

# $W^\pm$ und $Z^0$ - Vermittler der Schwachen Wechselwirkung

Martin-Lukas Wörner

29. Juli 2009

## 1 Einleitung

$W^\pm$  und  $Z^0$  Bosonen sind die Vermittler der schwachen Wechselwirkung, welche u.a. für den  $\beta$ -Zerfall verantwortlich ist. Es handelt sich um Vektorbosonen, also Spin-1 Teilchen. Sowohl  $W$  als auch  $Z$  sind mit einer Masse von 80 GeV bzw. 91 GeV sehr schwere Teilchen, mit annähernd dem hundertfachen der Protonenmasse. Diese hohe Masse sorgt für eine annähernde Punktförmigkeit der schwachen Wechselwirkung.

## 2 Vorhersage durch die Theorie

Der  $\beta$ -Zerfall war es auch, der erste Theorien zur schwachen Wechselwirkung angeregt hat. Die erste Theorie zum  $\beta$ -Zerfall stammte von Fermi, der eine Idee Paulis aufgriff. Pauli vermutete, dass die variierende Elektronenenergie beim  $\beta$ -Zerfall auf ein weiteres Teilchen zurückzuführen war, das bei der Reaktion entstand. Fermi griff diese Idee also auf und band sie in seine Theorie ein.

Diese Theorie beschrieb eine punktförmige Wechselwirkung und versagte somit bei hohen Energien aufgrund des divergierenden Wirkungsquerschnitts. Es war allgemein akzeptiert, dass ein Vermittlerteilchen existieren musste, das die Wechselwirkung übertrug. Dieses Teilchen musste sehr massiv sein, ferner musste es eine Ladung tragen.

### 2.1 Elektroschwache Vereinheitlichung

Eine Zeit lang sprach man von intermediären Vektorbosonen, bis 1967 Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg eine Vereinheitlichungstheorie der elektrischen und schwachen Wechselwirkung publizierten. Für diese sogenannte elektroschwache Vereinheitlichung erhielten die Physiker 1979 den Nobelpreis für Physik.

Die elektroschwache Vereinheitlichung beschrieb erstmals die Austauscheteilchen in der Form, wie wir sie heute begreifen.

Die „GSW“-Theorie postulierte vier masselose Bosonen als Ausgangszustand: Das  $W^+$ , das  $W^-$ , das  $W^0$  und das  $B^0$ . Aus einer spontanen Symmetriebrechung resultieren daraus die vier finalen Bosonen: das  $W^+$ , das  $W^-$ , sowie das Photon und das  $Z^0$ .

Drei dieser Bosonen erhalten ihre Masse nach der Theorie durch skalare Higgs-Felder. Das Photon bleibt masselos, und laut dem GSW-Modell muss somit ein freies Higgs-Boson existieren.

Der Weinberg-Winkel  $\Theta_W$  beschreibt diese Mischung. Er ist beispielsweise aus dem Myonen-Zerfall bestimmbar. Mit seiner Hilfe waren die absolute Masse von W und Z vorhersagbar:

$$M_W^2 = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}\sin^2\Theta_W G_F}$$

sowie

$$M_Z^2 = \frac{M_W^2}{\cos^2\Theta_W}$$

Die experimentelle Bestimmung des Weinberg-Winkels ergab  $M_W \approx 80 \text{ GeV}$  und  $M_Z \approx 92 \text{ GeV}$ . Wie bereits erwähnt, sind W und Z somit sehr schwere Teilchen und es existierte zum damaligen Zeitpunkt kein Beschleuniger, der eine Schwerpunktsenergie aufweisen konnte, die zur Erzeugung ausreichte.

### 3 Experimentelle Verifikation und Entdeckung

Zunächst stand man der ESV skeptisch gegenüber, doch die Theorie sollte schon bald eine experimentelle Verifikation erfahren: **1973** fotografierte die Gargamelle Blasenkammer im CERN Elektronen, die eine plötzliche Richtungsänderung erfuhren. Dies wurde als Neutrino-Elektron-Interaktion unter Austausch eines  $Z^0$  gesehen, ein Teilchen, welches die ESV propagiert hatte.

Diese Verifikation trieb den experimentellen Nachweis der Vektorbosonen voran. Zur Erzeugung dieser Bosonen müssen ein Lepton und Antilepton oder ein Quark und ein Antiquark miteinander reagieren. Die dafür notwendige Schwerpunktsenergie erreicht man am besten mit kollidierenden Teilchenstrahlen. Am einfachsten wäre eine  $e^+ + e^- \rightarrow Z^0$ -Kollision gewesen, doch standen die dafür notwendigen Schwerpunktsenergien zum damaligen Zeitpunkt nicht zur Verfügung. Solch hohe Energien standen erst deutlich später mit der Inbetriebnahme des SLC und des LEP zur Verfügung. In diesen Collidern wurde dann auch die genannte Reaktion initiiert.

Zuvor bestand für viele Jahre die einzige Möglichkeit zur Erzeugung der Vektorbosonen darin, die Quarks in Protonen auszunutzen. Jedoch genügte die halbe Ruheenergie

der Vektorbosonen nicht für ein Proton nicht, um die Vektorbosonen zu erzeugen. Vielmehr musste die Schwerpunktsenergie der beteiligten Quarks ausreichen. Die Quarks tragen lediglich einen Teil des Protonenimpulses in sich. Die Energie, die notwendig war, mittels einer frontalen Kollision zweier Protonen die Vektorbosonen zu erzeugen, lag jedoch immer noch jenseits des machbaren.

Günstiger war die Möglichkeit, Protonen auf Antiprotonen zu schießen. Die Schwerpunktsenergie musste hier nur halb so hoch sein. Ferner benötigt man aufgrund der entgegengesetzten Ladung von Proton und Antiproton lediglich einen Beschleunigerring.

### 3.1 Entdeckung im Sp $\bar{p}$ S

Seit 1976 war im CERN das Super Proton Synchrotron (SPS) in Betrieb. In der Anlage waren Protonen Energien bis zu 400 GeV realisierbar, doch arbeitete man mit festen Targets, sodass die Energie wiederum nicht ausreichen würde.

Die Lösung fand und forcierte Carlo Rubbia. Er schlug vor, das SPS zum Sp $\bar{p}$ S, also zum Super Protonen Antiprotonen Synchrotron umzubauen. Ein Vorschlag, der noch im selben Jahr realisiert wurde. Die Umsetzung war jedoch kompliziert: Antiprotonen mussten erst erzeugt, gekühlt und akkumuliert werden. Die Erzeugung erreichte man, indem man Protonen auf ein Kupfer-Target schoss. Die Ausbeute war jedoch sehr gering und entsprach lediglich einem Antiproton pro  $10^6$  eingesetzter Protonen.

Man benötigte also einen Zwischenspeicher. Ein weiteres Problem bestand in den Impuls- und Richtungsunterschieden welche die erzeugten Antiprotonen aufwiesen. Es war ein Kühlverfahren notwendig, um die Materie zu bändigen. Dies wurde durch eine stochastische Kühlung gelöst: Die Antiprotonen wurden nach der Erzeugung in einen Speicherring eingespeist. Dort maß ein Sensor deren Abweichung vom idealen Orbit und gab die Information an ein gegenüberliegendes E-Feld weiter, welches die entsprechenden Korrekturen vornahm. Für diese stochastische Kühlung war Simon van der Meer zuständig. Rubbia und van der Meer würden sich später den Nobelpreis teilen.

Der Wirkungsquerschnitt der Vektorbosonenerzeugung war gering. Er betrug lediglich ein bis zehn nano barn von insgesamt  $4 \cdot 10^7$  nano barn. Unter anderem wegen dieses geringen Wirkungsquerschnittes benötigte man einige 100 Milliarden Antiprotonen, deren Erzeugung ca. 24 h in Anspruch nahm.

#### 3.1.1 Die Beschleunigung

Bei der Beschleunigung selbst verfuhr man in mehreren Stufen, bis man die Teilchen bei 27 GeV in das Sp $\bar{p}$ S einflößte. Dort beschleunigte man dann auf die finale Energie von ca. 270 GeV und veranlasste die Kollision. Die Schwerpunktsenergie betrug somit gerade

$$E = 540 \text{ GeV}$$

### 3.1.2 Zerfall und Detektion

Bei allgemeiner Gültigkeit der schwachen Wechselwirkung sollten die W-Bosonen in alle Fermionen-Antifermionen-Paare mit gleicher Häufigkeit zerfallen. Für die Quark-Antiquark-Paare kommt wegen der drei möglichen Farbladungen ein weiterer Faktor 3 hinzu. Aufgrund der Hadronisierung der Quarks ist jedoch oft nicht eindeutig, in welches Quark-Antiquark-Paar ein W-Boson zerfallen ist. Die Identifizierung der leptonischen Zerfallskanäle ist hier wesentlich einfacher.

Es kamen zwei Detektoren zum Einsatz. Diese waren UA1 und UA2, benannt nach den underground areas, in denen sie standen. Diese Detektoren suchten unabhängig voneinander nach den W und Z. UA1 war anerkanntermaßen das Hauptprojekt. UA2 verstand sich als freundschaftliche Konkurrenz und natürlich als Kontrollinstanz.

Beim UA1 Detektor handelte es sich um einen Allzweckdetektor. Er wog 2000 t und besaß drei zentrale Driftkammern mit einem Magnetfeld von ca. 0,7 T. Ferner besaß der Detektor ein elektromagnetisches sowie ein hadronisches Kalorimeter und Myonen-Driftkammern im äußeren Bereich.

Der UA2 Detektor war simpler aufgebaut, als der UA1. Auch die Kosten betrug lediglich ein Drittel der Kosten des „großen Bruders“. Das Hauptaugenmerk des UA2 Detektors lag im Bereich der Kalorimetrie. Der Detektor war allgemein dedizierter und viele Vorgänge, die dem UA1 nicht entgingen, konnten schlicht ignoriert werden.

Beide Detektoren arbeiteten mit dem Transversalimpuls, da dieser eher detektierbar war. Die Zerfallsprodukte der W-Bosonen haben einen deutlich höheren Transversalimpuls als bei hadronischen Ausgangsteilchen.

Untersucht wurde der Prozess

$$W^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu$$

Also ein Prozess mit einseitig fehlendem Transversalimpuls, denn das Neutrino konnte nicht detektiert werden.

Wie man sich vorstellen kann, war das Auffinden der W-Ereignisse eine schwierige Angelegenheit. Aufgrund des geringen Wirkungsquerschnitts gab es ohnehin nur sehr wenige dieser events. Ferner kamen nur solche Ereignisse infrage, die zentral und gewissermaßen isoliert stattfanden. Gegen Ende des Experiments um 1982 hatten ca. eine Milliarde Proton Antiproton Kollisionen stattgefunden, von denen ca. eine Million aufgezeichnete worden waren. Die Auswahl musste also computergesteuert stattfinden. Nachdem man sich nach monatelangen Probeläufen mit dem Detektor vertraut gemacht hatte, und entsprechende Filter und Trigger installiert hatte, gab es nur noch wenige Events, die manuell zu untersuchen waren. Diese Events waren potenzielle W-Events, für welche spezielle Trigger existierten: Energiegesteuerte Elektronentrigger sowie Winkelgesteuerte Myonentrigger.

Gegen Ende von 1982 hatte man 5 Events, die als W-Bosonen Zerfall identifiziert

worden waren. Eine vorläufige Bestimmung der Masse lieferte

$$M_W \approx (81 \pm 5) \text{ GeV}$$

Bereits im Frühjahr 1983 folgte die Entdeckung des Z Bosons, ebenfalls durch UA1. Hier gestaltete sich die Auswahl der Ereignisse wesentlich einfacher als beim W Boson. Man suchte nach hochenergetischen Elektron-Positron Events sowie hochenergetischen Myon-Antimyon events. Musste also nicht mit einem fehlenden Transversalimpuls arbeiten. Die Kriterien waren zwei Spuren geladener Leptonen mit hohem gleich großem und entgegengesetztem Transversalimpuls.

Man beobachtete vier Elektronen- und ein Myonen-Event. Eine vorläufige Massebestimmung ergab eine Z-Masse von  $M_Z = (95,5 \pm 2,5) \text{ GeV}$ . Im Januar 1983 publizierte das UA1 seine Ergebnisse, das UA2 folgte eine Monat später. Die Entdeckung untermauerte die elektroschwache Theorie und galt als Sieg Europas im Wettrennen mit den USA auf dem Gebiet der Teilchenphysik. Die New York Times titulierte: „Europe 3, US Not Even Z-Zero“. Die Entdeckung war so wichtig, dass der Nobelpreis für Physik bereits 1984 an Carlo Rubbia und Simon van der Meer ging, die Hauptverantwortlichen des Projekts.

### 3.2 aktueller Stand

Man strebt nach wie vor nach genaueren Messdaten für die Masse und Halbwertsbreite der Vektorbosonen. Das hängt damit zusammen, dass die über Präzisionsmessungen der W- und Z-Masse auf die Higgs-Masse zurückgeschlossen werden kann, denn die Higgs-Masse bewirkt über Strahlungskorrekturen Fluktuationen in der W- und Z-Masse.