

Der Elektroschwache Weg

Dieter Haidt *

1 Die Suche nach einem Weg

Wenn der Jubilar, Herbert Pietschmann, innehält und auf sein reiches und vielfältiges Leben und Werk zurückblickt, tritt ein Weg besonders deutlich hervor, *der elektroschwache Weg* ([1]). Er entsteht aus vielen Ideen im Laufe der 1960er Jahre, erhält durch die Entdeckung der neutralen Ströme Wirklichkeit und prägt bis zum heutigen Tage die Teilchenphysik.

Wie jeder Weg hat auch der elektroschwache Weg Zubringer, die dem damaligen Zeitgenossen verwirrend erscheinen mußten. Die Gebiete, die sich mit den schwachen, den elektromagnetischen und den starken Phänomenen befaßten, haben sich ziemlich unabhängig voneinander entwickelt. Nur ein Gebiet, die QED, hatte den Status einer Theorie. Es war viel Vorarbeit nötig, bis klar wurde, daß das Eichprinzip ihr gemeinsames Strukturelement ist. Fermis Theorie der schwachen Wechselwirkung hat zwar mit der Formulierung als *V-A Theorie* Anfang der 1960er Jahre eine gewisse Reife gewonnen, die aber nicht darüber hinwegtäuschen konnte, daß sie nur eine *effektive* und nicht, wie die QED, eine Eichtheorie war. Der Vektorcharakter sprach für eine Vermittlung der schwachen Wechselwirkung durch ein intermediäres Vektorboson W^\pm und damit für eine Analogie zum Photon der QED, aber die Argumente dagegen waren ebenso stark, einmal die Kurzreichweitigkeit der schwachen gegenüber der elektromagnetischen Wechselwirkung, dann die Ladung des hypothetischen W^\pm und schließlich das unterschiedliche Verhalten unter der Spiegelsymmetrie. Der Erfolg der Theorie bei niedrigen Energien lenkte die Aufmerksamkeit auf das Hochenergieverhalten. Der Prozeß $\nu\bar{\nu} \rightarrow W^+W^-$ diente als Paradebeispiel für Divergenzen bei hohen Energien. Um sie unter Kontrolle zu bekommen, war die Annahme neuer Phänomene unumgänglich. Eines davon bestand in der Postulierung eines neutralen schwachen Vektorbosons zusätzlich zu dem bereits angenommenen geladenen. Sollte diese Spekulation zutreffen, dann müßte es einen neuartigen Typ von Neutrinowechselwirkungen geben, die dadurch erkennbar wären, daß kein geladenes Lepton im Endzustand auftritt - mit anderen Worten : es müßte neben den bekannten *geladenen Strömen* auch *neutrale Ströme* geben.

*Beitrag zur Festschrift für Prof.Herbert Pietschmann

Diese Hypothese wurde erst in ladungserhaltenden Zerfällen, also $\Delta Q=0$, geprüft. Um die konkurrierenden QED Beiträge zu minimieren, wurden nur Zerfälle mit $\Delta S \neq 0$ betrachtet. Die Verzweigungsverhältnisse waren entmutigend klein. Im ersten Blasenkammerneutrinoexperiment am CERN PS bot sich die neue Möglichkeit, direkt nach Prozessen $\nu + N \rightarrow \nu + X$ zu suchen, also hauptsächlich mit Endzuständen X bestehend aus einem Nukleon oder Nukleon plus Pion. Das Ergebnis der Suche wurde auf der Konferenz in Siena 1963 berichtet. Die fehlende Evidenz für neutrale Ströme führte zur Angabe einer oberen Grenze von etwa 5 % - so niedrig, daß die neutralen Ströme für einige Zeit kaum mehr Beachtung fanden, auch dann nicht, als später 1970 ein revidierter Wert von 12 ± 6 % publiziert wurde. So bildete sich das Vorurteil, es gebe keine schwachen neutralen Ströme.

Das Zusammenwirken der Untersuchungen zu globalen und lokalen Symmetrien, zum Renormierungsverhalten, zur spontanen Symmetriebrechung, zum Higgsmechanismus und zum GIM Mechanismus hat schließlich zum Glashow-Salam-Weinberg Modell geführt und mit der Entdeckung der schwachen neutralen Ströme im Gargamelleexperiment 1973 den *elektroschwachen Weg* eröffnet ([2]). In dieser so reichen Zeit an Ideen hat die Stromalgebra mit ihren berühmten Relationen ([3]) ihre Blüte erlebt.

Der Weg ist dicht besetzt mit herausragenden experimentellen und theoretischen Leistungen, viele davon mit Nobelpreisen ausgezeichnet. Beim Durchschreiten des elektroschwachen Weges soll an ein paar markanten Stellen zur Umschau verweilt werden - eingedenk des Satzes, den der Jubilar in der Einleitung zu seinem Buche über Geschichten zur Teilchenphysik ([4]) geschrieben hat : *Wer den Weg und die Methode, die zu physikalischen Erkenntnissen führen, nicht kennt, kann die Ergebnisse wirklich nicht verstehen.*

2 Das Gargamelleexperiment

Von Anbeginn sollte die Neutrinophysik ein Schwerpunkt des Forschungsprogrammes von CERN sein. Schon nach dem ersten Experiment entstand der Plan einer viel größeren Kammer mit einer schweren Flüssigkeit. Motiviert war das Projekt durch die Suche nach dem *Intermediären Vektorboson*. Die Vorteile einer Kammer mit großem Volumen lagen auf der Hand, nämlich die etwa 10-mal höhere Statistik und der Gewinn an Details über den Endzustand der Reaktion. In der Blasenkammer kann ein geladenes Pion, das ohne sichtbare Wechselwirkung das Kammervolumen verläßt, ein Muon vortäuschen. Dieser unvermeidliche Untergrund würde in einer 5 Meter langen Kammer beträchtlich heruntergedrückt werden können. Hinzukommt die Erkennung neutraler Teilchen, etwa Neutronen durch ihre starke Wechselwirkung, neutrale Pionen durch Konversion der Photonen, der neutralen K -Mesonen durch ihre Zerfallsprodukte. Nur eine Kammer mit einer schweren Flüssigkeit sichert eine möglichst vollständige Kenntnis der Reaktion. Dies ist wichtig, weil die Energie einer Neutrinowechselwirkung

aus den Energien der Teilchen im Endzustand zu bestimmen ist. Gegenüber dem früheren Experiment in der 1m Blaskammer, der sog. Ramm-Kammer, würde also Gargamelle, mit seiner riesigen - nomen est omen - geometrischen Ausdehnung ungeahnte neue Forschungsmöglichkeiten bieten.

Die Kammer (cf. Fig. 1) wurde unter der Leitung von Lagarrigue in Orsay gebaut. Die beteiligten Gruppen aus 7 Laboratorien erörterten 1968 in Mailand

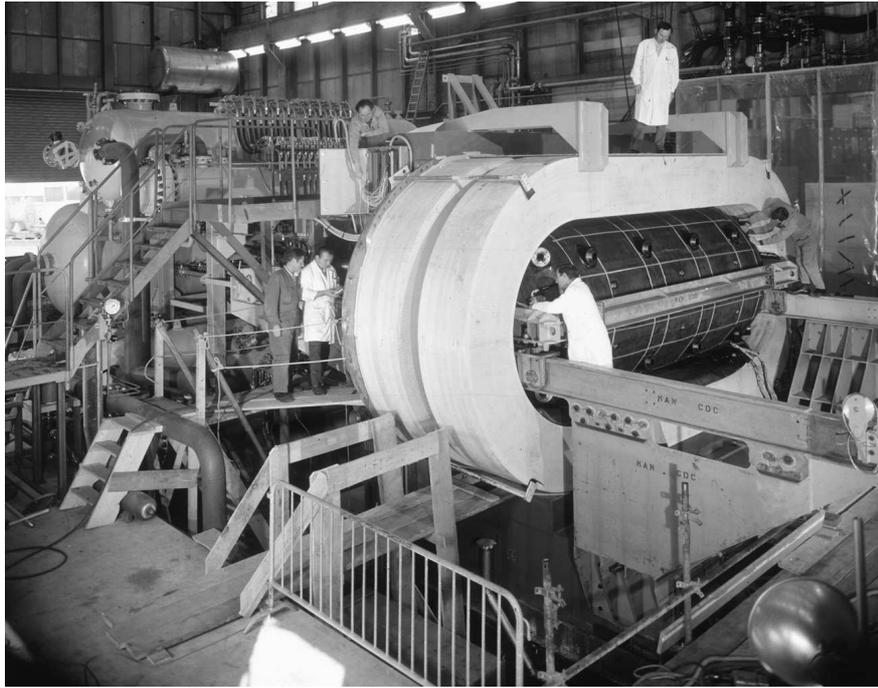


Figure 1: Die Gargamelle Blaskammer beim Einbau in die Magnetspulen

das Physikprogramm für dieses Experiment der zweiten Generation. Die Prioritäten waren durch die eben im SLAC entdeckte Substruktur des Protons stark beeinflusst. Freilich stand im Proposal die Suche nach dem W an oberster Stelle, aber die brennende Frage war *„Wie würde sich die Partonstruktur gesehen mit W -Augen von der gesehen mit γ -Augen unterscheiden?“*. Die Suche nach neutralen Strömen, Ironie der Geschichte, erschien im Proposal *unter ferner liefen*.

Gargamelle ging 1970 in dem wesentlich verbesserten Neutrinostrahl des CERN Protonsynchrotrons in Betrieb. Das Scan- und Meßprogramm war auf die Untersuchung des Partonmodells ausgerichtet. Doch nach zwei Jahren nahm das Programm eine jähe Wendung, als die theoretischen Fortschritte einen gemeinsamen Rahmen für elektromagnetische und schwache Phänomene in Aussicht gestellt hatten. Kernpunkt war der neue schwache Prozeß, der sich in einem Neutrinoexperiment durch Ereignisse *ohne Muon* im Endzustand zu erkennen geben würde. Gargamelle und dem gleichzeitig bereiten amerikanischen Experiment der HPW Kollaboration fiel die historische Rolle zu, die Frage der Existenz

neutraler schwacher Ströme experimentell zu entscheiden.

Die Suche nach Ereignissen ohne geladenes Lepton im Endzustand hat innerhalb Jahresfrist die überraschend große Zahl von über 100 Kandidaten ergeben. Hinzukam ein aufsehenerregendes Ereignis mit einem vorwärtsgestreuten Elektron im $\bar{\nu}_\mu$ -Strahl mit vernachlässigbarem Untergrund, also Kandidat für die elastische Reaktion $\bar{\nu}_\mu e \rightarrow \bar{\nu}_\mu e$. Umgekehrt war bei den hadronischen Kandidaten bekannt, daß Neutronen ein gefährlicher Untergrund sind und zwar, wie sich schnell herausstellte, der einzig gefährliche. Das Argument, daß die räumliche Verteilung neutron-induzierter Ereignisse in der Kammer exponentiell abfallen müßte, aber die beobachtete Vertexverteilung flach war, versetzte die Kollaboration in einen Zustand der Euphorie. Das Argument erwies sich jedoch als trügerisch, weil die Radialverteilung des Neutrinostrahles auch zu sehr vielen Neutrinoereignisse in den massiven Magnetspulen um Gargamelle herum (cf. Fig. 1) führte und daher Neutronen auch seitlich in das Kammer-volumen eintreten können. Es war also unvermeidlich, eine quantitative Vorhersage des Neutronuntergrundes zu machen. Die Umstände bei der Suche nach einem neuen Effekt sind immer kritisch, weil der quantitative Nachweis zu erbringen ist, daß *kein bekannter Prozeß* die gefundenen Kandidaten erklären kann. Die Auseinandersetzungen innerhalb der Kollaboration in den Monaten vor der Veröffentlichung war heftig - und konnte kaum anders als heftig sein, denn allen war bewußt, daß es sich hier um eine Entdeckung ersten Ranges mit weitreichenden Folgen handeln würde. Entsprechend groß würde die Blamage sein, sollte sich herausstellen, daß die beobachteten Kandidaten lediglich von Neutronen induziert worden wären.

Neutronen erzeugen in einer Blaskammer keine Spuren, werden also, genau wie Neutrinos, erst durch ihre Wechselwirkung sichtbar. Die Neutronen entstehen bei Neutrinowechselwirkungen in der massiven Abschirmung vor der Kammer und im Material um sie herum. Mesonen spielen dabei eine untergeordnete Rolle. Die experimentelle Kenntnis des Neutrinostrahles und der Dynamik der entstehenden Neutronen war ein Ingrediens für die Berechnung des Untergrundes. Aber es kam noch etwas Entscheidendes, vorher nicht Beachtetes, hinzu, nämlich die Berücksichtigung der Tatsache, daß hochenergetische Neutronen von der Entstehung in der Abschirmung bis zum Eintritt in das Kammervolumen eine energieabhängige Kaskade bilden. Dies war der eigentlich kritische Aspekt, weil dadurch die Neutronen aus tiefen Schichten der Eisenabschirmung kommen konnten, also die Untergrundrate gefährlich vervielfachten.

Die Bestimmung des Untergrundes stützte sich auf experimentelle Fakten und war frei von unbekanntem Parametern. Die quantitative Analyse hat den Schluß erlaubt, daß die beobachteten Ereignisse überwiegend *neutrino*-induziert sind, genauer der *neutron*-induzierte Untergrund nur etwa 10 % zum Signal beiträgt. Damit war der Weg für die Behauptung eines neuen Effektes frei. Die Publikation erfolgte Ende Juli 1973.

Auf der Elektron-Photon Konferenz Ende August 1973 in Bonn wurde die

Entdeckung zusammen mit den Ergebnissen der HPW Kollaboration vorgetragen und intensiv diskutiert. In seinem Abschlußwort hat C.N.Yang den neuen Effekt als die Sensation der Konferenz verkündet. Obwohl die Gargamellekollaboration die neuen Ereignisse phänomenologisch als *neutrinoinduzierte Ereignisse ohne Muon und Elektron* vorgestellt hatte, sprachen fast alle von der Entdeckung der *schwachen neutralen Ströme*. Die Elektron-Photon Konferenz wurde übrigens von da ab in *Lepton-Photon* Konferenz umbenannt.

Die Hochstimmung dauerte kaum einen Monat, dann folgte ein heißer Herbst, eingeleitet durch die Ankündigung der HPW Kollaboration, daß mit ihrem umgebauten Detektor der Effekt verschwunden sei. Ihr Ansehen war so hoch, daß die Gargamelleanalyse als falsch verdächtigt wurde. Das Vorhandensein von mehr als 100 Ereignissen war freilich nicht wegzudiskutieren. Daher galt es einigen prominenten Opponenten als ausgemacht, die Ursache des Fehlers in der Bestimmung des Neutronuntergrundes, genauer in der Behandlung der Neutronkaskade, zu sehen. Vielfach waren die Diskussionen emotionsgeladen, dementsprechend gering war die Bereitschaft der Gegner, die Widerlegung ihrer Argumente durch experimentelle Fakten zu akzeptieren. Ein spezielles Experiment, in dem Gargamelle mit Protonen verschiedener, aber jeweils fester, Energie beschossen wurde, brachte endlich Klarheit. Die von den Protonen ausgelösten Kaskaden wurden vermessen und mit der Vorhersage des Kaskadenprogramms verglichen. Alle wichtigen Details, wie die Kaskadenlänge und die Energieabhängigkeit, wurden bestätigt und zerstreuten jeden Zweifel. Das Ergebnis wurde auf dem jährlichen Treffen der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft (APS) im April 1974 in Washington vorgetragen.

Ein Jahr nach der Entdeckung war die Evidenz für den neuen Ereignistyp überwältigend groß: die HPW Kollaboration hat ihren Fehler erkannt und nun doch den Effekt gefunden, eine ANL Kollaboration hat die exklusiven 1π -Prozesse $\nu p \rightarrow \nu n \pi^+$ und $\nu p \rightarrow \nu p \pi^0$ beobachtet und die CITF Kollaboration mit einem neuen Kalorimeter und einer neuen Methode den Effekt bei Energien im 100 GeV Bereich gemessen. Außerdem hat Gargamelle inzwischen mit doppelter Statistik die erste Analyse bestätigt und durch eine zweite Methode ergänzt.

Jetzt konnte die eigentliche Untersuchung der Eigenschaften des neuen Effektes beginnen. Sie gab allen großen Laboratorien einen ungeheuren Aufschwung. Neue große Kollaborationen entstanden, immer größere Apparate wurden gebaut mit dem Ziel, wie Blaskammern als Universaldetektoren zu dienen. Umgekehrt sind Blaskammern durch Elektronikdetektoren ergänzt worden, insbesondere um die Unterscheidung von Ereignissen mit und ohne Muon zu verbessern und den Neutronuntergrund zu reduzieren. Für die theoretischen Gruppen hat ebenfalls eine fruchtbare Zeit eingesetzt, in der viele verschiedenartige Modelle zur Erklärung des neuen Ereignistyps entwickelt worden sind. Es hat kaum ein Jahr gedauert, da fanden die neutralen Ströme bereits eine Anwendung in der Physik der Supernovae.

3 Der Aufstieg zum Standardmodell

In einer rasanten Folge von Experimenten wurde aus der Vielzahl der Modelle, die zur Erklärung der Phänomenologie neutraler schwacher Ströme aufgestellt worden sind, im wesentlichen eines herausgefiltert, das Glashow-Salam-Weinberg Modell. Es hat sich von Anfang an großer Beliebtheit bei den Experimentatoren erfreut, weil die Vorhersage der Bornprozesse nur von einem einzigen freien Parameter, dem *schwachen Winkel* Θ_W , abhing. Niemand hatte erwartet, daß die einfache algebraische Struktur $SU(2) \times U(1)$ so erfolgreich die Daten beschreiben würde.

Die ersten Jahre nach der Entdeckung waren durch die Neutrinophysik bestimmt. Die Gargamelle Blasenkammer wurde weiterhin im Neutrino- und Antineutrinostrahl vom CERN PS betrieben. Im Fermilab liefen die 15' Blasenkammer und die Detektoren der HPWF und CITF Kollaborationen. Es entstanden mehrere Messungen des Verhältnisses NC/CC aus den inklusiven Prozessen mit einer typischen Genauigkeit von 10-20 %. In Gargamelle wurden auch ein Neutrino- und ein Antineutrinoexperiment mit Propan C_3H_8 als Kammerfüllung ausgeführt und alle exklusiven 1-Pionkanäle sowohl im geladenen wie im neutralen Strom gemessen. Es war jetzt sogar möglich, Wechselwirkungen am freien Proton zu untersuchen. Fig. 2 zeigt die erstmalige Anregung der $\Delta(1236)$ Resonanz durch einen schwachen neutralen Strom. Der beobachtete Übergang $p \rightarrow \Delta^+$ eli-

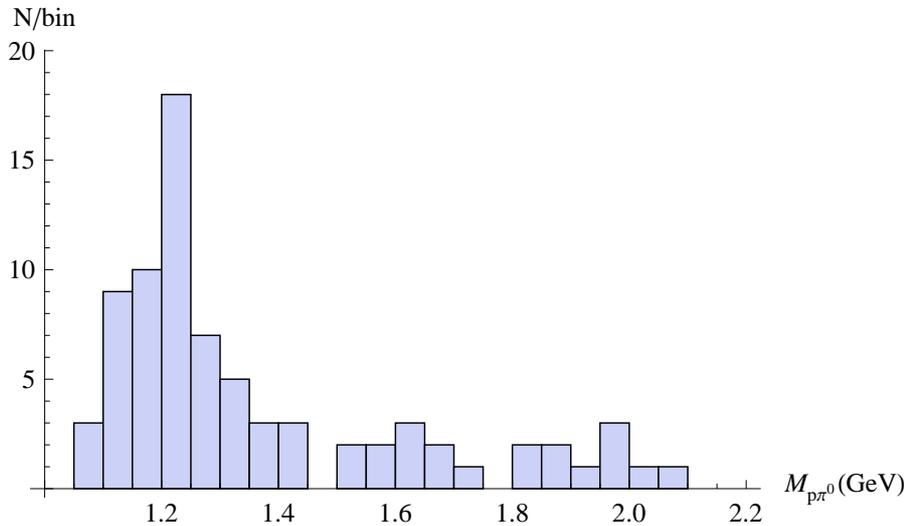


Figure 2: Anregung der 1236-Resonanz im schwachen neutralen Strom.

minierte Modelle mit $\Delta I=0$, also ohne Isospinänderung. 20 Jahre später erwiesen sich die Daten zur 1π Produktion bei der Interpretation des Kamiokaexperimentes als sehr nützlich.

Es zeichnet die Blasenkammer aus, daß sogar der Prozeß $\nu + n \rightarrow \nu + n + \pi^0$ gemessen werden konnte, obwohl alle Teilchen neutral sind, also keine Spuren in

der Kammer erzeugen. Der Wechselwirkungspunkt mußte erst aus dem Zerfall des neutralen Pions in zwei e^+e^- -Paare rekonstruiert werden und dann konnte das Neutron durch die Kinematik seiner beobachteten Reaktionsprodukte identifiziert und assoziiert werden.

Im Jahr 1976 ging das SPS im CERN in Betrieb und stellte Neutrinostrahlen hoher Intensität und Energien im Bereich 10 bis mehrere 100 GeV je nach Auslegung der Strahlführung bereit. Neue Detektoren kamen in Betrieb: im CERN die europäische Blaskammer BEBC, sowie die Kalorimeter der CDHS und CHARM Kollaborationen, im Fermilab das Kalorimeter der CCFR und FMMF Kollaborationen. Nicht nur die Statistik der Neutrinoereignisse stieg damit beträchtlich an, sondern auch der verfügbare Phasenraum und damit eine verbesserte Kontrolle der Systematik. Auf der Neutrino-Konferenz in Aachen 1976 wurden die bis dahin erzielten Fortschritte im Verständnis der neutralen Ströme eingehend diskutiert. Sakurai hat die Experimentatoren aufgefordert, ihre Ergebnisse so zu präsentieren, daß modellunabhängige Analysen auch von Außenstehenden durchgeführt werden können. Auch sollten alle Kopplungskonstanten der neutralen Ströme gemessen werden, wie es vorher mit den geladenen Strömen geschehen war - nur, so sagte er, nicht in 25 Jahren, sondern viel schneller. Eine gesonderte Betrachtung verdient ein folgenreicher Beitrag von Cline, MacIntyre und Rubbia zur Konferenz (cf. Kapitel 4).

Kopfzerbrechen verursachten die ersten Messungen an schweren Atomen, zunächst Wismuth, weil die gemessene (γ, Z) -Interferenz mit 0 verträglich war und damit anscheinend im Widerspruch zur Erwartung des GSW Modells stand. Der gesuchte Effekt ist jedoch extrem gering und die Untersuchung der systematischen Fehler war erst in den Anfängen. Es dauerte Jahre, bis die Messungen an Atomen stabile und schließlich genaue Ergebnissen erbrachten (cf. Fig. 4).

Dagegen gelang eine elegante Messung der (γ, Z) Interferenz im SLAC mit der Streuung polarisierter Elektronen am Deuteron. Die beobachtete paritätsverletzende Rechts-Linksasymmetrie etablierte eine wesentliche Eigenschaft des schwachen neutralen Stromes. Das Resultat ist zudem sehr auf $\sin^2\Theta$ empfindlich und hat zum Ausschluß alternativer Modelle beigetragen. Es war zugleich die erste genaue Einzelmessung mit einem deutlich niedrigeren Wert für $\sin^2\Theta$ verglichen mit den ersten Messungen aus den inklusiven Neutrinoquerschnitten. Das Analogon im Neutrino-sektor war die Messung der $1\pi^0$ Produktion zum einen induziert durch ein Neutrino (Linkshänder) und zum anderen induziert durch ein Antineutrino (Rechtshänder). Der beobachtete Hadronenzustand war in beiden Reaktionen gleich. Die Differenz der Querschnitte war signifikant von 0 verschieden.

Jedenfalls hat sich nach 5 Jahren, abgesehen von den technisch sehr aufwendigen Experimenten an Atomen, ein konsistentes Bild aller Messungen mit einem gemeinsamen Wert von $\sin^2\Theta_W$ (cf. Fig. 4) ergeben. Dies wurde als überzeugender Beweis für das GSW Modell gewertet (Nobelpreis für Glashow, Salam und Weinberg 1979). Seitdem diente das GSW Modell als Standardbezug zur Inter-

pretation aller Messungen und ist so zum *Standardmodell* geworden. Man zählt auch die durch die QCD beschriebenen Phänomene der starken Wechselwirkung zum Standardmodell; es hat somit die algebraische Struktur $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$.

Nun war der Weg zum Test der entscheidenden Frage gebahnt, ob nämlich das GSW Modell wirklich eine Eichtheorie sei und ihr damit derselbe Rang wie die QED zukomme. Eine systematische Untersuchung der drei Sektoren, dem Eichbosonsektor (Spin 1), dem Fermionsektor (Spin 1/2) und dem Higgssektor (Spin 0), setzte ein. Dies definierte das Programm für die zweite Etappe des elektroschwachen Weges.

4 Der Weg zu den Eichbosonen

Seit dem Versuch, den stark unterdrückten Zerfall $\mu \rightarrow e + \gamma$ zu verstehen, hat das W als Vermittler der schwachen Wechselwirkung besondere Bedeutung erhalten - übrigens gekoppelt mit der Frage, ob es in Wirklichkeit nicht zwei voneinander verschiedene Neutrinos gebe. Tatsächlich stand der experimentelle Test dieser beiden Fragen im Neutrinoprogramm des neugegründeten Labors CERN an oberster Stelle. Der erste Neutrinostrahl, eine Idee von Pontecorvo, wurde am CERN-PS gebaut und sollte erstmalig das Studium schwacher Prozesse im GeV-Bereich gestatten. Die Aussichten auf eine Entdeckung standen gut, denn es herrschte die Vermutung, daß das gesuchte *Intermediäre Vektorboson* etwa 1 GeV Masse haben sollte. Leider wurde kein Neutrinoereignis registriert, weil der Strahl falsch berechnet war. Dies war die Chance für das Konkurrenzexperiment am AGS Beschleuniger in Brookhaven. So konnten 1962 Lederman, Schwartz und Steinberger (Nobelpreis 1988) die Existenz von 2 Neutrinos nachweisen.

Das CERN Neutrinoprogramm wurde nach der Panne wieder aufgenommen und erwies sich von da an als außerordentlich erfolgreich. Zu den ersten Ergebnissen zählte der lineare Anstieg des totalen Neutrinoquerschnittes. Es dauerte ein paar Jahre, bis die Scalinghypothese Bjorkens und die Entdeckung der Substruktur im SLAC eine einfache Erklärung anboten. *The IVB, if it exists* war damals ein geflügeltes Wort. Wenn es also ein W geben soll, dann muß seine Masse größer als einige GeV sein, denn der W -Propagator würde sich durch eine Abweichung vom linearen Anstieg des totalen Wirkungsquerschnittes kundtun. Dies war die Methode, bei jedem neuen Neutrinoexperiment immer schärfere untere Grenzen abzuleiten, bis schließlich 1976 die neutralen Ströme einen völlig neuen Weg weisen konnten. Im Rahmen des GSW Modells besteht nämlich eine Beziehung zwischen der Masse des W und $\sin^2\Theta_W$, wobei als Proportionalitätsfaktor G_F/α , also eine dimensionsbehaftete Größe, eingeht. Mit dem Wert aus den damaligen Neutrinoexperimenten ergab sich für die W Masse etwa 70 GeV. So hohe Werte zu testen war für Neutrinoexperimente in absehbarer Zeit mit der Propagatormethode ausgeschlossen. In ihrem Beitrag zur Neutrino-Konferenz 1976

in Aachen haben Cline, McIntyre und Rubbia den Vorschlag gemacht, das W in $p\bar{p}$ Stößen direkt zu erzeugen. Das Experiment wurde im CERN verwirklicht. Dazu mußte eine Antiprotonquelle gebaut, das SPS umgebaut und zwei Detektoren gebaut werden. Ein entscheidender vorbereitender Schritt war das ICE-Experiment (Initial Cooling Experiment), in dem stochastische Kühlung erprobt wurde. Drei Jahre nach Genehmigung ging das $S\bar{p}pS$ 1981 in Betrieb. Den beiden Kollaborationen UA(1) und UA(2) ist es 1983 - genau 10 Jahre nach der Entdeckung der schwachen neutralen Ströme - gelungen, erst das geladene Boson W und kurz darauf das neutrale Boson Z zu erzeugen und im Zerfallskanal $e\nu$ bzw. l^+l^- nachzuweisen. Als Massen ergaben sich 81 und 92 GeV mit einer Genauigkeit von etwa 1 GeV. Damit war ein Markstein auf dem elektroschwachen Weg erreicht worden. Die Leistung, die Rubbia und van der Meer vollbracht haben, wurde schon im Jahr nach der Entdeckung mit dem Nobelpreis gewürdigt.

Später kamen am Tevatron im Fermilab die Detektoren der beiden Kollaborationen CDF und D0 hinzu. Der Stand der Messungen kurz vor Beginn des SLC/LEP Betriebes ist in Fig. 3 dargestellt. Im Laufe der nächsten 10 Jahre sind Präzisionsmessungen der Massen und Breiten von W und Z am Tevatron und bei SLC, LEP I und LEP II entstanden (cf. Fig. 7).

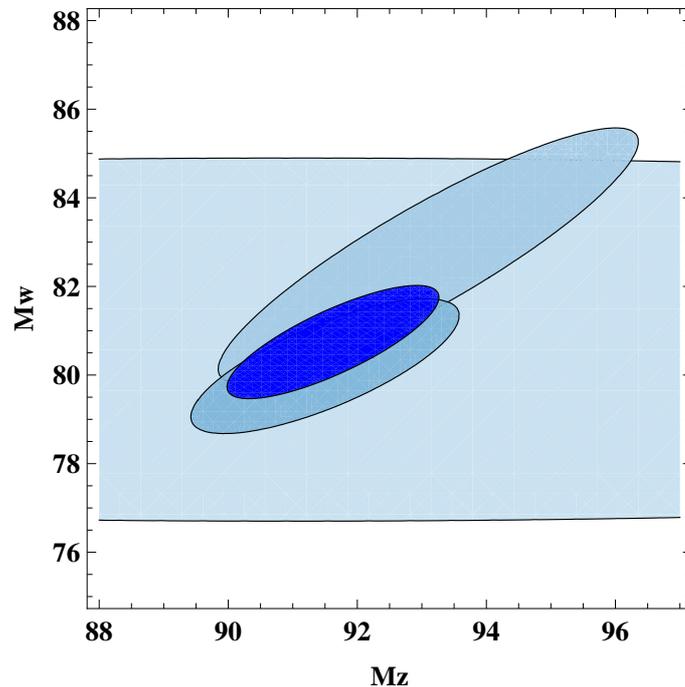


Figure 3: Die Bestimmungen der W - und Z -Massen; UA(2) kleine Ellipse, UA(1) große Ellipse und CDF helles Band; gemeinsamer Fit dunkelblaue Ellipse. Stand vom April 1989.

Die traditionelle Suche nach dem Propagatoreffekt des W war doch noch von Erfolg gekrönt, als nämlich mit dem Betrieb von HERA der Prozeß $e^+p \rightarrow \bar{\nu}_e + \text{anything}$ erstmalig gemessen wurde (siehe Fig. 10).

5 Der Weg zu den Quantenkorrekturen

Die Jahre von 1979 bis zum Beginn von LEP 1989 bilden eine zweite Periode. Das Standardmodell mit seinem Aufbau bestehend aus dem Eichbosonensektor mit den Spin 1 Bosonen, dem Fermionensektor mit den Spin 1/2 Quarks und Leptonen und dem Higgssektor mit dem Spin 0 Boson wird nun systematisch untersucht. 't Hooft und Veltman haben mit ihren bahnbrechenden Arbeiten die Renormierbarkeit der Theorie bewiesen (Nobelpreis 1999). Die massiven Eichbosonen definieren eine Skala, sodaß der bisherige Begriff von *Hochenergie* präzisiert werden kann. Als Niederenergieexperimente sind solche mit invarianter Energie unterhalb der Größenordnung 100 GeV anzusehen, also die Neutrino-Fixed-Target Experimente, aber auch die seit 1978 laufenden Experimente an den Speicherringen e^+e^- bei DESY mit PETRA und SLAC mit PEP. Sie testen die schwachen geladenen und neutralen Ströme und liefern Information über die $Zf\bar{f}$ -Kopplungen, die Propagatoren, ferner (W, Z) und (γ, Z) Interferenzen. Die eigentlichen Hochenergieexperimente finden am $p\bar{p}$ Speicherring vom CERN statt, danach vor allem am Tevatron und an SLC/LEP.

Mehrere theoretische Gruppen haben die Quantenkorrekturen zur Interpretation der elektroschwachen Observablen berechnet und Programmpakete zur Auswertung der Daten entwickelt. Die Mehrzahl der untersuchten Prozesse sind vom 4-Fermionentyp, etwa $\nu f \rightarrow \nu f$ or $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$, vermittelt durch die jeweils relevanten Eichbosonen. Neben den prozeßabhängigen Vertex- und Boxkorrekturen sind die Quantenkorrekturen an den Propagatoren universell und lassen sich durch effektive Ladungsformfaktoren $e^2(q^2)$, $s^2(q^2)$, $g_W^2(q^2)$ und $g_Z^2(q^2)$ entsprechend der 4 Kombinationen $\gamma\gamma$, γZ , ZZ und WW beschreiben ([6]). Alle Niederenergieexperimente, die neutrale Ströme testen, können dann in der (s^2, g_Z^2) -Ebene dargestellt werden (cf. Fig. 4).

In dieser zweiten Phase des elektroschwachen Weges erreicht die Neutrino-physik Präzisionsstatus. Die neuen massiven Detektoren und die hohen Strahlenergien ermöglichen echte Präzisionsmessungen von $\sin^2\Theta$. Der Begriff *präzise* hat eine wohldefinierte Bedeutung, denn die Berechnung der radiativen Korrekturen zeigt an, wie genau $\sin^2\Theta$ gemessen werden muß, um die vorhergesagte Verschiebung der Querschnitte gegenüber den Bornquerschnitten nachzuweisen. Für $\sin^2\Theta$ bedeutet dies eine Verschiebung um etwa 0.01. Eine detaillierte Studie hat 1981 ergeben, daß CDHS und CHARM die systematischen Unsicherheiten auf unter ± 0.005 verbessern können und somit zu einem quantitativen Test der Quantenkorrekturen in der Lage sind. Dieses Versprechen wurde auch eingelöst. Der CHARM Kollaboration ist darüberhinaus sogar die präzise Messung der ela-

stischen $\nu_\mu e$ und $\bar{\nu}_\mu e$ Querschnitte gelungen und auch der erstmalige Nachweis einer (W, Z) Interferenz. Welch ein Fortschritt gegenüber den Anfängen der Neutrino-physik, wo *schwache* Wechselwirkung gleichbedeutend mit *geringer* Statistik war !

Die publizierten Neutrinodaten waren alle mit einer zeitbedingten *systematischen* Unsicherheit behaftet, die daher rührte, daß die Massen der Eichbosonen und des t -Quarks unbekannt waren, also zur Auswertung der radiativen Korrekturen willkürliche numerische Annahmen gemacht werden mußten. Außerdem waren Annahmen über die Struktur des Nukleons notwendig, die jede experimentelle Gruppe nach eigenem Ermessen festgesetzt hatte. Mit zunehmender Verbesserung der Kenntnis dieser beiden Unsicherheiten konnten die publizierten inklusiven Neutrino und Antineutrino Querschnitte a posteriori unter einheitlichen Annahmen reanalysiert werden und so der systematisch und statistisch genaueste Wert für $\sin^2\Theta$ erzielt werden (Ref.[5]). Die resultierende Ellipse ist in Fig. 4 zu sehen. Hier gehen die rechts- und linkshändigen Kopplungen jeweils als Summe der u - und d -Quarkbeiträge ein. Auch die Differenzen sind gemessen, sodaß die Kopplungen $Zu\bar{u}$ und $Zd\bar{d}$ gut bekannt sind, während die Information zu $Zs\bar{s}$ und $Zc\bar{c}$ eher spärlich ist.

Eine Zusammenfassung aller Niederenergieexperimente ist in Fig. 4 dargestellt (Ref. [6]). Alle Messungen lassen sich in voller Allgemeinheit als Funktion von

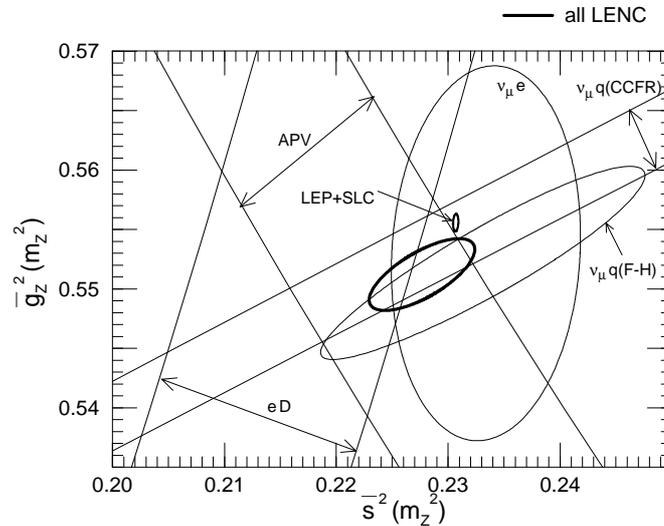


Figure 4: Test des neutralen Stromes in Niederenergieexperimenten; die dicke Ellipse ist der gemeinsame Fit aller Daten. Zum Vergleich zeigt die winzige Ellipse den Fit an die LEP/SLC Daten.

zwei elektroschwachen Größen ausdrücken. Die Übereinstimmung aller Daten miteinander bestätigt das Standardmodell auf einige Prozent.

Die beiden Laboratorien DESY und SLAC, die sich traditionell mit dem

Test der QED befaßt haben, verfügen nun mit PETRA und PEP über so hohe Energien, daß Abweichungen von der reinen QED durch die (γ, Z) -Interferenz beobachtbar werden. Dies zeigt sich darin, daß die Winkelverteilung der erzeugten Muonpaare bei diesen Energien nicht mehr symmetrisch ist. Der Effekt ist proportional zur Schwerpunktsenergie und war daher anfangs gering. Es zeugte von dem guten Geist bei DESY, daß alle vier PETRA Kollaborationen CELLO, JADE, MARK J und TASSO bereit waren, ihre Statistik zusammenzuwerfen, um so eine signifikante Winkelasymmetrie bereits auf der Lepton-Photon Konferenz in Bonn 1981 vorstellen zu können. Nach und nach sind die Messungen entstanden, die in Fig. 5 dargestellt sind. Die Asymmetrie resultiert aus der Inter-

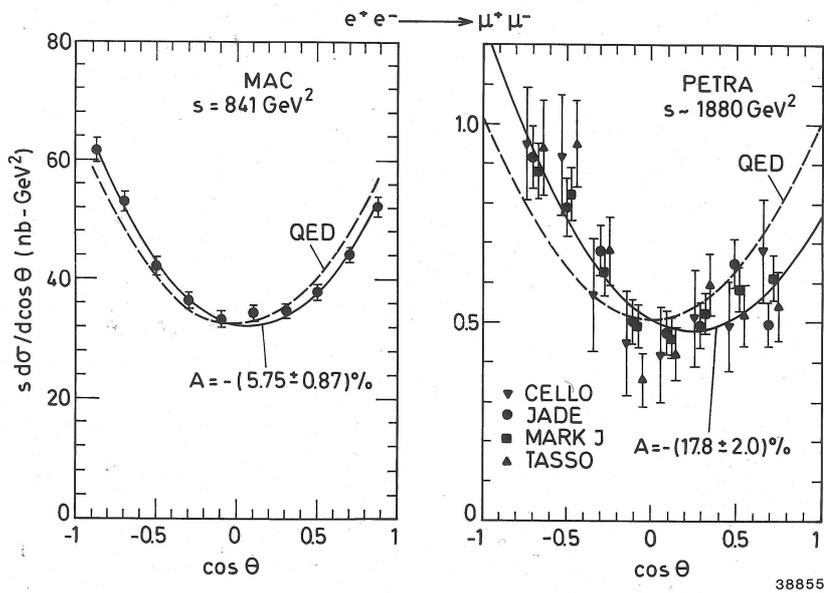


Figure 5: Winkelasymmetrie in $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

ferenz zweier Axialvektoramplituden, ist also paritätserhaltend. Die entsprechenden Messungen wurden auch mit dem τ -Lepton unternommen. Die Lebensdauer der Hadronen mit dem 1977 entdeckten b -Quark wurde von 10^{-8} schrittweise auf 10^{-12} s heruntergedrückt. Die genauere Untersuchung wurde erst mit Vertexdetektoren möglich. Die Suche nach dem t -Quark nahm im Forschungsprogramm von DESY einen breiten Raum ein (cf. Kap. 6). Freilich war die Entdeckung der Gluonjets der eigentliche Höhepunkt des PETRA Forschungsprogramms.

Auf der *Weak Interaction and Neutrino Konferenz* in Nof Ginosar im April 1989, also kurz vor dem Start des Stanford Linear Collider SLC und LEP im CERN, ergab sich aus der Kombination aller verfügbaren elektroschwachen Daten das in Fig. 6 dargestellte Bild: Konsistenz aller Messungen mit den Vorhersagen des Standardmodells bei gleichzeitiger Eingrenzung der Z -Masse auf 90 ± 0.5 GeV und der Masse des noch unbekanntes Topquarks auf 110 ± 60 GeV. Die Abhängigkeit von der Higgsmasse war zu gering, konnte deshalb auf 100 GeV festgesetzt

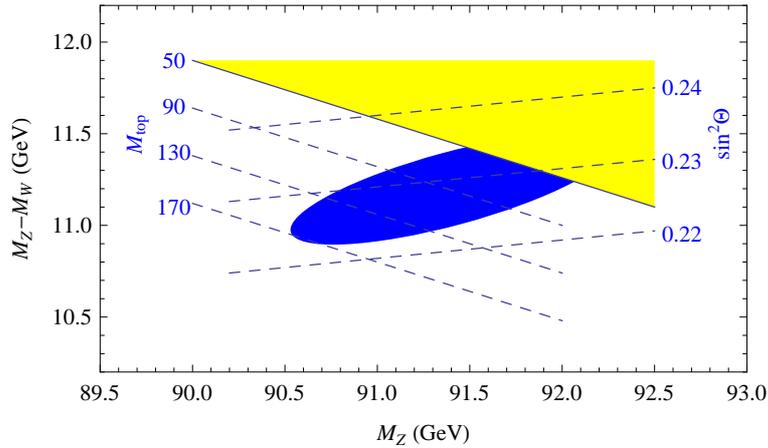


Figure 6: Stand im April 1989

werden. Die ersten Messungen von CDF am Tevatron hatten die untere Grenze von PETRA an die t -Quarkmasse auf 50 GeV verbessert, während der Fit an die elektroschwachen Daten auch eine obere Grenze ergab. Allerdings hat die Phantasie der Teilnehmer nicht ausgereicht, sich vorzustellen, daß die Topquarkmasse einmal nahe an der oberen Grenze gemessen würde.

Am Ende dieser zweiten Periode hat sich das Bild gerundet und bot eine solide Grundlage für Vorhersagen und die nächsten Schritte. Es ist jetzt erkennbar, unter welchen Bedingungen die QED innerhalb der umfassenden elektroschwachen Eichtheorie ihre Eigenständigkeit behält, nämlich dann, wenn die charakteristischen Invarianten des betreffenden Prozesses im Vergleich zu den Eichbosonmassen klein sind.

Kaum vier Monate später ging SLC mit dem MARK II Detektor in Betrieb und hat die erste Vermessung der Z -Resonanz präsentiert. Die Präzision der Massenmessungen wurde schrittweise am SLC und besonders am e^+e^- Speicherring LEP verbessert und erreichte schließlich eine Genauigkeit von 2 MeV. Mit dem wachsenden Erfolg des Standardmodells erwies sich die Aufklärung der spontanen Symmetriebrechung als immer dringender.

6 Der Weg zum Top

In den 60er Jahren hat der achtfache Weg Gell-Manns einen Hinweis auf eine Substruktur der Hadronen gegeben. Ein Quarktriolett wurde als die Fundamentalrepräsentation der $SU(3)$ vermutet. Um die eben formulierte Theorie Weinbergs mit neutralen schwachen Strömen zu retten, haben Glashow, Iliopoulos und Maiani die orthogonale Ergänzung zum Cabibbostrom vorgeschlagen und damit einen vierten Quarktyp. Schließlich haben Kobayashi und Maskawa 1972 die Frage der CP -Verletzung im GSW Modell erörtert und sind auf sechs Quarktypen

gekommen (Nobelpreis 2008). Die Übereinstimmung der gemessenen Strukturfunktion F_2 in νN und $\bar{\nu} N$ Daten von Gargamelle mit den ep -Daten von SLAC, sofern drittelzahlige Ladungen eingesetzt werden, hat zur Identifikation von Partonen mit Quarks, Antiquarks und Gluonen geführt. Damit bekam der anfangs hypothetische Charakter der Quarks etwas mehr Realität. Die Eigenschaft der QCD-Kräfte, mit zunehmendem Abstand zuzunehmen, war der Schlüssel zum Verständnis, warum es keine freien Quarks gebe, aber in Streuexperimenten sich die Quarks dennoch wie freie Teilchen verhalten.

Mit der Entdeckung des c -Quarks 1974 (Nobelpreis 1976 für Ting und Richter), des b -Quarks 1977 und auf der Leptonseite des τ -Leptons (Nobelpreis 1995 für Perl) zeigte sich eine Dublettstruktur der fundamentalen Fermionen mit drei Familien. Zugleich fielen zwei Lücken auf, die, wie einst bei Mendeleev, auf die Existenz zweier weiterer Fermionen hinwiesen : ein ν_τ als Partner zum τ und ein t -Quark als Partner zum b -Quark. Die Quantenzahlen des vermuteten t -Quarks lagen - mit Ausnahme seiner Masse - fest, nachdem die Quantenzahlen des b -Quarks experimentell in Übereinstimmung mit dem Standardmodell ermittelt waren [11]. Das Dublett (t, b) mit b unten und t oben gab auch zur Benennung *bottom* und *top* Quark Anlaß. Die Suche nach dem neuen Quark wurde ab 1979 intensiv bei PETRA betrieben, angeregt durch eine naive Massenregel, die vorgab, daß bereits die anfangs vorhandene Schwerpunktsenergie zur Produktion sei es als Resonanz oder als freies Paar ausreichen könnte. Nachdem sich kein Signal zeigte, wurde die Energie der Maschine erhöht. So ging es weiter, bis mit 46 GeV die Grenzenergie der Maschine erreicht war mit dem Ergebnis, daß die t -Masse größer als 23 GeV sein muß. Nach der PETRA Ära wurde die direkte Suche am e^+e^- Speicherring TRISTAN und am $p\bar{p}$ -Speicherring Tevatron fortgesetzt. Inzwischen sind die Messungen der elektroschwachen Größen so genau geworden, daß aus den radiativen Korrekturen, die von der t -Masse abhängen, indirekt auf den Wertebereich der t -Masse geschlossen werden konnte. Der Stand bei der schon erwähnten *Weak Interaction and Neutrino Konferenz* 1989 in Nof Ginosar ist in Fig. 6 dargestellt. CDF hat die untere Grenze an die t -Masse auf 50 GeV hochgeschoben, während die Konsistenz aller bis dahin verfügbaren Messungen bei fester Higgsmasse von 100 GeV den erlaubten Bereich der t -Masse auf Werte zwischen 50 und 170 GeV festlegte. Der erste Hinweis auf eine wirklich hohe t -Masse ergab sich aus der Entdeckung der $B^0 - \bar{B}^0$ Mischung durch die ARGUS Kollaboration (Ref. [7]). Durch die präzisen Messungen bei LEP konnte ein paar Jahre später die Topmasse innerhalb des Standardmodells zu etwa 170 GeV mit einer Unsicherheit von etwa 20 GeV vorhergesagt werden und wurde danach 1995 experimentell durch die Kollaborationen CDF und D0 am Tevatron bestätigt. Dies war ein Triumph des Standardmodells ! Der heutige Bestwert für die t -Quarkmasse ist 173.3 ± 1.3 GeV (cf. Fig. 8).

7 Auf dem Z

Im Sommer 1989 sind zwei neue e^+e^- Beschleuniger in Betrieb gegangen: im SLAC der Linearbeschleuniger SLC und im CERN der Speicherring LEP. Pünktlich zum Lepton-Photon Symposium in Stanford konnte mit dem MARK II Detektor am SLC die erste Messung der Z -Resonanzkurve mit den Parametern $m_Z=91.11\pm 0.23$ GeV und $\Gamma_Z=1.61 \pm_{0.43}^{0.60}$ GeV berichtet werden ([8]). Unmittelbar danach haben die vier LEP-Experimente ALEPH, DELPHI, L3, OPAL ihre **ersten** Z -Resonanzmessungen publiziert und die Genauigkeit in der Z -Masse auf unter 100 MeV verbessert. Zur Resonanzbreite tragen die Zerfälle $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ bei und liefern Information über die Anzahl der *leichten* Neutrintypen (cf. Fig. 7 links). So konnte gleich zu Beginn das bedeutende Ergebnis (Ref. [9]) gewon-

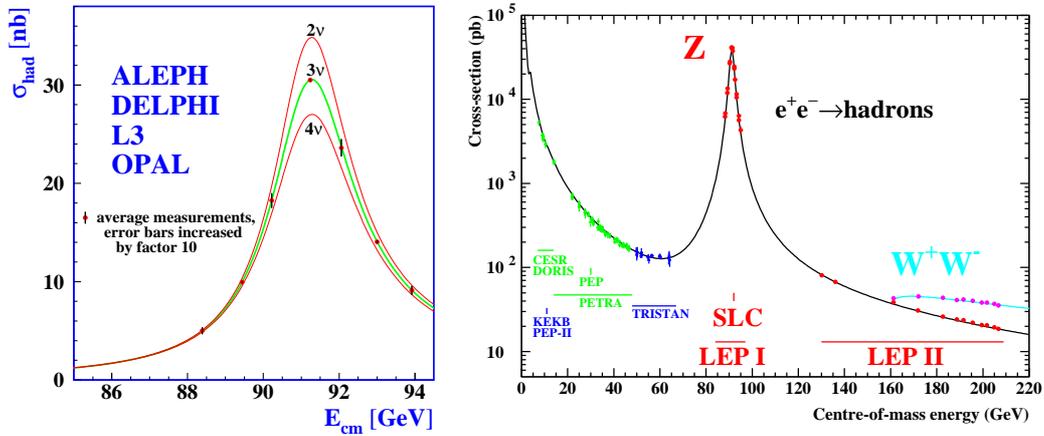


Figure 7: Links: Zahl der leichten Neutrinos; rechts: Hadronproduktion als Funktion der Schwerpunktsenergie

nen werden, daß es genau drei leichte Neutrinos gibt : die bekannten ν_e , ν_μ und das vermutete ν_τ , das im Jahre 2000 von der DONUT Kollaboration (Ref. [10]) erstmalig nachgewiesen wurde.

Die rechte Fig. 7 zeigt den Verlauf des Hadronquerschnitts als Funktion von \sqrt{s} , der Schwerpunktsenergie der jeweiligen Speicherringe. Er wird durch die Propagatoren und die Kopplungen bestimmt. Bei kleinen Energien dominiert der QED-Beitrag mit dem charakteristischen $1/s$ -Abfall. Mit zunehmender Energie wird die (γ, Z) -Interferenz wirksam, bis schließlich die schwache Wechselwirkung in der Nähe der Z -Resonanz mit der charakteristischen s -Abhängigkeit dominiert. Danach, bei den erhöhten Energien in der zweiten Phase des LEP-Betriebes, fällt der Querschnitt wieder mit $1/s$, erreicht und überschreitet die Produktionsschwelle der W^+W^- Paare. In den Jahren 1989 bis 1995 sammelten die vier LEP Experimente knapp 20 Millionen Z -Bosonen. Aus der Messung der differentiellen Fermionpaarquerschnitte $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ bei LEP und SLC wurden

präzise Werte der verschiedenen Z -Resonanzparameter bestimmt : die Z -Masse und Breite, der hadronische Querschnitt am Scheitel, die Winkelasymmetrien



Figure 8: Die Z -Resonanzparameter. Stand Juli 2010

A_{FB}^f und Verhältnisse von Partialbreiten $R_f = \Gamma_h/\Gamma_f$ ($f = e, \mu, \tau$). Hinzukommen Messungen mit schweren Quarks und die sehr empfindlichen Rechts-Links-Asymmetrien. Die Bestwerte sind in Fig. 8 aufgelistet und mit den Vorhersagen des Standardmodells verglichen. Wie man sieht, haben die Messungen auf dem Z für $\sin^2\Theta$ einen 5-mal genaueren Wert ergeben als aus den Neutrinoexperimenten. Zum Vergleichen mit Fig. 4 gilt $\bar{s}^2(M_Z^2) \approx \sin^2\Theta_{eff}^{\text{lept}} - 0.0010$.

Die Untersuchung von $e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$ and $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ hat durch die Entwicklung der Vertexdetektoren und die Methoden zur Identifizierung der schweren Quarks große Bedeutung erlangt. Im Sommer 1995 entstand eine Krise, weil die Messungen von Γ_c/Γ_l und Γ_b/Γ_l zu den Vorhersagen des Standardmodells in eklatantem Widerspruch standen (cf. Fig.4 in Ref. [6]). Eine sorgfältige Revision mit erhöhter Statistik und verbesserter Systematik hat für die $Zc\bar{c}$ und $Zb\bar{b}$ Parameter Verträglichkeit mit der Theorie innerhalb von 3 Standardabweichungen erbracht (cf. Fig. 8).

8 HERA

Die ep und μp Streuung war lange eine Domäne der QED, wie es umgekehrt die νp und νN Streuung für die schwache Wechselwirkung war. Die am Elektron-Proton-Speicherring HERA verfügbare Schwerpunktsenergie von 300 GeV ist so hoch, daß sowohl elektromagnetische als auch schwache Phänomene beobachtbar sind. Fig. 9 stellt dies eindrucksvoll dar. Bei Impulsüberträgen von der

Größenordnung der Z -Masse sind die elektromagnetischen und die schwachen

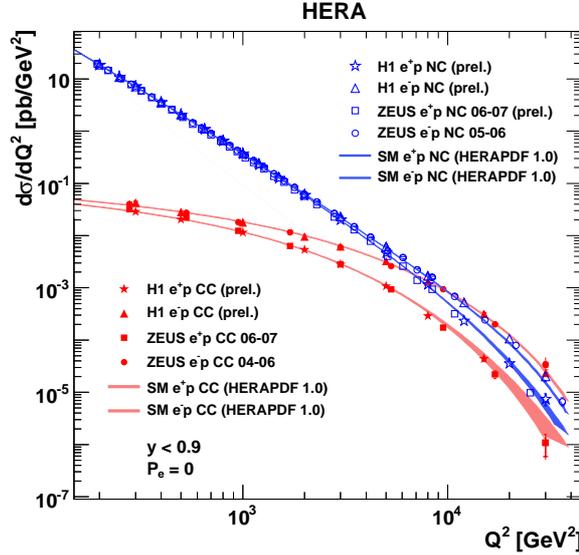


Figure 9: NC und CC Querschnitte der neutralen (NC) und geladenen (CC) Ströme vs. Q^2 bei HERA

Amplituden vergleichbar groß, sodaß die (γ, Z) -Interferenz deutlich hervortritt. Das Verhältnis der inklusiven Querschnitte NC/CC ist bei kleinen Impulsüberträgen durch die Propagatoren von γ und W bestimmt und deshalb sehr groß. Dies illustriert im Rückblick die Leistung des ed Experiments am SLAC 1978, in dem zum erstenmal die Interferenz nachgewiesen wurde. Es macht auch deutlich, daß bei den Muonexperimenten am SPS die schwachen Effekte zurecht vernachlässigt werden konnten.

HERA ging 1992 in Betrieb. Bereits die erste Datennahme hat ausgereicht, um den rein schwachen Prozeß $e^-p \rightarrow \nu_e + X$, also den inversen β -Zerfall, erstmalig zu beobachten. Obwohl die Statistik gering war, konnte endlich der Propagatoreffekt des W -Bosons, der so vergeblich am PS und SPS gesucht wurde, aufgezeigt werden (Fig. 10a). Ein interessantes Korollar ergibt sich aus der Interpretation der Messung als Neutrinowechselwirkung mit einem festen Target, weil dies einem totalen Querschnitt bei etwa 30 TeV entspricht, weit oberhalb existierender Messungen und so für die Astrophysik von Bedeutung ist. Zu den bleibenden Errungenschaften von HERA zählt die Vermessung der Protonstrukturfunktionen F_2 , xF_3 und F_L praktisch über den gesamten Phasenraum, also insbesondere der Vorstoß in x bis zu Werten von 10^{-6} und in Q^2 bis 30 000 GeV².

Ein eleganter Test der schwachen Wechselwirkung folgte aus dem Betrieb von HERA mit polarisierten Elektronen und Positronen. Der schon erwähnte Prozeß $e^-p \rightarrow \nu_e + X$ vollzieht sich allein durch den Austausch eines W Bosons.

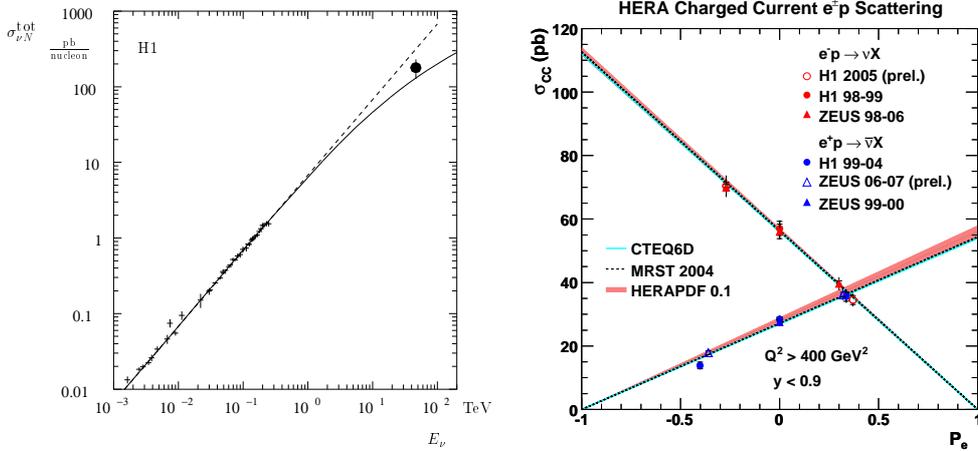


Figure 10: a: W-Propagator effekt; b: Test des geladenen Stromes

Bei der schwachen Wechselwirkung streuen aber nur linkshändige Elektronen und rechtshändige Positronen an den Partonen des Protons. Variiert man also den Grad der Polarisation, so sollte der Querschnitt im Grenzfall rechtshändiger Elektronen verschwinden. Dies bestätigen die Messungen, wie die Fig. 10b zeigt.

9 Der Weg zum Higgs

Im Standardmodell ist der Higgsmechanismus für die spontane Symmetriebrechung der $SU(2) \times U(1)$ nach $U(1)_{em}$ verantwortlich. Es muß ein neutrales Boson mit Spin 0 geben, über dessen Masse die Theorie keine Auskunft gibt - außer einer oberen Grenze von 1 TeV aus Konsistenzgründen. Nach all den erfolgreich bestandenen Tests kommt die Frage nach der Existenz dieses Higgsteilchens in die kritische Phase. Die charakteristische Eigenschaft, daß seine Kopplung massenabhängig ist, hat es erlaubt, in direkten Suchen leichte Massen auszuschließen. Die indirekte Methode besteht in der Suche nach Spuren innerhalb der radiativen Korrekturen präzise gemessener Größen, die jedoch dadurch erschwert ist, daß die virtuellen Beiträge nur proportional zu $\log M_{higgs}^2/M_W^2$ sind.

Die Fig. 11 zeigt die Abhängigkeit verschiedener Größen in der (M_{top}, M_{higgs}) -Ebene. Die im Fit benutzten Messungen entsprechen dem Stand von 1998 und enthalten die präzisen Messungen der Z -Parameter von LEP I. Der Bestwert für die Higgsmasse liegt im Bereich, der bereits durch Direktmessungen ausgeschlossen ist. Daran hat sich auch mit den neueren Fits nichts geändert. Die damals vorhandenen direkten Messungen der t -Masse sind als Punkt mit Fehlerbalken rechts eingezeichnet. Zwei im Fit festgehaltene Eingangsgrößen sind die Kopplungskonstanten der starken und elektromagnetischen Wechsel-

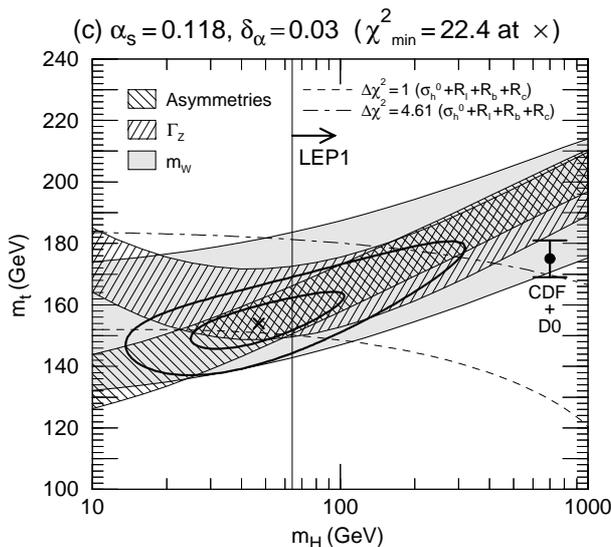


Figure 11: Standardmodellfit - Stand 1998 ([6])

wirkung $\alpha_s(M_Z)$ und $\alpha(M_Z)$. Werte der Higgsmasse unter 63 GeV sind ausgeschlossen, sonst hätte ein direkt erzeugtes Higgsboson durch seine Zerfälle nachgewiesen werden können. Der Fit verbessert die untere Grenze nicht. Die obere Grenze im Fit aus den Quantenkorrekturen ist unscharf zum einen wegen der ungenau bekannten Kopplung $\alpha(M_Z)$ (QED!), zum anderen wegen der starken (M_t, M_H) -Korrelation, jedoch ein schweres Higgs mit einer Masse oberhalb 200 GeV (Ref.[9]) ist ausgeschlossen.

In der zweiten Phase des LEP Betriebes wurde die Schwerpunktsenergie bis weit über die WW Schwelle erhöht (cf. Fig. 7 rechts). Die Messung des totalen Wirkungsquerschnitts $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ prüft den Tripelbosonvertex ZWW , so wie γWW in der ep -Streuung bei HERA. Die Übereinstimmung mit der Vorhersage des Standardmodells demonstriert den nichtabelschen Charakter der zugrundeliegenden Algebra $SU(2) \times U(1)$. Direkte Higgsproduktion konnte im Prozeß $e^+e^- \rightarrow Z + H$ studiert werden. Eine bedrängende Situation entstand kurz vor Abschalten von LEP, als zwei Kollaborationen Higgskandidaten bei 114 GeV vorwiesen, die anderen beiden nicht. Im Fermilab ging die Suche nach dem Higgsteilchen noch bis zum Abschalten des Tevatrons 2011 weiter und ließ für die Entdeckung nur noch einen ganz kleinen Massenbereich übrig. Nun fiel den seit 2010 im CERN laufenden Experimenten ATLAS und CMS an der neuen und höchstenergetischen Maschine, dem Large Hadron Collider LHC, die historische Rolle zu, zur Existenz des Higgsteilchens *ja oder nein* zu sagen. Fieberhafte Wochen und Monate vergingen, bis am 4. Juli 2012 von beiden Experimenten eine Resonanz bei etwa 125 GeV übereinstimmend unter großem Beifall angekündigt wurde und sogleich als die wahrscheinliche Entdeckung des ersehnten Higgsbosons interpretiert wurde. Die nachfolgenden Messungen haben sehr schnell die charak-

teristischen Eigenschaften des Higgsbosons bestätigt.

10 Ausblick

Die Erforschung des elektroschwachen Weges in den vergangenen fünf Jahrzehnten ist eine der großen und bleibenden Leistungen der Teilchenphysik. Alle bekannten elektroschwachen Phänomene sind auf elegante Weise im Standardmodell als einer Eichtheorie quantitativ erfaßt und zusammengefaßt. Die Entdeckung des mit der spontanen Symmetriebrechung zusammenhängenden Higgsbosons stellt die Krönung und einen gewissen Abschluß dar. Es entsteht ein Gefühl tiefer Befriedigung und Dankbarkeit, daß ein großer Traum, zwei fundamentale Kräfte vereinigt zu sehen, in Erfüllung gegangen ist.

Auf dem weiteren Weg werden die laufenden Experimente die derzeitige Gültigkeitsgrenze der Theorie kritisch prüfen. Beim Large Hadron Collider LHC ist kürzlich die Energie auf die bislang höchste Energie von 13 TeV gesteigert worden und ermöglicht so in einem neuen Phasenraumgebiet die Suche nach Phänomenen, die Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells liefern. Es gibt allerdings bereits jetzt schon eine kritische Stelle im Neutrino Sektor. Die Entdeckung der Neutrinooszillationen 1998 im Kamiokaexperiment gab dazu den Anstoß. Denn nun ist erwiesen, daß die Neutrinos nicht masselos sind, wie es das Standardmodell annimmt, und es entsteht eine symmetrische chirale Struktur. Viele neue Experimente widmen sich der detaillierten Erforschung der Struktur des Neutrino Sektors. Dazu gehört auch die alte Frage, endlich zu klären, ob das Neutrino ein Dirac- oder Majoranateilchen sei.

Nachwort

Auf dem langen und ereignisreichen Weg von der Stromalgebra bis zur Entdeckung des Higgsbosons habe ich viele wunderbare Begegnungen mit Herbert Pietschmann erleben dürfen. Dafür möchte ich meinen Dank sagen und ihm noch viele fruchtbare Jahre wünschen.

References

- [1] D. Haidt and H. Pietschmann: *Landolt-Börnstein New Series I/10*, Springer (1988); darin umfassendes Literaturverzeichnis bis 1986
- [2] R. Cashmore, L. Maiani and J.P. Revol: *Prestigious Discoveries at CERN*, EPJ C34 (2004) 1-190

- [3] H. Pietschmann: Selected Topics in Current Algebra. In: Lectures in Theoretical High Energy Physics. (Ed. H.H. Aly) John Wiley & Sons Ltd, London (1968) 1.
- [4] H. Pietschmann: *Geschichten zur Teilchenphysik*, Ibero Verlag/European University Press GmbH, 2007
- [5] G.L. Fogli and D. Haidt: Z.Phys. C40 (1988) 379
- [6] K. Hagiwara, D. Haidt, C.S. Kim, S. Matsumoto: Z.Phys. C64 (1994) 559;
K. Hagiwara, D. Haidt and S. Matsumoto: EPJ C2 (1998) 95
- [7] H. Albrecht et al.: Phys.Lett. B192 (1987) 245
- [8] G.S. Abrams et al.: PRL 63 (1989) 724
- [9] Electroweak Working Group CERN: Phys.Rep. 427 (2006) 257-454; hep-ep/0509008
- [10] K. Kodama et al.: Phys.Lett. B504(2001) 218
- [11] D.Schaile et P.M.Zerwas: Phys.Rev.D 45 (1992) 3262