind massiv, das  $Z^0$  ist ungeladen und ebenfalls massiv, und das vierte ist



ebenfalls ungeladen, bleibt masselos und muß mit dem Photon identifiziert werden. Dieses Modell blieb weitgehend unbeachtet, da es nicht möglich schien, die zugrundeliegenden Symmetrien zu akzeptieren und gleichzeitig den Vektorbosonen auf eine sinnvolle Weise Massen zu geben. Erst mit der Entdeckung der Möglichkeit von spontanen Symmetriebrechungen konnte bewiesen werden, daß die Vektorbosonen  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  in der Tat massiv werden können, während das Photon masselos bleibt. Die Vereinigung elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung war damit gelungen. Allerdings bleibt auch heute noch die Frage nach dem Ursprung der Massen von Quarks und Leptonen und der Energieskala der schwachen Wechselwirkung offen. Diese Größen sind Parameter der Theorie, die bislang nicht berechnet werden können, sondern aus dem Experiment entnommen werden müssen.

Wie sieht es am Ende dieser Periode der Entdeckungen aus? Wir haben eine wohlfundierte Theorie der starken Wechselwirkungen, die Quantenchromodynamik. Die starken Kräfte sind die von masselosen Gluonen verursachten Farbkräfte. Sie sind so stark, daß Quarks und Gluonen nicht frei auftreten können. Die elektroschwachen Kräfte hingegen werden durch die vorher genannten Vektorbosonen verursacht. Alle Kraftgesetze sind daher bekannt. Dennoch: Der ganze Mechanismus, der zum permanenten confinement der Quarks und Gluonen führt, ist noch nicht ausreichend verstanden. Auch die Struktur des Vakuums der Quantenchromodynamik, eine typische Größe, die nicht mit störungstheoretischen Methoden behandelbar ist, bedarf der weiteren Aufklärung. In der Folgezeit sind hierfür große Anstrengungen unternommen wurden. Ich selbst war und bin der Meinung, daß diese Fragen am ehesten durch experimentelles und theoretisches Studium von Zerfällen leichter und schwerer Quarks einer Erklärung zugeführt werden können. An den Zerfallsprozessen können die nichtstörungstheoretischen Eigenschaften gut beobachtet werden. Zerfallsreaktionen sind außerdem zur Bestimmung der ganz besonders interessanten Quarkmischungsparameter geeignet. Diese auf dem Quark-Niveau definierten Größen können aus experimentell meßbaren Übergangsraten von Hadronen entnommen werden, sofern der Einfluß der Bin-

dungskräfte auf die Quarks gut genug bekannt ist. In den genannten Bereich der schwachen Zerfälle haben meine Mitarbeiter und ich in den vergangenen Jahren viel Arbeit investiert und auch größere Erfolge erzielen können. So konnte zum Beispiel der Zerfallsmechanismus von nichtleptonischen Prozessen, der über viele Jahre rätselhaft blieb, von uns weitgehend aufgeklärt werden.

Nun noch einige Worte zum Stand der Teilchenphysik heute. Viele Vorhersagen des Standardmodells haben heute ihre Bestätigung gefunden. Die schweren Vektorbosonen können heute in großer Zahl erzeugt werden. Sie besitzen die vorhergesagten Eigenschaften, wie sehr genaue Messungen jetzt belegen. Die Dynamik der Wechselwirkungen ist völlig bestimmt durch drei Eichkopplungskonstanten,  $g_1$ ,  $g_2$  und  $g_3$ . Die Konstante  $g_3$  legt die Stärke der Kopplungen der Gluonen an die drei Farbzustände der Quarks fest und gilt universell für alle Quarks.  $g_2$  beschreibt die Stärke der Ankopplung von Quarks und Leptonen an die Vektorbosonen, wobei linkshändige up- und down-Quarks ineinanderübergehen.  $g_1$  ist eine weitere Kopplungsgröße, die zusammen mit  $g_2$  die elektromagnetische Ladung festlegt. Die Elementarteilchen unterscheiden sich allein durch ihre Quantenzahl und Massen. So sind Teilchen mit Farbquantenzahlen Quarks und Teilchen ohne Farbquantenzahlen Leptonen, die daher keine starke Wechselwirkung besitzen und als gewöhnliche freie Teilchen in Erscheinung treten können. Eine Teilchenfamilie, die durch die genannten Kräfte eng miteinander verbunden ist, hat 15 Mitglieder, wobei links- und rechtshändige Teilchen separat gezählt werden: drei linkshändige up-Quarks, drei linkshändige down-Quarks, und ebenso viele rechtshändige Quarks, das links- und rechtshändige Elektron, und ein linkshändiges Neutrino. Eine weitere Familie, mit den Charm-Quarks und seltsamen Quarks als Mitglieder, ist vollständig bekannt. Bei der dritten Familie, die das  $\tau$ -Lepton und die b-Quarks enthält, fehlt noch ein Teilchen, das dem up-Quark entspricht und top-Quark genannt wird. Es ist vermutlich sehr schwer und war wohl aus diesem Grunde bisher noch nicht zu finden. Die Felder dieser Teilchen entsprechen nicht genau den Feldern von Teilchen mit definierter Masse, sondern Mischungen dieser Felder. Die zugehörigen Mischungswinkel sind Para-

meter, deren Werte durch das Standardmodell nicht festgelegt werden. Eine Erweiterung des Standardmodells scheint notwendig.

Vielleicht sollte ich noch sagen, warum das Standardmodell so nützlich und schön ist. Es ist nützlich und schön, weil es einfach ist. Quarks und Leptonen als elementare Bausteine der Materie sind Punktteilchen ohne innere Strukturen. Experimentell ist gesichert, daß ihre Ausdehnung kleiner ist als  $10^{-16}$  cm, d.h. mindestens 100millionenmal kleiner als der Durchmesser eines Atoms. Alle Kräfte folgen aus einem einheitlichen Prinzip, das man Eichsymmetrie nennt. Die Kopplungen sind universell, d.h. sie haben die gleiche Stärke, unabhängig um welche Teilchenfamilie es sich handelt. Mittels der zugrundeliegenden Theorie läßt sich die Energieabhängigkeit der drei Eichkopplungen  $g_1$ ,  $g_2$  und  $g_3$  berechnen. Man findet, daß diese Kopplungen bei einer ungeheuer großen Energie, bei ungefähr  $10^{16}$  GeV, etwa gleich groß werden. Bei dieser Energie werden daher Quarks und Leptonen nicht mehr unterscheidbar sein, d.h. sie sind nur verschiedene Komponenten ein- und desselben Objekts. Geht man von einem solchen Vereinigungspunkt aus und wieder zurück zu heute verfügbaren Energien, so erkennt und versteht man aus dem Verlauf der Kopplungen, warum gerade die Farbwechselwirkung stark und die elektroschwache Wechselwirkung, der eine kleinere Symmetriegruppe zugrundeliegt, schwach ist. Das Zusammenlaufen der Kopplungen bei großen Energien legt eine "Grand Unified Theory" nahe, die große Vereinigung der Kräfte, mit der wir uns auch in Heidelberg sehr beschäftigt haben.

Mit Herrn Achiman habe ich sehr eingehend über die exzeptionelle Gruppe  $E_6$  als mögliche Vereinigungsgruppe gearbeitet. Sie könnte durchaus eine wichtige Rolle spielen. Eine gesicherte und allgemein akzeptierte Erweiterung des Standardmodells ist jedoch noch nicht gelungen. Insgesamt läßt sich aber schon jetzt sagen, daß die ungeheure Vielfalt der Naturerscheinungen offenbar auf nur wenigen sehr elementaren Prinzipien beruht. Natürlich treten in diesem Stadium neue Fragen auf, darunter auch sehr interessante Fragen, die man früher gar nicht stellen konnte, Fragen zum Beispiel nach dem Ursprung und der Auszeichnung der Eichgruppen. Warum betrifft die schwache Wech-

selwirkung nur die linkshändigen Felder? Anders ausgedrückt: Warum ist der liebe Gott ein Linkshänder? Auch Fragen nach den Teilchenfamilien können nun gestellt werden. Warum gibt es mehrere Familien und warum gerade drei? Man könnte sich genauso gut eine Welt mit nur einer Teilchenfamilie vorstellen. Auch der Ursprung aller Massen und der Quarkmischungswinkel, von denen ich vorhin sprach, ist noch ungeklärt. Selbst im Rahmen des Standardmodells ergeben sich noch zahlreiche Fragen und ungelöste Probleme: Ich habe über den skalaren Sektor, über ein zugehöriges skalares Teilchen, das Higgs-Meson, bisher nicht gesprochen. Dieser skalare Sektor steht in engem Zusammenhang mit den Teilchenmassen und möglichen Phasenübergängen. Weitere Fragen beziehen sich auf die nicht störungstheoretischen Eigenschaften des Modells und erweiterter Modelle. Können diese nicht störungstheoretischen Eigenschaften bei hohen Energien eine wichtige Rolle spielen und Erhaltungssätze wie Baryonenzahlerhaltung merklich verletzen? Es gibt auch Gründe anzunehmen, daß bei höheren Energien neue Teilchen auftreten, z.B. supersymmetrische Partner zu allen bekannten Teilchen. Auch nach magnetischen Monopolen, wie vor vielen Jahren von Dirac vorausgesagt, wird gesucht. Ich konnte in meinem Vortrag leider nicht darauf eingehen, daß es aufgrund der Entwicklung der Teilchenphysik der letzten Jahre eine immer enger werdende Zusammenarbeit zwischen Teilchenphysikern und Astrophysikern gibt. Insbesondere können nun auch kosmologische Probleme aufgegriffen werden. Man kann fragen, welche Voraussagen das Standardmodell bei hohen Temperaturen, wie sie in der Anfangsphase des Universums vorlagen, machen kann. Erklärt dieses Modell oder erweiterte Modelle die Baryonenasymmetrie im Weltall, also die Tatsache, daß die Baryonenzahl nicht Null ist? Diese Baryonenzahl ist zwar sehr klein, nur  $10^{-10}$  mal der Zahl der Photonen, aber wir verdanken ihr unsere Existenz. Wenn beim Urknall Teilchen und Antiteilchen in gleicher Zahl entstanden sind, so können nur CP-verletzende Prozesse im Verlauf der Abkühlung des Weltalls zu dieser Asymmetrie führen. Auch die Frage nach einer vollständigen Vereinigung aller Wechselwirkungen, die die Gravitation miteinschließt, ist heute ein Thema zahlreicher Untersuchungen. Sehr fundamentale Fra-

gen nach dem Ursprung der inneren Symmetrien, den Ladungen, den Farb- und Flavourquantenzahlen und selbst nach der Anzahl der Dimensionen von Raum und Zeit werden hierbei berührt.

Lassen Sie mich jetzt zum Schluß kommen. Ich habe an meinem Beruf sehr viel Freude gehabt. In der Teilchenphysik gab und gibt es immer etwas Neues und Aufregendes. Gelingweilt habe ich mich nie. Wohl aber bin ich oft mit hängender Zunge einer Sache nachgerannt. Aber auch wenn man, wie es uns Theoretikern häufig ergeht, nach mühsamen Rechnungen feststellt, daß die Natur es ganz anders eingerichtet hat, so hat man doch stets etwas dabei gelernt. Sehr wohl gefühlt habe ich mich in der einmaligen und großartigen wissenschaftlichen und menschlichen Atmosphäre in der Heidelberger Physik, die Bothe und Jensen geschaffen haben. Von Jensen habe ich viel mehr als nur Physik gelernt: Er war ein großartiger Mensch mit klarem Urteil, Kenntnissen in vielen Lebensbereichen und viel Herz. Als ich einmal unschlüssig war, ob ich einen Ruf nach auswärts annehmen sollte und meinte, es täte mir vielleicht gut, die Universität zu wechseln, fand ich am nächsten Tag einen Zettel auf meinem Schreibtisch, den ich Ihnen noch vorlesen möchte: "Epistel des Paulus an die Hebräer, Kapitel 13, Vers 17: 'Höret auf Eure Lehrer und folget ihnen; denn sie wachen über Eure Seelen, als die da Rechenschaft dafür geben sollen; auf daß sie das mit Freuden tun und nicht mit Seufzen; denn das ist euch nicht gut.' Er meinte natürlich, ich sollte in Heidelberg bleiben. Ich habe auf ihn gehört und es nicht bereut. Manchmal soll man eben doch auf einen weisen Mann hören.

Haxel, Kopfermann, Brix, Schmelzer und ihre Nachfolger bewahrten das gute menschliche Klima in Heidelberg. Neben der Forschung hat mir auch die Lehre Freude gemacht, mehr als die Vorlesungen die Zusammenarbeit und die Diskussionen mit Studenten an der Tafel oder vor einem Stück Papier. Ich bin dem Schicksal dankbar, daß ich ungeheuer faszinierende Entwicklungen in der Physik erleben und selbst aktiv daran teilnehmen durfte. Ich wünsche der jüngeren Generation einen ebenso anregenden und interessanten Beruf in einer friedlichen Zeit.

Zum Schluß möchte ich meinen Kollegen in der Physik herzlich für ihre Freundschaft danken und natürlich auch meiner Frau, die mir in vielen Jahren viele Steine aus dem Weg geräumt hat.