## P3 WS 2012

## Elementarteilchen

Marco A. Harrendorf und Thomas Keck marco.harrendorf@googlemail.com, t.keck@online.de Gruppe: 1 Karlsruhe Institut für Technologie, Bachelor Physik

Versuchstag: 07.05.2012

## Inhaltsverzeichnis

| 1  | Grundlagen       |   |    |  |  |
|----|------------------|---|----|--|--|
|    | 1.1              | Das Standardmodell  | 3  |  |  |
|    | 1.2              | Der Detektor  | 5  |  |  |
|    | 1.3              | Nachweis von Teilchen   | 6  |  |  |
| 2  | Aufgabenstellung |   |    |  |  |
|    | 2.1              | Verzweigungsverhältnis beim $Z^0$ Zerfall und Anzahl der Farbladung der starken   |    |  |  |
|    |                  | Wechselwirkung  | 9  |  |  |
|    | 2.2              | Abschätzung der Kopplungskonstanten der starken Wechselwirkung $\alpha_s$ aus der |    |  |  |
|    |                  | 3-Jet-Rate  | 10 |  |  |
|    | 2.3              | Anzahl der Neutrinogenerationen im Standardmodell                                 | 10 |  |  |
|    | 2.4              | Fehlerbetrachtung   | 11 |  |  |
| Li | terati           | ur  | 12 |  |  |

### 1 Grundlagen

#### 1.1 Das Standardmodell

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt die bekannten Elementarteilchen, aus der die Materie aufgebaut ist, sowie die Wechselwirkung dieser Elementarteilchen untereinander über die elektromagnetische Kraft, die schwache Kernkraft und die starke Kernkraft. Die Gravitation ist nicht Teil des Standardmodells. Grundlegend unterscheidet man im Standardmodell zwischen:

- 1. Leptonen: Hierzu gehört das Elektron und das Neutrino. Sie tragen einen halbzahligen Spin und sind Fermionen.
- 2. Quarks: Das Up- und das Down-Quark, diese sind die Bausteine für Protonen und Neutronen. Auch bei ihnen handelt es sich um Fermionen mit Spin  $\frac{1}{2}$ .
- 3. Eichbosonen: Diese vermitteln die drei im Modell enthaltenen Kräfte. Das Photon bewirkt die Elektromagnetische Kraft, es koppelt an alle Teilchen mit einer elektrischen Ladung. Das Gluon bewirkt die starke Wechselwirkung, es koppelt nur an Quarks. W- und Z-Bosonen koppeln an Fermionen und vermitteln die schwache Wechselwirkung.

Die grundlegenden Leptonen und Quarks besitzen jeweils drei sogenannte Generationen (oder auch Familien), diese unterscheiden sich lediglich in ihrer Masse. So besitzt das Elektron (Ruheenergie 0.511 MeV) etwa zwei schwerere Geschwister: das Myon (Ruheenergie 105.7 MeV) und das Tauon (Ruheenergie 1777 MeV). Da die schwereren Generationen in die zugehörigen leichteren Teilchen zerfallen können, sind diese durchweg instabil. Die schweren Generationen findet man deshalb nur in kosmischer Strahlung und in Beschleunigern. Jedes Elementarteilchen des Standardmodells besitzt darüberhinaus noch ein Antiteilchen mit den gleichen Eigenschaften. Leptonen und Quarks mit den dazugehörigen Generationen und die Eichbosonen sind in Schaubild 1.1 zusammengefasst.

Jedes Elementarteilchen im Standardmodell besitzt mindestens die 4 Eigenschaften:

- 1. Masse: Oft auch als Ruheenergie bezeichnet. Im Standardmodell gibt es außerdem mindestens zwei Teilchen ohne Masse, das Photon und das Gluon. Die Masse der Neutrinos ist Gegenstand aktueller Forschung.
- 2. Elektrische Ladung: Dabei ist bemerkenswert, dass Quarks nur Bruchteile von Elementarladungen tragen. Da Quarks aufgrund des "Confinement" stark "aneinanderkleben" beobachtet man im Experiment jedoch wieder nur ganzzahlige Vielfache der Elementarladung.
- 3. Farbladung: Quarks tragen außerdem eine sogenannte Farbladung, sind also entweder rot, blau oder gelb. Man beobachtet immer nur farblose Teilchen, sodass sich Quarks immer zu zweit (Farbe + Antifarbe), die entstehenden Teilchen nennt man Mesonen, oder zu dritt (rot+blau+gelb=weis), die entstehenden Teilchen nennt man Baryonen, zusammenfügen müssen. Diese aus Quarks zusammengesetzten Teilchen nennt man insgesamt Hadronen.



Abbildung 1: Das Standardmodell der Teilchenphysik: Entnommen aus [MissMJ]

- 4. Spin: Alle Leptonen und Quarks tragen den Spin  $\frac{1}{2}$  und sind damit Fermionen. Die Eichbosonen dagegen haben Spin 1 und sind damit, wie der Name schon vermuten ließ, Bosonen.
- 5. Weitere Eigenschaften sind die Hyperladung, die schwache Hyperladung und einige mehr, die hier nur der Vollständigkeit wegen erwähnt werden.

#### 1.2 Der Detektor

Die im Versuch untersuchten Daten kommen vom DELPHI Experiment, einem der vier Detektoren des "Large Electron-Positron Collider" (kurz: LEP) am CERN. Dabei wurden in einem Speicherring Elektronen und Positronen beschleunigt und in den Detektoren zur Kollision gebracht. Der grundlegende Aufbau des DELPHI Detektors ist, wie bei vielen solchen Experimenten, schalenförmig. Der Detektor ist in der Lage verschiedene Parameter der bei der Kollision



Abbildung 2: Der Delphi Detektor: Entnommen aus [Delphi]

entstehenden Produkte zu erfassen:

- 1. Energie: In den beiden Kalorimetern wird die Energie von Photonen, Elektronen, Positronen und Hadronen gemessen.
- 2. Impuls: Richtung und Geschwindigkeit der Teilchen kann man über Spurdetektoren zurückverfolgen, zusammen mit der Energiemessung ergibt sich der Impuls.
- 3. Flugzeit: Auch die Flugzeit und Lebensdauer der bei der Kollision entstehenden Teilchen kann gemessen werden.
- 4. Ladung: Über ein longitudinal angelegtes Magnetfeld kann aus der Ablenkung infolge der Lorenzkraft die Ladung der Teilchen bestimmt werden.

Nachfolgend werden die einzelnen Detektorschichten von innen nach außen kurz zusammengefasst, in der Klammer wird jeweils der im Schaubild 2 verwendete Begriff angegeben.

- 1. Ganz innen befindet sich das Strahlrohr, indem die Kollision zwischen Elektronen und Positronen stattfindet.
- 2. Der Spurdetektor (eng. Vertex Detector) besteht aus Halbleiterdetektoren, die die Spur der entstehenden Teilchen messen und rekonstruieren. Dieser Detektor soll vor allem sehr kurzlebige Teilchen erfassen.
- 3. Es folgt der innere Detektor (eng. Inner Detector). Dieser besteht aus einer JET-Kammer, die ebenfalls zur Spurrekonstruktion dient und einem Trigger Layer, der interessante Ereignisse herausfiltert, die abgespeichert werden sollen. Aufgrund der vielen stattfindenden Kollisionen können nicht alle Ereignisse gespeichert werden und es muss bereits im Detektor entschieden werden, welche Kollisionen die gesuchten Teilchen enthalten.
- 4. Die Spurendriftkammer (eng. Time Projection Chamber) ist der wichtigste Spurdetektor im Experiment. Dieser Detektor misst auch bereits die Energie der Teilchen.
- 5. Der äußere Detektor (eng. Outer Detector) besteht aus 5-lagigen Driftröhren, welche nochmals eine präzise Richtungsinformation für die Kollisionsprodukte liefern.
- 6. Das elektromagnetische Kalorimeter (Skizze: High-density Projection Chamber ) dient zur Energiemessung von geladenen Teilchen. Kalorimeter bestehen aus mehreren Schichten von Absorbermaterial und Auslesematerial. Im Absorbermaterial wird durch das zu messende Teilchen ein Teilchenschauer erzeugt, der im Auslesematerial über Szintilationsdetektoren gemessen werden kann.
- 7. Das hadronische Kalorimeter (eng. hadron calorimeter) misst die Energie von geladenen und neutralen Hadronen, die hier über die starke Kernkraft wechselwirken und nicht bereits im elektromagnetischen Kalorimeter absorbiert wurden.
- 8. Die Myonen-Kammer (eng. Myon Chamber) sitzt ganz außen am Detektor, da Myonen als einzige geladenen Teilchen die beiden Kalorimeter fast ungebremst durchfliegen. Werden hier Spuren von Teilchen rekonstruiert, handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um Myonen.
- 9. Vor dem eigentlichen Detektor befinden sich außerdem eine Reihe von Spurdetektoren und Kalorimeter, die in der Lage sind Teilchen zu detektieren, die in Vorwärtsrichtung gestreut wurden. Dies erhöht den effektiv messbaren Wirkungsquerschnitt der Kollision.

#### 1.3 Nachweis von Teilchen

Verschiedene Teilchen hinterlassen verschiedene Spuren und Energiedepositionen im Detektor. Eine kleine Zusammenfassung findet man in Schaubild 3.

- Photonen, Elektronen und Positronen wechselwirken sehr stark über die elektromagnetische Kraft und besitzen eine kurze Strahlungslänge, sie deponieren daher ihre gesamte Energie im inneren elektromagnetischen Kalorimeter. Elektronen und Positronen unterscheiden sich außerdem anhand ihrer Ladung und damit in der Richtung, in die sie aufgrund der Lorenzkraft abgelenkt werden.
- 2. Hadronen wie Neutronen deponieren ihre Energie über inelastische Stöße an Atomkernen im hadronischen Kalorimeter. Aufgrund der geringeren Wechselwirkung muss das hadronische Kalorimeter dichter und größer sein als das elektromagnetische.
- 3. Entsteht ein Quark-Antiquark Paar, so erzeugen diese beiden Quarks aufgrund des Confinements weitere Quarks und schließen sich zu Hadronen zusammen. Auf diese Weise bilden sich sogenannte Jets aus. Es handelt sich hierbei, um einige Hadronen, die sich vorzugsweise in die gleiche Richtung ausbreiten. Diese können im hadronischen Kalorimeter detektiert werden.
- 4. Myonen können im Myonendetektor ganz außen am Experiment eindeutig detektiert werden, da sie die einzigen Teilchen sind, die bis dorthin gelangen.
- 5. Neutrinos können nicht direkt nachgewiesen werden. Allerdings kann man sie indirekt über die Energie und die Impulserhaltung nachweisen, da man die Schwerpunktsenergie der Kollision kennt und alle anderen Teilchen im Dektektor messen kann.



Abbildung 3: Die Detektion von Teilchen in verschiedenen Schichten des Detektors: Entnommen aus [BlauesBuch]

### 2 Aufgabenstellung

Im Versuch "Elementarteilchen" wurden Elektron-Positron Kollisionen, die vom DELPHI-Experiment gemessen und für das Praktikum bereits aufbereitet waren, untersucht. Dabei haben wir die Anzahl an verschiedenen Zerfällen ermittelt. Bei den betrachteten Elektron-Positron Kollisionen entsteht zuerst ein  $Z^0$ -Vektorboson, dieses Eichboson besitzt verschiedene Zerfallskanäle. Es kann dabei in alle Quark-Antiquark Paare, außer dem Top Quark, und in alle Leptonen-Antilepton-Paare zerfallen. Die Masse des  $Z^0$  beträgt  $m_{Z^0} = 91$  GeV.

Die 400 der bereitgestellten Datensätze wurden nun klassifiziert, sodass eine Zuordnung zu den verschiedenen Zerfallskanälen möglich ist. Dabei wurde grob unterschieden zwischen Leptonischen Ereignissen (Elektron, Myon und Tauon-Paare) und hadronischen Ereignissen.

- 1. *Elektron-Paare* Elektronen-Paare konnte man sehr gut erkennen, da diese ihre Energie vollständig im elektromagnetischen Kalorimeter abgaben und exakt 2 Spuren im Spurdetektor hinterließen.
- 2. *Myonen-Paare* Myonen-Paare waren an den 2 geraden Spuren im Spurdetektor und an den Hits im Myon-Detektor ganz außen ebenfalls sehr gut zu erkennen.
- 3. *Tauon-Paare* Tauon-Paare waren die am Schwersten zu erkennenden Ereignisse. Ereignisse mit viel fehlender Energie (< 25MeV) und vielen Spuren im Spurdetektor, jedoch wenig deponierter Energie im hadronischen Kalorimeter wurden als Tauonen identifiziert.
- 4. Hadronen-Jets Die Zerfälle des Z<sup>0</sup> in Quarks waren gut an den ausgeprägten Jets von hadronischen Teilchen, die ihre Energie im hadronischen Kalorimeter abgeben, zu erkennen. Die Quarks erzeugen auf ihrem Weg durch den Detektor aufgrund des Confinement viele weitere Hadronen, die detektiert werden. Dabei unterschieden wir noch zwischen Jets mit 2 Strahlen und Prozessen höherer Ordnung (bei denen z.B. noch ein Gluon abgestrahlt wird), die mehr als 2 Jets produzierten.

Die so erhaltenen Anzahl an Ereignissen sind in Tabelle 1 angegeben.

| Ereignis                                       | Gezählte Ereignisse N | Statistischer Fehler $\sqrt{N}$ |
|--|-----------------------|---------------------------------|
| Elektronen-Paar                                | 28                    | 5.29                            |
| Myonen-Paar                                    | 12                    | 3.46                            |
| Tauonen-Paar                                   | 19                    | 4.36                            |
| Leptonen insgesamt $N_{Leptonen}$              | 59                    | 7.68                            |
| Hadronen 2-Jet N <sub>ZweiJet</sub>            | 209                   | 14.46                           |
| Hadronen 3-Jet (und mehr) N <sub>DreiJet</sub> | 132                   | 11.49                           |
| Hadronen insgesamt N <sub>Hadronen</sub>       | 341                   | 18.47                           |

 Tabelle 1: Das Ergebnis der Auswertung. Der statistische Fehler wurde unter Annahme einer Poissonverteilung der Ereignisse ermittelt.

Aus den gezählten Ergeinissen konnten nun verschiedene Parameter des Standardmodells ermittelt werden. Es wurden insgesamt 400 Ereignisse ausgewertet, da das Verzweigungsverhältnis einen statistischen Fehler von unter 15 % haben sollte. Alle Fehlerangaben der folgenden Zahlenwerte wurden aufgrund der statistischen Fehler in Tabelle 1 mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet.

# 2.1 Verzweigungsverhältnis beim $Z^0$ Zerfall und Anzahl der Farbladung der starken Wechselwirkung

Das Verzweigungsverhältnis von hadronischen (Quark-Antiquark-Paare) und leptonischen Ereignissen ist definiert über die Zerfallsbreiten:

$$R = \frac{\Gamma_{had}}{\Gamma_{l\bar{l}}} \tag{1}$$

mit 
$$\Gamma_{l\bar{l}} = 83, 83 \text{ MeV}$$
 (2)

und 
$$\Gamma_{l\bar{l}} = \frac{\Gamma e\bar{e} + \Gamma \mu \bar{\mu} + \Gamma \tau \bar{\tau}}{3}$$
 (3)

Die Zerfallsbreite  $\Gamma$  ist dabei proportional zur Anzahl der gezählten Ereignisse und reziprok proportional zur Zerfallszeit des  $Z^0$ . Da hier nur das Verhältnis betrachtet wird, reicht es aus, das Verhältnis der gezählten Ereignisse zu betrachten. Der Rest kürzt sich heraus.

$$R = \frac{N_{Hadronen}}{N_{Leptonen} \cdot 3} = 17.339 \pm 2.4448 \tag{4}$$

Der Fehler des Verzweigungsverhältnisses beträgt daher rund 14 %, und liegt damit unter den geforderten 15 %.

Es wurde dabei angenommen, dass im betrachteten Experiment alle 3 Leptonenereignisse die gleiche Zerfallsbreite besitzen, da ihre Masse gegenüber dem  $Z_0$  vernachlässigbar ist. Dies konnten wir im Versuch nicht exakt bestätigen, da die Standardabweichung der 3 Messwerte 8.02 beträgt. Die Standardabweichung ist jedoch in der Größenordnung des statistischen Fehlers der Leptonenzahl, sodass die Aussage, dass die Zerfallsbreiten nahezu gleich sind, nicht widerlegt werden kann.

Im Versuch wurde die Anzahl an Farbladungen bestimmt werden. Dies gelingt über den Zusammenhang:

$$N_{C} = \frac{\Gamma_{had}}{\underbrace{N_{u}}_{=2} \underbrace{\Gamma_{u\bar{u}}^{SM}}_{=98,88 \text{MeV}} + \underbrace{N_{d}}_{=3} \underbrace{\Gamma_{u\bar{u}}^{SM}}_{127,48 \text{MeV}} = R \cdot 0.1445$$
(5)  
= 2.5055 ± 0.35328 (6)

Dies entspricht nicht dem erwarteten Wert von  $N_C = 3$ . Jedoch liegt die Abweichung im Bereich von  $2\sigma$  (wobei  $\sigma$  der Fehler von  $N_C$  ist) und ist damit mit dem allgemein anerkannten Wert verträglich und gerade im Hinblick auf die geringe Statistik ein gutes Ergebnis,

## 2.2 Abschätzung der Kopplungskonstanten der starken Wechselwirkung $\alpha_s$ aus der 3-Jet-Rate

In der Vorbereitung war ein Zusammenhang zwischen der Kopplungskonstante  $\alpha_s$  der starken Wechselwirkung und der Anzahl an 3-Jet Ereignissen geben, der aus der QCD folgt:

$$\alpha_s = \frac{N_3 \left( y > y_{cut} \right)}{N_{bad} \cdot C \left( y > y_{cut} \right)} \tag{7}$$

$$C(y > y_{cut}) = 2.72$$
 (8)

$$y_{cut} = 0.02\tag{9}$$

Der Parameter  $y_{cut}$  ist dabei ein Maß für den Winkel, ab dem man ein 3-Jet Ereignis von einem 2-Jet Ereignis unterscheiden kann und ist von der Vorbereitungsmappe vorgegeben. Der Literaturwert beträgt  $\alpha_s = 0.119$ . Wir erhalten mit unseren Messergebnissen:

$$\alpha_s = \frac{N_{DreiJet}}{N_{Hadronen} \cdot 2.72} = 0.14231 \pm 0.014589 \tag{10}$$

Auch dieses Ergebnis ist mit einer  $2\sigma$  Abweichung mit dem Literaturwert verträglich.

#### 2.3 Anzahl der Neutrinogenerationen im Standardmodell

Die Anzahl der Neutrinogenerationen kann aus der totalen Zerfallsbreite ermittelt werden:

$$\Gamma_{tot} = \Gamma_{had} + 3\Gamma_{l\bar{l}} + \underbrace{N_V \Gamma_{v\bar{v}}}_{\Gamma_{inv}}$$
(11)

 $\Gamma_{inv}$  ist die Zerfallsbreite der Neutrinoereignisse, die wir im Experiment nicht sehen ("inv" steht für invisible).  $\Gamma_{had}$  und  $\Gamma_{l\bar{l}}$  sind aus den ersten beiden Teilversuchen bekannt, es fehlt noch  $\Gamma_{tot}$ . Hierfür gibt es einen Zusammenhang über den Wirkungsquerschnitt.

$$L = 28,48\frac{1}{\text{nb}}\tag{12}$$

$$\sigma_{had} = \frac{N_{had}}{L \cdot (1 - 0.263)} = 4.0615e - 36 \pm 2.1994e - 37m^2$$
(13)

$$\Gamma_{tot} = \sqrt{\frac{12\pi\Gamma_{had}\Gamma_{l\bar{l}}}{m_Z^2\sigma_{had}}} = 2.3034 \pm 0.17396e \text{GeV}$$
(14)

$$m_Z = 91.187 \text{GeV}$$
 (15)

Die Masse des Z-Bosons und die Luminosität der Daten L sowie die Korrektur zur Luminosität von 26.3 % aufgrund von Strahlungseffekten waren in der Vorbereitungsmappe gegeben. Bei der Umrechnung des Wirkungsquerschnitts in eine Energie wurde der in der Vorbereitungsmappe angebene Umrechnungsfaktor  $\sigma_{inm^2} \cdot 197.5 \cdot 10^{-9} = \sigma_{ineV}$  verwendet. Diese Umrechnung ist nötig, da die Formel für den totalen Wirkungsquerschnitt in natürlichen Einheiten h = c = 1 angegeben ist.

Die Anzahl der Neutrinogenerationen kann nun berechnet werden, indem  $\Gamma_{inv}$  bestimmt wird und dann das Verhältnis mit der ebenfalls gegebenen Zerfallsbreite  $\Gamma_{v\bar{v}} = 166.1 \text{MeV}$  des Neutrinokanals gebildet wird.

$$\Gamma_{inv} = 0.59837 \pm 0.26882 \text{GeV}$$
 (16)

$$N_V = \frac{\Gamma_{inv}}{\Gamma_{v\bar{v}}} = 3.6025 \pm 1.6184$$
(17)

Dieses Messergebnis ist innerhalb eines  $1\sigma$  Intervalls mit dem erwarteten Wert von 3 Neutrinogenerationen verträglich.

#### 2.4 Fehlerbetrachtung

Neben den bereits über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung berechneten Unsicherheiten aufgrund der Poissonstatistik der Ereignisse gibt es im Versuch auch systematische Fehlerquellen, die hier besprochen werden:

- 1. Die Tauon Ereignisse konnten nicht immer mit Sicherheit bestimmt werden. Dies dürfte eine der größten Fehlerquellen im Versuch sein.
- 2. Die Trennung von 2 und 3 Jet Ereignissen konnte ebenfalls nicht immer sicher angeben werden.
- 3. Falsche Messdaten waren ebenfalls ein Problem im Versuch. Mehrere Ereignisse wurden verworfen, da diese eine invariante Masse von über 150GeV besaßen und somit keine Z<sup>0</sup> Ereignisse sein konnten. Ebenfalls gab es Ereignisse, die aufgrund von Triggerfehlern zwar die richtige Energie besaßen, jedoch keine sonstigen Messdaten im Dektektor aufgezeichnet wurden.
- 4. Die Unsicherheit des Detektors selbst bei der Spurrekonstruktion und der Energiemessung ist nicht bekannt.
- 5. Die Software, die die automatische Jeterkennung durchführt, besitzt ebenfalls eine fehlerbelastete Erkennungsrate. Diese Rate wird in der Rechnung mit einem Korrekturfaktor *C* korrigiert, jedoch ist die Präzision dieser Korrektur ebenfalls nicht bekannt.

#### Literatur

[BlauesBuch] J. Wolf, F.K. Schmidt: Einführung in das Kernphysikalische Praktikum

[Delphi] CERN: The DELPHI detector at CERN's LEP collidier http://delphiwww.cern.ch/offline/physics/detrgb.big.gif Abrufdatum: 06.05.2012

## [MissMJ] MissMJ: Standard Model of Elementary Particles-de.svg

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard\_Model\_of\_ Elementary\_Particles.svg Abrufdatum: 06.05.2012