

# Gluon und Gluon selbstwechselwirkung: 3- und 4-Jet-Ereignisse bei ALEPH

Niklas Wahl

Universität Heidelberg  
Betreuer: Prof. Dr. Norbert Herrmann

28.05.2010

## Ziel des Vortrags

- Einblick in die Quantenchromodynamik (QCD)
- Experimentelle Überprüfung der QCD
- Detektoraufbau (speziell ALEPH)
- Auswertung und Korrektur der Daten  
(Jet-Raten/-Winkelverteilungen, -Algorithmen, etc)
- Ergebnisse des ALEPH-Experiments

# Inhaltsverzeichnis

- 1 Overview
- 2 Theorie der starken Wechselwirkung (QCD)
  - Grundlagen
  - Vertices und Kenngrößen
  - Überprüfung im Experiment
- 3 Observablen und Messbarkeit
  - Grundlegende Prozesse
  - 4-Jet Observablen
- 4 Detektoraufbau und Messmethodik
  - ALEPH-Detektor
  - Hadronische Ereignisse und Jet-Definition
  - Fehler/Korrekturen
- 5 Ergebnisse
  - ALEPH
  - Weltweit

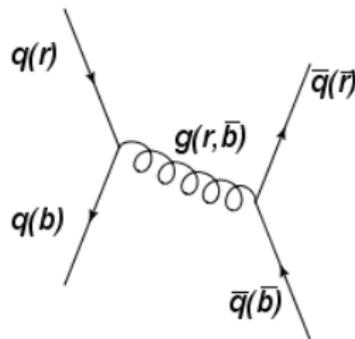
# Überblick

- QCD entstand in den 70er Jahren
- quantenfeldtheoretische Beschreibung der Starke Wechselwirkung
- angelehnt an die Quantenelektrodynamik (QED)
- QED: Ladungszustände +,-
- QCD: rot, grün, blau und Anti-Farben

## Die SU(3)-Eichgruppe

- Aufgrund der 3 Farbladungen andere Symmetriegruppe als in der QED (U(1)) nötig
- Wahl der SU(3) - Gruppe (nicht-abelsch)
- fordert 8 "farbige" Gluonen bzw. Gluonfelder (Eichinvarianz)

⇒ Gluonen ändern Farbe der Quarks und können auch mit sich selbst wechselwirken



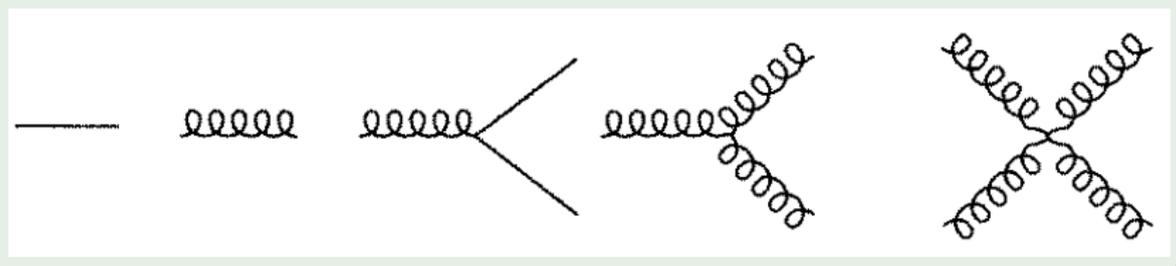
## Vertices der Starke Wechselwirkung

Vertices lassen sich aus der Lagrangedichte fast direkt “ablesen”

### Lagrangedichte

$$\mathcal{L}_{QCD} \approx q\bar{q} + G^2 + g_s t q\bar{q}G + g_s f G^3 + g_s^2 f^2 G^4$$

### Vertices



**Gesucht:** Größen die die verschiedenen Vertices charakterisieren

## Kopplungskonstante $\alpha_s$

- Gibt Stärke der Kopplung an
- Abhängig vom Impulsübertrag  $Q^2$

$\alpha_s$

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{12\pi}{(33 - 2n_f) \ln \frac{Q^2}{\Lambda^2}}$$

$n_f$  = Anzahl q-Flavours,  $\Lambda$  = Massenskala

⇒ Confinement und Asymptotische Freiheit

# Colour-Factors $C_A, C_F, T_F$

- Charakterisieren die verschiedenen Kopplungsstärken
- Lassen sich direkt aus der Symmetriegruppe  $SU(N_C)$  ableiten

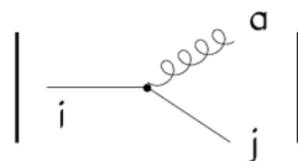
## Theoretische Werte

Es gilt:

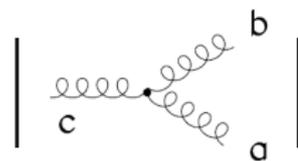
$$C_A = N_C, C_F = \frac{N_C^2 - 1}{2N_C}, T_F = 1/2$$

Für  $SU(3)$  gilt somit:

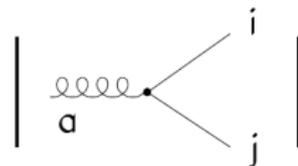
$$C_A = 3, C_F = 4/3, T_F = 1/2$$



$$\left| \begin{array}{c} \text{---} i \\ \bullet \\ \begin{array}{l} \text{~~~~} a \\ \text{---} j \end{array} \end{array} \right|^2 \sim \alpha_s C_F$$



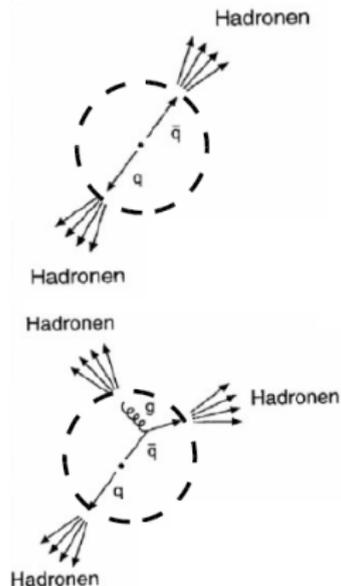
$$\left| \begin{array}{c} \text{~~~~} c \\ \bullet \\ \begin{array}{l} \text{~~~~} a \\ \text{~~~~} b \end{array} \end{array} \right|^2 \sim \alpha_s C_A$$



$$\left| \begin{array}{c} \text{~~~~} a \\ \bullet \\ \begin{array}{l} \text{---} i \\ \text{---} j \end{array} \end{array} \right|^2 \sim \alpha_s T_F$$

# Experimentelle Überprüfungsmöglichkeit

- Messung von  $\alpha_s(Q^2)$  und  $C_F, C_A, T_F$   
⇒ ideale Bestätigung der QCD und der SU(3)-Eichsymmetrie
- Confinement ⇒ Quarks- und Gluonen fragmentieren nach Teilchenkollisionen zu Teilchenjets
- $e^+e^-$ -Annihilation bietet sich aufgrund der Einfachheit an



# $e^+e^-$ -Beschleuniger

Warum ALEPH am CERN (LEP)?

Beschleuniger	Lab	$\sqrt{s}$
SPEAR	SLAC	2-8 GeV
PEP	SLAC	→ 29 GeV
PETRA	DESY	12-47 GeV
TRISTAN	KEK	50 - 60 GeV
LEP	CERN	90 GeV

LEP (spez. ALEPH) interessant, da Ruhemasse  $Z_0 \approx 91\text{GeV}$

⇒ erhöhte Produktion von  $Z_0$ -Bosonen

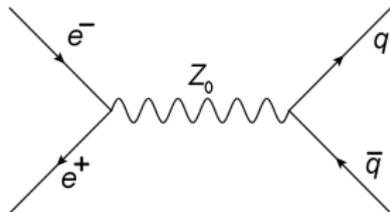
⇒ Sehr hohe Ereignisraten, u.a. der interessanten Prozesse:

$Z_0 \rightarrow q\bar{q}$ ,  $Z_0 \rightarrow q\bar{q}g$ ,  $Z_0 \rightarrow q\bar{q}gg$

## $e^+e^-$ -Annihilation am $Z$ -Peak

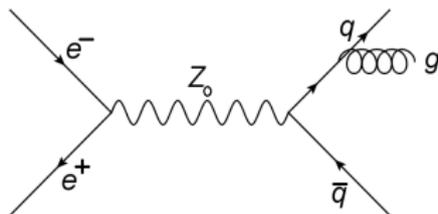
- Im Gegensatz zur Nukleon-Streuung rein schwach wechselwirkender Prozess
- Andere "Hintergrundereignisse" lassen sich leicht herausfiltern

Der grundsätzlich interessante Prozess ist der Zerfall des  $Z_0$ -Bosons in ein  $q\bar{q}$ -Paar



## 3 Partonen im Endzustand

$$Z_0 \rightarrow q\bar{q}g$$

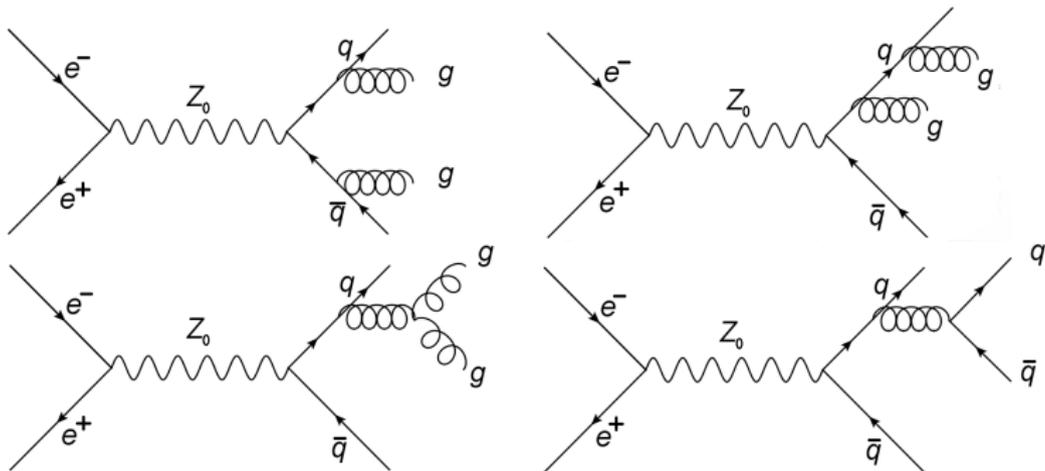


- Quark emittiert Gluon-Bremsstrahlung
- Keine Information über Gluon-Selbstwechselwirkung
- ABER: Verhältnis  $\frac{\sigma(Z \rightarrow q\bar{q}g)}{\sigma(Z \rightarrow q\bar{q})} \sim \alpha_s$

$\Rightarrow$  Prozesse erster Ordnung ermöglichen Messung von  $\alpha_s$  und sind guter Nachweis für die Existenz des Gluons überhaupt

# 4 Partonen im Endzustand

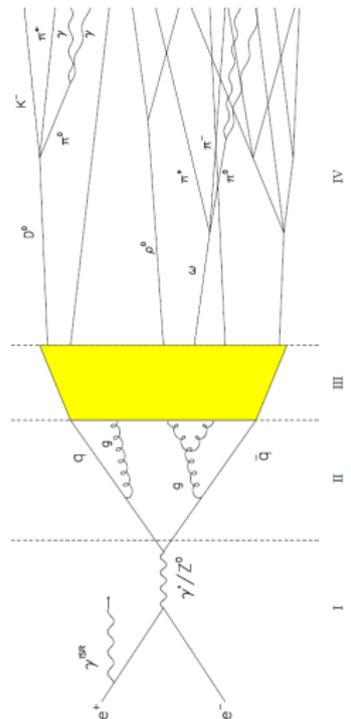
$$Z_0 \rightarrow q\bar{q}gg, Z_0 \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$$



⇒ Selbstwechselwirkungsbeiträge erst ab Ordnung  $\alpha_s^2$

# Unterscheidung der Prozesse

- Die Quarks/Gluonen aus den Prozessen fragmentieren in Teilchenjets
- Später abgestrahlte Gluonen tragen keinen bzw. kaum Transversalimpuls  
⇒ Führende Ordnungen für die Jet-Struktur entscheidend
- Jet-Struktur je nach Prozess unterschiedlich

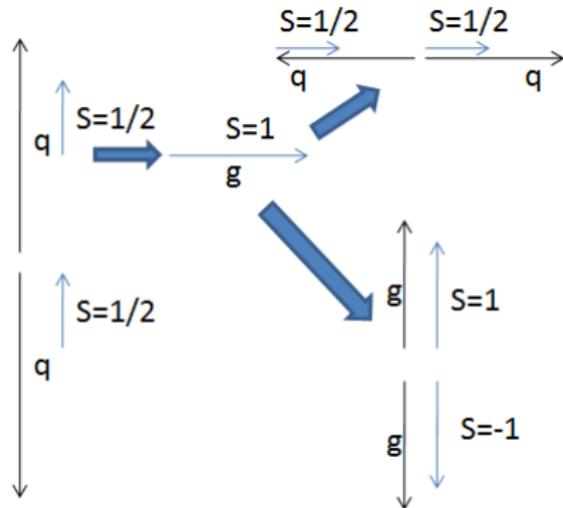
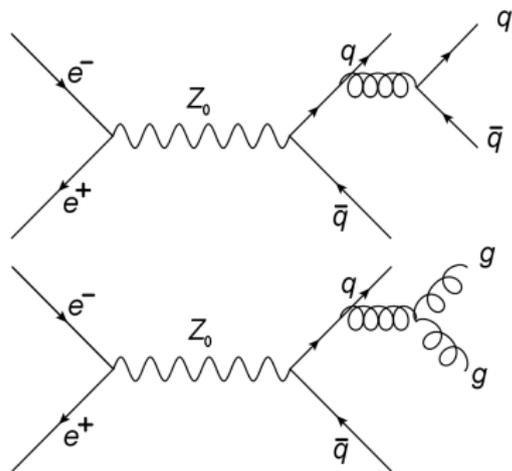


## Wichtige Größen

- Wichtige Größen sind die jeweilige Jet-Rate und die Winkelverteilung
- 4-Jet-Rate reagiert sehr stark auf Änderungen der Kopplungskonstante (höhere Ordnung)  
⇒ Hier 3-Jet-Rate zur Messung von  $\alpha_s$  eher unwichtig
- Winkelverteilungen wichtig um die gewünschten Ereignisse untereinander zu unterscheiden

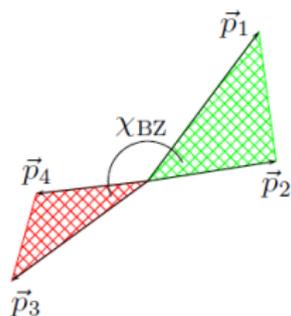
# Beispiel am 4-Parton-Endzustand

Quarks: Spin 1/2, Gluon: Spin 1

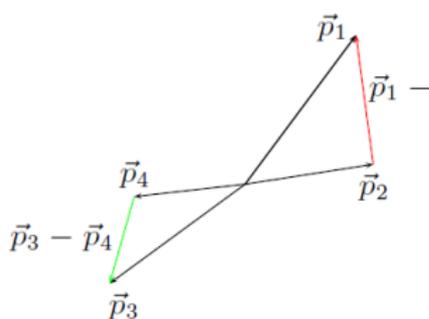


# Jet-Winkel anschaulich

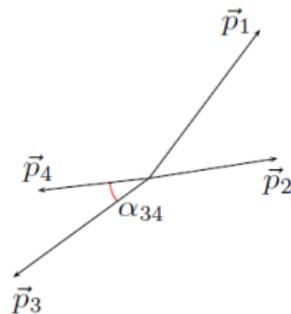
Bengston-Zerwas



mod. Nachtmann-Reiter



$\alpha_{34}$



Anm.: Jets nach Energie geordnet:  $E_1 > E_2 > E_3 > E_4$

# Wirkungsquerschnitt der 4-Jet-Observablen

$$\frac{1}{\sigma^4} \frac{d\sigma}{d \cos X} = \frac{\eta(\mu)^2 B_{\cos X}(\cos X) + \eta(\mu)^3 [B_{\cos X}(\cos X) \beta_0 \ln(x_\mu^2) + C_{\cos X}(\cos X)]}{\eta(\mu)^2 B_{\cos X} + \eta(\mu)^3 [B_{\cos X} \beta_0 \ln(x_\mu^2) + C_{\cos X}]}$$

mit

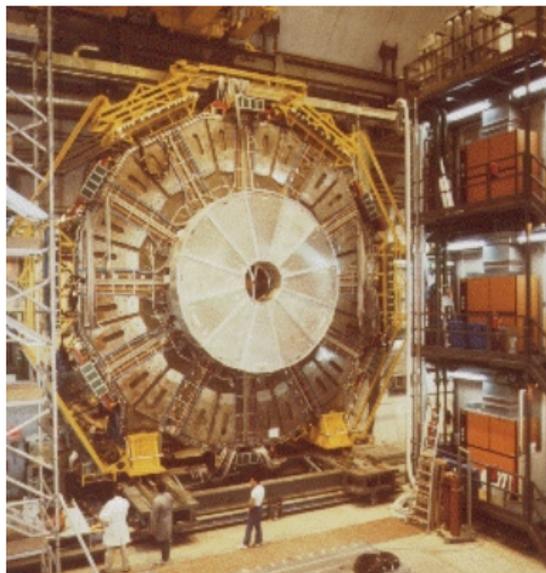
$$\eta(\mu) = \frac{\alpha_s(\mu) C_F}{2\pi} = \frac{\eta(M_Z)}{1 - \beta_0 \eta(M_Z) \ln\left(\frac{M_Z}{\mu}\right)} \left( 1 - \frac{\beta_1}{\beta_0} \eta(M_Z) \frac{\ln 1 - \beta_0 \eta(M_Z) \ln\left(\frac{M_Z}{\mu}\right)}{1 - \beta_0 \eta(M_Z) \ln\left(\frac{M_Z}{\mu}\right)} \right)$$

und

$$\beta_0 = \frac{11}{3}x - \frac{4}{3}yN_f \quad \text{und} \quad \beta_1 = \frac{17}{3}x^2 - 2yN_f - \frac{10}{3}xyN_f$$

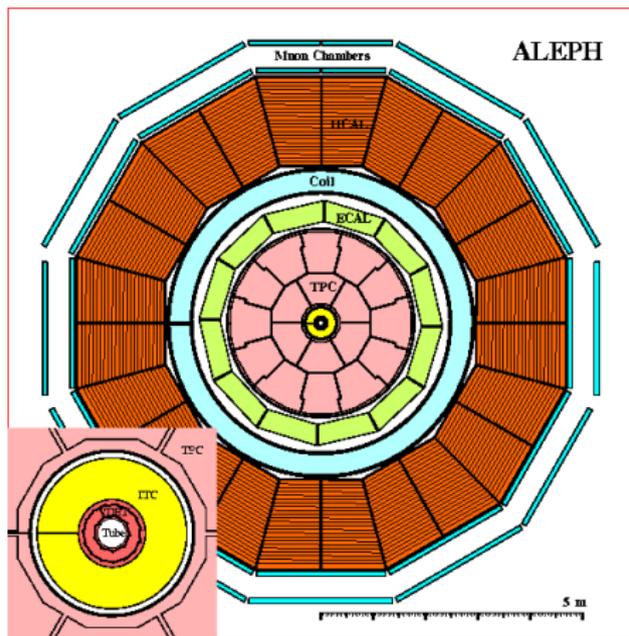
Die Variablen  $x = \frac{C_A}{C_F}$  und  $y = \frac{T_F}{C_F}$  sind die sog.  
**Colour-Factor-Ratios**

# Der ALEPH-Detektor



- Einer von 4 am LEP installierten Detektoren
- Sammelte von 1989 - 1995 Daten bei 91 GeV (danach höhere Energien)
- Messungen u.a. der Masse des W-Bosons, der Teilchenfamilien und der starken Wechselwirkung

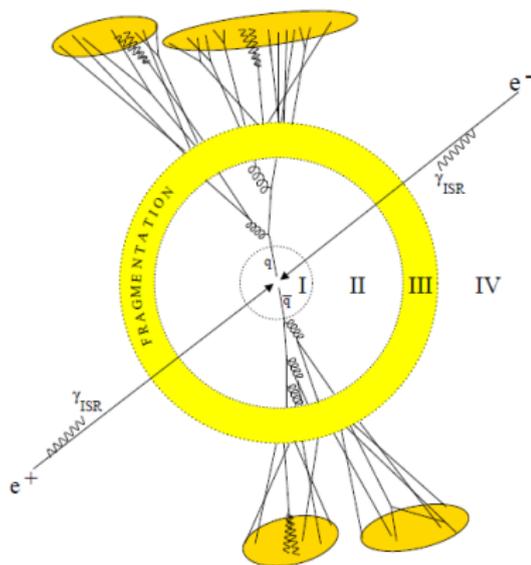
# Der ALEPH-Detektor



Von innen nach außen:

- 1 Tracking (bis ca. 1,8 m Radius)
  - Vertex-Detektor (VDET)
  - Driftkammern (ITC)
  - Time Projection Chamber (TPC)
- 2 Kalorimeter (bis ca. 5m)
  - Elektromagnetisch (ECAL)
  - Hadronisch (HCAL)
  - Myon-Detektor (MUON)

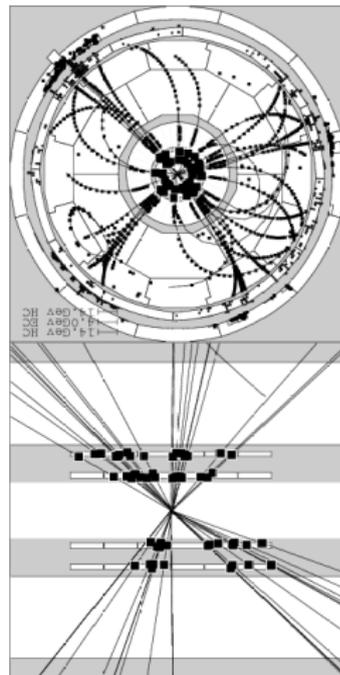
# Hadronisches Ereignis und Jet-Entstehung



- ❶ Annihilation und Bildung eines  $q\bar{q}$ -Paar aus der Schwerpunktsenergie (durch  $\gamma$ -Bremsstrahlung verringert)
- ❷ Abstrahlung von harten und weichen Gluonen, Paarbildungen etc.
- ❸ Fragmentation der Teilchen aus II
- ❹ Zerfall von instabilen Hadronen

## Jet-Definition

- Detektor zeichnet "nur" Fülle von einzelnen Ereignissen
- Teilchen müssen rekonstruiert und
- zu Jets zusammengefasst werden
- $\Rightarrow$  Verschiedene Algorithmen (JADE, DURHAM, CAMBRIDGE)



# Jet-Algorithmen (Beispiel JADE und DURHAM)

## JADE

Einer der ältesten Jet-Algorithmen:

$$y_{ij} = \frac{2E_i E_j \cdot (1 - \cos \theta_{ij})}{E_{vis}^2}$$

## DURHAM

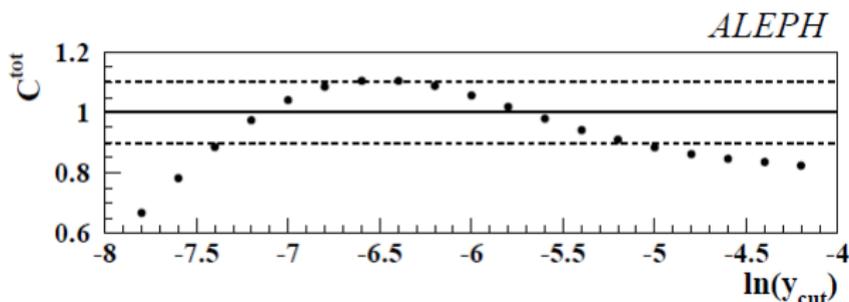
Verbesserung des JADE-Algorithmus:

$$y_{ij} = \frac{2\min(E_i^2, E_j^2) \cdot (1 - \cos \theta_{ij})}{E_{vis}^2}$$

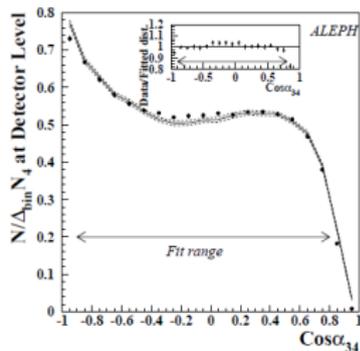
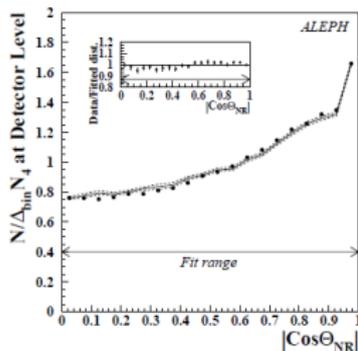
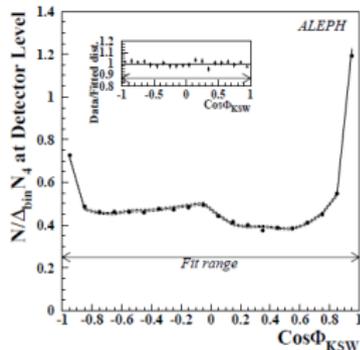
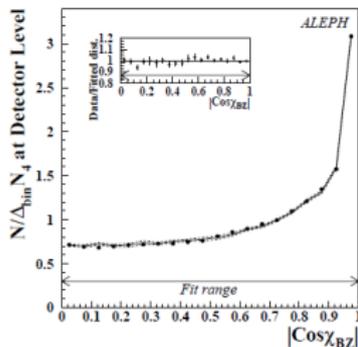
Teilchen werden solange zusammengefasst, bis  $y_{ij} > y_{cut}$ , wobei  $y_{cut}$  so gewählt wird, dass eine hohe 4-Jet-Rate erreicht wird.

## Korrekturen

- Detektoreffekte und Energieverluste
- Daten müssen korrigiert werden
- Monte-Carlo-Generatoren simulieren Millionen von Ereignissen
- Durch Simulation vor und nach Detektoreinflüssen können unerwünschte Effekte ausgeglichen werden



## Fits



- Anwendung verschiedener Simulationen
- Anpassung der exp. Parameter ( $\alpha_s, C_F, C_A$  usw..)
- Millionen Ereignisse → kleine stat Fehler

# Ergebnisse

ALEPH Ergebnisse von 2002 (Daten von 1994 und 1995)

## Werte

$$\alpha_s(M_Z) = 0.119 \pm 0.006(\text{stat}) \pm 0.026(\text{sys})$$

$$C_A = 2.93 \pm 0.14(\text{stat}) \pm 0.58(\text{sys})$$

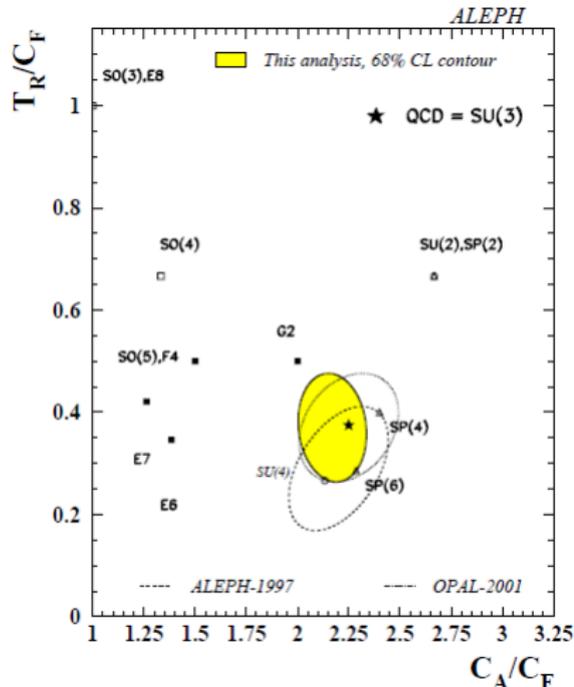
$$C_F = 1.35 \pm 0.07(\text{stat}) \pm 0.26(\text{sys})$$

## Theorie

$$C_A = 3$$

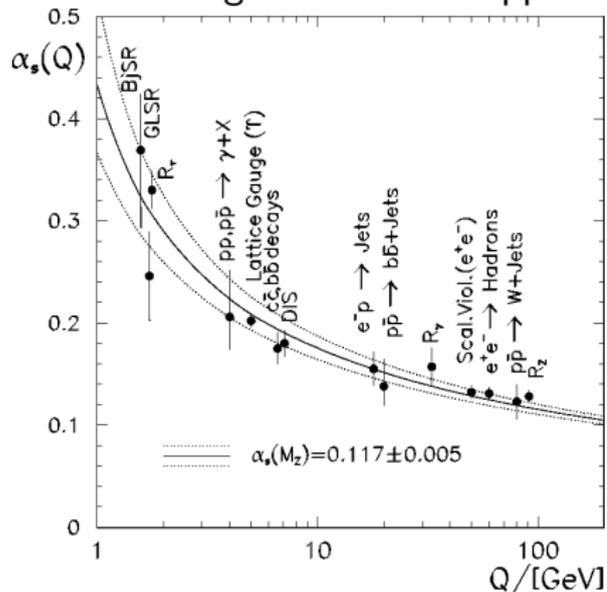
$$C_F = 4/3 = 1.33$$

Gute Übereinstimmung mit den  
 Theoretischen Werten!



# "Running" der Kopplungskonstante

ALEPH hat  $\alpha_s(M_\tau)$  und  $\alpha_s(M_Z)$  gemessen. Zusammenstellung mit den Messungen anderer Gruppen ergibt:



Der Anstieg zu kleinen Energien hin ist gut zu erkennen, wie von der QCD erwartet.

# Zusammenfassung

QCD wurde experimentell überprüft anhand:

- Der 4-Jet-Rate bei  $e^+e^-$ -Annihilation
- Den Jet-Winkelverteilungen

⇒ Daraus wurden die Color-Factors und die Kopplungskonstante bestimmt

Die von ALEPH vermessenen Kollisionen und deren Auswertung ergab eine gute Übereinstimmung mit der Theorie.

## Danke / Quellen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Quellen:

- ALEPH Collaboration, Measurements of the Strong Coupling Constant and the QCD Colour Factors using Four-Jet Observables from Hadronic Z Decays
- Uwe Flügge, Multijet-Produktion in der  $e + e^-$ -Annihilation von  $\sqrt{s} = 89$  GeV bis 207 GeV
- G. Dissertori, Measurements of the QCD Colour Factors at LEP
- Greiner, Schramm, Stein: Quantum Chromodynamics, Springer, 1989
- <http://aleph.web.cern.ch/aleph/aleph/Public.html>
- <http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2002/feynman/strongvertices.htm>
- [http://www.solstice.de/grundl\\_d\\_tph/msm\\_feyn/msm\\_feyn\\_04.html](http://www.solstice.de/grundl_d_tph/msm_feyn/msm_feyn_04.html)
- <http://www.physik.uni-bielefeld.de/~yorks/seminar/alexander.pdf>
- [http://www2.uni-wuppertal.de/FB8/groups/Teilchenphysik/Seminar/DPG/2003/DPG03\\_Hoeth\\_Farbfaktoren.pdf](http://www2.uni-wuppertal.de/FB8/groups/Teilchenphysik/Seminar/DPG/2003/DPG03_Hoeth_Farbfaktoren.pdf)
- <http://www.wikipedia.de> (Quantenchromodynamik, Gluon, Three-Jet-Rate (englisch))