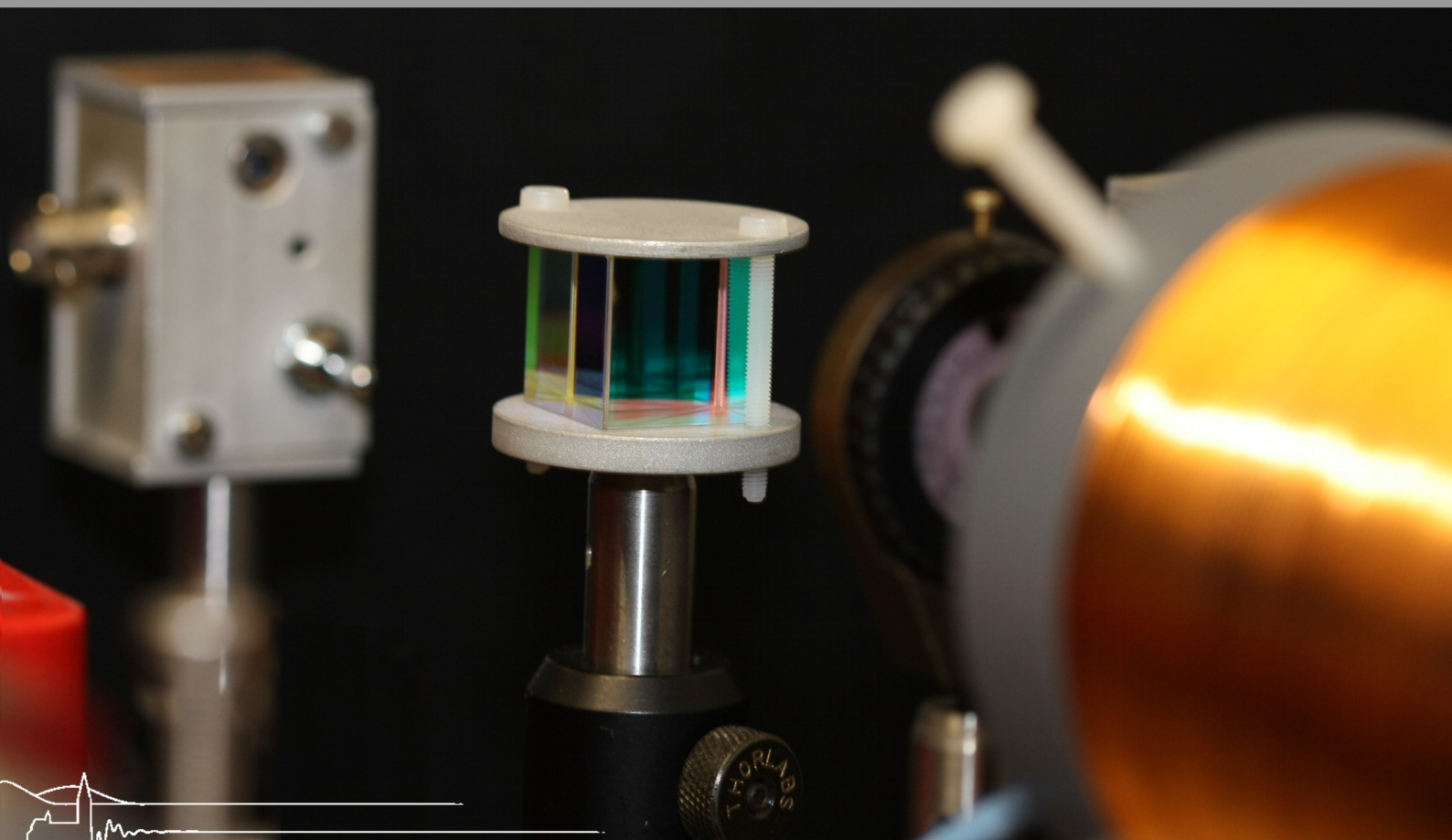




Universität Freiburg

Versuchsanleitung  
**Fortgeschrittenen  
Praktikum**  
Teil II

**$Z^0$ -Resonanz**



## $Z^0$ -Resonanz

INSTITUT FÜR MATHEMATIK UND PHYSIK  
ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT  
FREIBURG IM BREISGAU

2. MÄRZ 2012

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Vorkenntnisse</b>	<b>1</b>
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>2</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>4</b>

## 1 Einleitung

Der Versuch gibt einen Einblick in die moderne Elementarteilchenphysik. Das Z<sup>0</sup>-Teilchen ist der neutrale Partner des W<sup>±</sup>-Teilchens, welches die (schwache) Wechselwirkung im Beta-Zerfall vermittelt. Am CERN<sup>1</sup> in Genf wurde am LEP<sup>2</sup>-Speicherring durch e<sup>-</sup>e<sup>+</sup>-Kollision bei einer Schwerpunktsenergie von 91,2 GeV resonant erzeugt. Durch die Auswertung von Daten, welche mit dem OPAL<sup>3</sup>-Detektor aufgenommen wurden, sollen grundlegende Gesetze des sogenannten Standardmodells “überprüft werden. Hierzu gehören der Nachweis der Leptonuniversalität, die Messung der Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie und die Bestimmung der Anzahl leichter Neutrinofamilien.

## 2 Aufgabenstellung

- Berechnen Sie theoretisch die Zerfallsbreiten für die verschiedenen Fermionpaare und vergleichen Sie diese mit den in der Anleitung angegebenen Werten.
- Berechnen Sie die folgenden Größen: Gesamtbreite, hadronische Breite, ‘geladene’ leptonische Breite, ‘neutrale’ leptonische Breite (unsichtbare Breite) und partielle Wirkungsquerschnitte am Resonanzmaximum.
- Um wieviel Prozent würde sich die Breite der Z<sup>0</sup>-Resonanz “ändern, wenn der Zerfall in ein weiteres leichtes Fermionenpaar möglich wäre?
- Zeichnen Sie die erwarteten Formen der Winkelverteilungen für die Prozesse e<sup>-</sup>e<sup>+</sup> → e<sup>-</sup>e<sup>+</sup> und e<sup>-</sup>e<sup>+</sup> → μ<sup>-</sup>μ<sup>+</sup> auf. Trennen Sie im Falle von e<sup>-</sup>e<sup>+</sup> → e<sup>-</sup>e<sup>+</sup> die einzelnen Beiträge voneinander.
- Bestimmen Sie experimentell die gesamte, die leptonischen und hadronische Zerfallsbreiten sowie M<sub>Z</sub>.
- Berechnen Sie die Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie für den Prozess e<sup>-</sup>e<sup>+</sup> → μ<sup>-</sup>μ<sup>+</sup> bei √s = 91,2 GeV, 89,2 GeV und 93,2 GeV.

## 3 Vorkenntnisse

- Bausteine der Materie
- Fundamentale Kräfte
- Wechselwirkungen von Teilchen mit Materie (Bethe-Bloch-Gleichung, elektromagnetische Schauer, Cherenkov-Effekt)
- Funktionsweise von Teilchendetektoren (Driftkammern, elektromagnetische Kalorimeter, Szintillationszähler) und Aufbau des OPAL-Detektors.
- Monte-Carlo-Methode
- Detektorsimulation
- der Prozess e<sup>-</sup>e<sup>+</sup> → ff (Feynmandiagramme, t- und s-Kanalbeiträge, Strahlungskorrekturen, cos(Θ)-Verteilung der Bhabha-Streuung, etc.)
- Luminosität
- Wirkungsquerschnitt

Durchführung:

Der Versuch basiert auf der Verwendung des Frameworks ROOT, daher sind Kenntnisse in selbigem bzw. C/C++ hilfreich.

<sup>1</sup>Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire

<sup>2</sup>Large Electron-Positron Collider, betrieben von 1989-2000

<sup>3</sup>Omni-Purpose Apparatus for LEP

## 4 Versuchsdurchführung

1. Einweisung der Studenten in die Benutzung der Programme ROOT und GROPE<sup>4</sup> durch den Assistenten. Gemeinsam sollen anhand der ersten Eventbilder Aufbau und Funktionsweise des OPAL-Detektors diskutiert werden.
2. Schauen Sie sich die einzelnen Datensätze (Elektronen, Myonen, Taus und Hadronen) mit Hilfe von GROPE an. Die Eigenschaften der verschiedenen Ereignistypen und ihr 'Erscheinen' im Detektor sollen dabei durch Anfertigen einer geeigneten Tabelle studiert werden. Anhand dieser Tabelle sollen hinterher Schnitte festgelegt werden, die es ermöglichen die einzelnen Zerfallskanäle mit hoher Effizienz und hoher Reinheit zu selektieren. Dabei sollten sie in die Tabelle folgende Werte eintragen:
  - RUN: Run-Nummer
  - EVENT: Ereignis-Nummer
  - NCHARGED: Anzahl der geladenen Spuren
  - PCHARGED: Energie aller geladenen Spuren
  - E\_ECAL: Energie im elektromagnetischen Kalorimeter
  - E\_HCAL: Energie im hadronischen Kalorimeter
  - E\_LEP: LEP-Strahlenergie
  - COS\_THRU und COS\_THET:  $\cos(\Theta)$  ( $\Theta$  = Polarwinkel) (a) des positiven Leptons bezüglich der Positronstrahlrichtung, (b) der Thrustachse bei hadronischen Ereignissen.
3. Die anhand der gefertigten Tabelle grob bestimmten Schnitte sollen nun mit Hilfe von ROOT endgültig festgelegt werden. Dazu müssen Sie die Verteilungen der oben angegebenen Variablen für Elektronen, Myonen, Taus und Hadronen betrachten. Versuchen Sie durch Variation der Schnitte um die in (2) bestimmten Werte einen möglichst optimalen Kompromiss zwischen hoher Effizienz und hoher Reinheit zu erreichen.

**FRAGE:** Betrachten Sie die  $\cos(\Theta)$ -Verteilung der Elektronen. Versuchen Sie diese im Hinblick auf t- und s-Kanalbeitrag zu verstehen. Warum findet man nur auf einer Seite der Verteilung einen so großen Peak? Wo muss man am günstigsten schneiden, um optimal den t- vom s-Kanal zu trennen? Ist ein Schnitt nur auf einer Seite des Spektrums sinnvoll?

4. Tragen Sie auch die Verteilungen der oben angegebenen Variablen für die einzelnen Datensätze auf und versuchen Sie diese in Hinblick auf Detektoraufbau und Akzeptanzverluste zu verstehen.

**FRAGE:** Betrachtet man die Impulsverteilungen im Monte-Carlo oder in den Daten (beispielsweise für Elektronkandidaten, nach den von Ihnen festgelegten Schnitten), so werden Sie feststellen, dass für sehr viele Ereignisse ein Wert von Null eingetragen ist. Überlegen Sie welche Ursache dies hat. Warum verschwinden diese Nulleinträge bei einem Schnitt auf  $\cos(\Theta)$ ? Tragen Sie für die Daten E\_ECAL gegen PCHARGED auf. Überlegen Sie wo in diesem zweidimensionalen Plot Untergrund von Zwei-Photon-Ereignissen zu finden ist. Wie kann man diesen am günstigsten weg-schneiden?

5. Nachdem Sie alle Schnitte nun festgelegt haben, müssen Effizienzen und Untergrund für die leptonen und hadronischen  $Z$ -Zerfälle bestimmt werden. Für die Elektronen muss dabei der Anteil an t-Kanal Ereignissen abgezogen werden, um die reine Reaktion  $e^-e^+ \rightarrow Z \rightarrow e^-e^+$  zu erhalten. Hierzu muss man  $d\sigma/d\Theta = A(1 + \cos^2(\Theta)) + B(1 - \cos(\Theta))^{-2}$  und die COS\_THET-Verteilung für Elektronen fitten.

---

<sup>4</sup>Graphical Reconstruction of OPAL Events

**FRAGE:** An welchen (optimalen) Bereich zwischen -1 und 1 sollten die Funktion  $d\sigma/d\Theta$  hierbei gefittet werden? Welche Zahlen muss man mit Hilfe von A und B für eine richtige Effizienzbestimmung korrigieren? Wie geschieht das?

**FRAGE:** Welche Annahmen müssen bei der Untergrundabschätzung a priori (speziell beim hadronischen Untergrund für die leptonenischen Zerfallskanäle und umgekehrt) gemacht werden und in wie weit beeinträchtigen sie das Messergebnis.

6. Errechnen Sie aus den unter (5) ermittelten Effizienzen die Wirkungsquerschnitte für die vier Zerfallskanäle separat für die sieben einzelnen Energiepunkte. Verwenden Sie hierzu die in der zu Ihrem Datensatz zugehörigen Datei \*.lum angegebenen Luminositäten und berücksichtigen Sie die Effekte aufgrund der Strahlungskorrekturen (siehe Tabelle 1). Diskutieren Sie Ihr Ergebnis in Hinblick auf die Leptonuniversalität. Berechnen Sie zudem das Verhältnis des totalen Wirkungsquerschnittes am Resonanzmaximum des hadronischen zu den leptonenischen Zerfallskanälen. Vergleichen Sie das Ergebnis mit den erwarteten Verhältnissen der Verzweigungsverhältnisse und “überlegen Sie sich gegebenenfalls woher die Unterschiede kommen.

Schwerpunktsenergie [GeV]	Korrekturwerte [nb]	
	hadronische	leptonische
88,47	+2,0	+0,09
89,46	+4,3	+0,20
90,22	+7,7	+0,36
91,22	+10,8	+0,52
91,97	+4,7	+0,22
92,96	-0,2	-0,01
93,71	-1,6	-0,08

**Tabelle 1:** Zusammenstellung der Strahlungskorrekturwerte.

7. Bestimmen Sie die leptonenischen und die hadronische Breite des Z-Bosons, indem Sie an die unter (6) berechneten Wirkungsquerschnitte eine Breit-Wigner-Verteilung fitten. Korrigieren Sie Ihre Fehler (falls notwendig), indem Sie sie den  $\chi^2/\text{dof}$ -Wert (ROOT) Ihres Fits neu gewichten (PDG'94, Introduction) und dann den Fit neu durchführen bis (iterativ)  $\chi^2/\text{dof} \leq 1$ . Vergleichen Sie die gemessenen Werte unter Berücksichtigung der korrekten Fehler mit den theoretischen und den von Ihnen berechneten Werten.

**FRAGE:** Mit welcher der vier Partialbreiten sollte man am besten beginnen?

8. Bestimmen Sie aus Ihren Ergebnissen die Anzahl der leichten Neutrino-generationen.

**FRAGE:** Welche gemessenen Werte benutzen Sie dafür am besten und welche Annahmen müssen Sie für die Bestimmung machen?

9. Bestimmen Sie die Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie für die myonischen Endzustände für Daten und Monte Carlo. Schätzen Sie hieraus  $\sin^2 \Theta_w$  ab. Diskutieren Sie in diesem Zusammenhang die gemessenen und berechneten Winkelverteilungen.

## 5 Literatur

### Wissenschaftliche Arbeiten

- *Analyse von Z<sup>0</sup>-Zerfällen*

### Weiterführende Literatur

- PERKINS, D.H.: *Introduction to High Energy Physics*, Cambridge University Press, 2000
- BETHGE K.; SCHRÖDER, U.E.: *Elementarteilchen - und Ihre Wechselwirkungen*, Wiley, 2006
- HALZEN, F.; MARTIN, A.D.: *Quarks and Leptons: Introductory Course in Modern Particle Physics*, Wiley, 1984
- NACHTMANN, O.: *Phänomene und Konzepte der Elementarteilchenphysik*, Vieweg+Teubner, 1992
- NAKAMURA, K. ET AL.: *The Review of Particle Properties (PDG)*, 2010

Bemerkung: Vor allem die Anhänge in der Gesamtanleitung (Versuchsordner) in denen unter anderem die Benutzung von ROOT und GROPE beschrieben ist, sollten Sie sich vor dem Versuch durchlesen. Auch die in der Kurzanleitung nicht angegebenen Formeln können Sie in dieser Anleitung finden.