

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL- Experiment

### Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

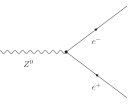
### Zusammen- fassung

### Quellen

# $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe, Frank Schäfer

23. April 2015



# Inhaltsverzeichnis

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

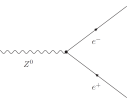
Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

- 1 Ziele
- 2 Theoretische Grundlagen
  - Allgemeines
  - Der Prozess  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in der Nähe der  $Z^0$  Resonanz
- 3 Das OPAL- Experiment
- 4 Auswertung
  - Cuts
  - st- Kanaltrennung
  - Zerfallsbreiten
  - Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie
- 5 Zusammenfassung
- 6 Referenzen



# Inhaltsverzeichnis

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

#### Das OPAL-Experiment

#### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

#### Zusammenfassung

#### Quellen

## 1 Ziele

## 2 Theoretische Grundlagen

- Allgemeines
- Der Prozess  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in der Nähe der  $Z^0$  Resonanz

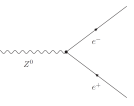
## 3 Das OPAL- Experiment

## 4 Auswertung

- Cuts
- st- Kanaltrennung
- Zerfallsbreiten
- Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie

## 5 Zusammenfassung

## 6 Referenzen



# Aufgabenstellung

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

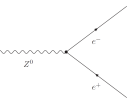
Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

- 1 Theoretische Berechnung der Zerfallsbreiten & Wirkungsquerschnitte für die verschiedenen Fermionpaare
- 2 Untersuchung der Abhängigkeit der Zerfallsbreite von der Anzahl der möglichen Zerfälle, auch im Hinblick auf die Anzahl leichter Neutrino-Generation
- 3 Darstellung der erwarteten Formen der Winkelverteilungen für die Prozesse  $e^- + e^+ \rightarrow e^- + e^+$  und  $e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$ .
- 4 Bestimmung der gesamten, leptonischen und hadronischen Zerfallsbreite des  $Z^0$ , sowie der Masse  $M_{Z^0}$ .
- 5 Berechnung der Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie



# Inhaltsverzeichnis

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

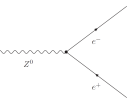
Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

- 1 Ziele
- 2 Theoretische Grundlagen
  - Allgemeines
  - Der Prozess  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in der Nähe der  $Z^0$  Resonanz
- 3 Das OPAL- Experiment
- 4 Auswertung
  - Cuts
  - st- Kanaltrennung
  - Zerfallsbreiten
  - Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie
- 5 Zusammenfassung
- 6 Referenzen



# Elektroschwache Wechselwirkung

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

#### Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+ e^- \rightarrow f \bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

- Ähnliche Kopplungskonstanten bei hohen Energien zwischen elektromagnetischer und schwacher WW  
→ Vorschlag: Vereinheitlichung (Glashow, 1961)
- Brout- Englert- Higgs Mechanismus wird integriert (Weinberg & Salam, 1967)
- Renormierbarkeit (Veltmann & t'Hooft, 1973)

→  $(W_\mu^1, W_\mu^2, W_\mu^3)$  koppeln an den schwachen Isospin I linkshändiger Fermionen

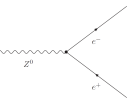
→  $B_\mu$  koppelt an Hyperladung  $Y = 2 \cdot Q - 2 \cdot I_3$

Es ergeben sich die physikalischen Felder:

$$W^\pm := \frac{1}{\sqrt{2}} \{ W_\mu^1 \mp i W_\mu^2 \}$$

$$\gamma := B_\mu \cdot \cos \theta_w + W_\mu^3 \cdot \sin \theta_w$$

$$Z_0 := -B_\mu \cdot \sin \theta_w + W_\mu^3 \cdot \cos \theta_w$$



# Elektroschwache Wechselwirkung

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

#### Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

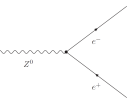
Zusammen-  
fassung

### Quellen

$\theta_w$  bezeichnet hierbei den **weak mixing angle**. Für  $\theta_w$  kann man folgende Beziehungen aus der elektroschwachen WW und dem Higgs-Mechanismus ableiten:

$$\cos \theta_w = \frac{m_W}{m_Z}$$

$$\sin^2 \theta_w = \frac{\alpha_{em}}{\alpha_w}$$



# Streuung und Wirkungsquerschnitte

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

#### Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

### Quellen

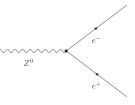
- Der Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung
- Die Proportionalität zwischen Ereignisrate  $\frac{dN}{dt}$  und Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  wird Luminosität  $L$  genannt
- Luminosität ist nur durch experimentellen Aufbau bedingt

$$\frac{dN}{dt} = L \cdot \sigma$$

Durch Integration der Gleichung ist es möglich, aus der gemessenen Teilchenanzahl auf den Wirkungsquerschnitt zu schließen.

$$\sigma = \frac{N}{\int L dt}$$





# Auftretende Prozesse bei $e^+e^-$ Wechselwirkungen

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

## Ziele

## Theoretische Grundlagen

### Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

## Das OPAL-Experiment

## Auswertung

### Cuts

### st-Kanaltrennung

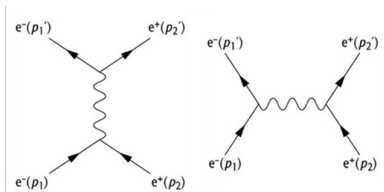
### Zerfallsbreiten

### Vorwärts- Rückwärts- Asymmetrie

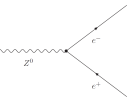
## Zusammenfassung

## Quellen

- Bhabha-Streuung: elastische Elektron-Positron Streuung
- Annihilation in  $Z^0$  oder Photon, welches anschließend in ein Fermion- Antifermion Paar zerfällt (s. Abbildung 1)



**Abbildung:** Streuung eines Elektrons mit Impuls  $p_1$  an einem Positron mit Impuls  $p_2$  [4], links s- Kanal; rechts t- Kanal



# Auftretende Prozesse bei $e^+e^-$ Wechselwirkungen

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

## Ziele

## Theoretische Grundlagen

### Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

## Das OPAL-Experiment

## Auswertung

### Cuts

### st-Kanaltrennung

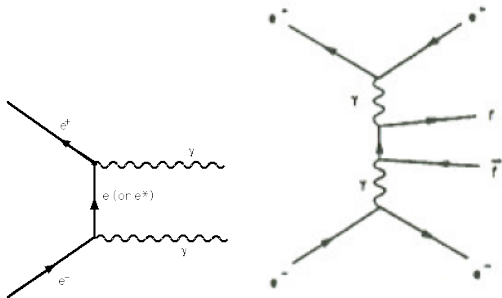
### Zerfallsbreiten

### Vorwärts- Rückwärts- Asymmetrie

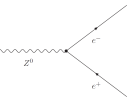
## Zusammenfassung

## Quellen

- Annihilation des  $e^+e^-$  in zwei oder 3 reelle Photonen
- Inelastische  $e^+e^-$  Streuung mit zusätzlicher WW zweier Photonen (2-Photon-Physik)



**Abbildung:** Annihilation in zwei oder drei reelle Photonen (links) und 2-Photon-Ereignisse (rechts)



# Zerfallsbreite

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

#### Das OPAL- Experiment

#### Auswertung

Cuts

st-

Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

Vorwärts-

Rückwärts-

Asymmetrie

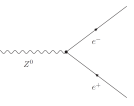
#### Zusammen- fassung

#### Quellen

- Vektorkopplung  $g_V^f = I_3^f - 2Q_f \sin^2 \theta_w$   
→ negativ unter Paritätstransformation
- Axialkopplung  $g_A^f = I_3^f$   
→ positiv unter Paritätstransformation

⇒ Paritätsverletzung der schwachen WW

⇒ Asymmetrie



# Zerfallsbreite

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

#### Das OPAL- Experiment

#### Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

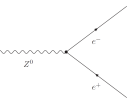
#### Zusammen- fassung

#### Quellen

Die totale Zerfallsbreite  $\Gamma_Z$  des  $Z^0$  ist:

$$\Gamma_Z = \Gamma_e + \Gamma_\mu + \Gamma_\tau + \Gamma_{had} + N_\nu \cdot \Gamma_\nu + \Gamma_{unbekannt}$$

- Zerfall des  $Z^0$  in  $t\bar{t}$  energetisch nicht möglich
- $\Gamma_{unbekannt}$  umfasst Beiträge, die nicht im Standardmodell enthalten sind, hier  $\Gamma_{unbekannt} = 0$



# Wirkungsquerschnitt

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow f\bar{f}) = \sigma_\gamma + \sigma_{Z^0} + \sigma_{\gamma Z}$$

Bei Energien in der Nähe der  $Z^0$ -Resonanz  $\rightarrow$   
Wirkungsquerschnitt durch den  $Z^0$  Austauschterm dominiert,  
Born-Näherung:

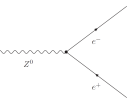
$$\sigma_f = \frac{12\pi}{M_Z^2} \cdot \frac{s\Gamma_e\Gamma_f}{(s - M_Z^2)^2 + (s^2\Gamma_Z^2/M_Z^2)}$$

wobei die Partialbreite gegeben ist durch:

$$\Gamma_f = \frac{N_c^f \sqrt{2}}{12\pi} \cdot G_F \cdot M_Z^3 \cdot (g_V^{f^2} + g_A^{f^2})$$

am Peak reduziert sich die Formel auf:

$$\sigma_f^{peak} = \frac{12\pi}{M_Z^2} \cdot \frac{\Gamma_e}{\Gamma_Z} \cdot \frac{\Gamma_f}{\Gamma_Z}$$



# Berechnete Wirkungsquerschnitte & Zerfallsbreiten

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

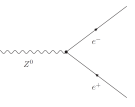
### Quellen

	$e, \mu, \tau$	Neutrinos	d,s,b-Quarks	u,c- Quarks
$\Gamma_f$	83.39	165.84	367.79	285.34
$\sigma(Z^0 \rightarrow f\bar{f})$	2.09	4.16	9.22	7.16

**Tabelle:** Theoretisch berechnete Zerfallsbreiten in MeV und Wirkungsquerschnitte in nb

Änderung der Zerfallsbreite des  $Z^0$  bei Zerfall in ein weiteres Fermion

- 3%  $\hat{=}$  geladenes Lepton
- 7%  $\hat{=}$  neutrales Lepton
- 15%  $\hat{=}$  d,s,b Quark
- 12%  $\hat{=}$  u,c Quark



# Wirkungsquerschnitte gegen Schwerpunktsenergie

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts

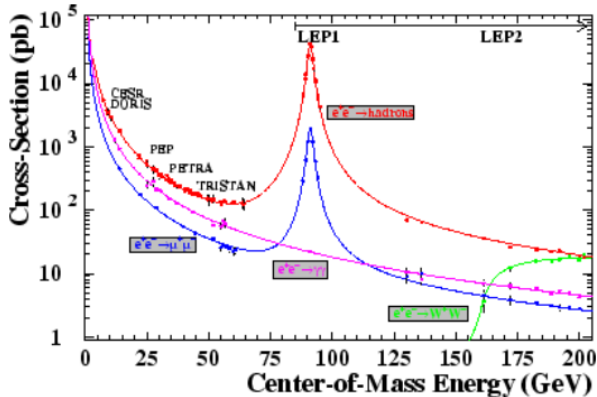
st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

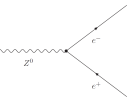
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen



**Abbildung:** Totaler Wirkungsquerschnitt als Funktion der Schwerpunktsenergie.



# Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

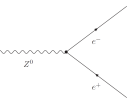
Quellen

Die Asymmetrie wird definiert als:

$$A_{FB}^f = \frac{\int_0^1 \frac{d\sigma}{d\cos\theta} d\cos\theta - \int_{-1}^0 \frac{d\sigma}{d\cos\theta} d\cos\theta}{\int_{-1}^1 \frac{d\sigma}{d\cos\theta} d\cos\theta}$$

$$A_{FB}^{f,Peak} \approx 3 \frac{(g_V^f)^2}{(g_A^f)^2} \approx 3(1 - 4\sin^2\theta_w)^2 \quad (1)$$





# Strahlungskorrekturen

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

#### Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

#### Cuts

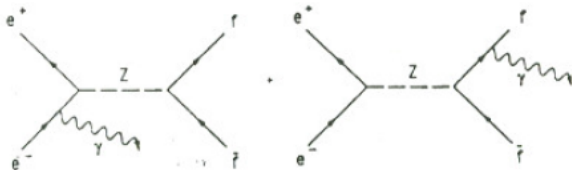
#### st-Kanaltrennung

#### Zerfallsbreiten

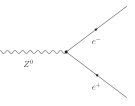
#### Vorwärts- Rückwärts- Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen



**Abbildung:** Reelle Strahlungskorrekturen: Abstrahlung eines Photons im Anfangszustand (initial state radiation) und Bremsstrahlung im Endzustand (final state radiation)[2]



# Strahlungskorrekturen

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts

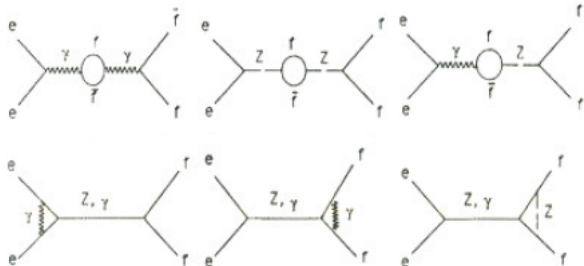
st-Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

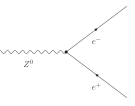
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen



**Abbildung:** Virtuelle Strahlungskorrekturen: selber Anfangs- und Endzustand wie in Born'scher Näherung)[2]



# Strahlungskorrekturen

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts

st-Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

Vorwärts-

Rückwärts-

Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

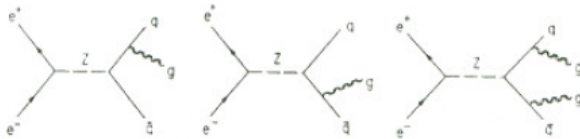
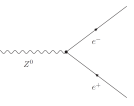


Abbildung: QCD Strahlungskorrekturen: Abstrahlung eines Gluons[2]



# Inhaltsverzeichnis

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

### 1 Ziele

### 2 Theoretische Grundlagen

- Allgemeines
- Der Prozess  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in der Nähe der  $Z^0$  Resonanz

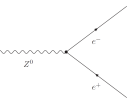
### 3 Das OPAL- Experiment

### 4 Auswertung

- Cuts
- st- Kanaltrennung
- Zerfallsbreiten
- Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie

### 5 Zusammenfassung

### 6 Referenzen



# Der LEP - Beschleuniger

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts

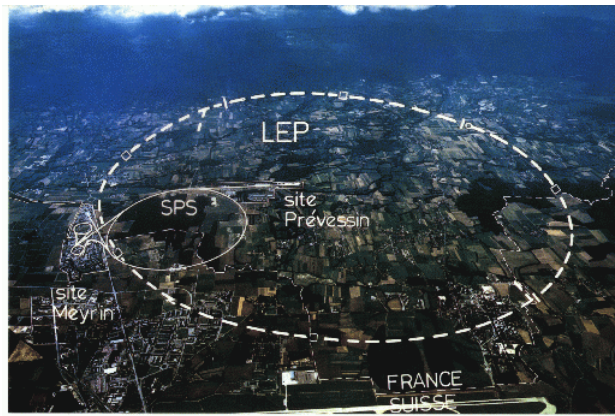
st-Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

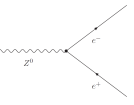
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen



27km Umfang, in 50-100m Tiefe, Betrieb von 1989 bis 2000



# OPAL - Überblick

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

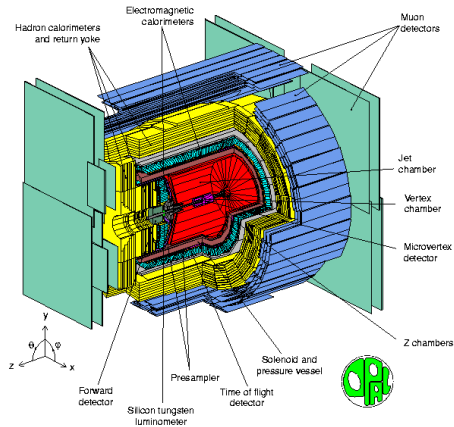
### Auswertung

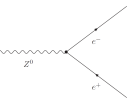
Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

- OPAL wurde betrieben am LEP-Beschleuniger, CERN von 1989 - 2000
- Schwerpunktenergie von 80 bis über 200 GeV
- Wichtigste Resultate:
  - Exakte Vermessung der  $Z^0$ -Masse
  - Erzeugung von W-Boson-Paaren
  - Suche nach Hinweisen auf Higgs-Mechanismus





# Tracking-Detektoren

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

#### Das OPAL-Experiment

#### Auswertung

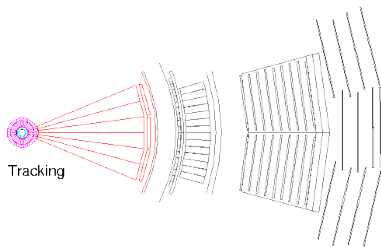
Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

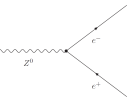
#### Zusammenfassung

#### Quellen

Dient der Rekonstruktion von Teilchenbahnen. Identifikation von Zerfallsprodukten des  $Z^0$ . Funktionsweise durch Ionisation und Anregung.

- Mikrovertex-Detektor (Cyan):  
Silizium-Streifen-Detektor
- Vertex-Kammer (Magenta): Vieldrahtproportionalkammer mit axial angeordneten Drähten, Ortsauflösung:  $55 \mu m$





# Tracking-Detektoren

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

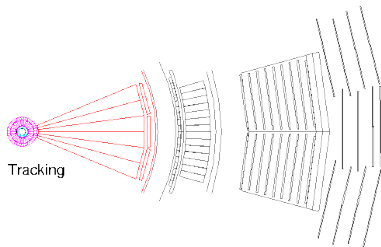
### Zusammenfassung

### Quellen

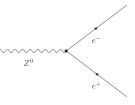
- Jet-Kammer (Rot):  
ebenfalls Zähldrähte  
parallel zur Strahlachse,  
Ortsauflösung:  $\approx 135 \mu m$

Außerdem:

- Z- Kammern (radial  
angeordnete Detektoren)
- Time-of-Flight-System:  
Szintillationszähler zur  
Messung der Flugzeit und  
Triggerung
- Magnetfeld 0,435 T in  
Strahlrichtung







# Elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL)

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

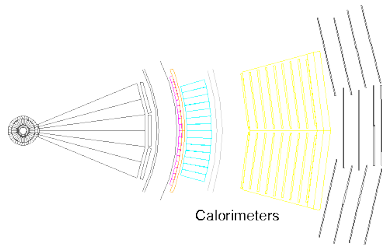
### Auswertung

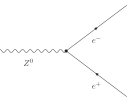
Cuts  
st-Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

- Besteht aus Bleiglasblöcken
- Deckt 98 % des vollen Raumwinkels ab (zusammen mit Endkappenkalorimeter)
- Kathodenpads hinter Bleiglasblöcken zur Bestimmung von Energie und Position EM-Schauer





# Hadronisches Kalorimeter (HCAL)

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

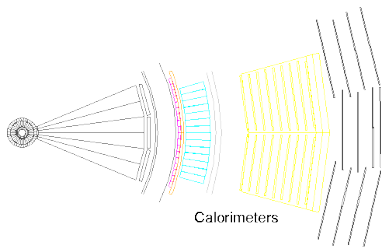
Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

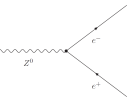
### Zusammenfassung

### Quellen

- Außerhalb des ECAL
- Besteht hauptsächlich aus Eisen
- Hadronen, die das ECAL verlassen, werden hier gestoppt
- Unterstützt bei der Identifikation von Myonen

Außerdem:  
Forward-Kalorimeter an Enden  
des Detektors zur Bestimmung  
der Luminosität





# Myon-Kammern

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+ e^- \rightarrow f \bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

#### Das OPAL-Experiment

#### Auswertung

Cuts

st-Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

Vorwärts-

Rückwärts-

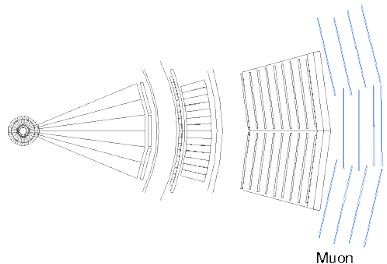
Asymmetrie

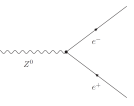
#### Zusammenfassung

#### Quellen

Myonen haben sehr hohes Durchdringungsvermögen und werden nicht von em- und hadronischem Kalorimeter gestoppt.

- Myon-Kammern bestehen aus Driftkammern (je 1,2m x 9cm)
- Myonen hinterlassen deutliche Spur, Impuls genau bestimmbar





# Inhaltsverzeichnis

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

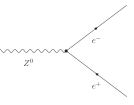
Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

- 1 Ziele
- 2 Theoretische Grundlagen
  - Allgemeines
  - Der Prozess  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in der Nähe der  $Z^0$  Resonanz
- 3 Das OPAL- Experiment
- 4 Auswertung
  - Cuts
  - st- Kanaltrennung
  - Zerfallsbreiten
  - Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie
- 5 Zusammenfassung
- 6 Referenzen



# $e^+e^-$ - Ereignisse

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

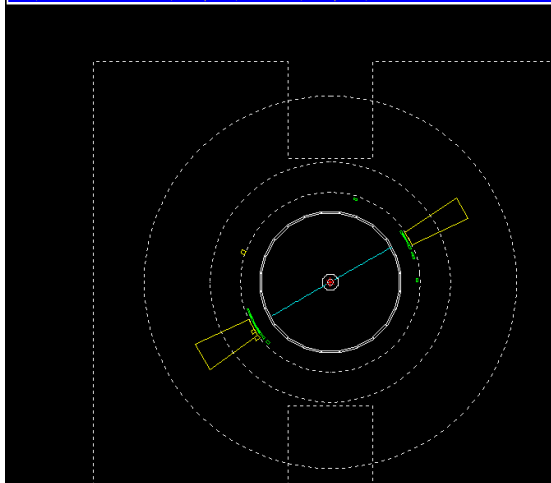
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

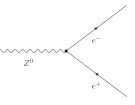
Zusammen-  
fassung

Quellen

- 2 geladene Spuren
- große  
Energiedeposition  
im el.-magn.  
Kalorimeter
- geringe  
Energiedeposition  
im hadr.  
Kalorimeter

```
Run: 2966:167987 Date: 911027 Time: 164811 Ctrk(N= 2 Sump= 83.8) Ecal(N= 5 SunE= 87.5) Hcal(N= 0 SunE=
Ebeam: 45.61 Evis: 84.4 Eniss: 6.8 Vtx ( -0.10, -0.11, -0.50) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SunE=
Bz=0.001 Bunchlet: 1/1 Thrust=0.9976 rplane=0.0000 Oblat=0.0049 Spher=0.0001
```





# $\mu^+\mu^-$ -Ereignisse

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

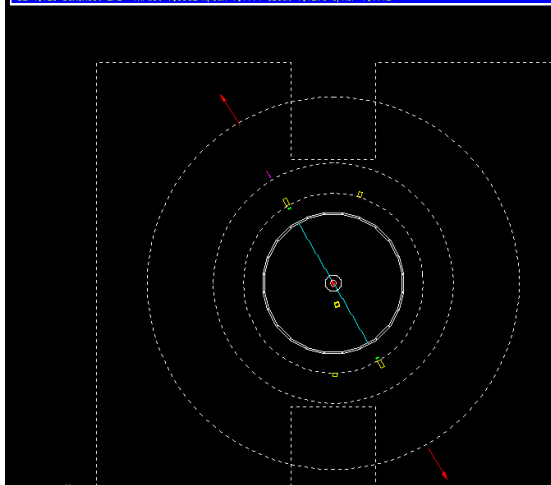
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

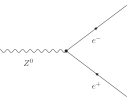
Zusammen-  
fassung

Quellen

- 2 geladene Spuren
- geringe  
Energiedeposition  
im el.-magn.  
Kalorimeter
- geringe  
Energiedeposition  
im hadr.  
Kalorimeter
- Signal in den  
Myondetektoren

```
Run: event 2560; 85398 Date 911028 Time 132211 Ctrk(N= 2 Sump= 96,8) Ecal(N= 5 SumE= 2,0) Hcal(N= 1 SumE=
Ebeam 46,48 Evis 97,3 Eniss -4,3 Vtx ( -0,08, -0,11, -0,61) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE=
Rz=4,023 Bunchlet 1/1 Thrust=0,3981 Aplane=0,0000 Oplane=0,0108 Spher=0,0002
```





# $\tau^+ \tau^-$ - Ereignisse

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+ e^- \rightarrow f \bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

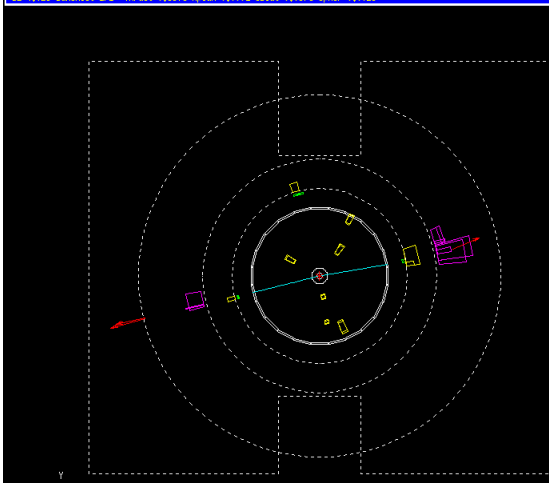
Cuts  
st-Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie

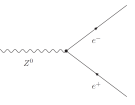
### Zusammenfassung

### Quellen

- 2-6 geladene Spuren
- geringere Energiedeposition im el.-magn. Kalorimeter als Elektronen
- ähnliche Energiedeposition im hadr. Kalorimeter wie hadronische Endzustände

```
Run: 25701 29664 Date: 911029 Time: 184829 Ctrk(N= 2 Smps: 49,7) Ecal(N= 10 SumE= 5,2) Hcal(N= 9 SumE= 20
Ebeam: 45,61 Evis: 71,8 Emiss: 13,4 Vtx ( -0,10, 0,12, 0,47) Muon(N= 3) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0
Bz=4,029 Bunchlet: 1/1 Thrust=0,9878 Aplan=0,0001 Oblat=0,0373 Spher=0,0028
```





# $q\bar{q}$ - Ereignisse

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

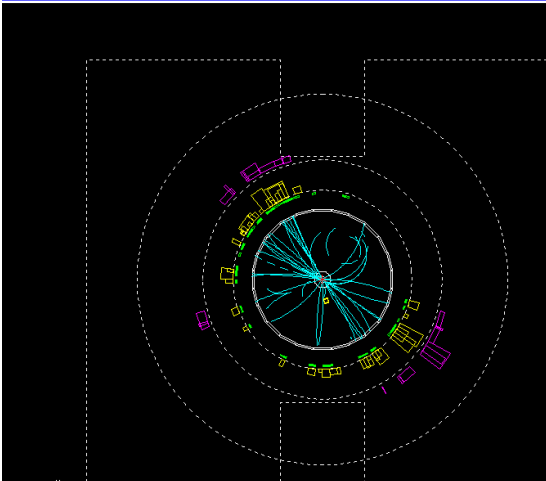
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

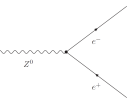
### Quellen

- große Anzahl geladener Spuren  $\geq 6$
- große Energiedeposition im hadr. Kalorimeter

```
Run: event 2566:196117 Date 911027 Time 201656 Ctrk(N= 46 SumP= 64,6) Ecal(N= 44 SumE= 53,0) Hcal(N=19 SumE=
Ebeam 45,61 Evis 96,0 Emiss -4,8 Vtx ( -0,03, 0,11, -0,29) Nuon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE=
Bz=4,350 Bunchlet 1/1 Thrust=0,9037 Hplane=0,0956 Oblat=0,0915 Spher=0,1263
```







# Festlegung der Cuts

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

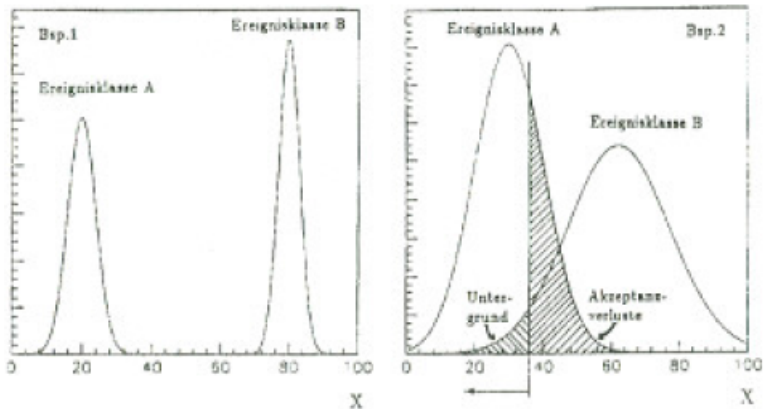
### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

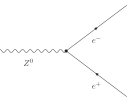
Cuts  
st-Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen



- Kompromiss zwischen hoher Effizienz (kleine Akzeptanzverluste) und hoher Reinheit (geringer Untergrund)



# Effizienzmatrix

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

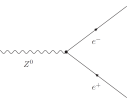
Quellen

## Berechnung der Elemente der Effizienzmatrix

$$\epsilon_{ij} = \frac{N_i^{Cut}}{N_j^{MC}}$$

$N_i^{Cut} \triangleq$  Anzahl aller selektierten Ereignisse nach dem Cut  
auf das i-te Endprodukt

$N_j^{MC} \triangleq$  Gesamtanzahl der Ereignisse in der j-ten Monte  
Carlo-Simulation



# Effizienzmatrix

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+ e^- \rightarrow f \bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

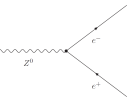
## Berechnung der Elemente der Effizienzmatrix

$$\epsilon_{ij} = \frac{N_i^{Cut}}{N_j^{MC}}$$

$N_i^{Cut} \triangleq$  Anzahl aller selektierten Ereignisse nach dem Cut  
auf das i-te Endprodukt

$N_j^{MC} \triangleq$  Gesamtanzahl der Ereignisse in der j-ten Monte  
Carlo-Simulation

→ optimaler Weise ist  $\epsilon = 1$



# Fehlerberechnung der Effizienz

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

#### Das OPAL- Experiment

#### Auswertung

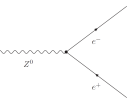
##### Cuts

st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

#### Zusammen- fassung

#### Quellen

- Abzählung der **erfolgreichen** Versuche  $N_i^{Cut}$  bei  $N_j^{MC}$  **durchgeführten** Versuchen
- Binomialverteilung mit  $\sigma^2(N_i^{Cut}) = N_j^{MC} \cdot \epsilon_{ij} \cdot (1 - \epsilon_{ij})$
- $\sigma(\epsilon_{ij}) = \sqrt{\frac{\epsilon_{ij} \cdot (1 - \epsilon_{ij})}{N_j^{MC}}}$
- Berechnung des Fehlers auf inverse Effizienzmatrix erfolgt numerisch



# Monte Carlo-Simulation

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

#### Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

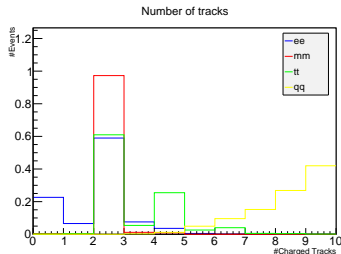
### Auswertung

#### Cuts

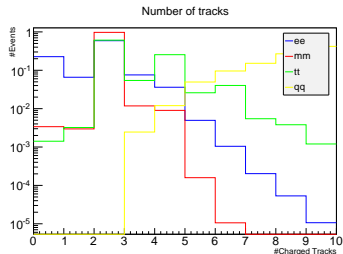
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

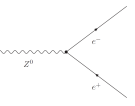


(a) Ncharged: Linear Skalierung Events



(b) Ncharged: Log. Skalierung Events

**Abbildung:** Verteilungen der Anzahl der Fermionen entlang der jeweiligen Variable aus MC-File



# Monte Carlo-Simulation

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

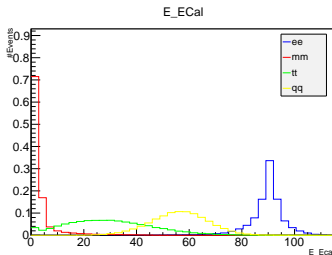
### Auswertung

#### Cuts

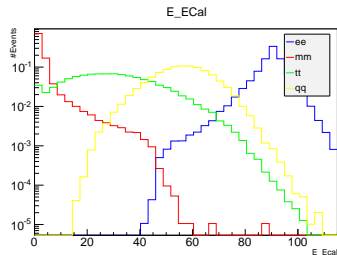
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

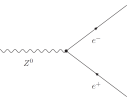


(a) E\_Ecal: Lineare Skalierung Events



(b) E\_Ecal: Log. Skalierung Events

**Abbildung:** Verteilungen der Anzahl der Fermionen entlang der jeweiligen Variable aus MC-File



# Monte Carlo-Simulation

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+ e^- \rightarrow f \bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

#### Das OPAL-Experiment

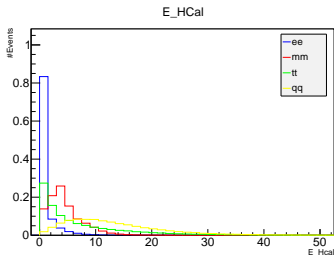
#### Auswertung

##### Cuts

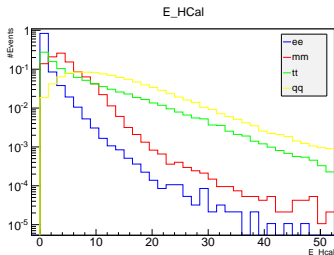
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

#### Zusammenfassung

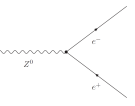
#### Quellen



(a) E\_Hcal: Lineare Skalierung Events (b) E\_Hcal: Log. Skalierung Events



**Abbildung:** Verteilungen der Anzahl der Fermionen entlang der jeweiligen Variable aus MC-File



# Monte Carlo-Simulation

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts

st-Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

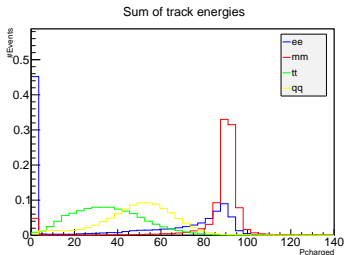
Vorwärts-Rückwärts-

Asymmetrie

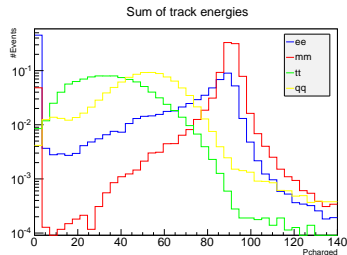
Zusammen-

fassung

Quellen



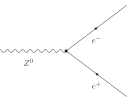
(a) Pcharged: Lineare Skalierung  
Events



(b) Pcharged: Log. Skalierung  
Events

**Abbildung:** Verteilungen der Anzahl der Fermionen entlang der jeweiligen Variable aus MC-File





# Cuts & Effizienzmatrix

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

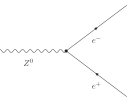
Quellen

	Ncharged	E_Ecal	Pcharged
$Z^0 \rightarrow e^+e^-$	$\leq 5$	$\geq 46$	$< 4 \vee \geq 60$
$Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$	$\leq 5$	$< 46$	$\geq 80$
$Z^0 \rightarrow \tau^+\tau^-$	$\leq 6$	$\leq 60$	$\leq 70 \wedge > 5$
$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$	$\geq 7$	$\geq 35$	

**Tabelle:** Festgelegte Cuts anhand der Monte Carlo Simulationen

Die Effizienzmatrix  $\epsilon$ , mit den von uns festgelegten Schnitten:

Cut	$e^+e^- - MC$	$\mu^+\mu^- - MC$	$\tau^+\tau^- - MC$	$q\bar{q} - MC$
$e^+e^-$	$0.879 \pm 0.001$	$(4.2 \pm 2.1) \cdot 10^{-5}$	$0.0191 \pm 0.0005$	$(4.1 \pm 0.6) \cdot 10^{-4}$
$\mu^+\mu^-$	$0 \pm 0$	$0.886 \pm 0.001$	$(5.2 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(1.0 \pm 1.0) \cdot 10^{-5}$
$\tau^+\tau^-$	$(8.9 \pm 0.98) \cdot 10^{-4}$	$0.0299 \pm 0.0006$	$0.913 \pm 0.001$	$(2.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}$
$q\bar{q}$	$(2.7 \pm 0.5) \cdot 10^{-4}$	$0 \pm 0$	$(7.0 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$	$0.9679 \pm 0.006$



# Cuts & Effizienzmatrix

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

	Ncharged	E_Ecal	Pcharged
$Z^0 \rightarrow e^+e^-$	$\leq 5$	$\geq 46$	$< 4 \vee \geq 60$
$Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$	$\leq 5$	$< 46$	$\geq 80$
$Z^0 \rightarrow \tau^+\tau^-$	$\leq 6$	$\leq 60$	$\leq 70 \wedge > 5$
$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$	$\geq 7$	$\geq 35$	

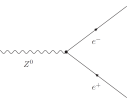
Tabelle: Festgelegte Cuts anhand der Monte Carlo Simulationen

$$R_{e^+e^-} = 0.973$$

$$R_{\mu^+\mu^-} = 0.995$$

$$R_{\tau^+\tau^-} = 0.911$$

$$R_{q\bar{q}} = 0.999$$



# Anwendung der Effizienzmatrix

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL- Experiment

### Auswertung

#### Cuts

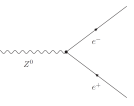
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammen- fassung

### Quellen

- Die Anzahl der Ereignisse in der jeweiligen MC-Simulation ( $N^{MC}$ ) und die Anzahl nach den Cuts ( $N^{Cut}$ ) der Simulation ergeben die Effizienzmatrix:

$$N^{Cut} = \epsilon \cdot N^{MC}$$



# Anwendung der Effizienzmatrix

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL- Experiment

### Auswertung

### Cuts

st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammen- fassung

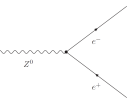
### Quellen

- Die Anzahl der Ereignisse in der jeweiligen MC-Simulation ( $N^{MC}$ ) und die Anzahl nach den Cuts ( $N^{Cut}$ ) der Simulation ergeben die Effizienzmatrix:

$$N^{Cut} = \epsilon \cdot N^{MC}$$

- Inverses Problem bei den echten Daten!** Die Schnitte ermöglichen eine Selektion der jeweiligen Ereignisse aus dem Datensatz  $\rightarrow N^{Cut}$ . Die gesuchte ursprüngliche Anzahl an Ereignissen im Datensatz ( $N^{wahr}$ ) berechnet sich damit zu:

$$N^{wahr} = r \cdot \epsilon^{-1} N^{Cut} \quad r \hat{=} \text{st-Kanal-Trennung } (e^+e^-)$$



# Anwendung der Effizienzmatrix

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+ e^- \rightarrow f \bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

### Cuts

st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

- Die Anzahl der Ereignisse in der jeweiligen MC-Simulation ( $N^{MC}$ ) und die Anzahl nach den Cuts ( $N^{Cut}$ ) der Simulation ergeben die Effizienzmatrix:

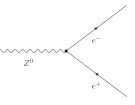
$$N^{Cut} = \epsilon \cdot N^{MC}$$

- Inverses Problem bei den echten Daten!** Die Schnitte ermöglichen eine Selektion der jeweiligen Ereignisse aus dem Datensatz  $\rightarrow N^{Cut}$ . Die gesuchte ursprüngliche Anzahl an Ereignissen im Datensatz ( $N^{wahr}$ ) berechnet sich damit zu:

$$N^{wahr} = r \cdot \epsilon^{-1} N^{Cut} \quad r \hat{=} \text{st-Kanal-Trennung } (e^+ e^-)$$

- Wirkungsquerschnitte sind berechenbar über:

$$\sigma = \frac{N^{wahr}}{\int L dt} + S \quad S \hat{=} \text{Strahlungskorrekturen}$$



# Gecuttete Daten

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL- Experiment

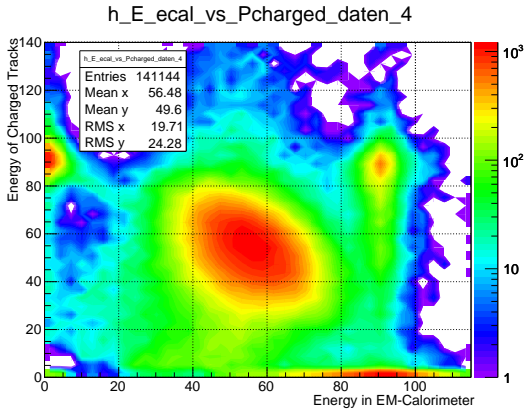
### Auswertung

#### Cuts

st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

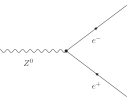
### Zusammen- fassung

### Quellen



(a) Daten ohne Cuts

Abbildung: Daten: Variablen Pcharged und EEcal



# Gecuttete Daten

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

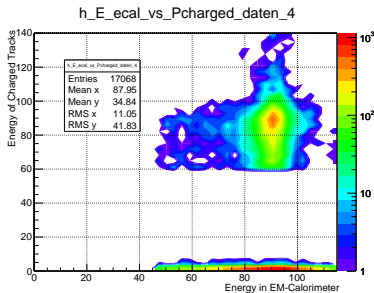
### Auswertung

### Cuts

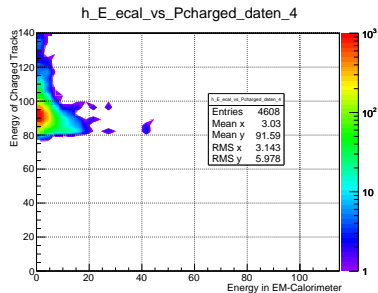
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

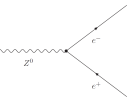


(a)  $e^+e^-$



(b)  $\mu^+\mu^-$

Abbildung: Daten: Variablen Pcharged und EEcal



# Gecuttete Daten

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

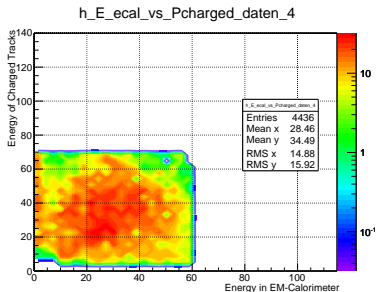
### Auswertung

### Cuts

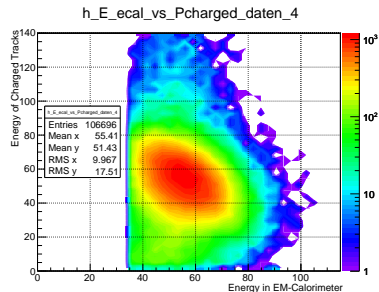
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen



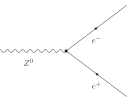
(a)  $\tau^+\tau^-$



(b)  $q\bar{q}$

Abbildung: Daten: Variablen Pcharged und EEcal





# st- Kanaltrennung

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

### Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

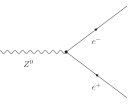
Quellen

## Idee

- $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  Prozess  $\mapsto$  s und t Kanalbeiträge
- Nur s- Kanalbeiträge sind relevant

$$f(\cos \theta) = \underbrace{A \cdot (1 + \cos^2 \theta)}_{s\text{-Kanal}} + \underbrace{B(1 - \cos \theta)^{-2}}_{t\text{-kanal}}$$

- Gesucht ist der Anteil der s-Kanal-Ereignisse an der Gesamtzahl der  $e^+e^-$ -Ereignisse  $\hat{=}$  r-Faktor



# Problematik der st- Kanaltrennung

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+ e^- \rightarrow f \bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL- Experiment

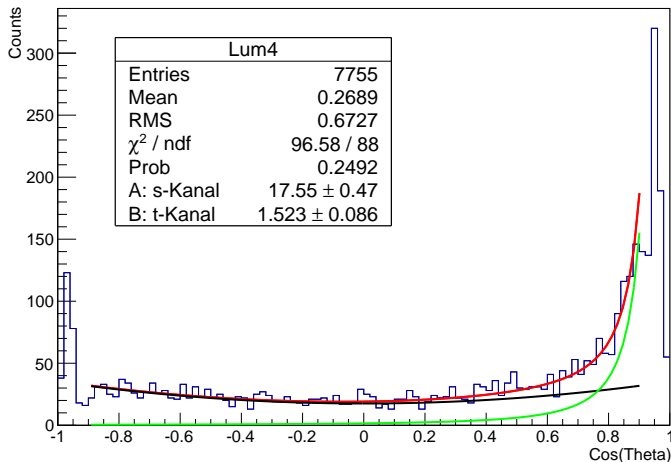
### Auswertung

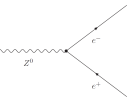
Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammen- fassung

### Quellen

## Winkelverteilung Elektronen Daten4





# Problematik der st- Kanaltrennung

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

#### Das OPAL- Experiment

### Auswertung

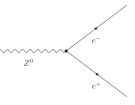
#### Cuts st- Kanaltrennung

Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

#### Zusammen- fassung

### Quellen

- Wert für  $\cos \theta = -1$  erheblich größer als der theoretisch erwartete Verlauf
- nicht identifizierbare Werte bei  $\cos \theta = 999 \rightarrow$  **falsche Zuordnung**
- **Divergenz** der t Kanal Funktion für  $\cos \theta \rightarrow 1$
- Cut auf Pcharged korreliert mit  $\cos \theta$



# Problematik der st- Kanaltrennung

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

#### Das OPAL-Experiment

#### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

#### Zusammenfassung

#### Quellen

Elektron-Ereignisse mit nicht messbarem Impuls nahe der Strahlachse  
(hauptsächlich Bhabha-Streuung)

→ Begrenzte Auflösung des Detektors in diesem Bereich

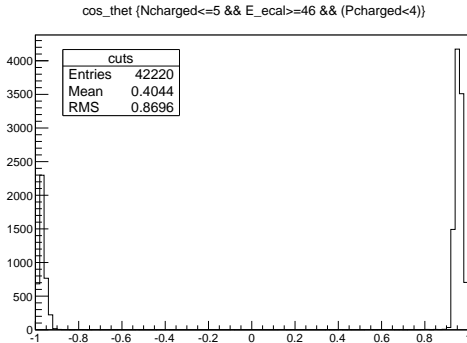
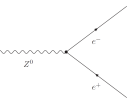


Abbildung: Elektron Ereignisse für Pcharged < 4



# Lösungsansätze zur Bestimmung von $r$

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

#### Das OPAL-Experiment

#### Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

#### Zusammenfassung

#### Quellen

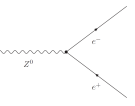
### 1 Zuhilfenahme der Einträge im Histogramm

- Integration der s-Kanal Funktion aus Fit zwischen -1 und 1
- Quotient aus Ergebnis und Gesamtzahl der Einträge  $\rightarrow r$
- Divergente t-Kanal Funktion wird nicht benötigt

### 2 Annahme geltender Leptonuniversalität

### 3 Integration zwischen -0.9 und 0.9 + zusätzlichen Cut auf $\cos \theta$

$$r = \frac{\int_{-0.9}^{0.9} A \cdot (1 + \cos^2 \theta) d \cos \theta}{\int_{-0.9}^{0.9} A \cdot (1 + \cos^2 \theta) d \cos \theta + \int_{-0.9}^{0.9} B \cdot (1 - \cos \theta)^{-2} d \cos \theta}$$



# Lösungsansätze zur Bestimmung von $r$

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

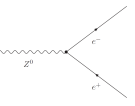
### Quellen

- ① Zuhilfenahme der Einträge im Histogramm
  - Integration der s-Kanal Funktion aus Fit zwischen -1 und 1
  - Quotient aus Ergebnis und Gesamtzahl der Einträge  $\rightarrow r$
  - Divergente t-Kanal Funktion wird nicht benötigt
- ② Annahme geltender Leptonuniversalität
- ③ Integration zwischen -0.9 und 0.9 + zusätzlichen Cut auf  $\cos \theta$

$$r = \frac{\int_{-0.9}^{0.9} A \cdot (1 + \cos^2 \theta) d \cos \theta}{\int_{-0.9}^{0.9} A \cdot (1 + \cos^2 \theta) d \cos \theta + \int_{-0.9}^{0.9} B \cdot (1 - \cos \theta)^{-2} d \cos \theta}$$

Integrationsgrenzen	r Faktor
-0.8 bis 0.8	0.83
-0.9 bis 0.9	0.74
-0.95 bis 0.95	0.59

**Tabelle:** Tabelle der  $r$  Faktoren unter Variation der Integrationsgrenzen am Resonanzmaximum



# Lösungsansätze zur Bestimmung von $r$

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

## ① Zuhilfenahme der Einträge im Histogramm

- Integration der s-Kanal Funktion aus Fit zwischen -1 und 1
- Quotient aus Ergebnis und Gesamtzahl der Einträge  $\rightarrow r$
- Divergente t-Kanal Funktion wird nicht benötigt

## ② Annahme geltender Leptonuniversalität

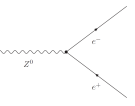
## ③ Integration zwischen -0.9 und 0.9 + zusätzlichen Cut auf $\cos\theta$

$$r = \frac{\int_{-0.9}^{0.9} A \cdot (1 + \cos^2 \theta) d \cos \theta}{\int_{-0.9}^{0.9} A \cdot (1 + \cos^2 \theta) d \cos \theta + \int_{-0.9}^{0.9} B \cdot (1 - \cos \theta)^{-2} d \cos \theta}$$

## Korrektes Vorgehen

## Programme ALIBABA oder TOPAZ0

- Nicht-s-Kanalbeiträge werden getrennt berechnet
- 0.5 % systematischer Fehler durch fehlende Ordnungen



# Vorgehen zur Bestimmung der Zerfallsbreiten

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
**Zerfallsbreiten**  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

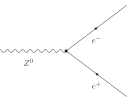
Zusammen-  
fassung

Quellen

- Wirkungsquerschnitte werden über Schwerpunktsenergie aufgetragen
- Fit mit Hilfe der relativistischen Breit Wigner Verteilung

$$\sigma_f = \frac{12\pi}{M_Z^2} \cdot \frac{s\Gamma_e\Gamma_f}{(s - M_Z^2)^2 + (s^2\Gamma_Z^2/M_Z^2)}$$





# 1. Methode: Zuhilfenahme der Entries im Histogramm

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

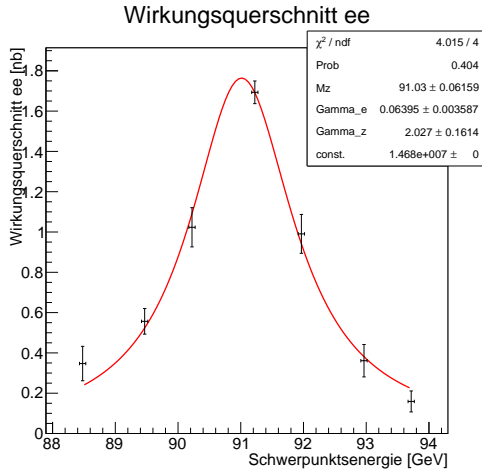
### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

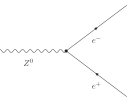
Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen



(a)  $e^+e^-$  Wirkungsquerschnitt



# 1. Methode: Zuhilfenahme der Entries im Histogramm

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

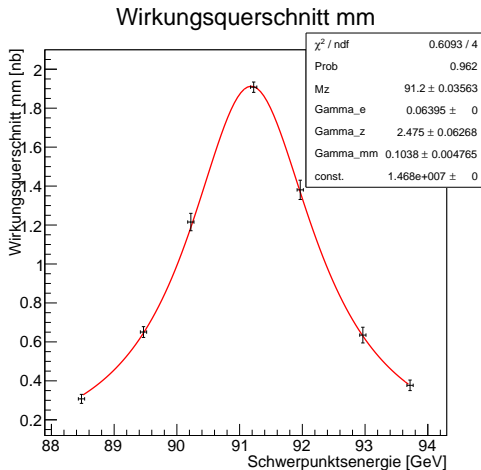
### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

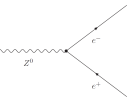
Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen



(a)  $\mu^+\mu^-$  Wirkungsquerschnitt



# 1. Methode: Zuhilfenahme der Entries im Histogramm

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

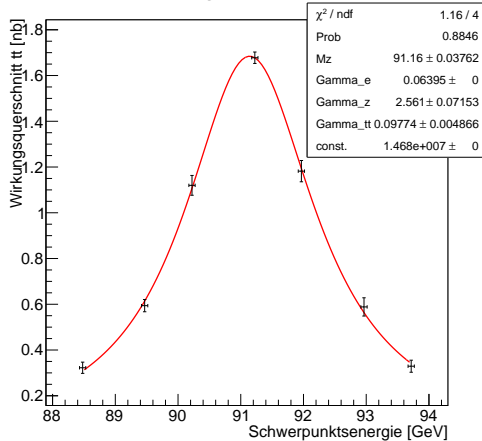
### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

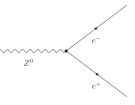
### Zusammenfassung

### Quellen

## Wirkungsquerschnitt tt



(a)  $\tau^+\tau^-$  Wirkungsquerschnitt



# 1. Methode: Zuhilfenahme der Entries im Histogramm

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

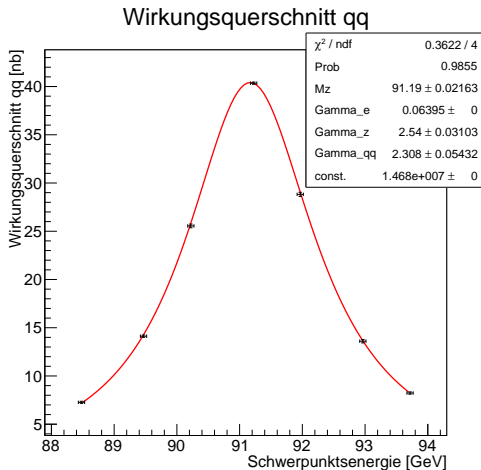
### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

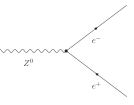
Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen



(a)  $q\bar{q}$  Wirkungsquerschnitt



# 1. Methode: Zuhilfenahme der Entries im Histogramm

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

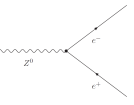
Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

Fit	Größe	Wert aus Fit[GeV]	Theor. Wert[GeV][2]	Abweichung von Theorie
$e^+e^-$	$\Gamma_e$	$0.064 \pm 0.004$	0.0838	$5\sigma$
	$\Gamma_Z$	$2.03 \pm 0.16$	2.4844	$3\sigma$
	$M_Z$	$91.03 \pm 0.06$	91.188	$3\sigma$
$\mu^+\mu^-$	$\Gamma_\mu$	$0.104 \pm 0.005$	0.0838	$5\sigma$
	$\Gamma_Z$	$2.48 \pm 0.06$	2.4844	$1\sigma$
	$M_Z$	$91.2 \pm 0.04$	91.188	$1\sigma$
$\tau^+\tau^-$	$\Gamma_\tau$	$0.098 \pm 0.005$	0.0838	$4\sigma$
	$\Gamma_Z$	$2.56 \pm 0.07$	2.4844	$2\sigma$
	$M_Z$	$91.16 \pm 0.04$	91.188	$1\sigma$
$q\bar{q}$	$\Gamma_q$	$2.31 \pm 0.05$	1.732	$> 5\sigma$
	$\Gamma_Z$	$2.54 \pm 0.03$	2.4844	$2\sigma$
	$M_Z$	$91.19 \pm 0.02$	91.188	$1\sigma$

**Tabelle:** Tabelle der extrahierten Größen aus dem Fit: st  
Kanaltrennung unter Zuhilfenahme der Entries im Histogramm



## 2. Methode: Leptonuniversalität

### $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

#### Ziele

Theoretische

Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

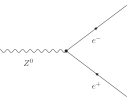
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

Fit	Größe	Wert aus Fit[GeV]	Theor. Wert[GeV][2]	Abweichung von Theorie
$\mu^+\mu^-$	$\Gamma_\mu$	$0.082 \pm 0.002$	0.0838	$1\sigma$
	$\Gamma_Z$	$2.48 \pm 0.06$	2.4844	$1\sigma$
	$M_Z$	$91.20 \pm 0.04$	91.188	$1\sigma$
$\tau^+\tau^-$	$\Gamma_\tau$	$0.077 \pm 0.004$	0.0838	$2\sigma$
	$\Gamma_Z$	$2.56 \pm 0.07$	2.4844	$2\sigma$
	$M_Z$	$91.16 \pm 0.04$	91.188	$1\sigma$
$q\bar{q}$	$\Gamma_q$	$1.81 \pm 0.04$	1.732	$2\sigma$
	$\Gamma_Z$	$2.54 \pm 0.03$	2.4844	$2\sigma$
	$M_Z$	$91.19 \pm 0.02$	91.188	$1\sigma$

**Tabelle:** Tabelle der extrahierten Größen aus dem Fit unter der Annahme geltender Leptonuniversalität



### 3. Methode: Integration zwischen -0.9 und +0.9

#### Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts

st-  
Kanaltrennung

Zerfallsbreiten

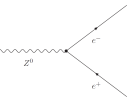
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

Fit	Größe	Wert aus Fit[GeV]	Theor. Wert[GeV][2]	Abweichung von Theorie
$e^+e^-$	$\Gamma_e$	$0.098 \pm 0.004$	0.0838	$4\sigma$
	$\Gamma_Z$	$2.32 \pm 0.14$	2.4844	$2\sigma$
	$M_Z$	$91.13 \pm 0.06$	91.188	$1\sigma$
$\mu^+\mu^-$	$\Gamma_\mu$	$0.068 \pm 0.003$	0.0838	$> 5\sigma$
	$\Gamma_Z$	$2.48 \pm 0.06$	2.4844	$1\sigma$
	$M_Z$	$91.20 \pm 0.04$	91.188	$1\sigma$
$\tau^+\tau^-$	$\Gamma_\tau$	$0.064 \pm 0.003$	0.0838	$> 5\sigma$
	$\Gamma_Z$	$2.56 \pm 0.07$	2.4844	$2\sigma$
	$M_Z$	$91.16 \pm 0.04$	91.188	$1\sigma$
$q\bar{q}$	$\Gamma_q$	$1.50 \pm 0.04$	1.732	$> 5\sigma$
	$\Gamma_Z$	$2.54 \pm 0.03$	2.4844	$2\sigma$
	$M_Z$	$91.19 \pm 0.02$	91.188	$1\sigma$

**Tabelle:** Tabelle der extrahierten Größen aus den gefitteten Wirkungsquerschnitten für r Faktoren integriert zwischen -0.9 und +0.9



# Neutrino-Generationen

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

#### Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

#### Cuts

#### st-Kanaltrennung

#### Zerfallsbreiten

#### Vorwärts- Rückwärts- Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

Mit Methode 2 und gemitteltem Wert für  $\Gamma_Z$  und theoretisch berechnetem Wert für  $\Gamma_\nu$  ist

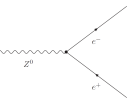
$$N_\nu = \frac{\Gamma_Z - (\Gamma_e + \Gamma_\mu + \Gamma_\tau + \Gamma_{had})}{\Gamma_\nu}$$

$$\sigma_{N_\nu} = \frac{1}{\Gamma_\nu} \cdot \sqrt{\sigma_{\Gamma_Z}^2 + \sigma_{\Gamma_{lep}}^2 + \sigma_{\Gamma_{q\bar{q}}}^2}$$

Anzahl leichter Neutrino-Generationen

$$N_\nu = 2.89 \pm 0.16$$





# Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

#### Das OPAL- Experiment

#### Auswertung

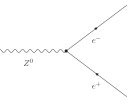
Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

#### Zusammen- fassung

#### Quellen

Zur Bestimmung der Asymmetrie der Winkelverteilung der Events sind Myon-Ereignisse besonders geeignet:

- Verteilung der Elektronen stark asymmetrisch durch s- und t-Kanalbeiträge
- Hadronen und Taus schwer zu trennen
- Myonen müssen im s-Kanal entstanden sein
- Im Detektor sehr gut von anderen Teilchen zu unterscheiden



# Berechnung des *Weak Mixing Angles* aus der Asymmetrie

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

#### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

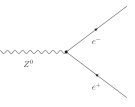
### Quellen

$\theta_W$  kann anhand folgender Gleichung berechnet werden:

$$\sin^2 \theta_W = \frac{1}{4} - \sqrt{\frac{A_{FB}^f}{48}} \quad (2)$$

$$\sigma_{\sin^2 \theta_W} = \frac{\sigma_A}{8 \cdot \sqrt{3A}} \quad (3)$$

Der Literaturwert beträgt  $(\sin^2 \theta_W)_{lit} = 0,23113 \pm 0,00015$  [7].



# Winkelverteilung der Myon- Ereignisse

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

## Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

## Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

## Quellen

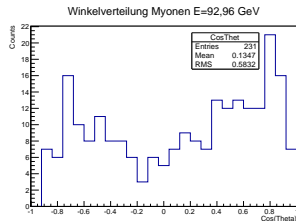
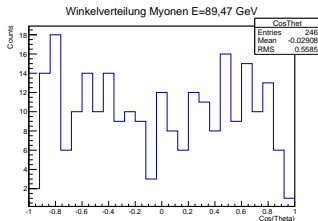
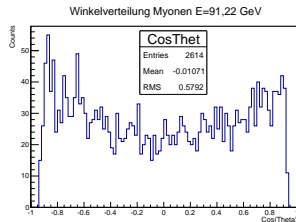
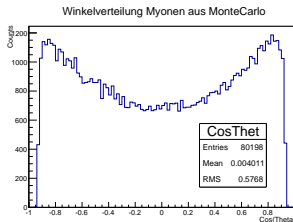
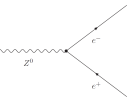


Abbildung: Winkelverteilung der Myonen aus MC-Simulation und Datensatz



# Theor. Berechnung der Asymmetrie

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

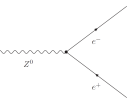
### Zusammenfassung

### Quellen

- El.- Schwache WW: Erwartete Werte für die Asymmetrie in Abhängigkeit der Schwerpunktennergie für verschiedene Werte von  $\sin(\theta_W)^2$ .

$\sin(\theta_W)^2$	$A_{FB}^f(91,225 \text{ GeV})$	$A_{FB}^f(89,225 \text{ GeV})$	$A_{FB}^f(93,225 \text{ GeV})$
0,21	0,0761943	-0,0936944	0,231741
0,23	0,0227831	-0,163934	0,196537
0,25	0,00421544	-0,194922	0,19068

**Tabelle:** Theoretische Berechnung der Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie



# Messung der Asymmetrie

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

Zur Messung der Asymmetrie gibt es zwei mögliche Vorgehensweisen:

- Zählen der Ereignisse in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung:

$$A_{FB}^f = \frac{N_{fwd} - N_{bwd}}{N_{fwd} + N_{bwd}} \quad (4)$$

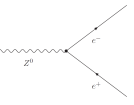
$$\sigma_A = \frac{1}{N_{fwd} + N_{bwd}} \cdot \sqrt{(1 + A_{FB}^f)(N_{fwd} + N_{bwd})} \quad (5)$$

- Fit der Winkelverteilung mit der Asymmetrie als freiem Parameter:

$$N = Const. \cdot \left( \frac{3}{8} \cdot (1 + \cos^2 \theta) + A_{FB}^f \cdot \cos \theta \right) \quad (6)$$

$Const. \hat{=}$  Normierungsfaktor

$A_{FB}^f \hat{=}$  Asymmetrie



# Ergebnisse durch Zählen der Ereignisse

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

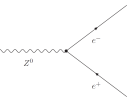
Quellen

Datensatz	$A_{FB}^f$	$\sigma_A$	$\sin^2 \theta_W$	$\sigma_{\sin^2 \theta_W}$
Monte Carlo (mit Cut)	0,007	0,004	0,2380	0,0007
Daten4, ( $\sqrt{s} = 91,22$ GeV)	-0,0045	0,02	/	/
Daten4 ( $\sqrt{s} = 89,47$ GeV)	-0,016	0,06	/	/
Daten4 ( $\sqrt{s} = 92,96$ GeV)	0,194	0,07	/	/

**Tabelle:** Ergebnisse der Messung der  
Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie durch Zählen der Ereignisse

## Literaturwert

$$(\sin^2 \theta_W)_{lit} = 0,23113 \pm 0,00015 [7]$$



# Bestimmung der Asymmetrie durch Fit der Verteilung

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

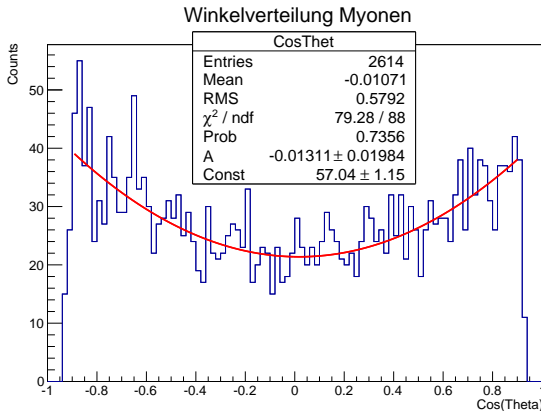
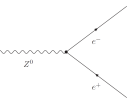


Abbildung: Winkelverteilung der Myonen bei  $\sqrt{s} = 91,22 \text{ GeV}$



# Ergebnisse

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

#### Theoretische Grundlagen

##### Allgemeines

Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

#### Das OPAL- Experiment

### Auswertung

##### Cuts

##### st- Kanaltrennung

##### Zerfallsbreiten

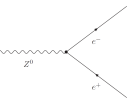
##### Vorwärts- Rückwärts- Asymmetrie

#### Zusammen- fassung

### Quellen

- Bei beiden Methoden stimmt Asymmetrie am Resonanzmaximum mit Null überein  
→ Keine Asymmetrie messbar!
- *Weak Mixing Angle* nur zu  $\sin^2 \theta_W = 0,25$  bestimmbar
- Bei Ausreizung der Fehlergrenzen nach oben:  
 $A_{FB}^f = 0.015 \rightarrow \sin^2 \theta_W = 0,232.$   
(Angabe dient der Ungenauigkeitsabschätzung)





# Grund für fehlgeschlagene Bestimmung der Asymmetrie

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

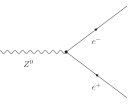
Ursache: Unzureichende Anzahl an Ereignissen im Datensatz!

- Im Datensatz ca. 140.000 Ereignisse, davon:
  - $\approx 4.600$  Myonen
  - $\approx 2.600$  Myonen am Resonanzmaximum
- Bei Asymmetrie von 0.02 (vgl. Tab. 6) mit gewünschter statistischer Signifikanz von  $3\sigma$ : ca. 22.500 Ereignisse notwendig (nach Umstellen von Gl. 5

$$\sigma_A = \frac{1}{N_{fwd} + N_{bwd}} \cdot \sqrt{(1 + A_{FB}^f)(N_{fwd} + N_{bwd})}$$

Fernando Ferroni, Paolo Privitera, *Electroweak Physics at LEP*:

*"The statistical error is the main limitation: since  $A_{FB}$  is only 2 % at the pole, one can obtain a measurement  $3\sigma$  away from zero only with more than  $10^5$  leptons."*



# Inhaltsverzeichnis

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

### 1 Ziele

### 2 Theoretische Grundlagen

- Allgemeines
- Der Prozess  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in der Nähe der  $Z^0$  Resonanz

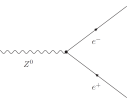
### 3 Das OPAL- Experiment

### 4 Auswertung

- Cuts
- st- Kanaltrennung
- Zerfallsbreiten
- Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie

### 5 Zusammenfassung

### 6 Referenzen



# Zusammenfassung

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

### Das OPAL-Experiment

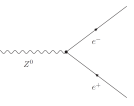
### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammenfassung

### Quellen

- Ereignisse hinterlassen charakteristische Spuren im Detektor  
→ durch entsprechende Cuts gut unterscheidbar
- st- Kanaltrennung liefert (ohne exakte Kenntnis der Detektorgrenzen) kein vertrauenswürdige Ergebnis
- Literaturwerte der Zerfallsbreiten können von uns nur unter der Annahme geltender Leptonuniversalität bestätigt werden  
→  $N_\nu = 2.89 \pm 0.16$ ,
- Asymmetrie am Resonanzmaximum auf Grund der geringen Datenmenge nicht festzustellen



# Inhaltsverzeichnis

## $Z^0$ -Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

Ziele

Theoretische  
Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der  $Z^0$   
Resonanz

Das OPAL-  
Experiment

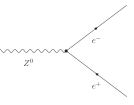
Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

Zusammen-  
fassung

Quellen

- 1 Ziele
- 2 Theoretische Grundlagen
  - Allgemeines
  - Der Prozess  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in der Nähe der  $Z^0$  Resonanz
- 3 Das OPAL- Experiment
- 4 Auswertung
  - Cuts
  - st- Kanaltrennung
  - Zerfallsbreiten
  - Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie
- 5 Zusammenfassung
- 6 Referenzen



# Quellen & Literatur

## Z<sup>0</sup>-Resonanz

Moritz Wiehe,  
Frank Schäfer

### Ziele

### Theoretische Grundlagen

Allgemeines  
Der Prozess  
 $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  in  
der Nähe der Z<sup>0</sup>  
Resonanz

### Das OPAL- Experiment

### Auswertung

Cuts  
st-  
Kanaltrennung  
Zerfallsbreiten  
Vorwärts-  
Rückwärts-  
Asymmetrie

### Zusammen- fassung

### Quellen

-  *Z<sup>0</sup>-Resonanz*, Physikalisches Institut Universität Freiburg, 2. März 2012.
-  *Analyse von Z<sup>0</sup>-Zerfällen*, Physikalisches Institut Universität Freiburg, 9. Februar 1995.
-  Karl Jakobs *Experimentalphysik V*, Freiburg, WS 2014/15
-  Lexikon der Physik <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/bhabha-streuung/1532>, 1998  
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
-  CERN *The OPAL Experiment at LEP 1989 - 2000* <http://opal.web.cern.ch/opal/>, 12.03.2015
-  Fernando Ferroni, Paolo Privitera *Electroweak Physics at LEP*, IEKP-KA-91-02, 1991 Institut für experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe
-  Particle Data Group, The American Physical Society *Physical Review D, Particles and Fields*, 01.07.2002
-  Clarissa Hofmann *Sensitivität des ATLAS-Experiments am LHC für die Entdeckung des Higgs-Bosons*, Freiburg, 2011
-  Greiner, W., Müller, B. *Gauge Theory of Weak Interaction (Band 13)*, Springer 2000.