

Kernphysik

24. Juni 2009

P3-11 Elementarteilchen

Gruppe 58 - Saskia Meißner, Arnold Seiler

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuchs	2
2	theoretische Grundlagen	2
2.1	Elementarteilchen (Standardmodell)	2
2.1.1	Betrachtung des Standardmodells	3
2.2	Starke Wechselwirkungen	4
2.3	elektromagnetische Wechselwirkungen	4
2.3.1	Paarvernichtung oder Paarbildung	4
2.3.2	Streuung	4
2.4	schwache Wechselwirkungen	4
2.5	gravitative Wechselwirkungen	4
2.6	Z_0 -Zerfall	5
2.6.1	Verzweigungsverhältnisse und Anzahl der verschiedenen Farbladungen der starken Wechselwirkung	5
2.6.2	Das Verhältnis R von hadronischer zu leptonischer Zerfallsbreite	5
2.6.3	Die Anzahl der Farbladungen N_c im Standardmodell (SM)	5
2.6.4	Jet-Rate	6
2.6.5	Bestimmung der Kopplungskonstante α_s	6
2.6.6	Neutrino-Generationen N_ν im Standardmodell	6
2.6.7	totale Breite Γ_{tot} bei Z -Resonanz:	6
2.6.8	Breite der unsichtbaren Neutrinozerfälle Γ_{inv} :	6
3	experimenteller Aufbau	7
3.1	Der DELPHI-Detektor	7

4	Durchführung des Versuchs	8
4.1	Ereignisklassifizierung:	8
4.1.1	hadronische Ereignisse:	8
4.1.2	leptonische Ereignisse:	9
5	Auswertung / interpretation	10
5.1	„branching“ ratio and number of colors of strong interaction	10
5.1.1	lepton universality	11
5.1.2	„branching“ ratio	11
5.1.3	number of colors	11
5.2	coupling constant α_s of strong interaction	11
5.3	number of neutrino generations N_ν in SM	12
5.4	appendix	12

1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch werden aufbereitete Messdaten von Experimenten der Elementarteilchenphysik analysiert. Die Daten stammen von dem DELPHI-Detektor¹ am LEP-Speicherring² am Forschungszentrum CERN³. Der Versuch ist relativ zeitnah (beendet im Jahr 2000) an aktuellen Forschungsgebieten und beschäftigt sich mit dem Modell der kleinsten Teilchen. Wir betrachten einen Ausschnitt der Daten (1000 Z-Ereignisse) um einen kleinen Einblick in dieses Gebiet zu erlangen. Ziel ist es die Eigenschaften der Elementarteilchen näher zu betrachten. Dazu bestimmen wir die Verzweigungsverhältnisse beim Z^0 -Zerfall, sowie die Anzahl der verschiedenen Farbladungen der starken Wechselwirkung. Mit Hilfe der 3-Jet-Rate bei Erzeugung und Zerfall des Z-Bosons kann die Kopplungskonstante α_s der starken WW bestimmt werden. Zuletzt werden wir die Anzahl der Neutrino-Generationen im Standardmodell mittels der Zerfallsbreite des Z^0 bestimmen.

2 theoretische Grundlagen

2.1 Elementarteilchen (Standardmodell)

Man unterteilt die Elementarteilchen in zwei Gruppen, die Fermionen (Spin $\frac{1}{2}$ -Teilchen) und Bosonen (Spin 1-Teilchen). Die Fermionen sind wiederum unterteilt in Quarks (u, d, c, s, t, b) und Leptonen (e, μ , τ , ν_e , ν_μ , ν_τ), wobei es zu jedem Teilchen ein Antiteilchen gibt.

Quarks treten im Gegensatz zu den Leptonen nur in gebundenen Zuständen auf, den Hadronen. Diese lassen sich wiederum in Baryonen (3-Quark-Zustände) und Mesonen (2-Quark-Zustände) unterteilen. Die Hadronen bestehen aus Quarks mit bestimmter Farbladung, sind selbst aber farblos (weiß). Es sind somit nur farblose Teilchen beobachtbar. Das Konzept der Farbladung ist in Analogie zur additiven Farbmischung:

- rot+grün+blau = weiß (analog mit Antifarben)

¹Detector with Lepton, Photon and Hadron Identification

²Large-Elektron-Positron collider

³Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire

- farbe+antifarbe=weiß

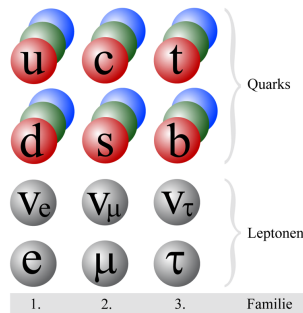


Abbildung 1:

Die 2 Familien mit je 3 Generationen der Elementarteilchen

Quelle: Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY (<http://www.teilchenphysik.de>)

Die Familien (Quarks, Leptonen) im Standardmodell bestehen aus 3 Generationen mit je 2 Leptonen (z.B. Elektron e und zugehöriges Elektronneutrino ν_e) und 2 Quarks (z.B. up- und down-Quark). Die erste Generation genügt zum Aufbau der gewöhnlichen Materie. Bosonen sind bei den Wechselwirkungen die Vermittler (Eichbosonen) (z.B. Gluonen, γ -Quanten, W- und Z-Bosonen). Es gibt auch zusammengesetzte Teilchen (Atome, Mesonen) mit Spin 1.

Leptonen			Quarks			
Teilchen	Masse (GeV/c ²)	Elektr. Ladung	Teilchen	Masse (GeV/c ²)	Elektr. Ladung	Farbe
ν_e (Elektron-Neutrino)	$< 2 \times 10^{-9}$	0	U (up)	0,004	2/3	r,g,b
e^- (Elektron)	0,00051	-1	D (down)	0,0075	- 1/3	r,g,b
ν_μ (Myon-Neutrino)	$< 0,0002$	0	C (charm)	1,23	2/3	r,g,b
μ^- (Myon)	0,106	-1	S (strange)	0,15	- 1/3	r,g,b
ν_τ (Tau-Neutrino)	$< 0,02$	0	T (top)	175	2/3	r,g,b
τ^- (Tau)	2	-1	B (bottom)	4,2	- 1/3	r,g,b

Abbildung 2:

Tabelle der Elementarteilchen und ihre Eigenschaften

Quelle: Vorbereitung zum Versuch Elementarteilchen 2008, F-Praktikum an der Uni Karlsruhe

2.1.1 Betrachtung des Standardmodells

Über das Standardmodell hinaus wurde festgestellt dass die Neutrinos eine Ruhemasse besitzen. Das Hierarchieproblem und die Vereinigung der drei Grundkräfte lässt sich ebenso wenig mit diesem Modell lösen. Auch die Gravitation wird nicht berücksichtigt, da sie sehr klein ist im Gegensatz zu den anderen

Wechselwirkungen. Eine Erweiterung des SM durch den Higgs Mechanismus beschreibt, wie die masselosen Eichbosonen eine Masse erhalten. Durch die Wechselwirkung der Teilchen mit dem Higgs-Feld erhalten sie ihre Masse (starke WW entspricht großer Masse). Daraus folgt, dass es mindestens ein weiteres Teilchen geben muss, das Higgs-Boson, welches bisher noch nicht nachgewiesen wurde.

2.2 Starke Wechselwirkungen

Hadronen (Quarks) unterliegen der starken WW. Sie treten in sogenannten *flavours* (*Quantenzahlen*) auf: up (u), down (d), charm (c), strange (s), top (t), bottom (b). Es gibt zwei mögliche Ladungen $+\frac{2}{3} \cdot e$ (u, c, t) und $-\frac{1}{3} \cdot e$ (d, s, b). Bei der starken WW wird die Farbladung der Quarks durch Gluonen g vermittelt. Es gibt insgesamt 8 Gluonen (Farbladungszustände) die auch untereinander Farbladung austauschen können.

2.3 elektromagnetische Wechselwirkungen

Leptonen und Baryonen (Quarks) mit Ladung unterliegen der elektromagnetischen WW. Mögliche WW:

2.3.1 Paarvernichtung oder Paarbildung

z.B. ein Elektron und ein Positron wird zu zwei Photonen: $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$
oder zwei Photonen werden zu je einem Positron und Elektron: $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$

2.3.2 Streuung

z.B. ein Photon und ein Elektron: $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$

2.4 schwache Wechselwirkungen

Leptonen und Hadronen unterliegen der schwachen WW. Grundlegend zerfällt ein geladenes Lepton zu seinem zugehörigen Leptonneutrino unter Abgabe/Aufnahme eines W-Bosons mit entsprechender Ladung.

z.B. ein Myon und ein Elektronneutrino wird zu einem Elektron und einem Myonneutrino, was durch ein W^- -Boson vermittelt wird: $\mu^- + \nu_e \rightarrow e^- + \nu_\mu$

2.5 gravitative Wechselwirkungen

Im Atomaren Bereich ist die Gravitation vernachlässigbar, da sie sehr schwach ist.

Wechselwirkung	Boson	Masse (GeV/c ²)	Reichweite (m)	"Ladung"	elektr. Ladung	Spin-Parität	Kopplungs-konstante	Dimensionslose Kopplungskonstante
elektromagnetische	γ (Gamma)	0	∞	elektrisch e	0	1^-	-	$\alpha = e^2 / 4\pi\hbar c = 1/137$
schwache	Z^0	91,173	10^{-18}	schwache	0	1^+	G_F (Fermi)	$(Mc/\hbar)^2 G/\hbar c = 1,02 \times 10^{-5}$
	W^\pm	80,22	10^{-18}	schwache	± 1	1^-	G_F (Fermi)	$(Mc/\hbar)^2 G/\hbar c = 1,02 \times 10^{-5}$
starke	8 g (Gluonen)	0	$\leq 10^{-15}$	Farbe	0	1^-	-	$\alpha_s \sim 1$, r groß $\alpha_s < 1$, r klein
Gravitation	G (Graviton)	0	∞	Masse	0	2^+	K (Newton)	$KM^2 / \hbar c = 0,53 \times 10^{-38}$

Abbildung 3:

Die vier Wechselwirkungen und ihre Austauscheteilchen (die Angaben zum Graviton sind hypothetisch)
Quelle: Vorbereitung zum Versuch Elementarteilchen 2008, F-Praktikum an der Uni Karlsruhe

2.6 Z_0 -Zerfall

2.6.1 Verzweungsverhältnisse und Anzahl der verschiedenen Farbladungen der starken Wechselwirkung

2.6.2 Das Verhältnis R von hadronischer zu leptonischer Zerfallsbreite

$R = \frac{\Gamma_{had}}{\Gamma_{ll}}$ soll auf 15% genau bestimmt werden. Wieviele Scans dazu notwendig sind ist abzuschätzen.

Unter Annahmen der Leptonenuniversalität ist das Verzweungsverhältnis gegeben durch $R = \frac{N_{had}}{N_{ll}} = \frac{N_{had} \cdot 3}{N_{e\bar{e}} + N_{\mu\bar{\mu}} + N_{\tau\bar{\tau}}}$.

- Ist die Annahme der Leptonuniversalität gerechtfertigt? $\Gamma_{e\bar{e}} = \Gamma_{\mu\bar{\mu}} = \Gamma_{\tau\bar{\tau}} \Rightarrow \Gamma_{ll} \equiv \frac{\Gamma_{e\bar{e}} + \Gamma_{\mu\bar{\mu}} + \Gamma_{\tau\bar{\tau}}}{3}$

Sind die Kopplungskonstanten für alle Leptonen gleich und die Massen im Gegensatz zum Z-Boson vernachlässigbar, so müssten auch die Zerfallsbreiten für alle Leptonen gleich sein. Es gilt auch: $N_{ll} = \frac{N_{e\bar{e}} + N_{\mu\bar{\mu}} + N_{\tau\bar{\tau}}}{3}$

2.6.3 Die Anzahl der Farbladungen N_c im Standardmodell (SM)

Die Anzahl der Farbladungen lässt sich folgendermaßen berechnen: $N_c = \frac{R \cdot \Gamma_{ll}}{(N_u \Gamma_{uu}^{SM} + N_d \Gamma_{dd}^{SM})}$

wegen: $\Gamma_{had} = R \cdot \Gamma_{ll}$ sowie $\Gamma_{had} = N_c (N_u \Gamma_{uu}^{SM} + N_d \Gamma_{dd}^{SM})$

415% genau: $\frac{\sigma_R}{R} = 0,15$ lässt sich berechnen aus $\sigma_R = \sqrt{\sigma_{N_{had}}^2 \cdot \left(\frac{1}{N_{ll}}\right)^2 + \sigma_{N_{ll}}^2 \cdot \left(-\frac{N_{had}}{N_{ll}^2}\right)^2}$ mit der Abweichung vom

Mittelwert $\sigma_{N_{ll}} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (N_{ll} - N_{ll})^2}$ und dem statistischen Fehler $\sigma_{N_{had}} = \sqrt{N_{had}}$

allgemein gilt: $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ und $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

- partielle Zerfallsbreite der up-Quarks $\Gamma_{u\bar{u}}^{SM} = 98,88MeV$
- partielle Zerfallsbreite der down-Quarks $\Gamma_{d\bar{d}}^{SM} = 127,48MeV$
- partielle Zerfallsbreite der Leptonen $\Gamma_{l\bar{l}}^{SM} = 83,83MeV$.
- Anzahl der up- und down-Quarks : $N_u = 2$ $N_d = 3$.

2.6.4 Jet-Rate

Um später die Kopplungskonstante bestimmen zu können, soll zunächst die 3-Jet-Rate bestimmt werden. Dazu zählt man alle Hadronischen Jets N_{had} und den Anteil der 3-Jets N_3 . Wir werden hier Ereignisse mit mehr als 3 Jets zu den 3-Jets zählen.

Bei der automatischen Auswertung der Ereignisse benötigt man einen exakten Parameter, der erlaubt, ein Ereignisse mit zwei oder mehr Jets zu unterscheiden. Dazu wird die Energie eines Jets und somit des Teilchens, das ihn ausgelöst hat, mit der ursprünglichen Gesamtenergie und dem mittleren Winkel θ_{ij} zwischen den Jets i und j verglichen: $M_{ij} = 2E_i E_j (1 - \cos(\theta_{ij}))$. Die Gesamtenergie ist dabei die Schwerpunktsenergie \sqrt{s} . Da die Energie eines Jets proportional zur Schwerpunktsenergie ist, kann man eine jetspezifische Konstante $y = \frac{M_{ij}^2}{s}$ definieren. Für einen Detektor findet man dann ein y_{cut} für das Jets mit $y > y_{cut}$ als aufgelöst erkennbar sind. Bei unserer optischen Auswertung werden wir die Jets nicht exakt nach dieser Vorschrift sortieren können, sondern abschätzen müssen.

Für DELPHI hat sich ein $y_{cut} = 0.02$ als nützlich erwiesen.

2.6.5 Bestimmung der Kopplungskonstante α_s

Aus den gezählten Ereignissen lässt sich dann mit $\frac{N_3}{N_{had}} = C \cdot \alpha_s$ die Kopplungskonstante α_s bestimmen. Die Konstante C ergibt sich dabei aus y_{cut} zu $C = 2,72$.

2.6.6 Neutrino-Generationen N_ν im Standardmodell

Die Anzahl der Neutrino-Generierungen kann aus der gemessen und theoretisch vorhergesagten Zerfallsbreite bei Z^0 -Resonanz bestimmt werden: $N_\nu = \frac{\Gamma_{inv}}{\Gamma_{\nu_e \bar{\nu}_e}^{SM}}$ mit $\Gamma_{\nu_e \bar{\nu}_e}^{SM} = 166,1MeV$.

2.6.7 totale Breite Γ_{tot} bei Z-Resonanz:

Der Wirkungsquerschnitt $\sigma_{had} = \sigma(e^+e^- \rightarrow p\bar{p})$ für den Zerfall in ein Quantenpaar bei Z-Resonanz ist: $\sigma_{had} = \frac{12 \cdot \pi \cdot \Gamma_{l\bar{l}} \cdot \Gamma_{had}}{m_Z^2 \cdot \Gamma_{tot}^2}$. Daraus folgt die totale Breite $\Gamma_{tot} = \sqrt{\frac{12 \cdot \pi \cdot \Gamma_{l\bar{l}} \cdot \Gamma_{had}}{m_Z^2 \cdot \sigma_{had}}}$. Der theoretische Wirkungsquerschnitt σ_{had} verringert sich um 26,3% zum tatsächlichen Wirkungsquerschnitt, da bei Z-Ereignissen auch Photonen abgestrahlt werden können (effektive Schwerpunktsenergie nimmt ab). So wird die totale Breite zu $\Gamma_{tot} = \sqrt{\frac{12 \cdot \pi \cdot \Gamma_{l\bar{l}} \cdot \Gamma_{had}}{m_Z^2 \cdot \frac{\sigma_{had}}{0,737}}}$. Aus der Luminosität kann man den tatsächlichen Wirkungsquerschnitt bestimmen $\sigma_{had} = \frac{N_{had}}{L}$. Weitere bereits bekannte Größen: $\Gamma_{l\bar{l}} = 83,83MeV$, $\Gamma_{had} = R \cdot \Gamma_{l\bar{l}}$, $m_Z = 91,871GeV$ und $L = 28,48nb^{-1}$.

2.6.8 Breite der unsichtbaren Neutrinozerfälle Γ_{inv} :

Die totale Breite der Z-Resonanz lautet: $\Gamma_{tot} = \Gamma_{had} + 3\Gamma_{l\bar{l}} + N_\nu \cdot \Gamma_{\nu\bar{\nu}}$. So folgt für die Breite der unsichtbaren Zerfälle: $\Gamma_{inv} = \Gamma_{tot} - \Gamma_{had} - 3 \cdot \Gamma_{l\bar{l}}$.

3 experimenteller Aufbau

3.1 Der DELPHI-Detektor

Der Detektor nimmt alle Daten auf um die Teilchenbahnen zu reproduzieren. Hieraus kann man dann auf die Einzelnen Komponenten, Zerfallsprodukte schließen und die Kette bis zurück zum anfänglichen Ereignis verfolgen bzw. reproduzieren.

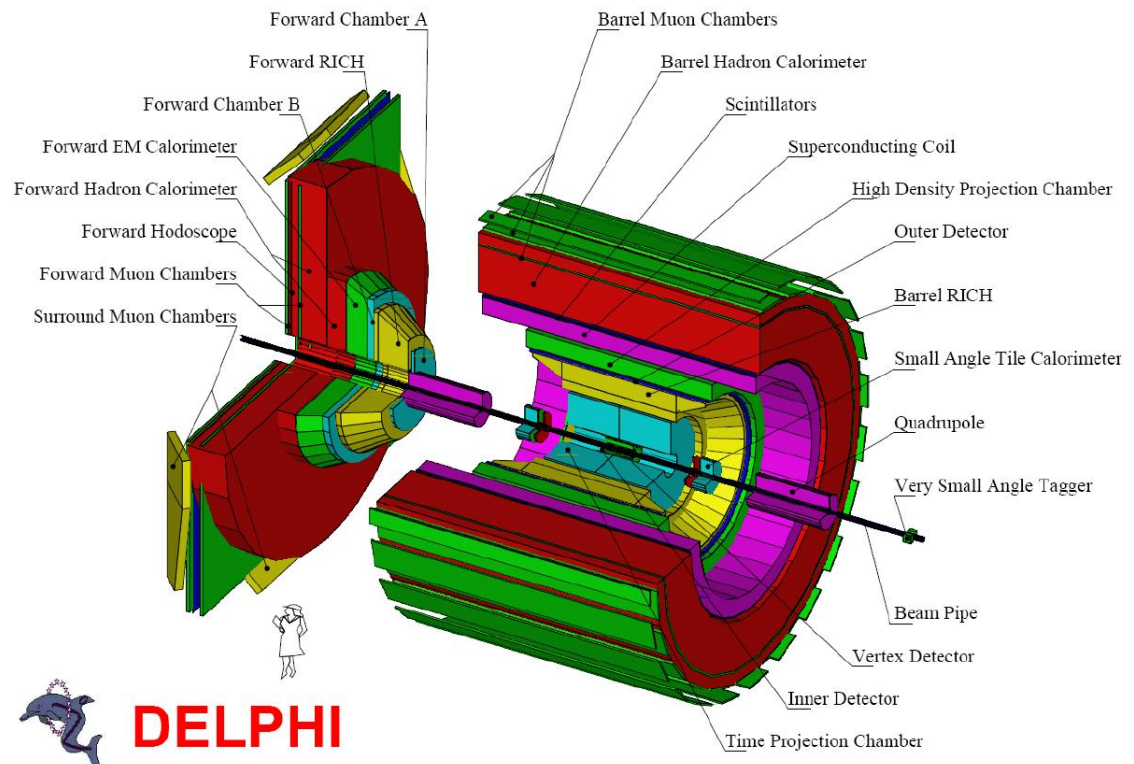


Abbildung 4:
Aufbau des DELPHI-Detektors

Quelle: The DELPHI Collaboration (<http://delphiwww.cern.ch/>)

- Vertex Detektor:

Dieser Teil ist zum Nachweis von primären und sekundären Zerfallsereignissen.

- Inner Detektor:

Verbessert die Vertexpföfung und triggert die Aufnahme. Triggern heißt hier, dass vor der Auswertung bereits Daten gefiltert werden, um nicht nur die wahrscheinlichsten Ereignisse aufzunehmen.

- Time Projections Chamber:

Spurkammer um Spuren 3dim zu reproduzieren. Die Kammer besteht aus zwei entgegengerichteten Driftkammern mit einem Gasgemisch. Sie liefert Informationen über den Energieverlust $\frac{dE}{dx}$ und die Driftzeit.

- RICH Detektoren:

Mit diesen Detektoren werden Protonen, Pionen und Kaonen bis zu großen Impulsen voneinander unterschieden. Mit Hilfe des Cherenkov-Effekts kann man diese Teilchen identifizieren. Wenn ein hochenergetisches Teilchen durch ein dielektrisches Medium mit einer Geschwindigkeit größer als Lichtgeschwindigkeit fliegt, strahlt es unter einem bestimmten Winkel Photonen ab (Cherenkov-Strahlung). Man bestimmt die Geschwindigkeit der Teilchen und den Impuls um auf die Ruhemasse des Teilchens zu kommen.

- Outer Detektor:

Verbessert die Genauigkeit der Impulsmessung beim Teilchendurchgang und liefert schnelle Triggerinformationen.

- High Density Projection Chamber (elektromagnetische Kalorimeter).

Zur Unterscheidung von Photonen, Elektronen und Positronen. Das Kalorimeter besteht aus homogenen und inhomogenen Schauerzählern zur Bestimmung der Teilchenzahl. Die Schauer brechen ab, sobald die Energie nicht mehr ausreicht um in weitere Teilchenpaare zu zerfallen. Hieraus lässt sich die Energie des Schauerauslösers bestimmen.

- Superconducting Coil (Supraleitende Spule)

Präzise Impulsmessung von geladenen Teilchen für das elektrom. Kalorimeter.

- Scintillators (Flugzeit Messer)

Werden zur Unterscheidung von Untergrundprozessen (kosmische Strahlung) und Ereignissen von der Beam Pipe verwendet.

- Barrel Hadron Calorimeter

Dieses Kalorimeter ist zur Messung Hadromischer Schauer. Es ist im Prinzip wie das em. Kalorimeter nur mit billigerem Material, da die Teilchen energiereicher sind, die dort ankommen.

- Barrel Muon Chambers

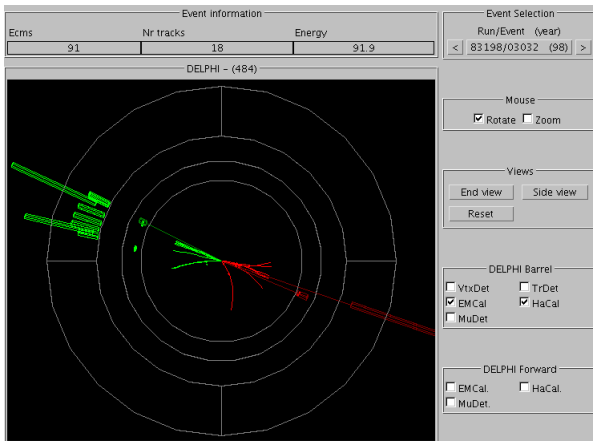
Hier werden Myonen detektiert. Sie geben erst weiter außerhalb des Detektors ihre Energie ab, da sie eine viel größere Ruhemasse als Elektronen besitzen.

4 Durchführung des Versuchs

4.1 Ereignisklassifizierung:

4.1.1 hadronische Ereignisse:

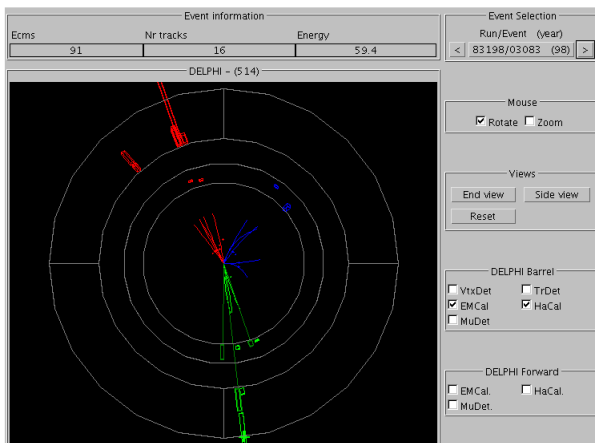
- 2-Jet-Ereignisse: Es entstehen Quark-Antiquark Paare.



WIREDE Development Team, ECP/IPT
Copyright 1996, CERN, Geneva, Switzerland

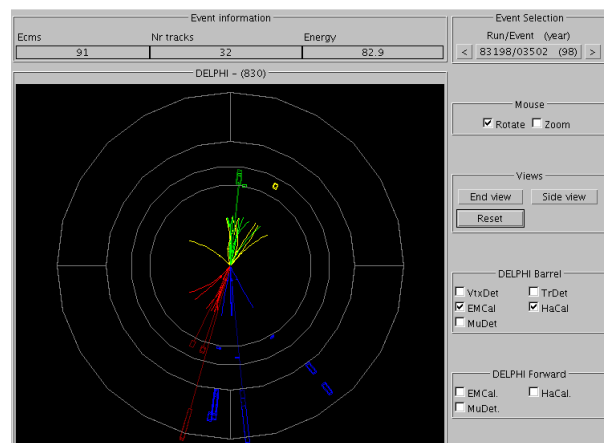
2-Jet Ereignis

- 3- und mehr-Jet-Ereignisse: Abstrahlung von einem Quark-Antiquark Paar und Gluonen. Die Abgestrahlten Gluonen zerfallen in Quarks die dann die weiteren Jets bilden.



WIREDE Development Team, ECP/IPT
Copyright 1996, CERN, Geneva, Switzerland

3-Jet Ereignis



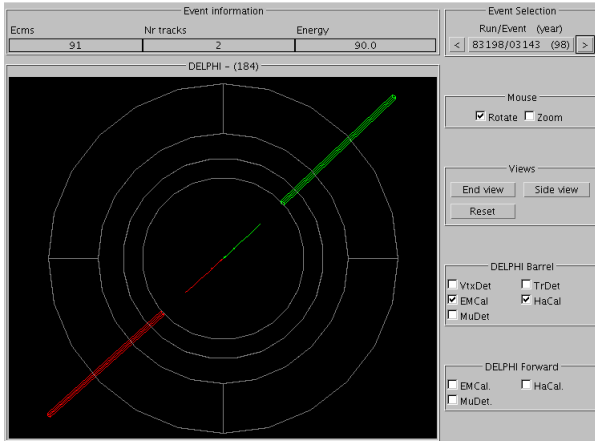
WIREDE Development Team, ECP/IPT
Copyright 1996, CERN, Geneva, Switzerland

multi-jet-Ereignis

4.1.2 leptonische Ereignisse:

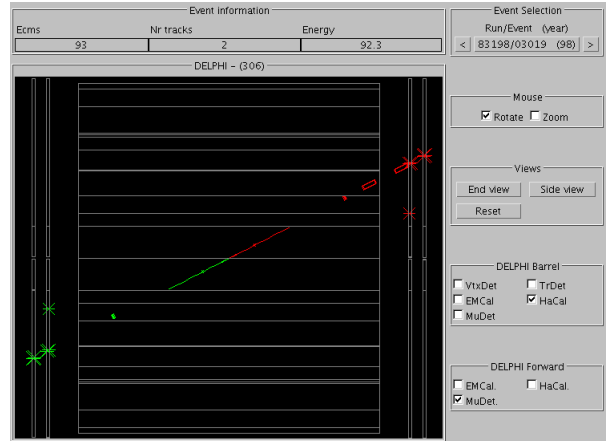
- e^-e^+ -Ereignisse:

Die Teilchen fliegen in entgegengesetzter Richtung weg und deponieren ihre Energie nahezu vollständig im em. Kalorimeter.



WIRED Development Team, ECP/PT
Copyright 1996, CERN, Geneva, Switzerland

e^+e^- -Ereignis



WIRED Development Team, ECP/PT
Copyright 1996, CERN, Geneva, Switzerland

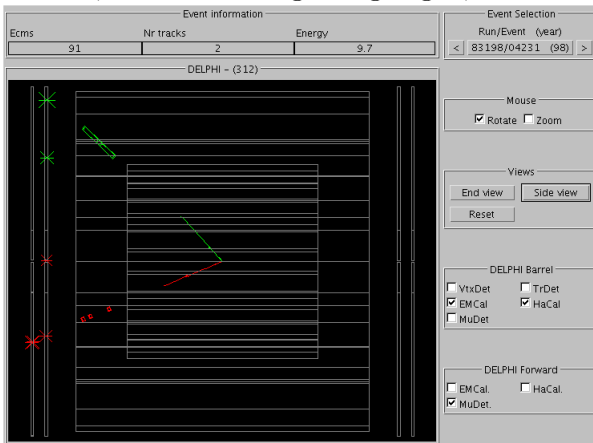
$\mu^+\mu^-$ -Ereignis

- $\mu^-\mu^+$ -Ereignisse:

Die Teilchen fliegen wie bei der e^-e^+ Paarbildung in entgegengesetzte Richtungen weg. Allerdings durchfliegen Myonen den Detektor meist ohne größeren Energieverlust und hinterlassen dann eine Spur in den Myonenkammern.

- $\tau^-\tau^+$ -Ereignisse:

Diese Leptonen zerfallen noch bevor sie die erste Detektorschicht erreichen. Man kann sie jedoch daran erkennen, dass zu wenig Energie im Detektor deponiert wird. Durch den Zerfall eines τ^\pm entstehen Neutrinos, die diese Energie wegtragen, ohne eine Spur im Detektor zu hinterlassen.



WIRED Development Team, ECP/PT
Copyright 1996, CERN, Geneva, Switzerland

$\tau^-\tau^+$ -Ereignis: hadronischer Zerfall

5 Auswertung / interpretation

5.1 „branching“ ratio and number of colors of strong interaction

The classification of the events is done by each of us so we can estimate a systematic deviation. 600 events are enough to calculate R with relative deviation of $\frac{\sigma_R}{R} = 0,11$, this is less than the required

15%.

$$N_{had} = N_{2-jet} + N_{3-jet} + N_{multi-jet} \text{ and } N_{l\bar{l}} = \frac{N_{e\bar{e}} + N_{\mu\bar{\mu}} + N_{\tau\bar{\tau}}}{3}$$

- statistic deviation of the funtions (propagation of deviation): $\sigma_{f(x,y,\dots)} = \sqrt{\sigma_x^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \sigma_y^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \dots}$
- statistic deviation of value (poisson-distribution): $\sigma_x = \sqrt{x}$
- standard deviation of median: $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ und $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
- relative deviation, for example of R: $\frac{\sigma_R}{R}$
- deviation specivication: (*value* \pm *statistic deviation* \pm *systematic deviation*)

1000 events	arnold	saskia	median	statistic deviation	systematic deviation
$N_{e\bar{e}}$	55	55	55	7	1
$N_{\mu\bar{\mu}}$	40	38	39	6	2
$N_{\tau\bar{\tau}}$	42	47	45	7	4
N_{2-jet}	515	511	513	23	13
N_{3-jet}	302	306	304	17	9
$N_{multi-jet}$	44	41	43	7	3
$N_{l\bar{l}}$	46	47	46	4	2
N_{had}	861	858	860	29	16

5.1.1 lepton universality

The values of $N_{e\bar{e}} = (55 \pm 7 \pm 1)$, $N_{\mu\bar{\mu}} = (39 \pm 6 \pm 2)$, $N_{\tau\bar{\tau}} = (45 \pm 7 \pm 4)$ are in the same range. The universality is justified because the values are in their deviation ranges.

5.1.2 „branching“ ratio

Our result of the branching ratio is: $R = \frac{N_{had}}{N_{l\bar{l}}} = (19 \pm 2 \pm 1)$.

5.1.3 number of colors

We compute the number of colors $N_c = \frac{R \cdot \Gamma_{l\bar{l}}}{(N_u \Gamma_{uu}^{SM} + N_d \Gamma_{dd}^{SM})} = (2, 7 \pm 0, 3 \pm 0, 1)$ with $\Gamma_{had} = R \cdot \Gamma_{l\bar{l}} = (1, 56 \pm 0, 14 \pm 0, 06) GeV$. The real value of colors $N_c = 3$ is in our intervall of the result.

5.2 coupling constant α_s of strong interaction

The coupling constant of strong interaction is $\alpha_s = \frac{N_3}{C \cdot N_{had}} = (0, 148 \pm 0, 006 \pm 0, 003)$. We looked up a value in literatur, it is between $\alpha_s = 0, 1$ and $\alpha_s = 0, 2$ in relation to the distance of the quarks.

5.3 number of neutrino generations N_ν in SM

We need the cross section $\sigma_{had} = \frac{N_{had}}{L} = (7, 8 \pm 0, 3 \pm 0, 1) \cdot 10^{-11} MeV^{-2}$ (of $e^- + e^+ \rightarrow q + \bar{q}$) for the total decay width $\Gamma_{tot} = \sqrt{\frac{12 \cdot \pi \cdot \Gamma_{\bar{l}} \cdot \Gamma_{had}}{m_Z^2 \cdot 0,737}} = (2, 36 \pm 0, 12 \pm 0, 05) GeV$. Further we get the width of invisible neutrino decays $\Gamma_{inv} = \Gamma_{tot} - \Gamma_{had} - 3 \cdot \Gamma_{\bar{l}} = (543 \pm 183 \pm 83) MeV$ to calculate the number of neutrino generations.

$$N_\nu = \frac{\Gamma_{inv}}{\Gamma_{SM}^{\nu_e \bar{\nu}_e}} = (3, 3 \pm 1, 1 \pm 0, 5)$$

This allows an interval from 2 to 4 neutrino generations in the standard model which contains the real value of 3.

5.4 appendix

- eventlist (page1)
- table branching ratio and number of colors (page2)
- table coupling constant (page3)
- table number of neutrino generations (page4)