

Bogdan Povh



# Bogdan Povh

Bogdan Povh wurde 1932 in Belgrad geboren, seine Familie zog drei Jahre später nach Ljubljana in Slovenien. An der Universität von Ljubljana erhielt er 1955 das Diplom in Physik. Nach einer Assistentenzeit am J. Stefan Institut ging er 1957 als research fellow an das California Institute of Technology in Pasadena, USA, und arbeitete dort an der Spektroskopie leichter Kerne. Nach einem halben Jahr an der Universität Freiburg, wo er die Delbrück Streuung untersuchte, ging er zurück nach Ljubljana und promovierte dort 1962 zum Thema des nuklearen Photoeffekts und des Strahlungseinfangs von Protonen in leichten Kernen. Eine zweijährigen Assistentenzeit in Freiburg wurde 1964 mit der Habilitation abgeschlossen. Im Jahre 1965 folgte der Ruf an die Universität Heidelberg. Dort arbeitete er vor allem auf dem Gebiet der Hochenergie-Kernphysik, und unterhielt eine ständige Arbeitsgruppe am CERN in Genf. Ab 1975 war er Direktor am Heidelberger Max Planck Institut für Kernphysik. Seine Arbeiten zur Spektroskopie der Hyperkerne und zur rückstoßfreien Produktion von Hyperonen erregten großes Aufsehen und wurden 2005 mit der Stern-Gerlach Medaille gewürdigt. Nach Jahren als Herausgeber der Zeitschrift für Physik A, später European Physical Journal A, und vielen Arbeitsaufenthalten und Sabbaticals am CERN, Los Alamos und Berkeley, wurde er 2000 emeritiert. Seither schrieb er viele erfolgreiche und bei den Studenten beliebte Bücher, die schwierige Physik anhand anschaulicher Prinzipien entwickeln



*Bogdan Povh*

## **Von dem kleinen Van de Graaf zu der großen HERA**

Vor dreiundvierzig Jahren habe ich das erste Mal in diesem Hörsaal geredet. Es ist anscheinend gut gelaufen, ich bin danach nach Heidelberg berufen worden. Später habe ich hier Physik eins, zwei und Jahre lang Physik sechs gelesen. Heute ist wahrscheinlich mein letzter Auftritt hier.

Sie haben, Herr Schultz-Coulon, meinen Geburtsort, Belgrad angesprochen. Meine Eltern waren Triestiner. Nach dem ersten Weltkrieg im Jahre 1918, Italien hat den Krieg gewonnen, und als Belohnung bekamen sie Triest mit der slowenischen Umgebung zugeteilt. Die Italienisierung hat sich mit Mussolini Ende der 20er Jahre sehr intensiviert, und meine Eltern sind nach Jugoslawien, nach Belgrad emigriert. Die slowenischen Emigranten wurden von den Serben sehr herzlich aufgenommen und die meisten haben sich dort integriert. Durch meine Geburt in Belgrad und wahrscheinlich auch durch die Professur in Heidelberg werde ich dort als in Belgrad geborene Persönlichkeit geführt. In Jahre 1936 ist mein Vater Direktor des slowenischen Zweigs einer großen jugoslawischen Investitionsbank geworden und wir sind nach Ljubljana gezogen.

Nach dem Abitur 1950 fiel mir die Entscheidung Physik zu studieren leicht. Physik und Mathematik waren meine Lieblingsfächer im Gymnasium, dazu habe ich geglaubt, dass man als Physiker nicht viel mit Menschen oder sogar mit Politik zu tun haben wird. Dieser Respekt vor Menschen und der Politik war die Folge meiner Erfahrungen während des Krieges wie auch nach dem Krieg.

Ende der 50er Jahre hat in Ljubljana Professor Anton Peterlin das Studium der Physik modernisiert. Das Studium war nicht ausschließlich der Ausbildung der Lehrer, sondern der Forschung und Technik gewidmet. Peterlin hatte 1938 an der Humboldt Universität promoviert und wurde anschließend an der Universität in Ljubljana zum Professor ernannt. Im Jahre 1953 wurde das Forschungsinstitut "Institut Josef Stefan", das Peterlin gegründet hat, fertig gestellt. Auch der Vater von Peterlin war Physiker, er studierte bei Josef Stefan in Wien.



**Abb. 1.** Professor Anton Peterlin.

Josef Stefan war ein kärntener Slowene, und Peterlin hat seinen Namen für das Institut gewählt. Peterlin hat alle wichtigen Vorlesungen selbst gehalten, mit Erfolg seine Forschung in der Makromolekülphysik betrieben, und als Direktor das neue Institut geführt. Den Zugang zu der Physik habe ich von Peterlin gelernt.

Im Jahre 1957 habe ich vom Institut ein Einjahresstipendium für die USA bekommen. Die Bewilligung des Stipendiums musste noch die jugoslawische Atomkommission geben, was sich als sehr

schwierig erwies. Peterlin hat es doch erreicht. Ich durfte in die USA, für damalige Zeiten üblich, ohne meine Frau.

Ich hatte Glück, mein Betreuer Črt Zupančič, international schon sehr bekannt, hat Tommy Lauritsen, Professor aus Caltech in Kopenhagen, kennengelernt. Mit seiner Empfehlung wurde ich als Gast in Caltech angenommen. Zupančič hat während seines Forschungsaufenthalts in Kopenhagen mit einem dänischen Kollegen die erste Messung der Coulombanregung eines deformierten Kerns durchgeführt. Die Coulombanregung wurde eine wichtige Methode der Kernspektroskopie. Später ist Zupančič als Professor an der LMU in München gelandet.

Bevor ich nach Caltech kam, wusste ich nicht, dass Caltech zu einer der zehn weltbesten Universitäten zählt. Nachdem ich erfahren habe, wer alles beim Caltech war, habe ich es verstanden. Da war Linus Pauling, mit zwei Nobelpreisen. Zweimal im Jahr durfte er seinen Talar tragen, der so vielfarbig war wie sonst keiner. Man hat mich belehrt, die Zahl der Farben hängt nicht nur von der Zahl der Nobelpreise ab, sondern auch, ob man sich mit anderen den Preis teilen müsse. Pauling hat beide Preise alleine bekommen. Dann war da noch Carl David Anderson, Entdecker des Positrons. Er saß in seinem Office ziemlich einsam, er hatte noch nicht verkraftet, dass ihm Millikan nicht geglaubt hat, dass er die Magnete richtig gepolt hatte. Millikan, der Gründer des Caltech, und schon Nobelpreisträger, er hat die elementare Ladung entdeckt und bestimmt, glaubte, dass Anderson nur ein Elektron und nicht ein Positron in seiner Wilsonkammer gesehen hatte. Anderson beharrte auf seiner Behauptung und bekam mit Recht den Nobelpreis. Dann waren noch viele, die den Preis noch nicht bekommen hatten. In der Physik vor allen Richard Feynman, Murray Gell-Mann, William Fowler und mein Office Nachbar und Feynmans Doktorand Ken Wilson. Ken hat sich schon damals für die starke Wechselwirkung interessiert und die Feynman Diagramme zu höheren Ordnungen gerechnet. Den Nobelpreis hat er für die Anwendung der in Heidelberg als Wegner-Wilson-Loops bekannte Methode in der starken Wechselwirkung bekommen.

Dann war noch in der Biologie Max Delbrueck, er hat mit Volker Soergel musiziert und versucht, seine Expertise als Physiker in der Biologie anzuwenden. Mit Erfolg, 1969 bekam er den Nobelpreis für Physiologie.

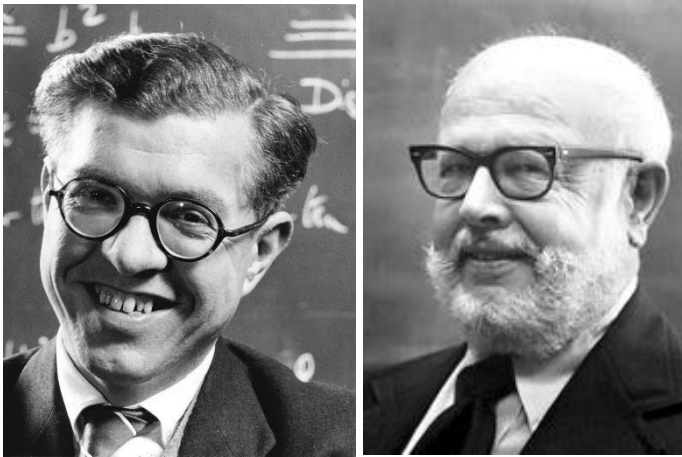
Aus heutiger Sicht muss man Fritz Zwicky erwähnen, einen genialen Astronom, in menschlichem Umgang als ein Ekel bekannt, der schon 1931 die dunkle Materie entdeckt hat. Aus der Bewegung der benachbarten Galaxien hat er die Existenz der dunklen Materie geschlossen. Es hat mehr als ein halbes Jahrhundert gedauert, bis ihre Existenz auch von Physikern ernst genommen wurde.

Ich war in Caltech als Gast des Kellogg Radiation Laboratory. Der damalige Name kam von dem Sponsor, dem berühmten Cereal-Produzenten, Kellogg Company. Der Gründer des Labors, das der Strahlungsphysik und Therapie gewidmet war, war Charly Lauritson, Vater von Tommy Lauritson. Der erste Beschleuniger des Labors zur Erzeugung von Röntgenstrahlen war ein elektrostatischer Elektronenbeschleuniger von 1 MV. In den dreißiger Jahren galten die Röntgenstrahlen noch als gesund, und der Beschleuniger diente als eine Art von Solarium für ultraharte UV Strahlung. Zwanzig Jahre später, als ich nach Caltech kam, durfte man den Beschleuniger nicht mal einschalten, so gefährlich war sie inzwischen geworden.

William Fowler war der Chef des Kellogg Radiation Laboratory. Das Sabbatjahr 1954/55 hat Fowler in Cambridge mit Fred Hoyle verbracht. Hoyle hat ihn überredet, seine Forschung der Kernphysik den Sternen zu widmen. Hoyle hat schon 1947 einen Vorschlag gemacht, die Sternentwicklung mit Hilfe von Kernreaktionen, Plasmaphysik und Beobachtungen zusammen zu betrachten und so das Problem zu lösen. Die Schlüsselfrage jeder Kosmologie ist die Frage, wie entstehen die Elemente schwerer als Helium. Im Big-Bang-Modell gab es nicht genug Zeit um Elemente schwerer als Helium zu produzieren, im Steady-State-Modell werden Wasserstoffatome spontan geboren. Die Wasserstoffverbrennung in Sternen, die zum Helium führt, war schon in den



dreißiger Jahren theoretisch gelöst. Mit Wasserstoffverbrennung kommt man allerdings nicht weiter als bis Helium. Schuld daran sind die zwei Lücken in den stabilen Kernen mit fünf und acht Nukleonen. Die Rettung kommt von der Drei-Alpha Fusion, vorausgesetzt es existiert der geeignete Zustand im Kohlenstoff. Ohne diesen Zustand würde man noch etliche Milliarden Jahre warten müssen bis die Sonne und die Erde entstehen könnten. Und dieser Zustand ist bei genau der richtigen Energie in Kellogg gefunden worden. Schon 1957 wurde der zusammenfassende Artikel zur Entstehung der Elemente in Sternen von Hoyle, Burbidge und Fowler veröffentlicht.



**Abb. 2.** Fred Hoyle und William Fowler, mit Bart nach dem Nobelpreis.

Im Jahre 1964 wurde die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckt, und die Hoylesche Steady State Kosmologie musste dem Urknallmodell weichen. Aber die Elementsynthese fügt sich exzellent an die primordiale Nuklearsynthese, die eine Mikrosekunde nach dem Urknall stattgefunden haben sollte. Nur Fowler

bekam den Nobelpreis im Jahre 1983 für die gesamte Arbeit. Wir Experimentalphysiker glauben, dass das Nobelkomitee im Allgemeinen die Theoretiker mit Preisen bevorzugt. In diesem Fall war die Hoyle'sche Leistung für den Erfolg wesentlich. Warum er keinen Nobelpreis bekommen hat, werden wir erst im Jahre 2033 erfahren, wenn die Unterlagen des Nobelkomitees freigegeben werden.

Als ich meinem Betreuer Charly Barnes angedeutet habe, dass ich gerne noch ein weiteres Jahr bliebe, hat er mir verraten, dass es kein Problem gäbe, wenn ich das täte, was Willy sagt. So habe ich für Sterne wichtige Reaktionen in leichten Kernen gemessen. Keine besonders aufregende Arbeit, aber die Daten konnte ich später für meine Dissertation benutzen. Hunderte von Doktoranden in vielen Van de Graaf Labors haben ähnliche Daten gesammelt. Diese Daten haben sich als außerordentlich nützlich erwiesen. John Bachall konnte mit diesen Daten das Sonnenneutrino Spektrum ausrechnen und den Fluss absolut angeben. Ray Davis hat gezeigt, dass nur ein Drittel der Sonnenneutrinos die Erde erreicht. Das war der erste experimentelle Nachweis der Neutrinooszillationen. Die erste Bestätigung dieser Messung kam vom Gallium Experiment im Gran Sasso, das unter der Federführung des MPI durchgeführt wurde.

Kellogg besaß drei elektrostatische Beschleuniger, 600 KV, 2 MV (ging nur bis 1,8 MV) und einen 5 MV, der bei guter Laune bis 3 MV ging. Ich durfte nur den kleinsten und den größten benutzen. Der 2 MV Beschleuniger wurde nur von den Professoren benutzt.

Das berühmte Experiment, die Entdeckung des drei-Alpha Zustands in Kohlenstoff 12, fand vor meinem Aufenthalt in Kellogg statt. Aber 1958 konnte ich die Professoren beim Experimentieren beobachten. Feynman und Gell-Mann haben eine Messung vorgeschlagen, mit der man entscheiden soll, ob der Betazerfall über die skalare, pseudoskalare, Vektor- oder Axialvektor-Kopplung stattfindet. Man entschied sich für den bekannten Lithium-8 Zerfall und der Messung der Korrelationen zwischen nachfolgenden

Alphateilchen. Der jüngste, noch nicht ganz Professor, sorgte für die Elektronik, der zweitjüngste, mein Betreuer Charlie Barnes, hat den Beschleuniger betrieben, Charlie Lauritsen hat seinen Beitrag schon geleistet, er hat den Targethalter gefertigt, und Willi Fowler hat für das Vakuum gesorgt. Er war der am meisten beschäftigte, wenn sich das Vakuum verschlechtert hat, hat er mit einem Pinsel Schellack aus einer großen Büchse geholt und den Targethalter gepinselt. Nach dem Experiment hat man den Targethalter auseinander genommen und den Grund für das schlechte Vakuum gefunden. Die Professoren hatten vergessen den O-Ring einzusetzen, und Willi musste ihn mit Schellack ersetzen. Feynman und Gell-Mann kamen und haben sich entschuldigt. Sie hatten übersehen, dass man aus dem Zerfall des 2-plus Zustands von Beryllium-8 keine Aussage über die Kopplung im Betazerfall machen kann.

Fast gleichzeitig mit mir kam Volker Soergel, damals aus Freiburg, zum Kellogg. Er hat die Wahl seines Experimentierens erst mit Bertold Stech, schon damals aus Heidelberg, besprochen. Stech hat ihm gesagt, die Zukunft der Physik stecke in der schwachen Wechselwirkung. Wie recht hat Stech gehabt, damals gab es noch keine Quarks und man wusste noch nicht, dass mit der schwachen Wechselwirkung die neue Quarkspektroskopie entstehen wird. Jedenfalls, damals war der Betazerfall die wichtigste Manifestation der schwachen Wechselwirkung. Felix Boehm und Stech von den benachbarten Laboren und Soergel wollten den Betazerfall von Fluor 20 untersuchen. Boehm hat mit Fowler ausgehandelt, dass sie für die Erzeugung des kurzlebigen Fluor-20 die Professorenmaschine benutzen durften. Soergel war für den Betrieb der Maschine zuständig. Die Maschine hat ein Potentiometer mit dem man sie langsam zu der richtigen Spannung gebracht hat. Da die Lebensdauer von Fluor-20 etwa 20 Sekunden beträgt, hat Soergel einen Schalter eingebaut, mit dem die Maschine von Null zur vollen Spannung und wieder zu Null geschaltet wurde. Viel schlimmer, er hat auch das Terminal umgebaut, so dass die Maschine ruhig lief, man brauchte das

Potentiometer nicht mehr. Nächsten Morgen erfuhr Fowler von den Änderungen. Ich habe Fowler nie so böse gesehen, er war sonst ein sehr gutmütiger Mensch. Die Änderungen von Soergel sind nie wieder rückgängig gemacht worden.

Im Wintersemester 1958/59 hat Gell-Mann eine hervorragende Vorlesung über die Feldtheorie gehalten. In der ersten Hälfte der zweistündigen Vorlesung hat er über das physikalische Problem, dass er lösen will, geredet. In der zweiten Hälfte kam die Umsetzung des Problems in die formale mathematische Form. Die Vorlesung fand vier Jahre vor den Quarkpapers statt, so war schon voll von Strangeness. Das erste Mal habe ich auch von der Existenz der Hyperkerne erfahren. Gell-Mann hat sich sehr lobend über Piniewski und Danish, die beiden Entdecker der Hyperkerne, geäußert.

Caltech lag gesellschaftlich isoliert. Nicht nur das, Caltech war eine exklusive Männeruniversität. Deswegen hat sich das soziale Leben innerhalb des Campus entwickelt. Vermutlich wollte man verhindern, dass sich die Studenten mit Mädchen treffen.

Das Kelloggseminar fand freitags abends um 19 Uhr, nach dem Dinner, statt. Nach dem Seminar wurden wir von einem der Professoren zur Party eingeladen. Vor meinem Abschied vom Kellogg, spät in 1959, hatte ich beim letzten Seminar die Ehre, mit den Professoren in der ersten Reihe zu sitzen.

Nicht nur Kellogg Partys, auch die Partys der gesamten Physik gab es regelmäßig. Feynman erschien mit seiner Trommel und hat erwartet, dass wir uns um ihn versammeln und ihn bewundern. Einmal als wir es nicht so getan haben, hat er die Party sofort verlassen.



**Abb. 3.** Von links der Theoretiker Kristie, mit der Pfeife mein Betreuer Charlie Barnes, ich, Charlie Lauritson, Willy Fowler noch ohne Bart, Tommy Lauritson und Kavanagh.

Mitte 1959 hat man in Ljubljana Peterlin als Direktor des Josef Stefan Instituts abgesetzt. Sein Nachfolger war ein Betriebsingenieur ohne jedes Gefühl für das Leben in einem Forschungsinstitut. Seine fachliche Inkompetenz versuchte er mit Repression zu kompensieren. Er schrieb dem Präsidenten von Caltech, dass er mich nach Hause schickt. Deswegen habe ich die Einladung von Soergel angenommen und meinen Aufenthalt im Ausland für sechs Monate in Freiburg verlängert. Nach der Rückkehr in Ljubljana hatte ich mit dem neuem Direktor Probleme so, dass ich nicht richtig arbeiten konnte. Im Jahre 1962 sind meine Frau und ich endgültig nach Deutschland emigriert. Professor Theodor Schmidt hatte mich schon bei meinem ersten Besuch in Freiburg eingeladen wieder zu kommen. Das habe ich auch getan.

In Freiburg gab es einen 5 MV Van de Graaff, der sehr gut geeignet war um Spektroskopie von leichten und mittelschweren

Kernen zu machen. Nach 20 Jahren gegenseitiger Bekämpfung, auf einer Seite der Anhänger des Einteilchenmodells und der Anhänger des Kollektivmodells der Kerne, hat man sich bemüht die beiden Modelle zu vereinheitlichen.



**Abb. 4.** Theodor Schmidt in Freiburgzeit.

Theodor Schmidt hat schon im Jahr 1937 das Einteilchenmodell glaubhaft präsentiert. Er hat gezeigt, dass die magnetischen Eigenschaften der Grundzustände der Kerne verstanden werden können, wenn man annimmt, dass ein ungerader Kern aus einem Rumpf mit dem Drehimpuls Null und einem Nukleon in einer Bahn mit definierten Drehimpuls besteht. Schmidt ist mit seinem Modell zu dem damaligen Papst der Kernphysiker, Niels Bohr, gegangen und hat ihm das Modell erklärt. Bohr war vehement dagegen. Das passte nicht zu seinem Modell des Compoundkerns. Schmidt hat trotz der Kritik von Bohr sein Modell publiziert. Um Bohr teilweise zu befriedigen, hat er den Rumpf, um den das ungerade Nukleon kreist, zu einer Art Compoundkern gemacht. Schmidt hat die damalige experimentelle Methode der Hyperfeinstrukturaufspaltung sehr gut beherrscht, er hat auch die großen Quadrupolmomente entdeckt. Dies war die experimentelle

Grundlage des Einteilchenmodells, sowie auch des kollektiven Modells des Kerns. Später in Heidelberg haben Peter Brix und ich Theodor Schmidt für die Verleihung des Ehrendoktors vorgeschlagen. Wir waren der Meinung, dass gerade die Heidelberger Universität, bei der Hans Jensen den Nobelpreis für das Schalenmodell bekommen hat, Schmidt für die ersten experimentellen Evidenzen des Einteilchenmodells die Anerkennung schuldet.

Im Jahre 1965 habe ich das Angebot, nach Heidelberg zu kommen, dem Angebot in Freiburg zu bleiben den Vorzug gegeben. In Heidelberg waren damals in der Kernphysik Jensen, Haxel, und Gentner. Alle drei sehr einflussreiche Herren. In Freiburg eine Konkurrenz zu Heidelberg in der Kernphysik zu machen wäre auch für einen wesentlich geschickteren als mich schwierig. Zusätzlich war ich in Heidelberg zusammen mit Heintze und Soergel im selben Institut und konnte auf ihre Unterstützung zählen.

Heintze und Soergel hatten schon lange am CERN gearbeitet. Ich habe mich an Gell-Mann und sein Lob für die Entdeckung der Hyperkerne erinnert. Die Hyperkerne waren die Domäne der Emulsionsphysiker mit sehr beschränkten Möglichkeiten. Man konnte nur die Grundzustände einiger weniger Hyperkerne untersuchen. Mit den Zählerexperimenten könnte man auch die angeregten Zustände der Hyperkerne studieren. Ich habe 1968 einen Letter of Intent an Professor P. Preiswerk, den EP-Division Leader beim CERN geschrieben. Als ersten Versuch, die angeregten Zustände zu sehen, habe ich den Nachweis mit den Gamma Übergängen vorgeschlagen. Als ich meinen Vorschlag vorgetragen habe, hatte ich das Gefühl, dass Preiswerk eher geschlafen als zugehört hatte. Etwa ein Jahr lang habe ich keine Reaktion von ihm bekommen, dann habe ich mich bei Wolfgang Gentner über Preiswerk beschwert. Ich wusste, dass sich die beiden gut kennen. Bald danach hat mich Preiswerk in sein Büro eingeladen und mich über die damalige CERN Wissenschaftspolitik aufgeklärt. Er hat mir gesagt: "Jeder kann zum CERN kommen und irgendeinen Vorschlag machen. Aber die Physik am CERN ist hart. Die Leute,

die hier arbeiten wollen, müssen das Durchhaltevermögen besitzen, sonst geht es nicht. Und es ist erstmals sowieso, dass die meisten Leute nach einem Jahr nicht mehr wiederkommen, und ihre Vorschläge erledigen sich von selbst. Und zweitens weiß man nicht, ob die vorgeschlagene Physik gut ist oder nicht. In einem Jahr kann sich jeder noch mal selbst überlegen, ob er noch an seine Physik glaubt oder nicht, und noch mal die Zahlen des Vorschlags überprüfen."

Jedenfalls, nach diesem Jahr kam es, ich glaube im Wesentlichen durch Nachwirkung von Soergel, zu einer Bewilligung dieses Experiments. Und hier hat mich die Realitätsbetrachtung von Preiswerk eingeholt. Um ein Experiment beim CERN zu machen, muss man eine Gruppe und Geld haben. Ich habe mit Erfolg Uli Lynen, einen exzellenten Physiker und geschickten Experimentalisten vom Max-Planck-Institut für Kernphysik für das Experiment gewonnen. Dazu kamen noch Andreas Bamberger und Martin Faessler, frisch promovierte Physiker. Selbstverständlich sind sie alle später Professoren geworden, in Frankfurt, Freiburg und München.

Das Experiment war zwar formal bewilligt, aber eine Strahlführung war nicht vorhanden. Die Idee des Experiments war, dass man in einem Target Kaonen stoppt und Hyperkerne produziert. Die K-Pi Reaktion am Nukleon macht Lambdateilchen. Einige von diesen Lambdas werden in den angeregten Zuständen der Hyperkerne stecken bleiben und durch Gammaemission zerfallen. Die einzige Möglichkeit damals, die Gammas aus einem solchen Zustand in einer Umgebung von hochenergetischen Strahlen zu messen, war mit gestoppten Kaonen. Deswegen brauchte man einen niederenergetischen K-Strahl, mit 500 MeV/c, das ist ein ziemlich langsamer K-Strahl. Weil die Kaonen schnell zerfallen, musste der Strahl sehr kurz sein. Was wir gebaut haben, war wahrscheinlich der kürzeste Kaonstrahl, der je gebaut wurde, er wurde 10 Meter kurz.

Aber da musste man erstmals einen Ort finden, wo man ein Produktionstarget bekommt. Dann kam der Vorschlag, dass wir



von einem Target eines schon bestehenden Strahls die Kaonen und Pionen abzupfen. Das war ein 6 cm langes Protontarget für ein nachfolgendes Experiment, und wir sollten ihn auch für Kaonen benutzen. Üblicherweise liegen die sekundären Strahlen in der gleichen Ebene wie der Produktionsstrahl. Das ging aber nicht, man konnte nicht eine ausreichende Abschirmung für die Umgebung bauen. Die Lösung war, die Kaonen nach oben, unter 30 Grad abzuzapfen. Mit zweien Magneten konnte man den Kaonstrahl dann in der ersten Etage wieder parallel zum Boden führen.

Dann kam die Frage, wie man in diesen Strahlen Kaonen und Pionen voneinander trennt, wo doch die Pionen bei diesen Energien jeweils mehr als 100 mal häufiger sind als die Kaonen. Es gab auch keine freien Separatoren, aber auch Separatoren würden nichts nutzen. Mit einem richtigen Separator wäre der Strahl zu lang und es gäbe keine Kaonen mehr zu stoppen. Soergel erzählte, dass Gregory, der in dieser Zeit der Direktor war, vorschlug, dass wir die Teilchen über den Unterschied in der Stoppingpower separieren. Wenn Sie 500 MeV Pionen und Kaonen nehmen und durch einen Absorber schicken, verlieren die Kaonen mehr Energie als die Pionen, und wenn sie das nachher analysieren, dann werden viel mehr Kaonen mit kleiner Energie da sein, und dann können sie die Pionen aus dem Strahl ablenken.

Wir sind auf diesen Vorschlag eingegangen, und Petrucci, ein Physiker aus Rom, hat uns sehr geholfen und einen von diesen exotischen Strahlen gebaut. Er hatte auch etwas Geld, und hat auch spezielle Elemente, kurze Quadrupol-Linsen bauen lassen, die in den Strahl eingebaut wurden (Abb. 5). Zwischen den Ablenkmagneten war der Separator, ein mit Glyzerin gefülltes Rohr. Der zweite Magnet diente sowohl der Ablenkung wie auch für der Separation. Besonders stolz waren wir auf den selbstgebauten Beamstopper. Jeder Strahl im CERN musste einen Beamstopper haben, schon damals. Aber die Standardstopper wären zu lang für unseren Strahl. Beim Ausgang des Strahls haben wir ein 50 Zentimeter wasserdichtes Rohr gehabt, das wir mit

Wasser füllen konnten. Die technische Ausführung war auf der langjährigen Erfahrung der Toilettenbauer gemacht. Das Wasser wurde von einem hochliegenden Reservoir geführt, so wie in den alten Toiletten. Nach oben wurde es durch eine Pumpe gefördert wie in den modernen Flugzeugtoiletten. Auf die Schnur, mit der man das Wasser runter lässt, so wie man das in den alten Toiletten getan hat, haben wir verzichtet und sie durch einen modernen Knopf ersetzt.

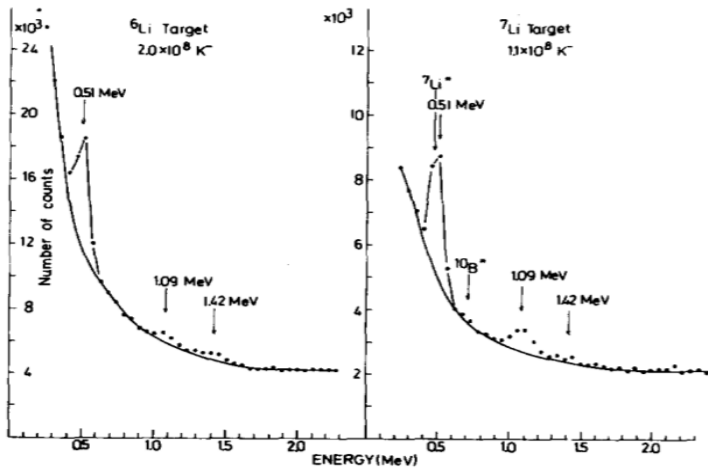


**Abb. 5.** Der 10 Meter kurze Kaonstrahl, aufgebaut auf einer 30 Grad schiefen Ebene.

Der Aufbau des Experiments war sehr einfach, fast so wie bei den Experimenten an Van der Waals Beschleunigern. Die Gammas wurden in NaJ-Zählern aufgenommen in Koinzidenz mit Pionen, die in Plastikzählern registriert wurden.

Das sind die zwei Peaks in Abb. 6, zwei Gammalinien, und, das können Sie glauben, die Energien, die wir damals gefunden haben, sind noch immer gültig, es gibt keine bessere Messung. Das liegt daran, dass diese Gammas zwar heute mit hochauflösenden Germaniumzählern gemessen werden, aber der Rückstoß ist so

groß, dass sie durch den Dopplereffekt verschmiert sind, und deswegen waren Natriumjodid damals keine schlechten Detektoren, um das nachzuweisen. Und was ist jetzt das Resultat dieser Messung? Wir haben alle Zustände der Hyperkernen in der S-Schale gefunden, und damit kann man die normale Wechselwirkung Nukleon-Nukleon und Lambda-Nukleon testen, das hier sind die Rechnungen dazu.

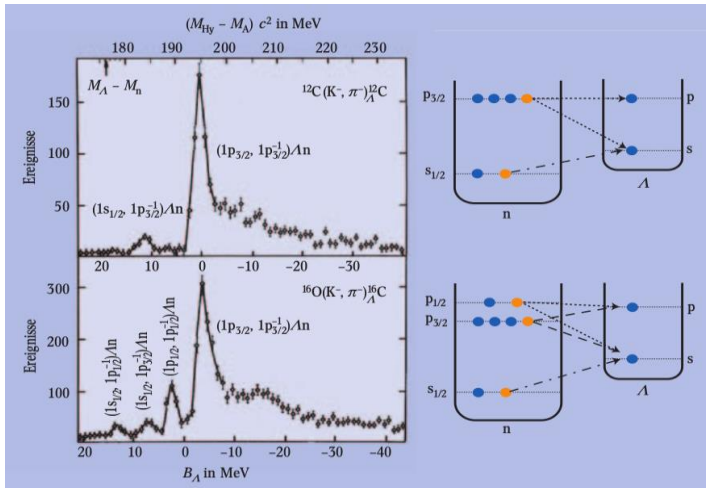


**Abb. 6.** Die ersten Gammaübergänge beobachtet in Hyperkernen, in Lambda-Helium-4 und Lambda-Tritium-4.

Auf dieselbe Weise hat man auch das Lambda-Helium-5 gerechnet, findet es aber um 2 MeV tiefer gebunden als im Experiment gemessen. Eigentlich ist das Problem noch nicht gelöst. Offensichtlich fehlt etwas bei Lambda-Nukleon Wechselwirkung. Das Lambda in He-4 unterliegt nicht dem Pauli Prinzip, weder als Baryon noch als Quarkverbund.

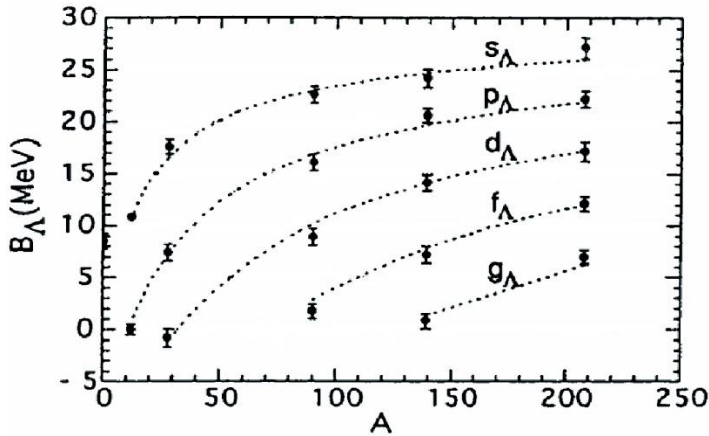
Mit diesen ersten Messungen der angeregten Lambda-Helium-4 und Lambda-Tritium-4 ist die romantische Phase der Spektroskopie der Hyperkerne abgeschlossen. Mit diesem ersten

Experiment haben wir gezeigt, dass die Spektroskopie der Hyperkerne möglich ist, die folgenden Experimente mussten richtig im Detail ausgearbeitet werden.



**Abb. 7.** Die Spin-Bahn Kopplung für das Lambdateilchen im Kern ist fast Null. Ersetzt man das letzte Nukleon in Sauerstoff mit einem Lambdateilchen spaltet der Zustand in zwei mit 6 MeV Energieunterschied.

Zwei Reaktionen, K-Pi und Pi-K, sind für die Hyperkern-Spektroskopie geeignet. Die erste findet im Bereich zwischen 500 und 700 MeV/c fast ohne Rückstoß statt, und man kann sie zum Umtauschen eines Nukleons mit einem Lambda im gleichen Zustand benutzen. Damit konnte man zeigen, dass die Lambdas im Kernen keine Spin-Bahn Wechselwirkung haben (Abb. 7). Im rechten Teil des Bildes wird gezeigt, dass der Umtausch des letzten Nukleons des Sauerstoffs in dem Hyperkern in zwei Zustände zerfällt, mit 6 MeV Energieunterschied. Die 6 MeV entsprechen genau dem Energiebetrag der Spin-Bahn Aufspaltung.



**Abb. 8.** Die Bindungsenergien von Lambdateilchen in Kernen. Die gestrichelte Kurve entspricht der Berechnung mit gleichem Potential für alle Kerne. Nur der Radius variiert mit der Nukleonen Zahl A.

Mit der Pi-K Reaktion kann man auch tief gebundene Zustände von Lambdas in Kernen vermessen. Abb. 8 zeigt eine Messung von Bindungsenergien von Lambdas in Kernen bis Blei. Die Messung wurde im Brookhaven Labor durchgeführt. Die gestrichelten Kurven sind die Rechnungen, die nichts anderes enthalten als den Kern, für alle Hyperkerne ist die Tiefe des Potentials gleich, nur der Radius geht mit  $A^{2/3}$ . Das bedeutet, dieses Bild ist Demonstration par excellence dass der Kern eine entartete Flüssigkeit ist. Das Lambda spürt überhaupt nichts von dem Kern, benimmt sich so, als ob das nur ein Potential wäre, ein anziehendes Potential, und hat sonst keine andere Eigenschaft. Die Nukleon-Zustände der Kerne werden durch die Anwesenheit des Lambda nicht gestört. Die Fehler sind hier ziemlich groß, aber neue Experimente wollen das mit zehnfacher besserer Auflösung vermessen.

Ich glaube, um abzuschließen, dass man zu den Hyperkernen ruhig sagen kann, dass das einfache Bild des Kerns das einer Fermi-Flüssigkeit ist, sehr ähnlich zu dem, was die Leute bei tiefen Temperaturen mit entarteten Gasen zu machen versuchen. Die

Natur hat mit den Kernen eines der schönsten Systeme Fermi-entarteter Flüssigkeiten gemacht.

In Jahre 1983 hat die EMC-Kollaboration im CERN die ersten Messungen von Strukturfunktionen an Kernen veröffentlicht. Es war eine Überraschung, dass die Strukturfunktionen an Kernen anders sind als die am Proton. Das bedeutet, dass die Quarks im Nukleon doch anders sind als freie Quarks. Die Effekte, die in der perturbativen QCD nicht behandelt werden können, werden als nichtperturbative QCD bezeichnet. Gerade diese Effekte sind interessant, wenn man aus der tiefinelastischen Streuung etwas über die Quarkstruktur der Nukleonen lernen will.

Mit Thomas Walcher, Klaus Rith und Dietrich von Harrach hatten wir eine neue Kollaboration in CERN, NMC, die die nichtperturbativen Effekte untersuchen sollte. Der Kollaboration sind auch andere Gruppen beigetreten. Die NMC hat die nichtperturbativen Effekte in tiefinelastischen Streuung präzise gemessen. Zu diesen nichtperturbativen Effekten zählen "Verletzung des Gottfried Summen Regel", "Fehlende Spin von Quarks in Nukleon", und "Shadowing". Die ersten zwei sind die Folge der Tatsache, dass das Nukleon nicht nur aus drei Quarks besteht, sondern noch aus weiteren Quark-Antiquark Paaren. Diese Quark-Antiquark Paare nennen wir Kernphysiker einfach Pionen. Yukawa hat das Pion vorausgesagt in Analogie zum virtuellen Photon. Die Kopplungskonstante des Pions ist aber so groß, dass die Störungsrechnung im Falle des Pions absurd ist. Die Anwesenheit von Quark-Antiquark Paaren im Nukleon ist direkt im Experiment nachgewiesen worden. Es wäre wahrscheinlich besser, wenn man das Nukleon als Superposition von Triquark, Pentaquark und vielleicht Heptaquark Komponenten betrachten würde, als die Anwesenheit der Mesonen im Nukleon mit der Störungsrechnung zu beschreiben.

Die Struktur des Protons ist noch nicht gelöst. Die einfachen Modelle mit dem Gemisch von Quarks und Pionen werden meistens als naiv bezeichnet. Zu Unrecht, die Quarks, als Bausteine des Protons keine elementaren Quarks, haben nach der chiralen

Symmetriebrechung eine mehr oder weniger komplexe Struktur, und vor allem sind sie von Pionen begleitet.

Shadowing angewandt auf die tiefinelastische Streuung bedeutet, dass der Wirkungsquerschnitt, besonders im Bereich der Seequarks, nicht mit der Zahl der Nukleonen im Kern zunimmt. Das wirkt oberflächlich betrachtet überraschend. Bei Überträgen mit hohem Impulsquadrat nimmt der elementare Wirkungsquerschnitt am Nukleon ab, und das virtuelle Photon sollte nicht stark absorbiert werden. Alle Nukleonen sollten gleichberechtigt zum Wirkungsquerschnitt beitragen. Das Gegenteil ist der Fall. Unabhängig vom Impulsquadrat des virtuellen Photons ist die Hälfte der Ereignisse nicht perturbativ. Das kann man einsehen, wenn man die tiefinelastische Streuung im Ruhesystem des Protons betrachtet. In diesem System fluktuiert das Photon in ein Quark-Antiquark Paar. Die transversale Dimension des Quark-Antiquark Paares nimmt mit dem Impulsquadrat ab, so wie erwartet. Aber ein winziger Anteil der Quark-Antiquark Paare ordnen sich longitudinal. Die Zahl der longitudinalen Quark-Antiquark Paare nimmt mit zunehmendem Impulsquadrat ab. Aber die longitudinalen Paare haben die hadronische Dimension und hadronische Wirkungsquerschnitte, so dass die Zahl der Ereignisse der beiden etwa gleich ist.

Bei großen Bjorken  $x$  ist der Wirkungsquerschnitt in Kernen proportional zu der Nukleonzahl, bei kleinen nicht. Die Virtuellen Photonen, die zu kleinen Bjorken  $x$  beitragen sind zu Hälfte die longitudinalen Quark-Antiquark Paare.

Die Entwicklung der Strukturfunktionen mit dem Impulsquadrat des Photons wird mit einem Programm beschrieben, das nur die kleinen Quark-Antiquark Paare berücksichtigt. Das Programm ist offensichtlich so flexibel, dass auch die nicht berücksichtigte Hälfte berücksichtigt wird. Die tiefinelastische Streuung als reine perturbative QCD betrachtet, ist ein Märchen.

Die nichtperturbative Effekte in der tiefinelastischen Streuung haben wir weiter an dem Speicherring HERA in Hamburg untersucht. Die HERMES Kollaboration, die von Klaus Rith geleitet

wurde, hat alle nichtperturbative Effekte präzise gemessen. Ich habe mich der H1 Kollaboration angeschlossen und die tiefinelastische Streuung an Pion, den Konstituenten des Protons, gemessen. Wir konnten zeigen, dass das Proton nicht nur drei Quarks als die Konstituenten hat, aber zu 36% auch mindestens ein Pion. Die meisten nichtperturbative Effekte, die man in der tiefinelastischen Streuung misst, stammen von dem Pion in dem Proton und Neutron.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg im Rahmen einer Ringvorlesung am 11. Januar 2007.