

Einführung in die moderne Teilchenphysik

Dr. Stefan Schael
Max-Planck Institut für Physik
Werner Heisenberg Institut
Föhringer Ring 6
D-80805 München

1. Das Standardmodell der Teilchenphysik
2. Teilchenbeschleuniger & Teilchendetektoren
3. Erhaltungssätze und Symmetrien
4. Die elektroschwache Wechselwirkung I & Neutrinos
5. Neutrinos & Die elektroschwache Wechselwirkung II
6. Die elektroschwache Wechselwirkung III
7. B-Physik I & die Entdeckung des Top Quark
8. B-Physik II & CP Verletzung
9. Das ATLAS Experiment
10. Grenzen des Standardmodells

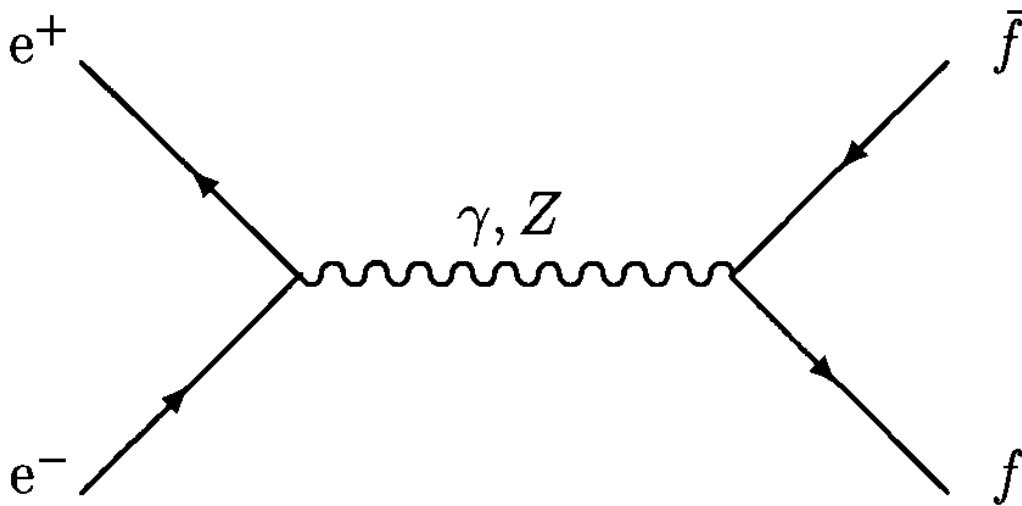
Literatur:

- H. Hilscher, "Elementare Teilchenphysik", Vieweg,
- E. Lohrmann, "Hochenergiephysik", Teubner,
- O. Nachtmann, "Elementarteilchenphysik", Vieweg.

ftp:

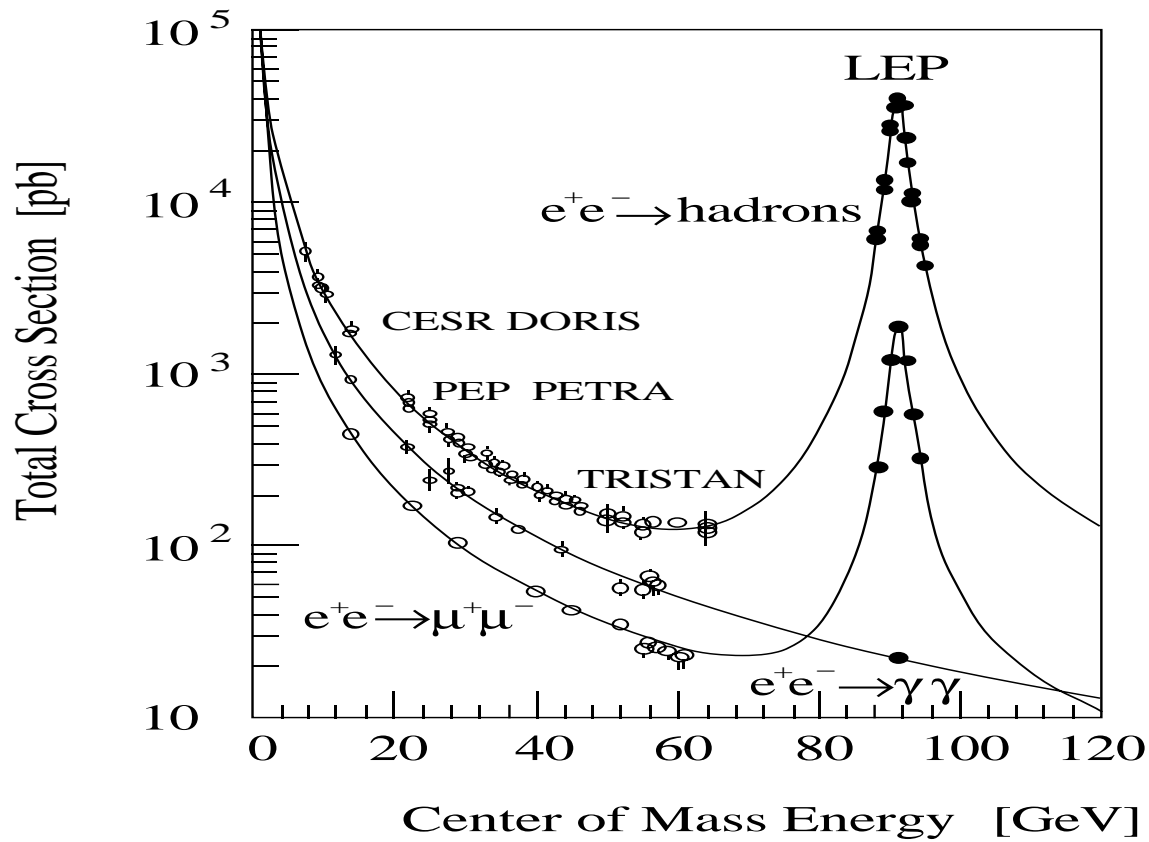
[afmp02.mppmu.mpg.de:/pub/stefan/augsburg_ss98/](ftp://afmp02.mppmu.mpg.de/pub/stefan/augsburg_ss98/)

Z Zerfälle in Quarks



- $N_{f\bar{f}} = L \cdot \sigma_{f\bar{f}}$

Die Luminosität L ist eine Beschleunigereigenschaft.



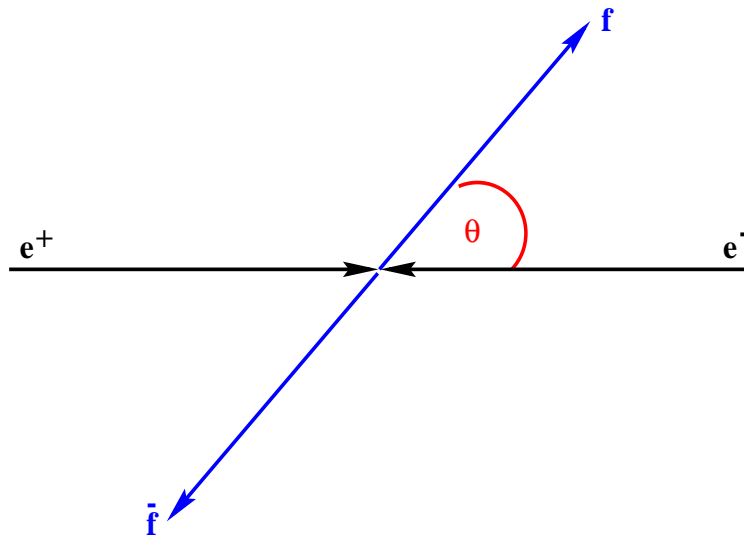
$$\sigma_{f\bar{f}}(s) = \frac{12\pi}{M_Z^2} \cdot \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{f\bar{f}}}{\Gamma_Z} \cdot \frac{s\Gamma_Z^2}{(s - M_Z^2)^2 + M_Z^2\Gamma_Z^2}$$

- $\Gamma_{f\bar{f}} = \frac{\sqrt{2}G_F M_Z^3}{6\pi} \cdot (g_R^2 + g_L^2) \cdot N_C$

- $g_L = \pm\frac{1}{2} - |Q_f| \sin^2(\Theta_W)$ • $g_R = -|Q_f| \sin^2(\Theta_W)$

- $\sin^2(\Theta_W) := 1 - \frac{M_W^2}{M_Z^2} = 0.2260 \pm 0.0048$

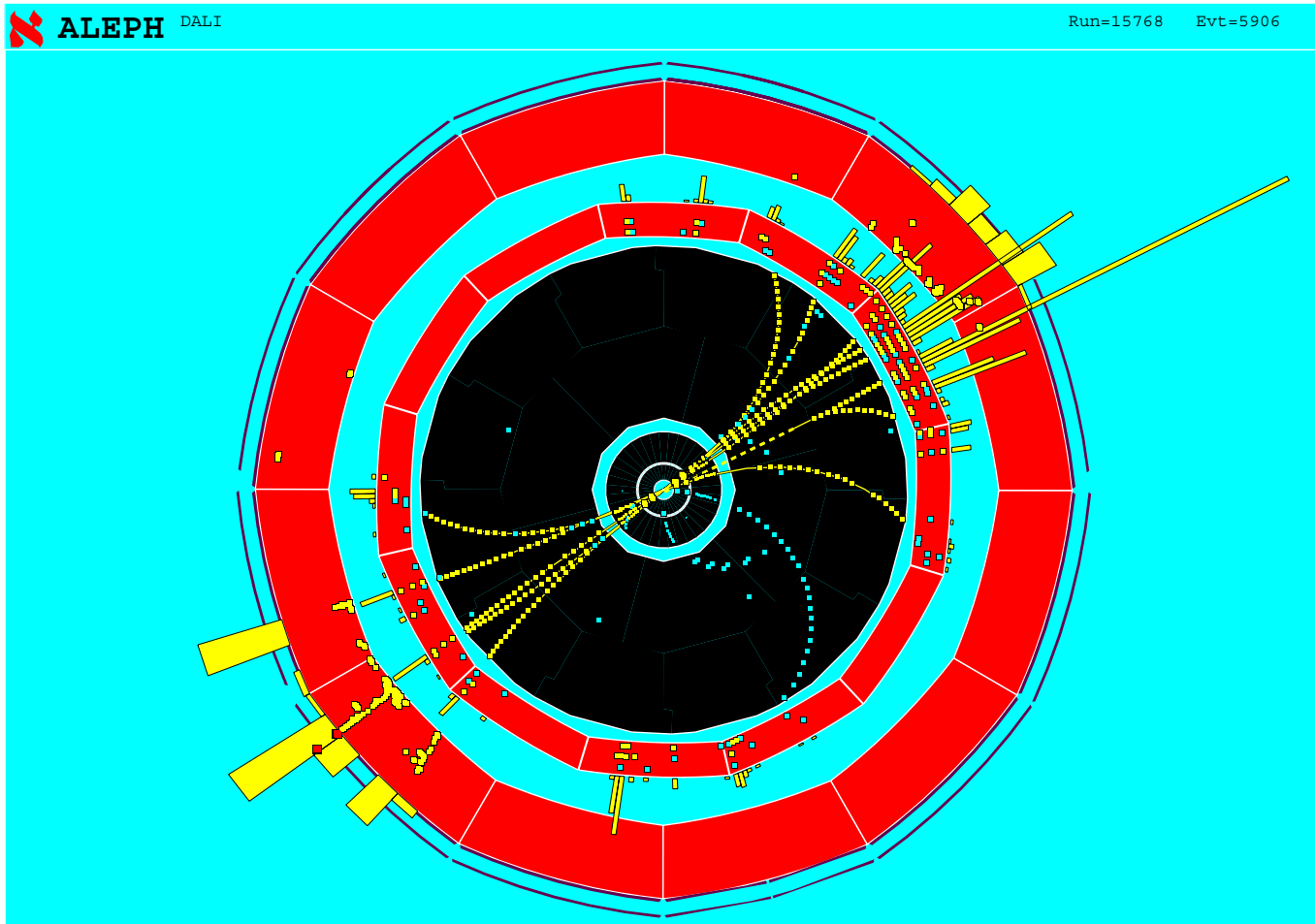
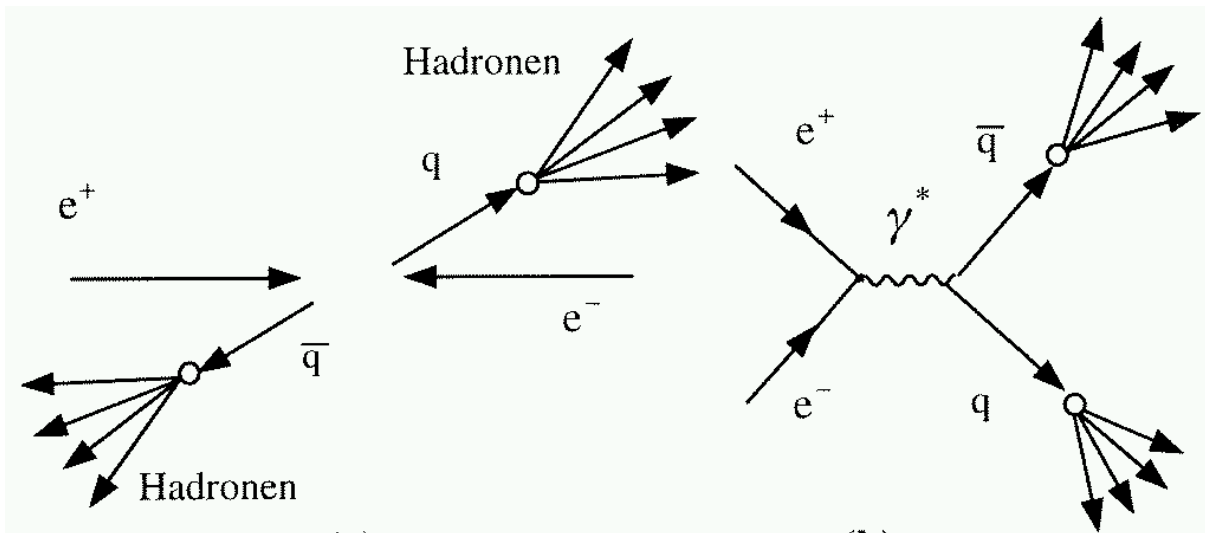
Winkel-Verteilung der Fermionen aus Z-Zerfällen:



$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = 1 + \cos^2\theta + \frac{8}{3}A_{FB}^f \cos\theta$$

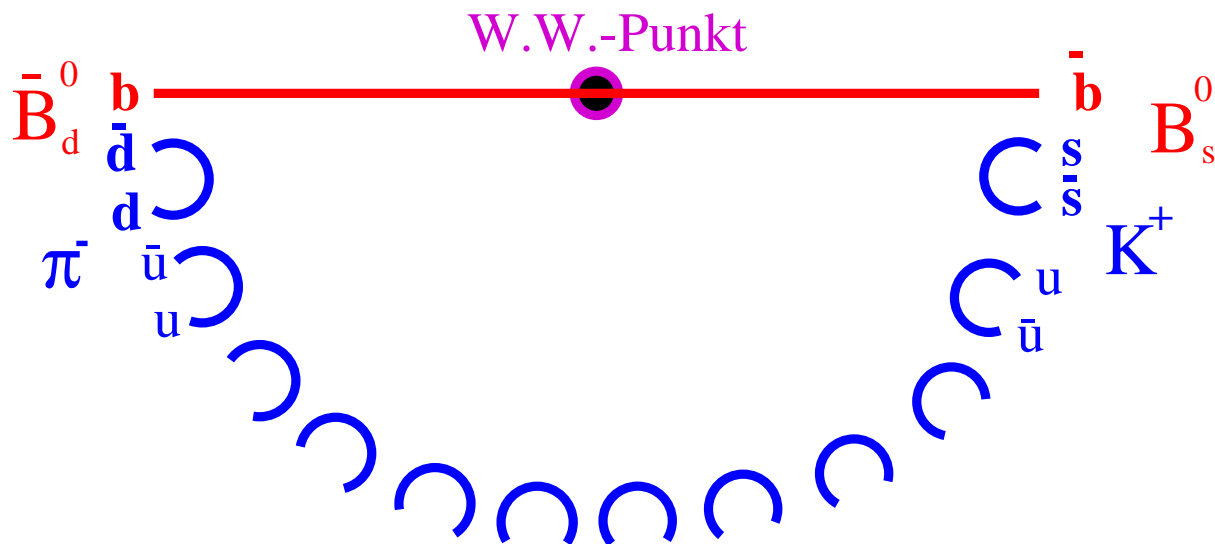
$$\begin{aligned} A_{FB}^f &= \frac{\sigma_A^f - \sigma_B^f}{\sigma_A^f + \sigma_B^f} \\ &= \frac{3g_L(e)^2 - g_R(e)^2}{4g_L(e)^2 + g_R(e)^2} \cdot \frac{g_L(f)^2 - g_R(f)^2}{g_L(f)^2 + g_R(f)^2} \end{aligned}$$

$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$



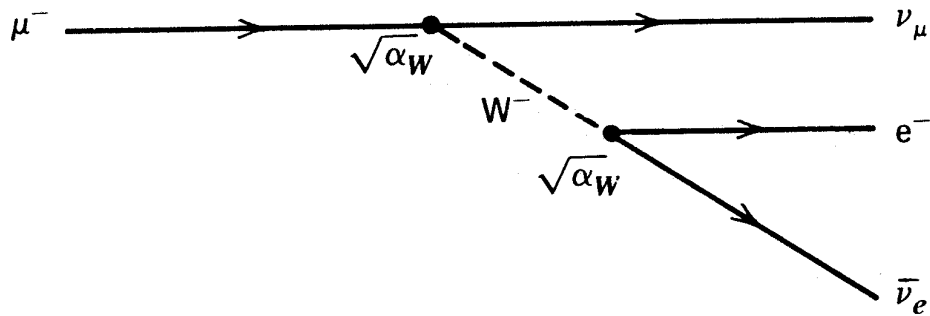
Made on 9-Sep-1993 14:15:44 by DREVERMANN with DALLDI.

Wie sieht ein hadronischer Z-Zerfall in b-Quarks aus ?



- B-Mesonen: $B_d^0(\bar{b}d)$, $B_u^\pm(\bar{b}u)$, $B_s^0(\bar{b}s)$
 Masse: ca. $5 \text{ GeV}/c^2$
 Lebensdauer: ca. $1.5 \cdot 10^{-12} \text{ s}$

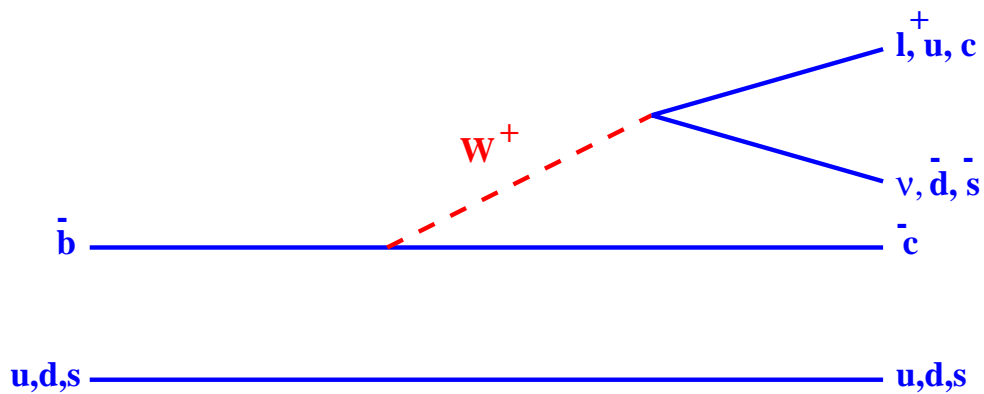
- $\mu^- \rightarrow \nu_\mu e^- \bar{\nu}_e$



$$\Gamma_\mu = \frac{\hbar}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3}$$

$$m_\mu = 105.66 \text{ MeV} \text{ und } \tau_\mu = 2.197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

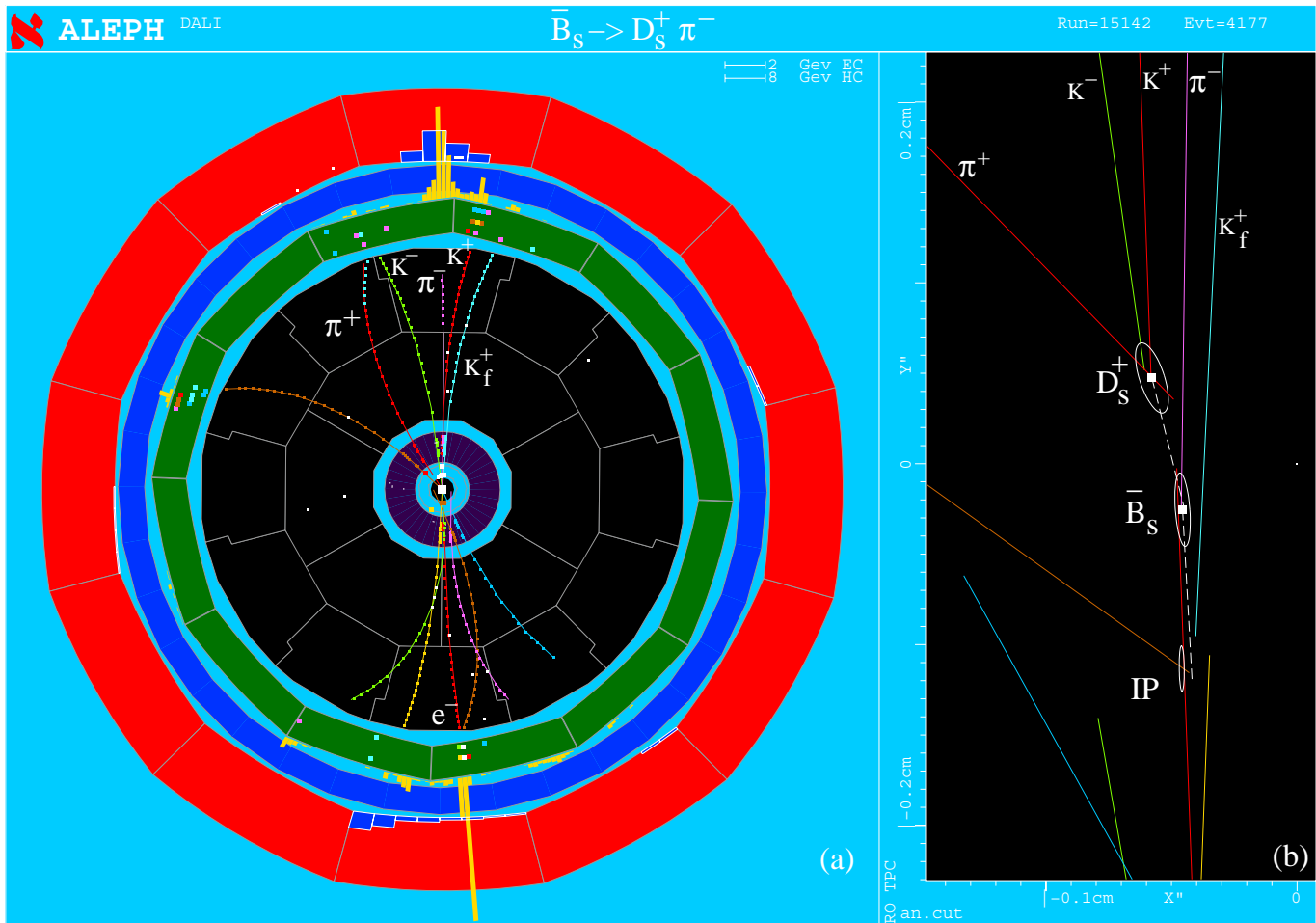
- $b \rightarrow c f f'$



$$\Gamma_b = \frac{\hbar}{\tau_b} = \frac{G_F^2 m_b^5}{192\pi^3} K_c V_{cb}^2$$

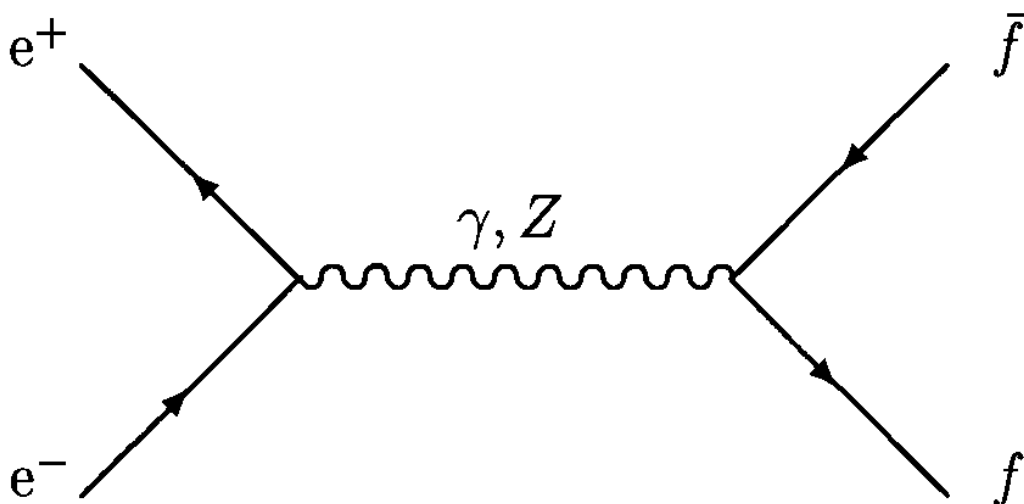
$$\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^+ \pi^-$$

$$M(B_s^0) = 5.3684 \pm 0.0056 \pm 0.0015 \text{ GeV}/c^2$$

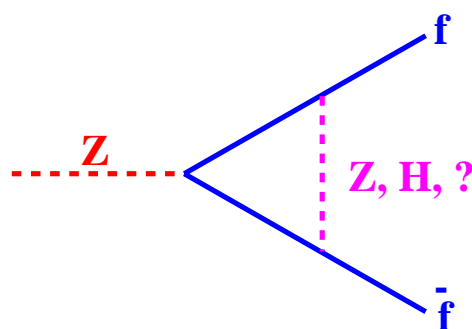
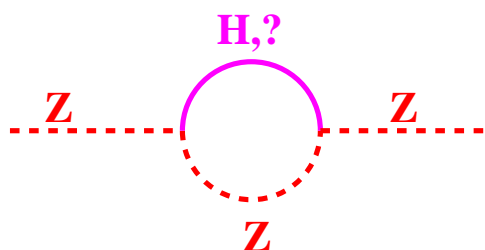
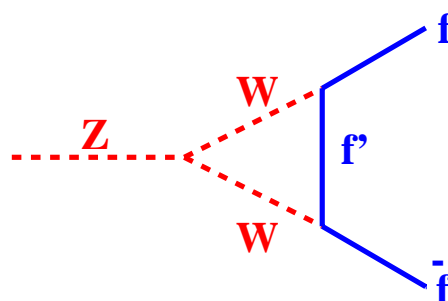
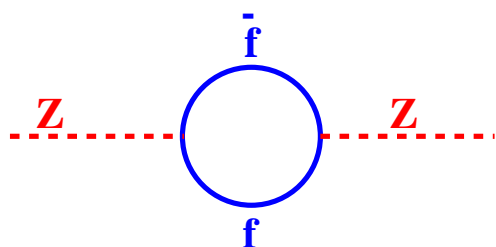


Made on 3-Jun-1993 14:35:52 by DREVERMANN with DALLI.D1.

In niedrigster Ordnung Störungstheorie:



● Elektroschwache Korrekturen



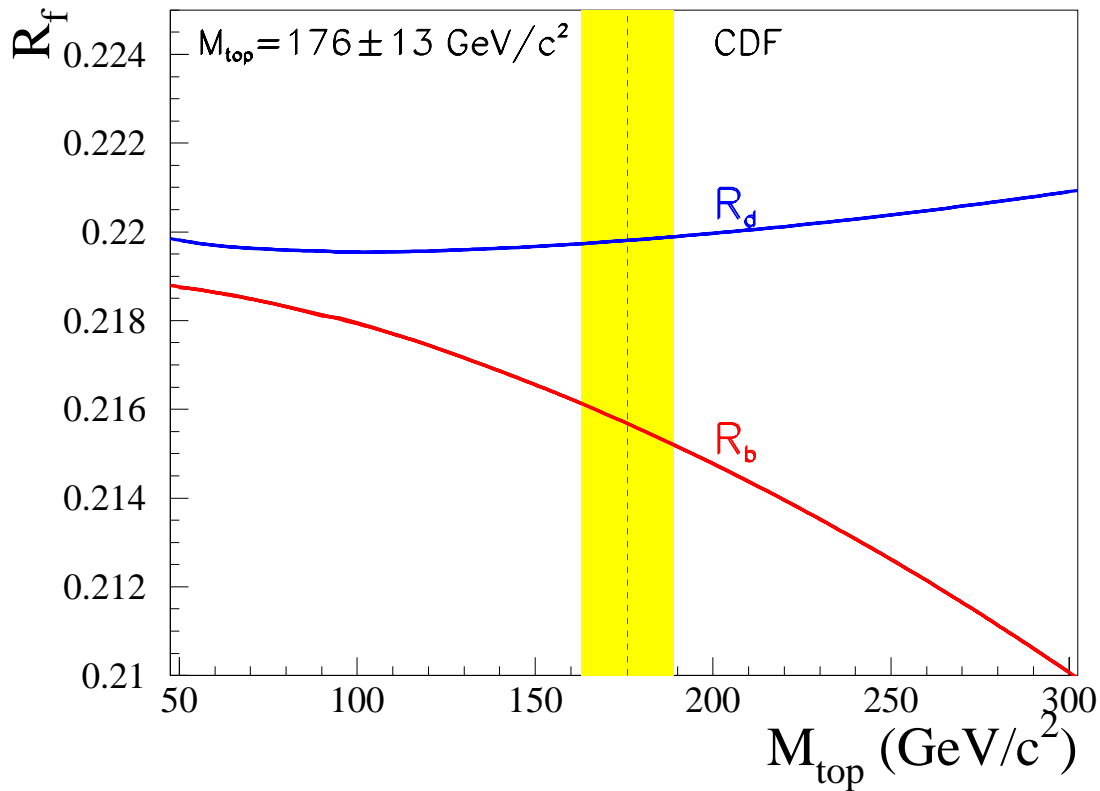
$$\bar{g}_L(f) = g_L(f) + \delta_f(m_t^2, \ln(M_H), ?)$$

$$\bar{g}_R(f) = g_R(f) + \delta_f(m_t^2, \ln(M_H), ?)$$

$$\bar{g}_L(f) = g_L(f) + \delta_f(m_t^2, \ln(M_H), ?)$$

$$\bar{g}_R(f) = g_R(f) + \delta_f(m_t^2, \ln(M_H), ?)$$

$$R_f = \frac{\Gamma(Z \rightarrow f\bar{f})}{\Gamma(Z \rightarrow q\bar{q})} = \frac{\bar{g}_R^2(f) + \bar{g}_L^2(f)}{\sum_f (\bar{g}_R^2(f) + \bar{g}_L^2(f))}$$



Das Problem:

- **Das Standard Modell ist sehr erfolgreich, aber unschön !**

Wir haben mindestens 21 freie Parameter:

- **6 Quark Massen**
- **6 Lepton Massen**
- **1 Z Boson Masse**
- **1 Higgs Masse**
- **3 Kopplungskonstanten α , α_s und G_F**
- **3 Quarkmischungswinkel, und 1 Phase (CKM-Matrix)**

Einige offene Fragen:

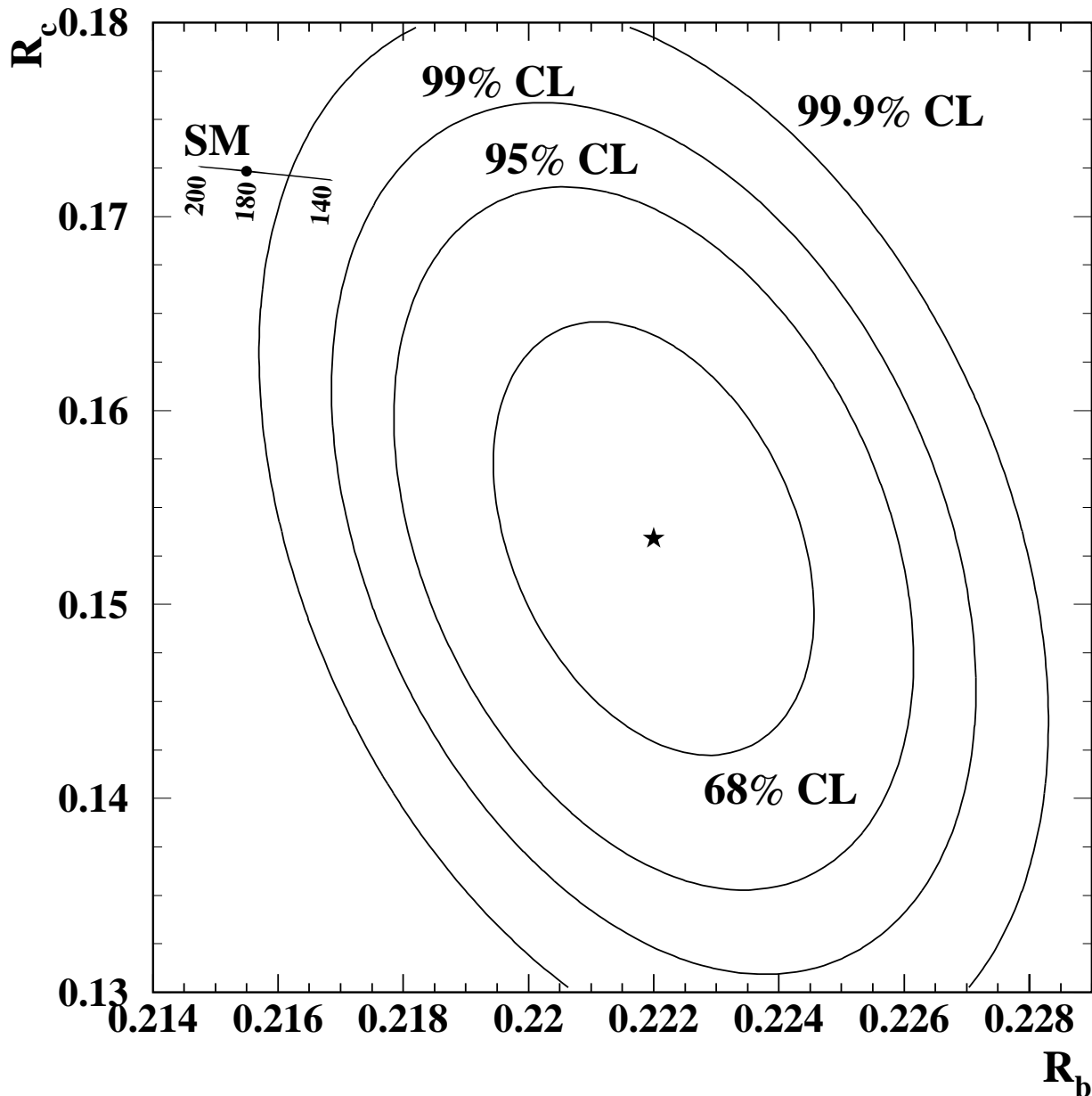
- **Warum haben Elektron und Proton die gleiche Ladung ?**
- **Warum gibt es 3 Generationen von Quarks und Leptonen ?**
-
-
-

Gibt es Messungen die vom Standard Modell abweichen ?

Bei LEP 1995: genau 2

Die relative Zerfallsbreite des Z Bosons
in b- und c-Quarks (R_b und R_c)

Stand Sommer 1995:

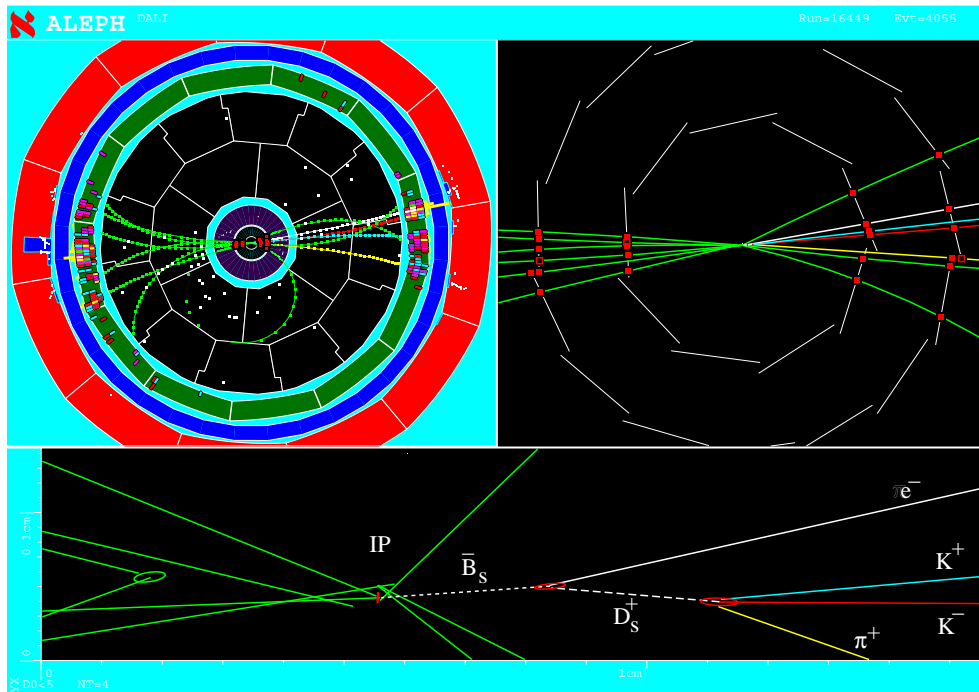


- Wie werden diese Größen gemessen ?
- Was hat sich seit Sommer 1995 getan ?

Wie kann man R_b messen ?

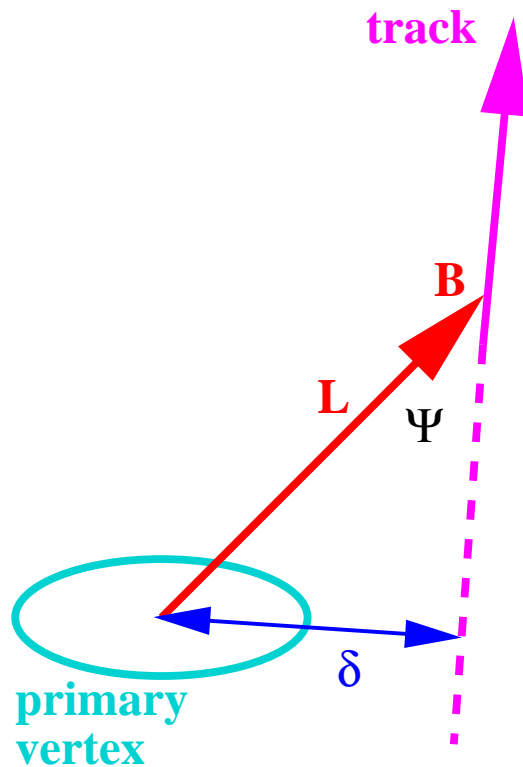
1. Eine Größe finden, um $Z \rightarrow b\bar{b}$ von anderen hadronischen Z-Zerfällen zu unterscheiden

- Wie sieht ein solches Ereignis aus ?



$$\left. \begin{array}{l} B - \text{Lebensdauer } 1.5 \text{ ps} \\ B - \text{Impuls } \approx 32 \text{ GeV}/c \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Flugstrecke } \approx 2.5 \text{ mm}$$

- In b-Ereignissen gibt es Spuren die nicht vom Primär-Vertex kommen !



B-Fluglänge : $L \approx 2.6 \text{ mm}$

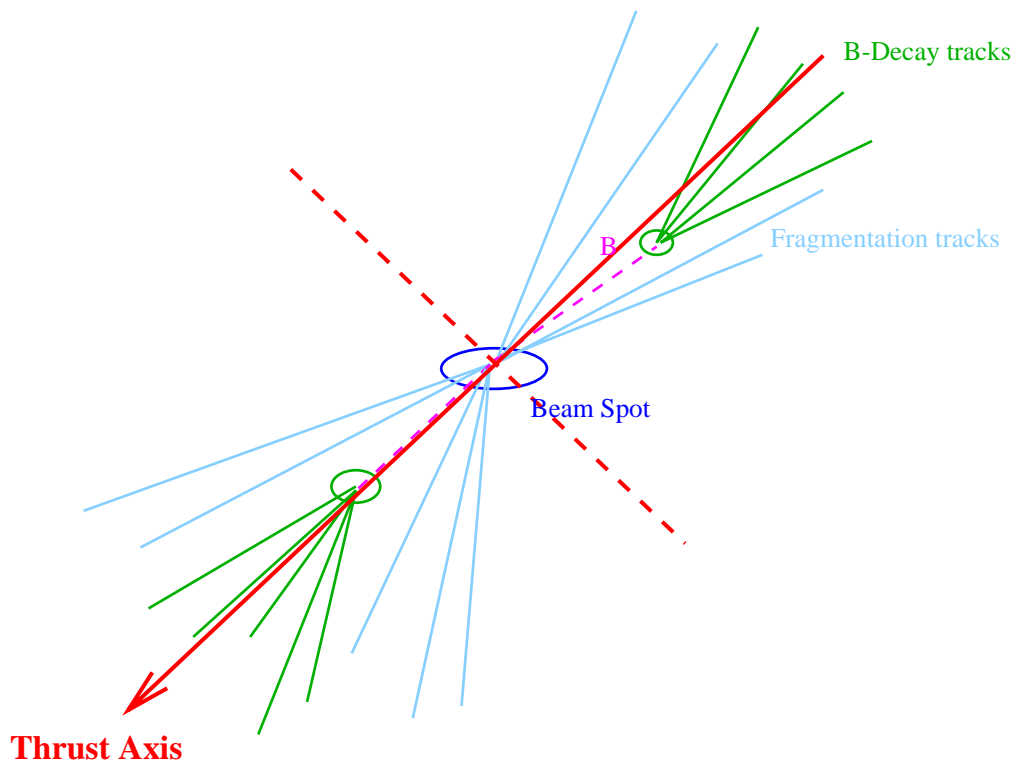
Vertex-Detektor-Auflösung (ALEPH):

$$\sigma_{r\phi} = 12 \mu\text{m}, \sigma_z = (12 - 22) \mu\text{m}$$

Primär-Vertex-Auflösung (ALEPH):

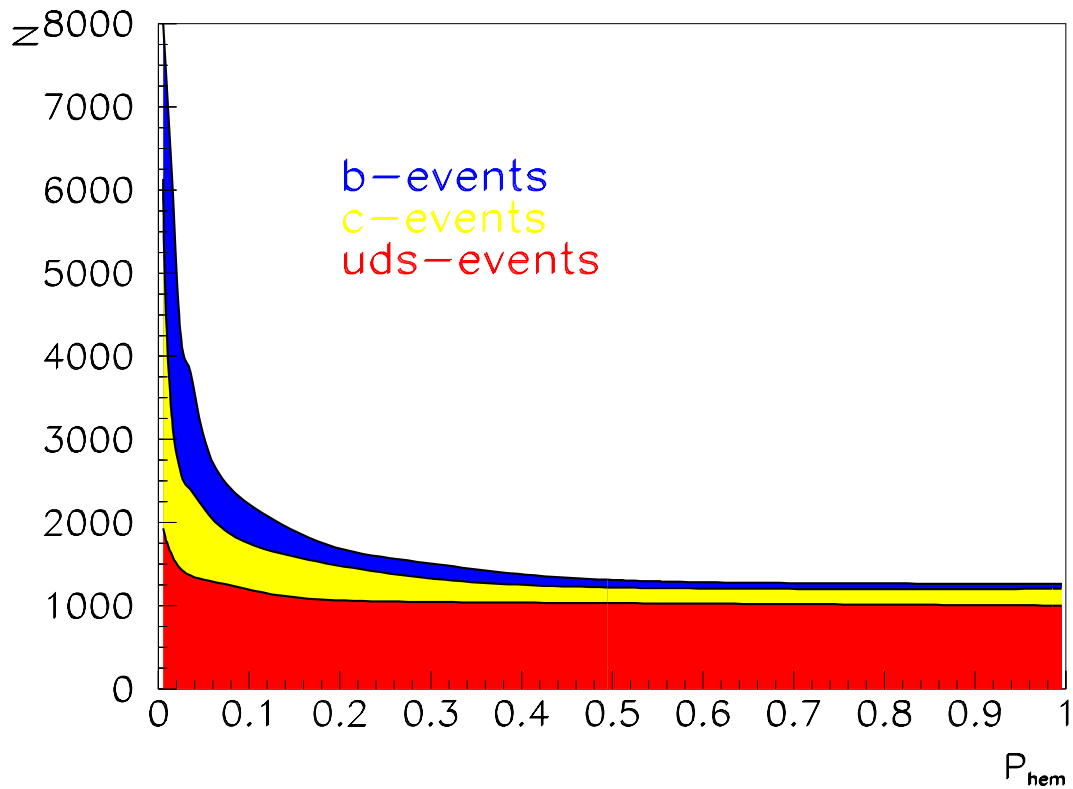
$$\sigma_x \approx 50 \mu\text{m}, \sigma_y \approx 10 \mu\text{m}, \sigma_z \approx 60 \mu\text{m}$$

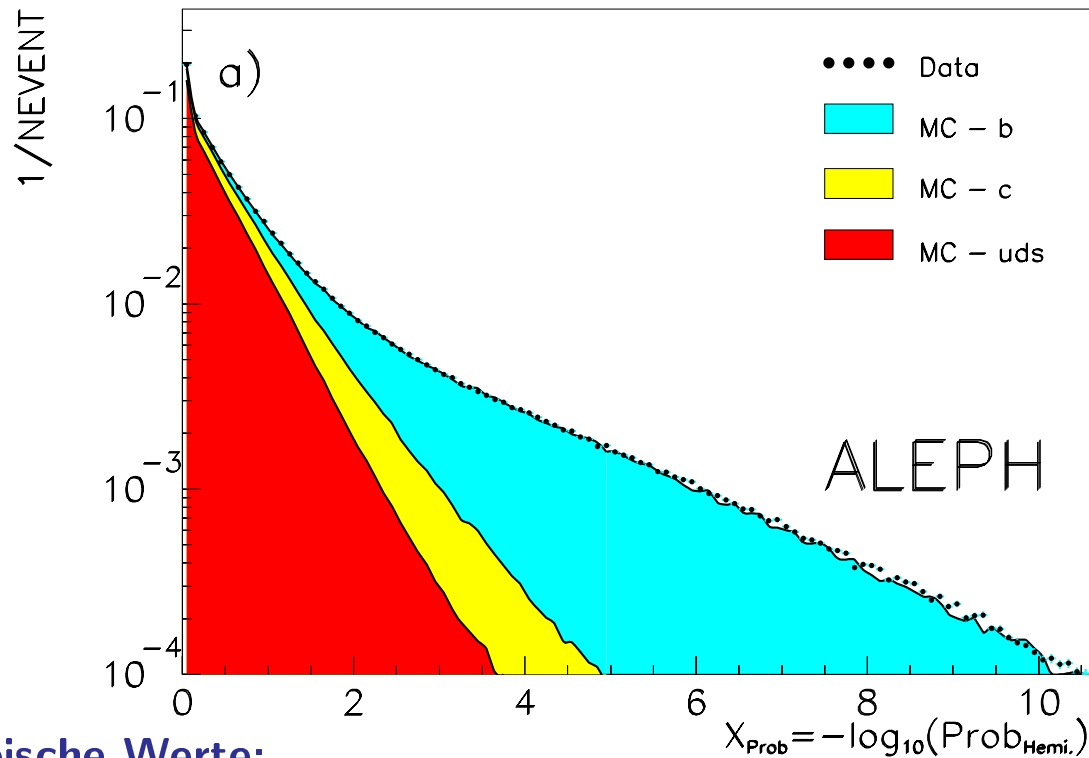
$$\Rightarrow \sigma_\delta \approx 70 \mu\text{m}$$



B-Ereignis-Selektion:

1. Das Ereignis wird in 2 Hemisphären unterteilt.
2. In jeder Hemisphäre wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, daß alle Spuren vom Primär-Vertex stammen (\mathcal{P}_{hem}).





Typische Werte:

Efficiency $\approx 25\%$, Purity $\approx 95\%$

Untergrund dominiert von $Z \rightarrow c\bar{c}$ Ereignissen

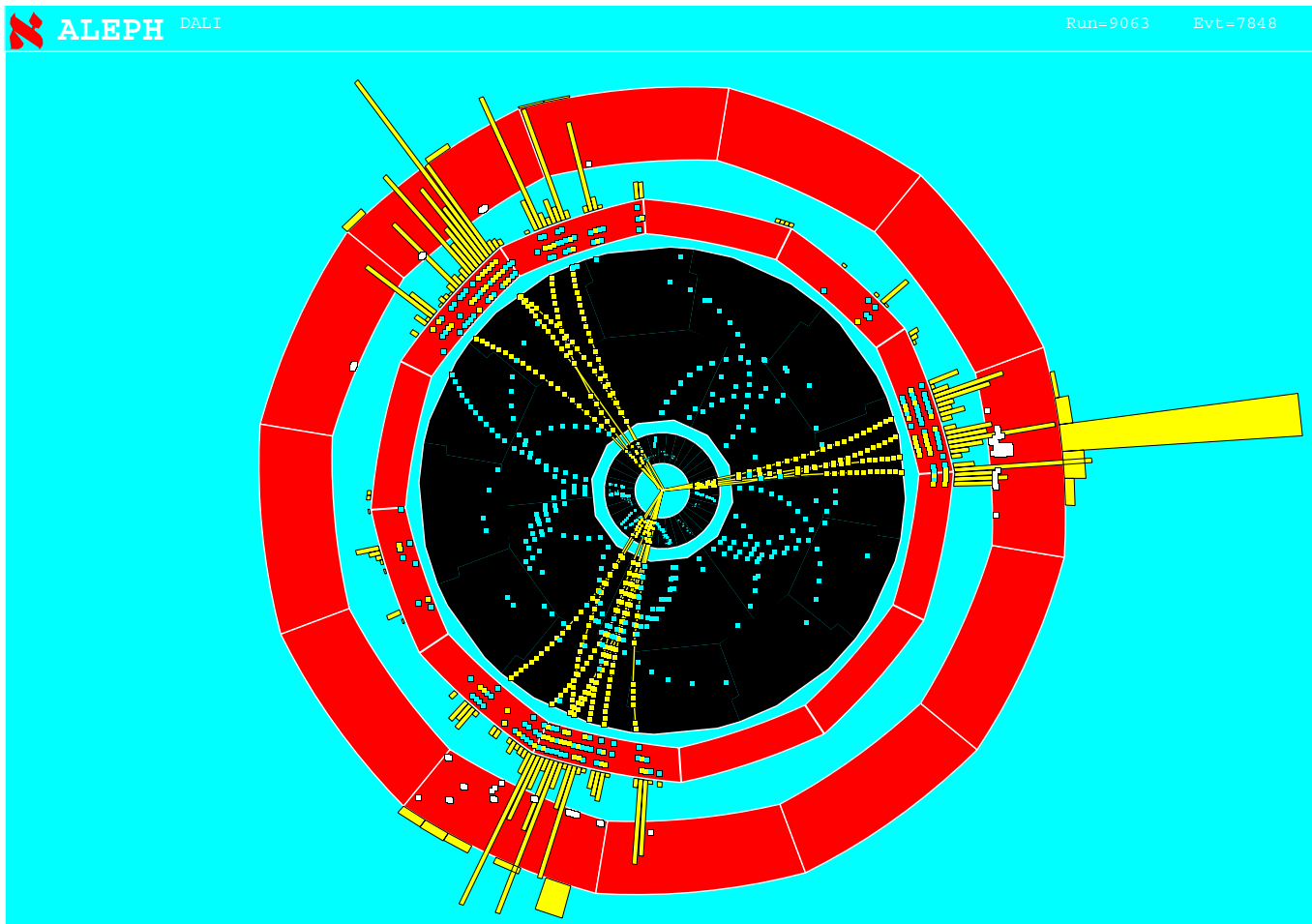
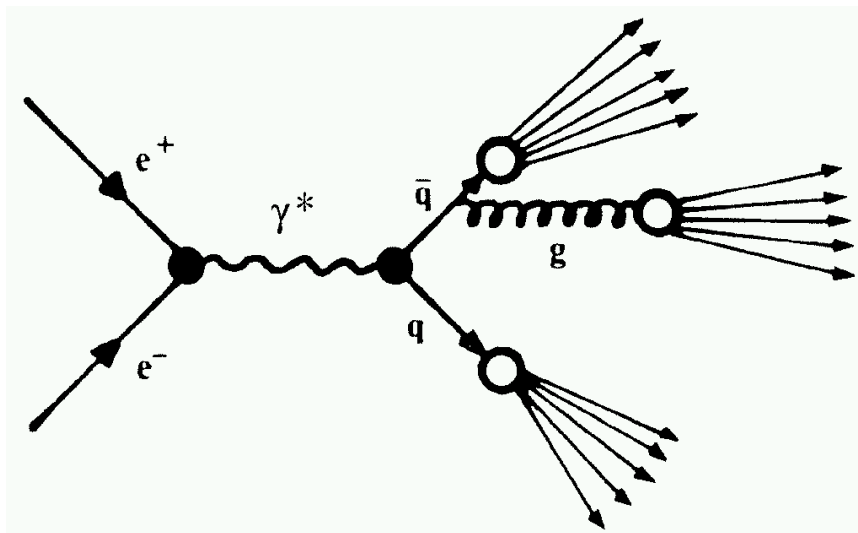
Die Messung von $R_b = \Gamma(Z \rightarrow b\bar{b})/\Gamma(Z \rightarrow q\bar{q})$?

$$N_t = 2 N_{had} [\epsilon_b R_b + \epsilon_c R_c + \epsilon_x R_x]$$

$$N_{tt} = N_{had} [\epsilon_b^2 R_b \rho_b + \epsilon_c^2 R_c \rho_c + \epsilon_x^2 R_x \rho_x]$$

- $R_x \equiv R_{uds} = 1 - R_b - R_c$,
 R_c vom S.M. oder Messungen
- ϵ_c und ρ_b vom Monte Carlo

$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}$$



Made on 9-Sep-1993 11:43:03 by DREVERMANN with DALI.DI.

ALEPH 1993: $R_b = 21.92 \pm 0.22 \pm 0.26 \%$

basierend auf den 1992 Daten d.h. ca. 0.6 MZ.

1. Systematischer Fehler dominiert.
2. wichtigste Beiträge:

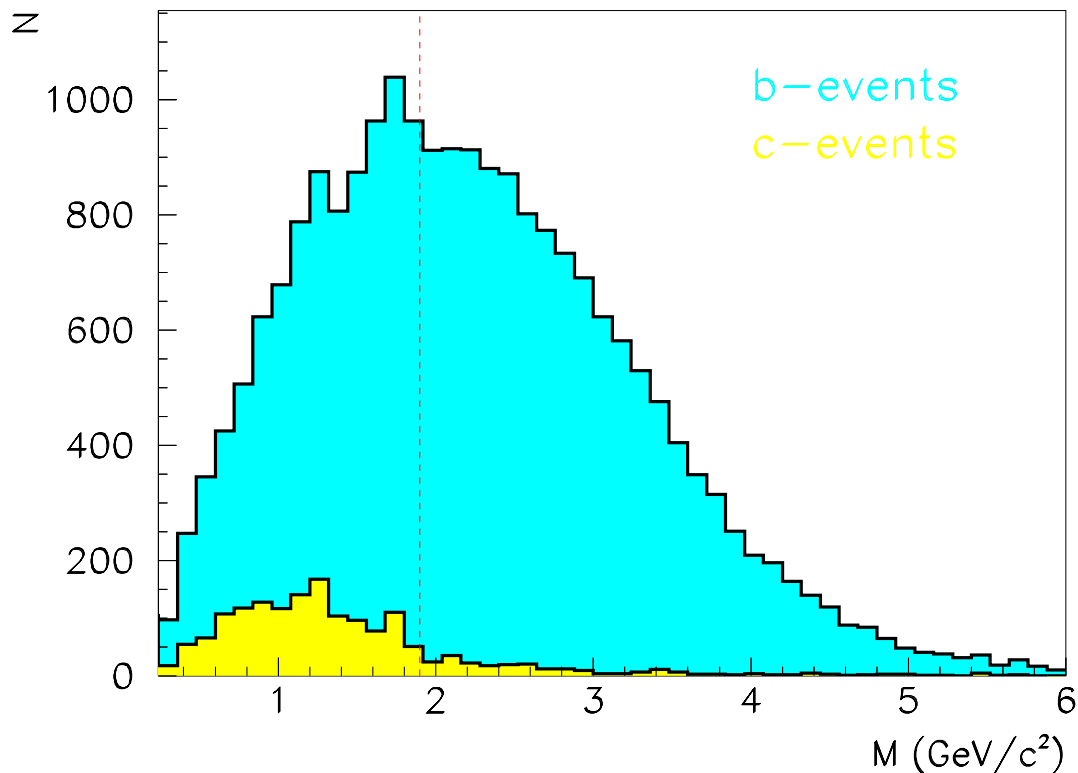
Charm efficiency	← Monte Carlo
Korrelationen	← Monte Carlo

● Was hat sich seit 1993 getan ?

1. Datenmenge: 0.6 MZ → 4 MZ

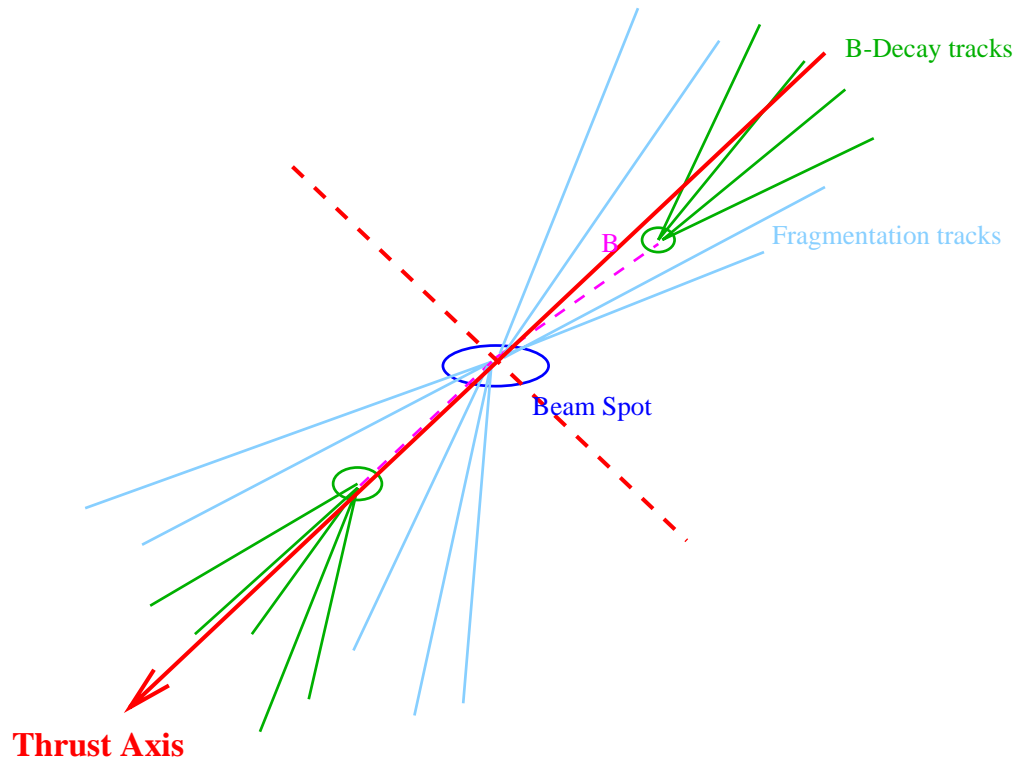
2. Charm Untergrund

● B-Masse: $5.1 \text{ GeV}/c^2$ ● D-Masse: $1.9 \text{ GeV}/c^2$



Efficiency $\approx 25\%$, Purity $\approx 98\%$

3. Korrelationen zwischen den Hemisphären



Bisher: **Impakt Parameter relativ zu 1 Primär-Vertex**
für beide Hemisphären.

Neu: **Nur aus den Spuren der jeweiligen Hemisphäre**
wird der **Primär-Vertex** bestimmt.
d.h. **2 Primär-Vertices**

Hemisphären Korrelationen reduziert
von ca. 8% → 3.7% !

Standard Modell: $R_b = 21.56 \pm 0.04 \%$

ALEPH 1993: $R_b = 21.92 \pm 0.34 \%$

ALEPH 1997: $R_b = 21.67 \pm 0.17 \%$

- Fehler um 50% reduziert im Vergleich zu 1993 !
- Relative Genauigkeit 0.8% !

Wie kann man R_c messen ?

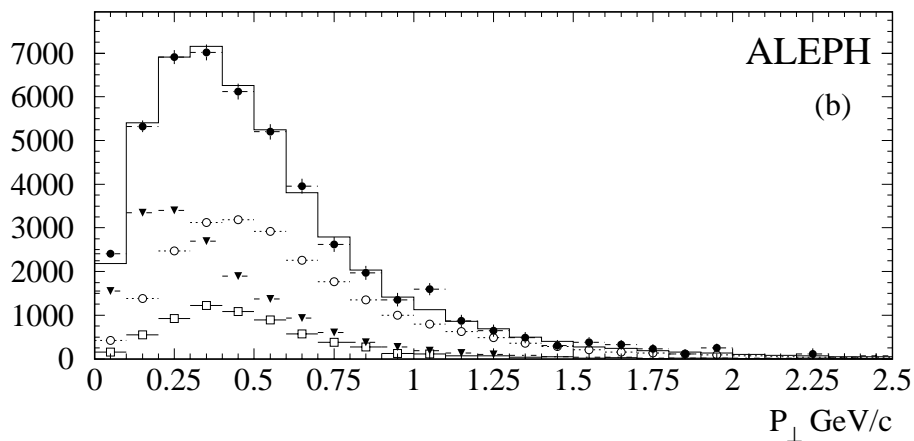
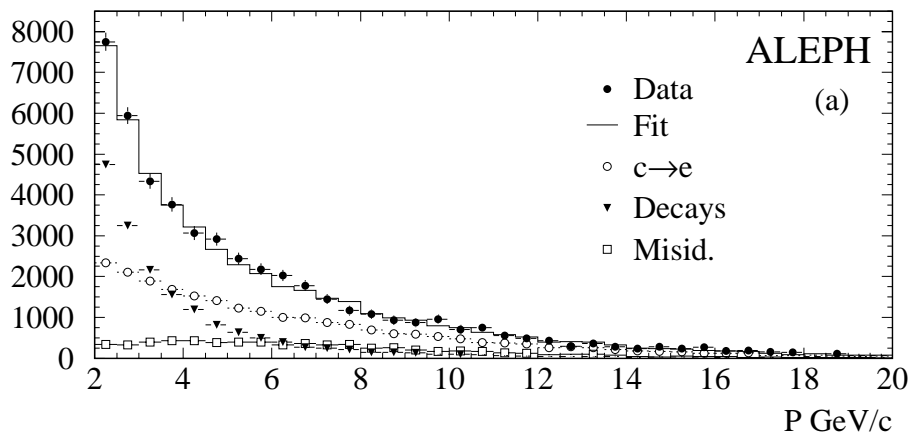
d.h. Woran erkennt man $Z \rightarrow c\bar{c}$ Zerfälle ?

1. Semileptonische Zerfälle

Sowohl B- als auch D- Mesonen zerfallen semileptonisch d.h.: $B \rightarrow X_c l \nu$ und $D \rightarrow X_s l \nu$ ($l=e, \mu$). Die Kinematik ist jedoch unterschiedlich.

Leptonenspektrum aus B-Zerfällen kann aus den Daten bestimmt werden.

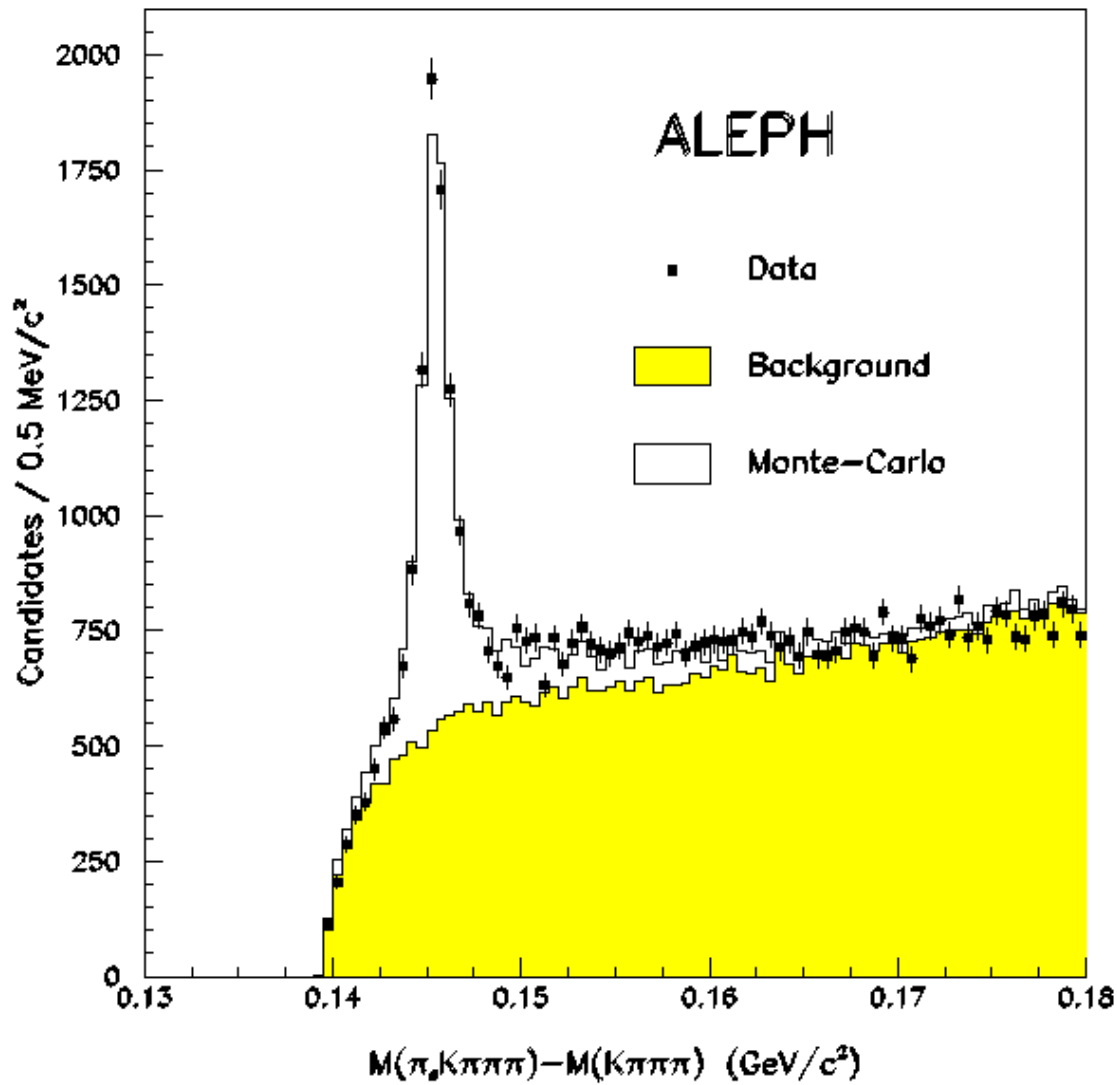
udsc electrons components



ALEPH 1996: $R_c = 16.52 \pm 0.78 \pm 0.93 \%$

2. Exklusive D-Meson Zerfälle

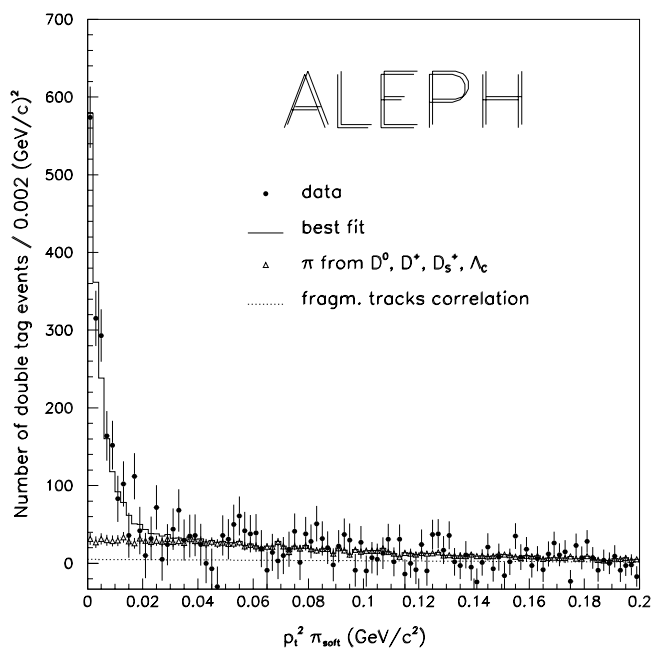
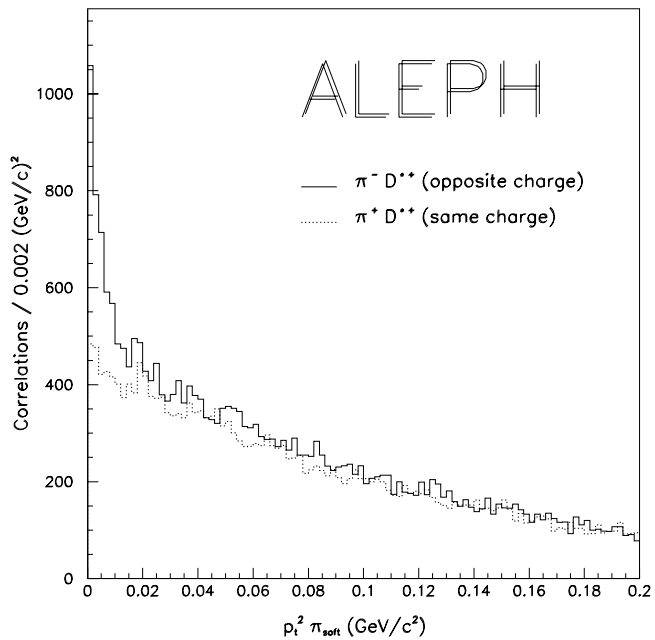
Rekonstruktion von $D^* \rightarrow D\pi_{soft}^\pm$ Zerfällen
in beiden Ereignishälften.



Aus 4 MZ Ereignissen werden
ca. 31000 $D^* \rightarrow D\pi^\pm$ Zerfälle rekonstruiert.

ALEPH 1996: $R_c = 16.9 \pm 1.3 \pm 1.1 \%$

3. Exklusive D-Meson Zerfälle + π_{soft}^{\pm}



ALEPH 1996: $R_c = 17.6 \pm 1.3 \pm 1.1 \%$

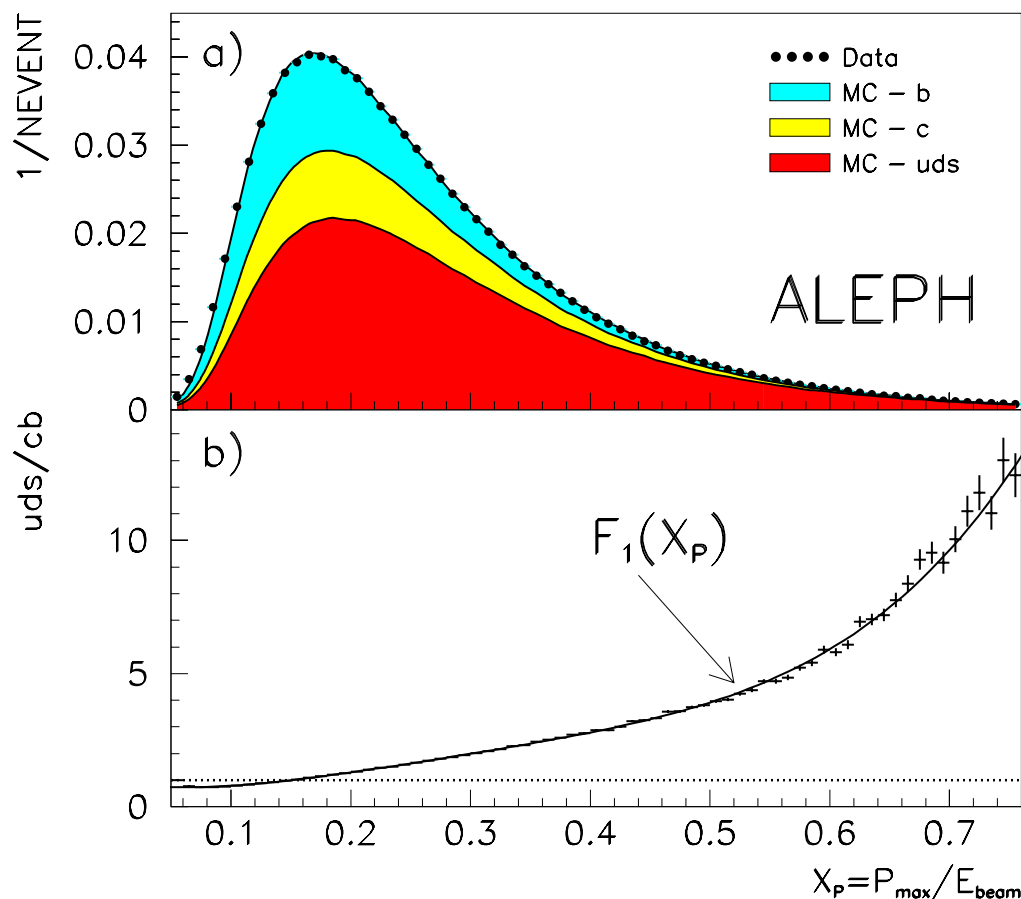
Was ist mit R_{uds} ?

- $R_{uds} = \frac{\Gamma(Z \rightarrow u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s})}{\Gamma(Z \rightarrow q\bar{q})} = 1.0 - R_b - R_c$
- R_b und R_c zeigen signifikante Abweichungen vom Standard Modell $\Rightarrow R_{uds}$ ebenso ?

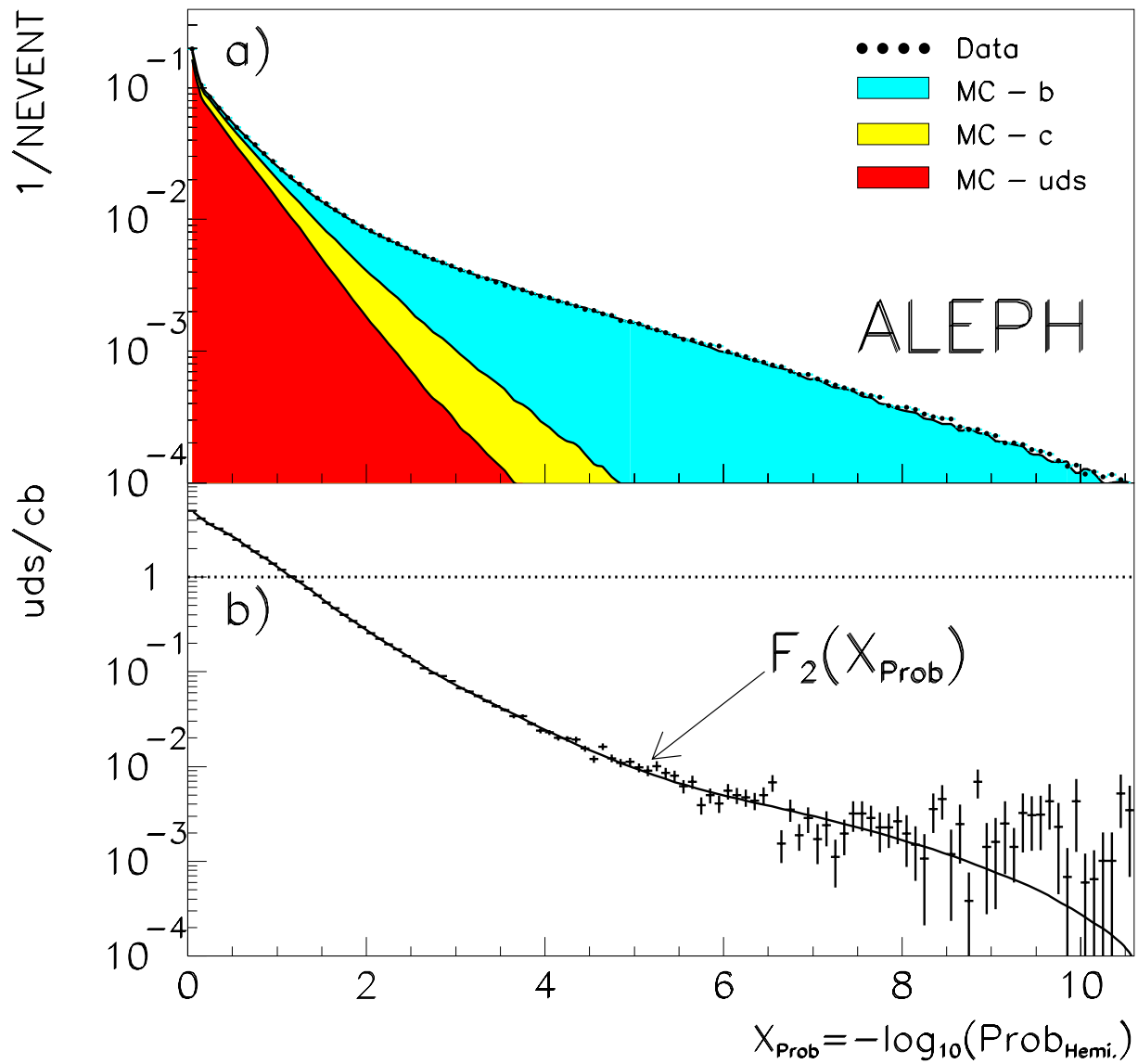
Erste Messung von R_{uds} : ALEPH Sommer 1996

Woran erkennt man Z-Zerfälle in leichte Quarks ?

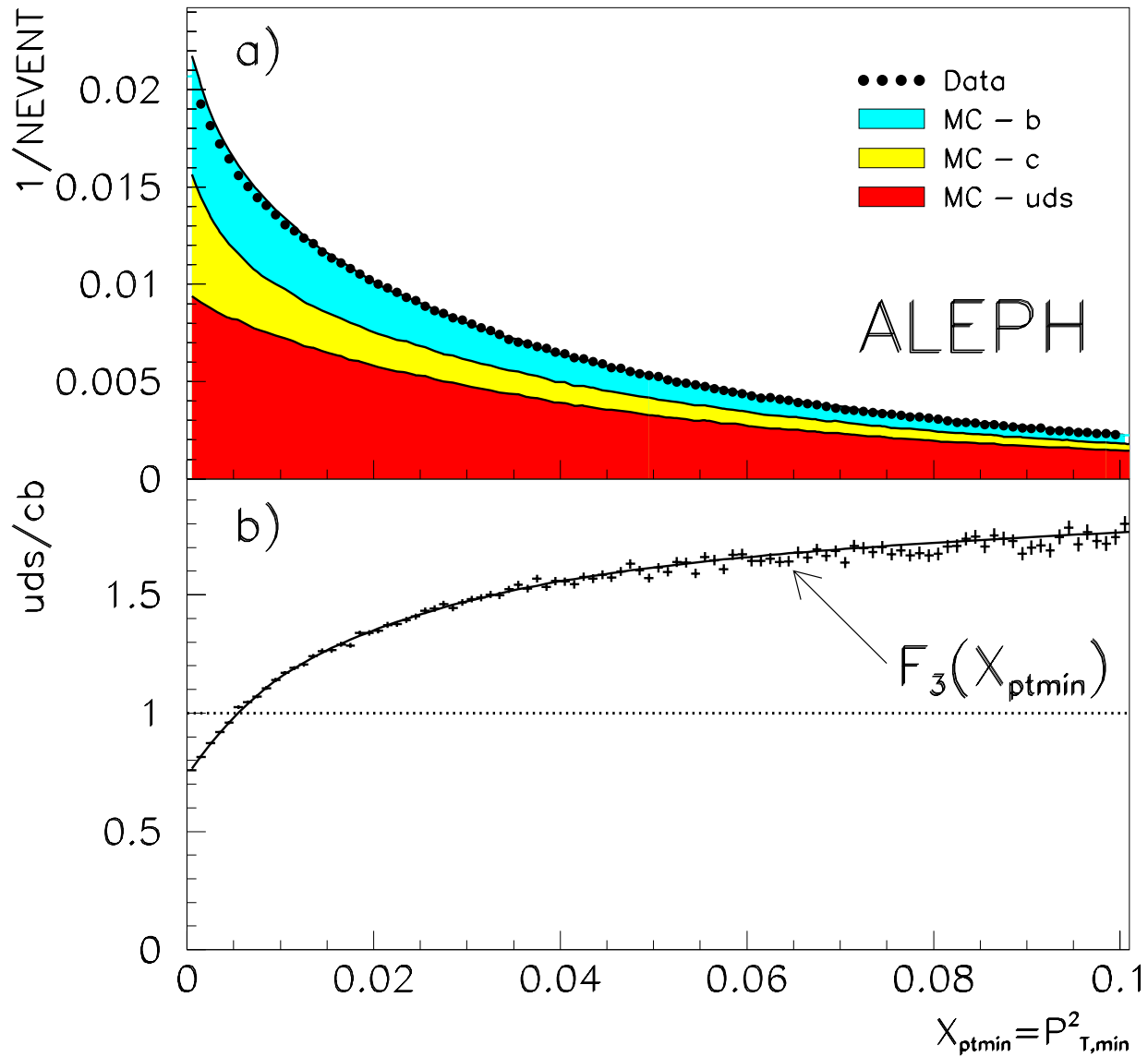
1. Hochenergetische Teilchen



2. Keine Lebensdauerinformation



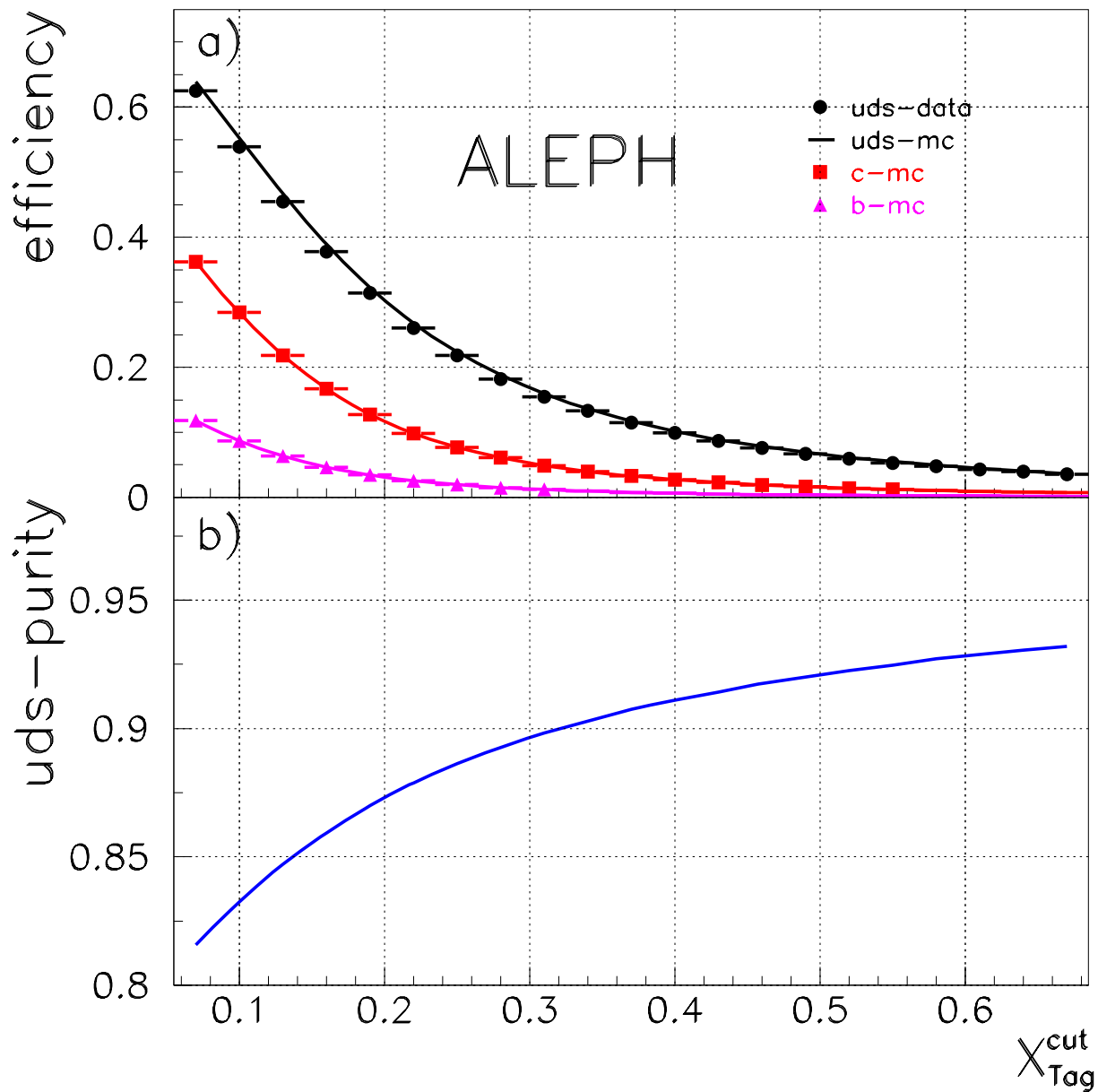
3. Keine $D^* \rightarrow D\pi^\pm$ Zerfälle



Keine unabhängigen Schnitte auf X_P^{max} , \mathcal{P}_{hem} und p_T^{min} sondern:

$$X_{tag} = N \cdot f_1(X_P^{max}) \cdot f_2(\mathcal{P}_{hem}) \cdot f_3(p_T^{min})$$

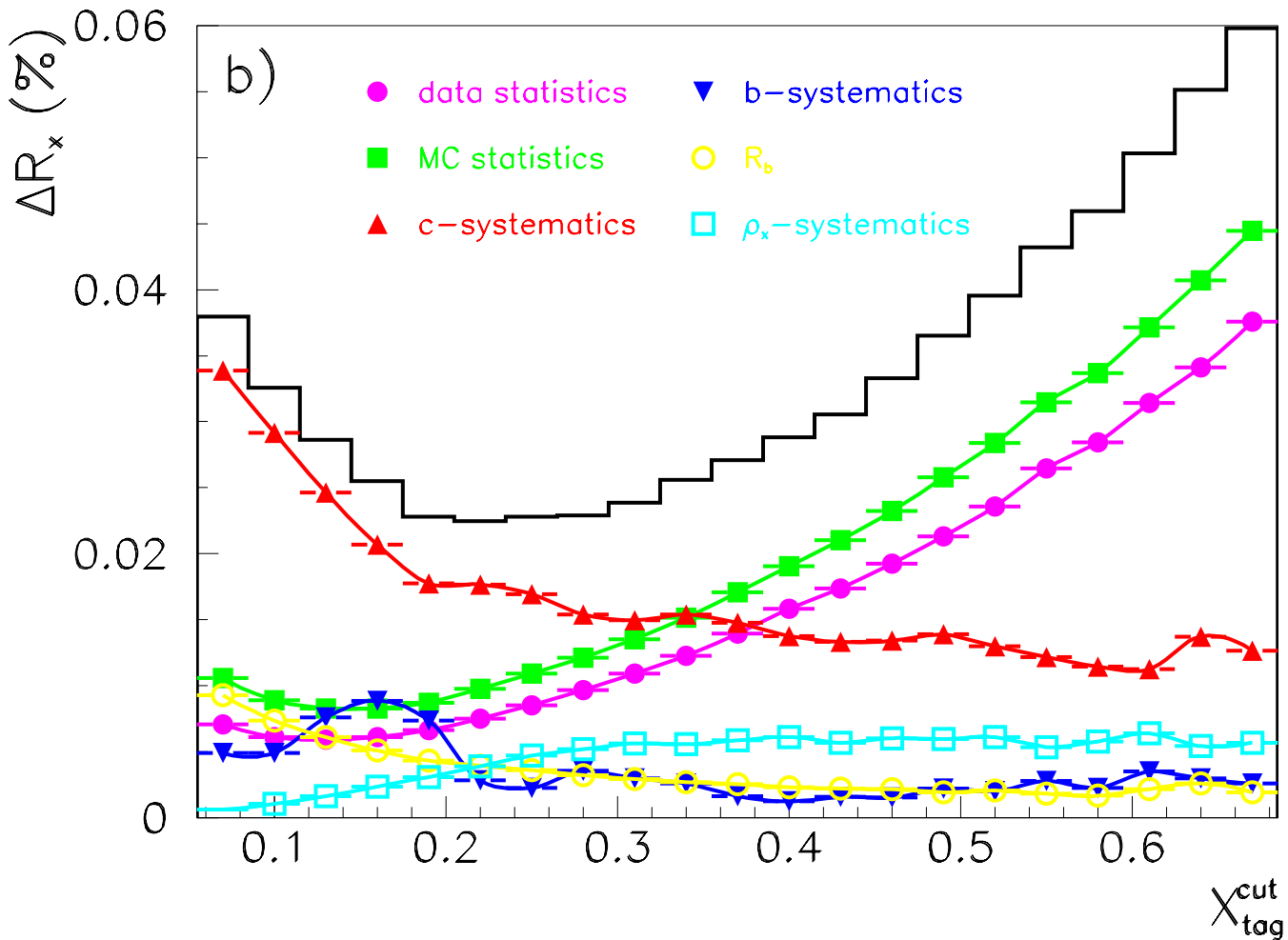
um uds-Hemisphären von b- and c-Hemisphären zu separieren.



Das Ergebnis:

aus 2.5 MZ Ereignissen:

$$R_{uds} = 61.62 \pm 0.45 \pm 1.31 \%$$



- Genauigkeit ca. 2% → 1.5% bei 4 MZ
- Gute Übereinstimmung mit S.M.: 61.20%.

Was kann man noch besser machen ?

- Alle Informationen kombinieren um R_b zu messen.

1. Lebensdauer+Masse → b-tag
2. Lepton Spektren → b-tag
3. Ereignis Topologien → b-tag, c-tag, uds-tag

5-Tags → 20 Messungen:

- 5 Single Tagged hemispheres
- 5 Double Tagged events
- 10 Mixed Tagged events

d.h. anstatt von 2 Gleichungen haben wir 20 Gleichungen.

Die Lösung dieses Gleichungssystems hängt wesentlich weniger vom Monte Carlo ab, als alle bisherigen Messungen !

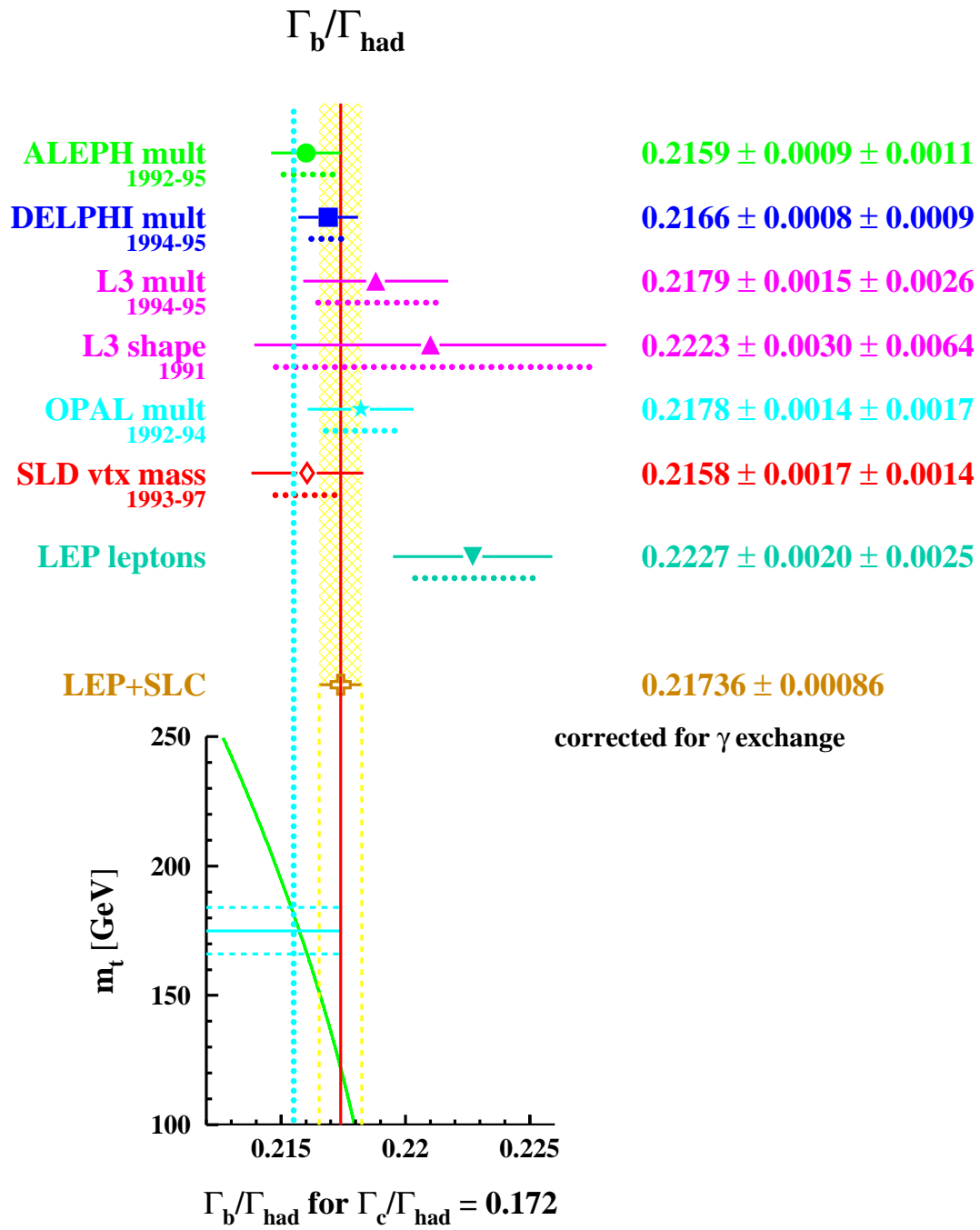
Diese Messung nützt alle verfügbaren Informationen optimal aus.

ALEPH 1997: $R_b = 21.59 \pm 0.14 \%$

Genauigkeit: 0.6%,

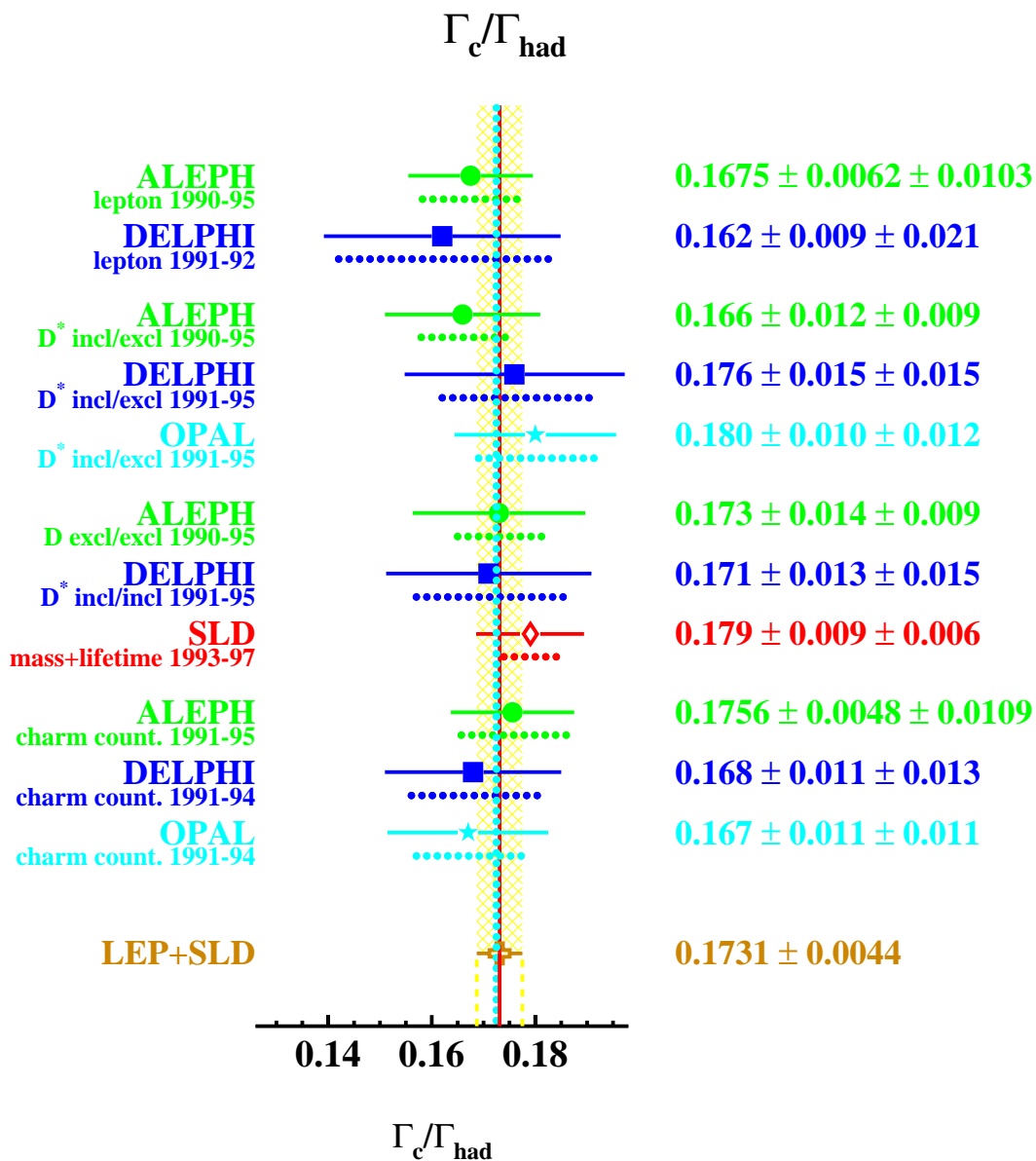
d.h. doppelt so genau wie alle bisherigen Messung !

Die Messungen von R_b

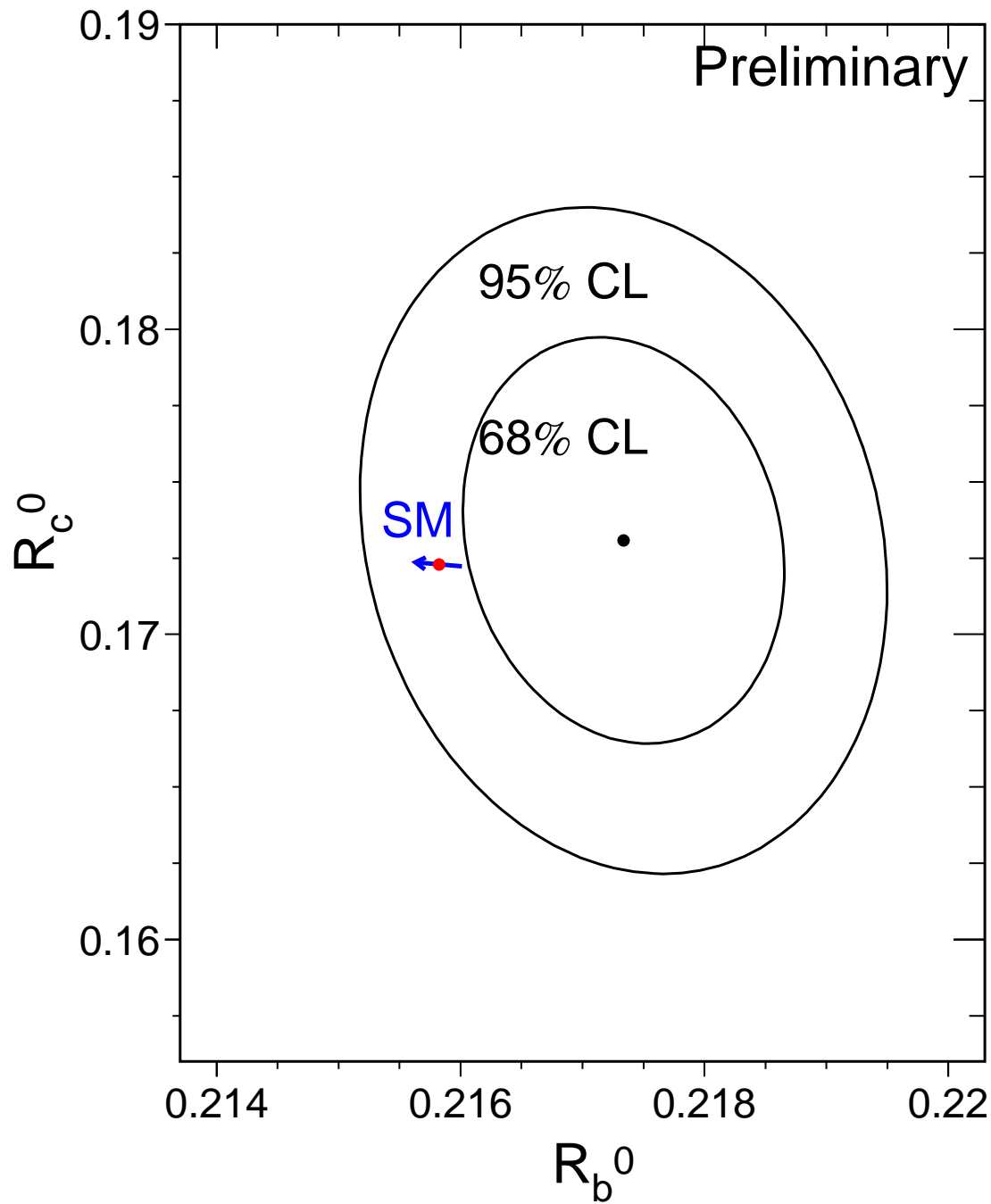


- Standard Modell: $R_b = 21.56 \pm 0.04 \%$

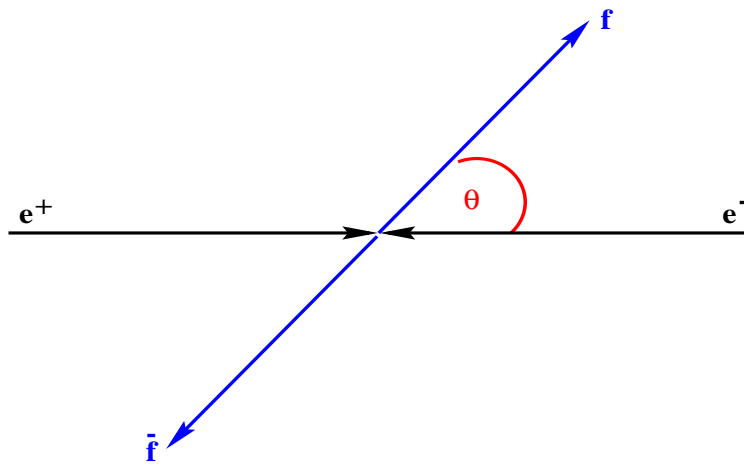
Die Messungen von R_c



- Standard Modell: $R_c = 17.32 \%$



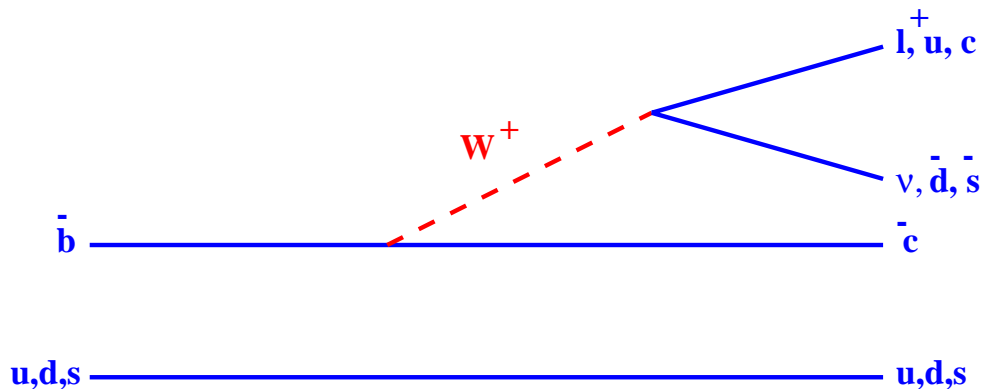
Die neuen Messungen von R_b und R_c zeigen keine signifikanten Abweichungen mehr vom Standard Modell mit $m_{top} = (176 \pm 6) \text{ GeV}$



$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = 1 + \cos^2\theta + \frac{8}{3}A_{FB}^f \cos\theta$$

$$A_{FB}^f = \frac{\sigma_A^f - \sigma_B^f}{\sigma_A^f + \sigma_B^f} = \frac{3g_L(e)^2 - g_R(e)^2}{4g_L(e)^2 + g_R(e)^2} \cdot \frac{g_L(f)^2 - g_R(f)^2}{g_L(f)^2 + g_R(f)^2}$$

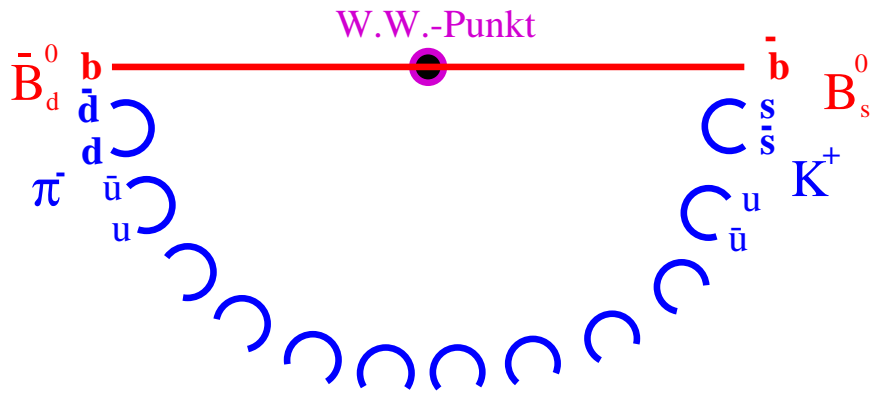
Wie kann man das für b -Quarks messen ?



1. Semileptonische B-Hadron Zerfälle

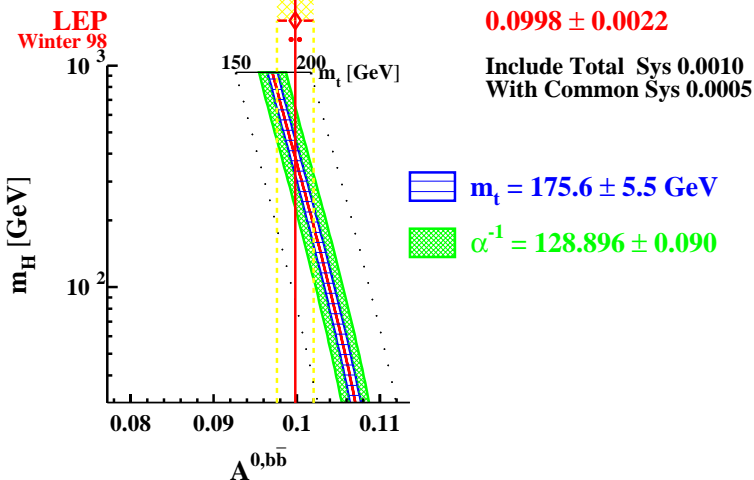
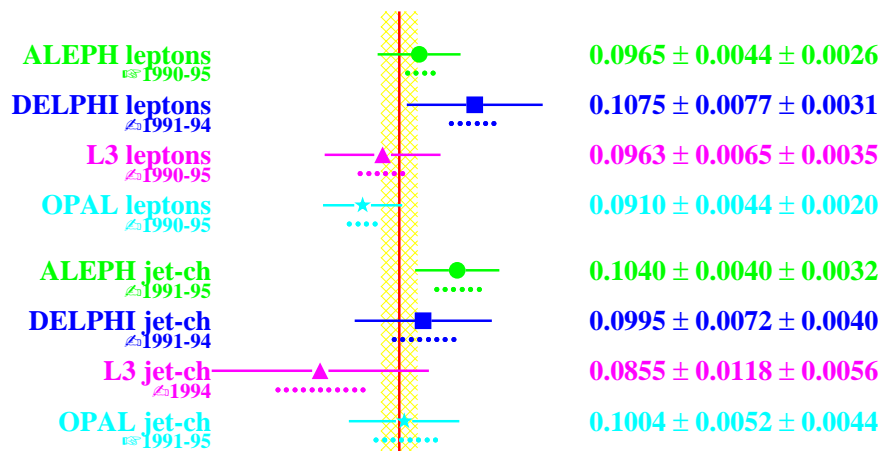
- $B^0(\bar{b}d), B^+(\bar{b}u) \rightarrow l^+ \nu_l X$
- $\bar{B}^0(b\bar{d}), B^-(b\bar{u}) \rightarrow l^- \nu_l X$

2. Jet Ladungen



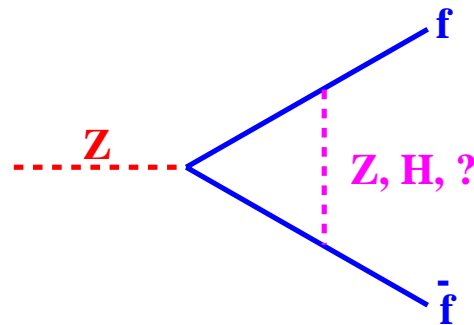
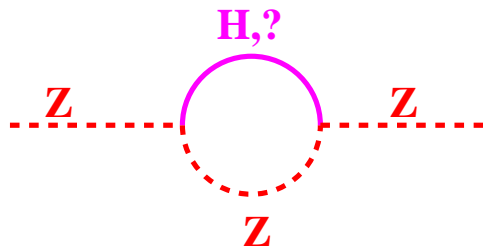
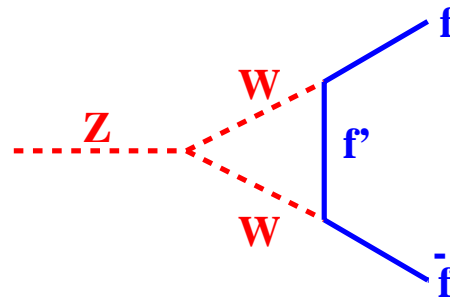
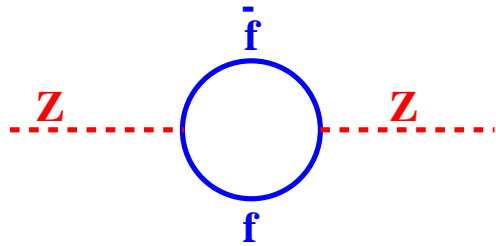
$$Q_{Jet} = \frac{\sum_{jet} p_i^\kappa q_i}{\sum_{jet} p_i^\kappa}$$

$A_{FB}^{b\bar{b}}$ at $\sqrt{s} \approx m_Z$



Aus den Daten von LEP und SLD lässt sich die Masse des Top-Quarks bestimmen.

● Elektroschwache Korrekturen



$$\bar{g}_L(f) = g_L(f) + \delta_f(m_t^2, \ln(M_H), ?)$$

$$\bar{g}_R(f) = g_R(f) + \delta_f(m_t^2, \ln(M_H), ?)$$

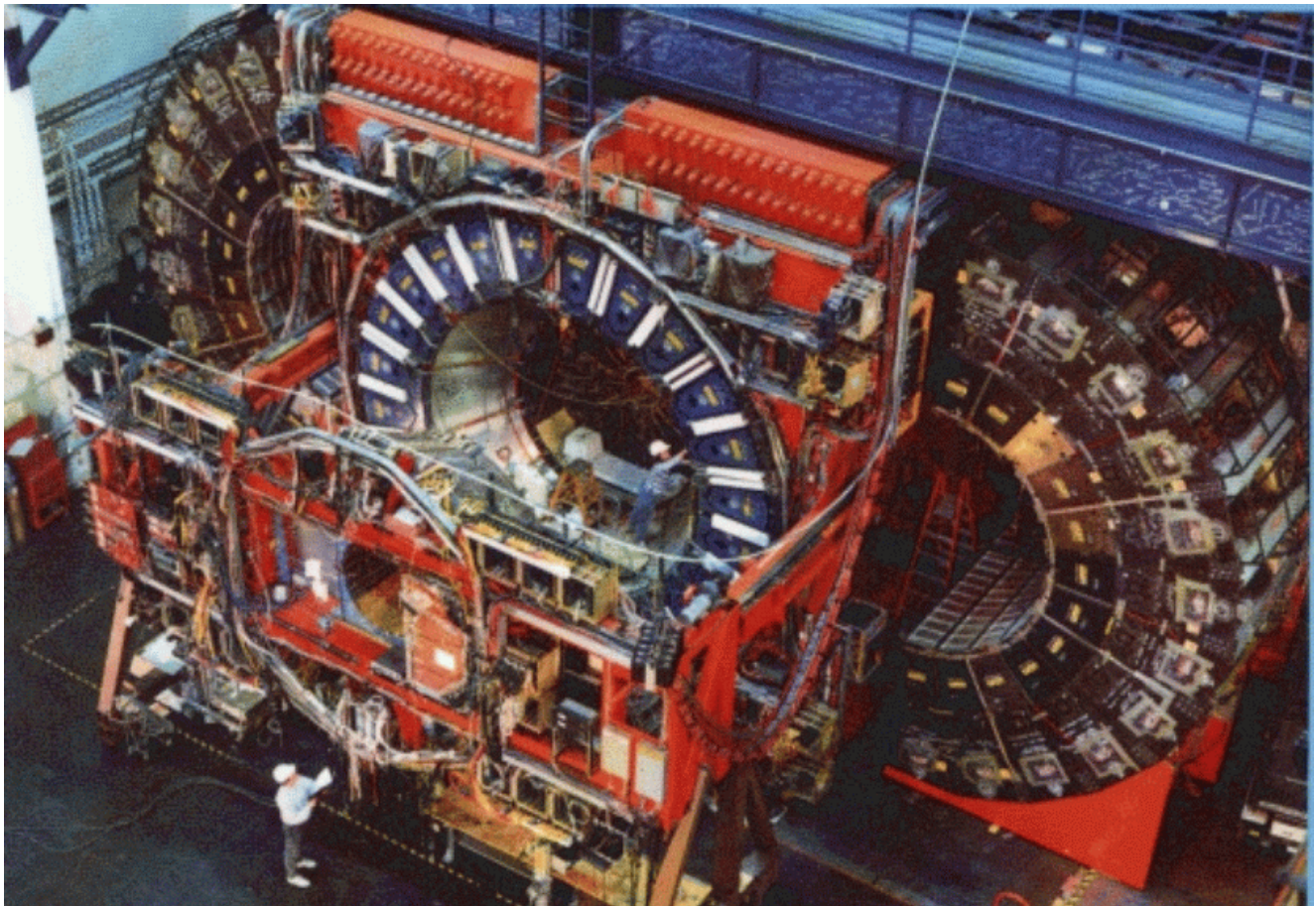
Im Jahre 1994 ergab sich aus diesen Daten die **Vorhersage**:

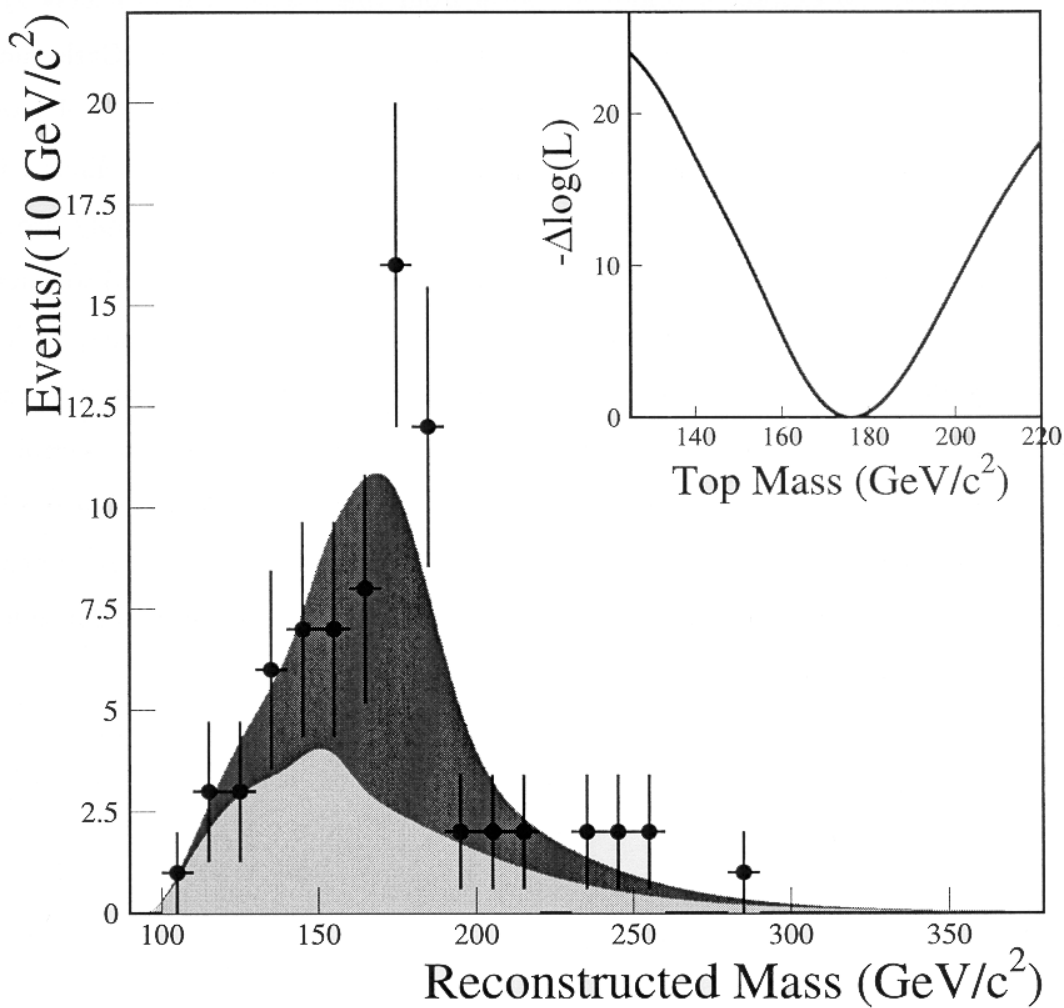
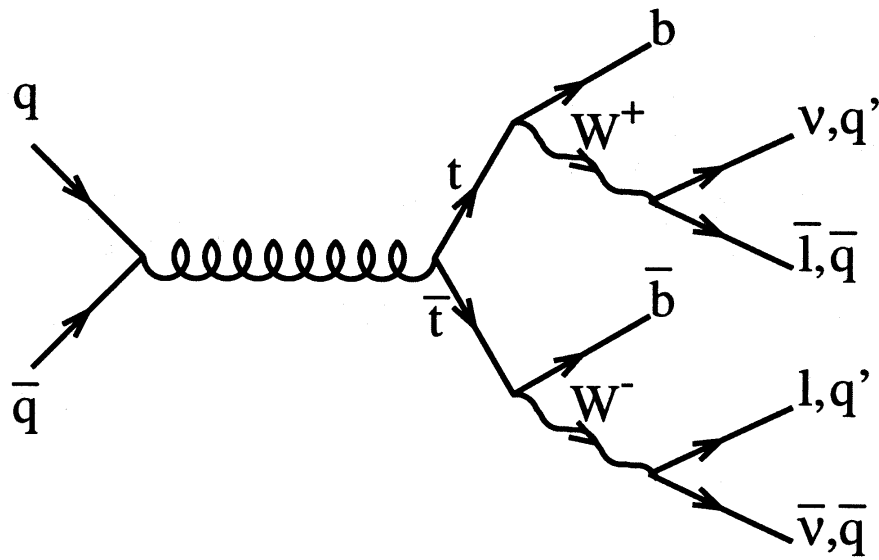
$$m_{top} = 164 \pm 16 \pm 19 \text{ GeV}/c^2$$

Am Dienstag den 26 April wurde auf simulanten Presse-Konferenzen in den USA, Japan und Italien die Entdeckung des Top-Quarks am CDF-Experiment am Fermilab, Chicago bekanntgegeben:

$$m_{top} = 174 \pm 13 \pm 13 \text{ GeV}/c^2$$

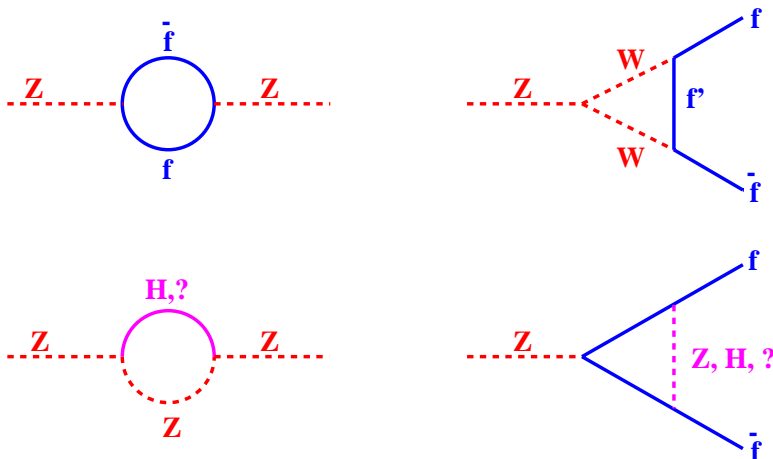
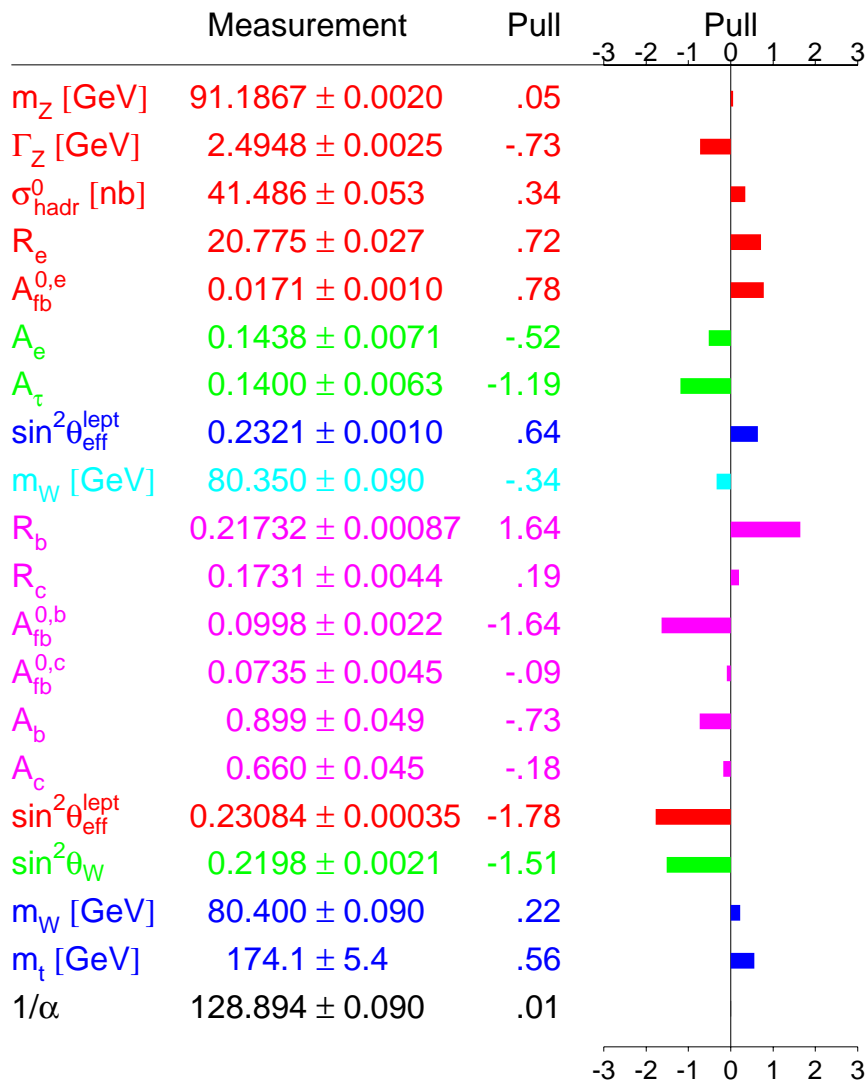
Dies war der spektakulärste Erfolg der Arbeiten an der Elektroschwachen Theorie von Glashow, Salam und Weinberg.





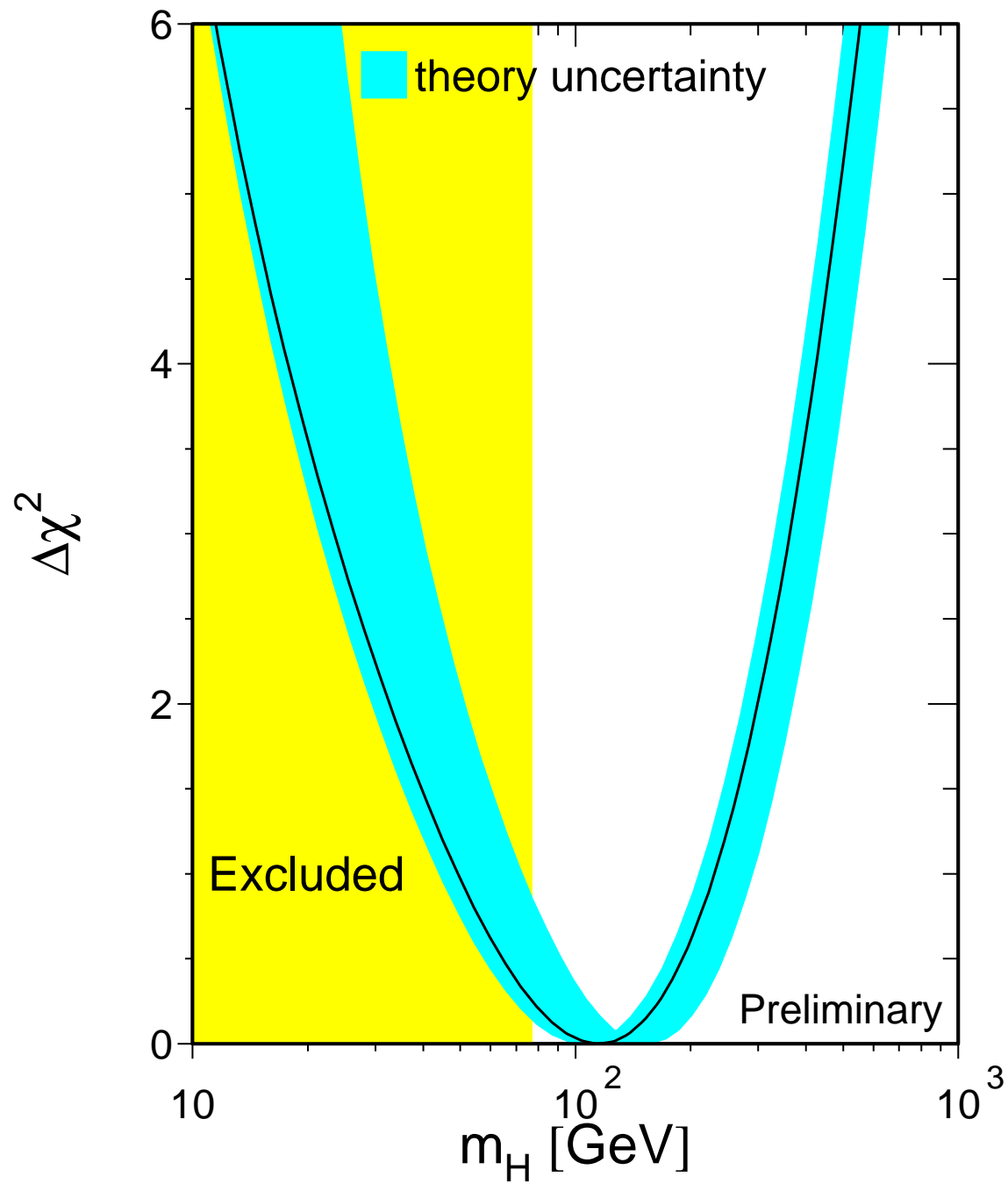
CDF 1998 : $m_{top} = 176 \pm 5 \pm 5 \text{ GeV}/c^2$

Moriond 1998



$$\bar{g}_L(f) = g_L(f) + \delta_f(m_t^2, \ln(M_H), ?)$$

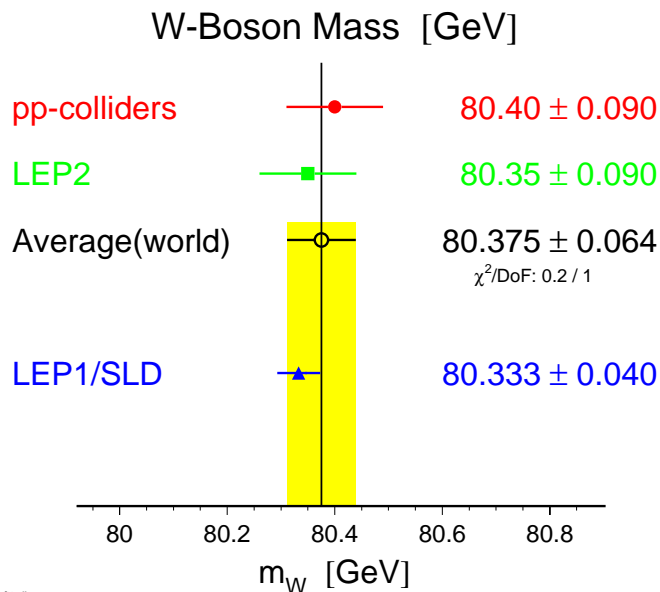
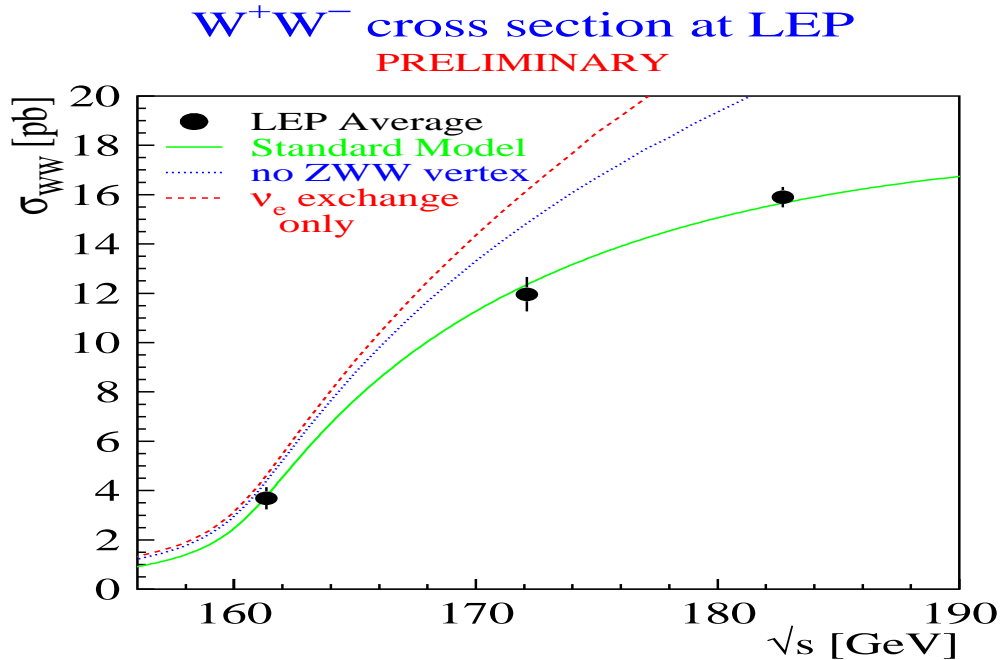
$$\bar{g}_R(f) = g_R(f) + \delta_f(m_t^2, \ln(M_H), ?)$$



$$m_H = 115^{+116}_{-66} \text{ GeV} < 306 \text{ GeV at 95\% CL.}$$

Zusammenfassung

- Elektroschwachen Koppelungen von Quarks testen das S.M.
- Eine nie erwartete Präzision wurde erreicht.
- Die LEP Experimente waren und sind ein voller Erfolg.
- 1989 $E_{cms} = 91 \text{ GeV} \rightarrow 200 \text{ GeV}$ im Jahre 2000.



- LEP wird im Jahre 2000 abgeschaltet, 2005 beginnt LHC.