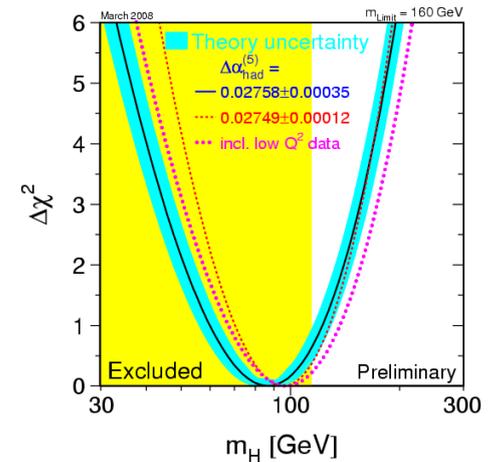
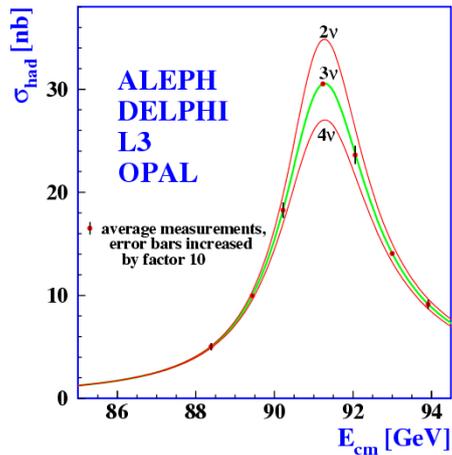


Vorlesung „Higgs und Elektroschwache Wechselwirkung“

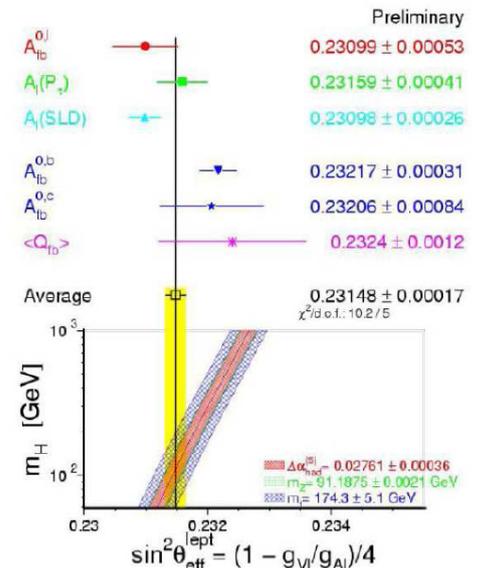
Vorlesung 6: Präzisionsmessungen II 6.5.2008

Benno List, Achim Geiser



Inhalt:

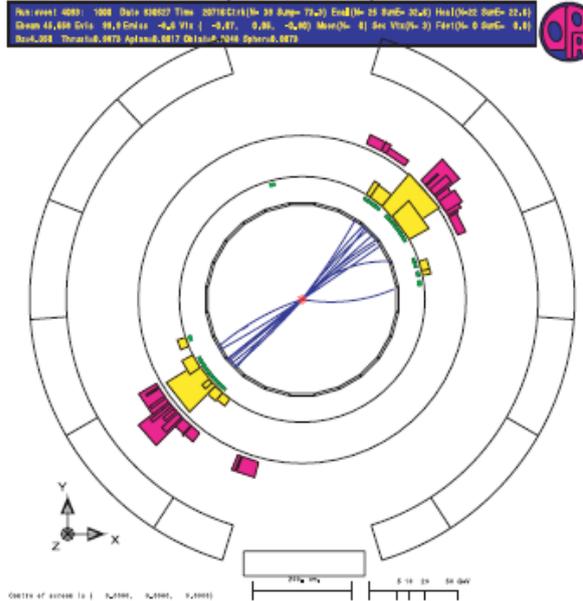
- Messung von M_Z bei LEP
- Messung der Z-Linienform
- Verzweigungsverhältnis in schwere Quarks
- Asymmetrien
- Tau-Polarisation



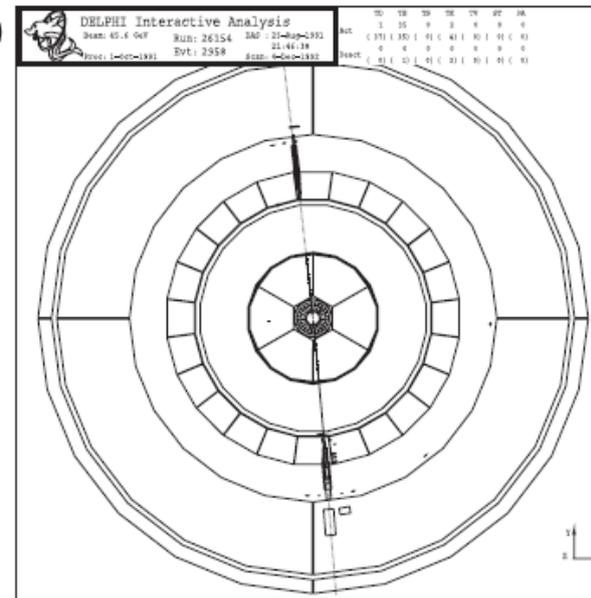
- Martin W. Grünewald: „*Experimental tests of the electroweak Standard Model at high energies,*“ Phys. Rept. **322** (1999) 125-346.
- The ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, and SLDCollaborations: „*Precision electroweak measurements on the Z resonance,*“ Phys. Rept. **427** (2006) 257-454 [arxiv: hep/ex-0509008].

Ereignistypen bei LEP

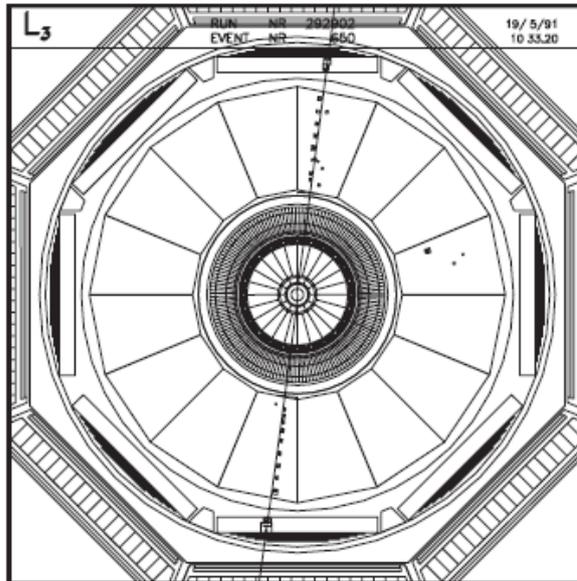
OPAL:
Z→had
(87% aller
sichtbaren
Ereignisse)



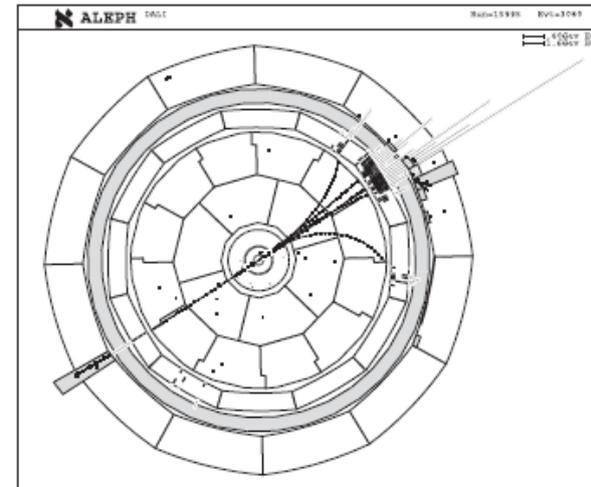
DELPHI:
Z→e⁺e⁻
(4.2%)



L3:
Z→μ⁺μ⁻
(4.2%)



ALEPH:
Z→τ⁺τ⁻
(4.2%)



LEP and SLD Coll., Phys. Rept. 427 (2006) 257, Fig. 1.7

Z-Zerfälle

- Lagrangian:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_F = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu .
 \end{aligned}$$

- Zerfallsbreiten (auf Tree-Level):

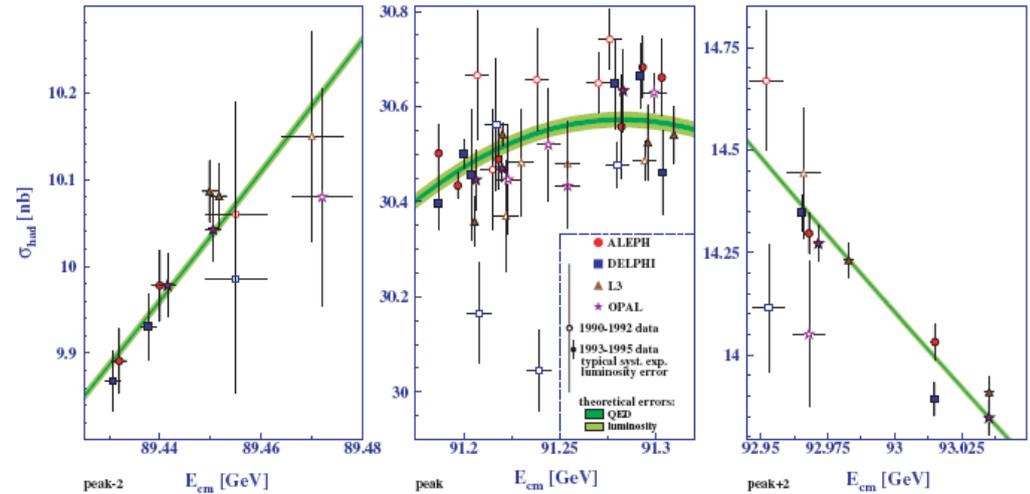
$$\Gamma_{ff} = N_C^f \frac{\alpha_{em} M_Z}{12 \sin^2 \theta_W \cos^2 \theta_W} [g_{Vf}^2 + g_{Af}^2] = N_C^f \frac{G_F M_Z^3}{6\sqrt{2}\pi} [g_{Vf}^2 + g_{Af}^2],$$

$$\sin^2 \theta_W^{\text{eff}} = 0.23098$$

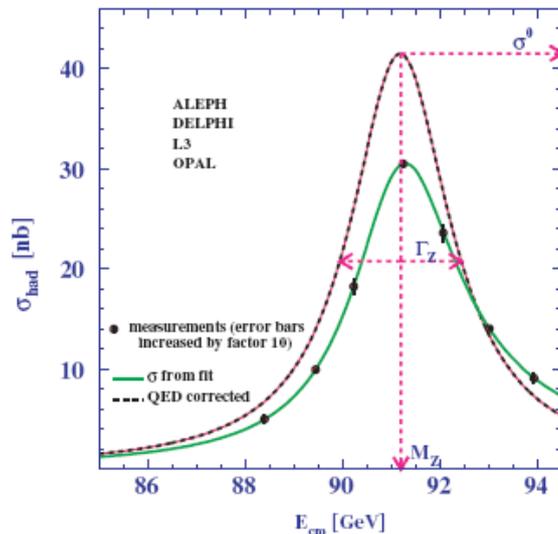
Teilchen	t_{3L}	q	$g_V = t_{3L} - 2q \sin^2 \theta_W$	$g_A = t_{3L}$	$g_V^2 + g_A^2$	N_C	N_f	BR
u, c	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	0.19203	$+\frac{1}{2}$	0.28687	3	2	23.6 %
d, s, b	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	-0.34601	$-\frac{1}{2}$	0.36973	3	3	45.5 %
ν_e, ν_μ, ν_τ	$+\frac{1}{2}$	0	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0.50000	1	3	20.5 %
e^-, μ^-, τ^-	$-\frac{1}{2}$	-1	-0.03804	$-\frac{1}{2}$	0.25145	1	3	10.3 %

Messung der Z-Linienform

- Strategie:
 - Messe auf Maximum (P) und bei $P \pm 1.8 \text{ GeV}$ ($P \pm 2$)
 - Fitte Linienform
- Resultat:
 - $M_Z = 91.1875(21) \text{ GeV}$ (23ppm)
 - $\Gamma_Z = 2.4952(23) \text{ GeV}$ (0.9‰)



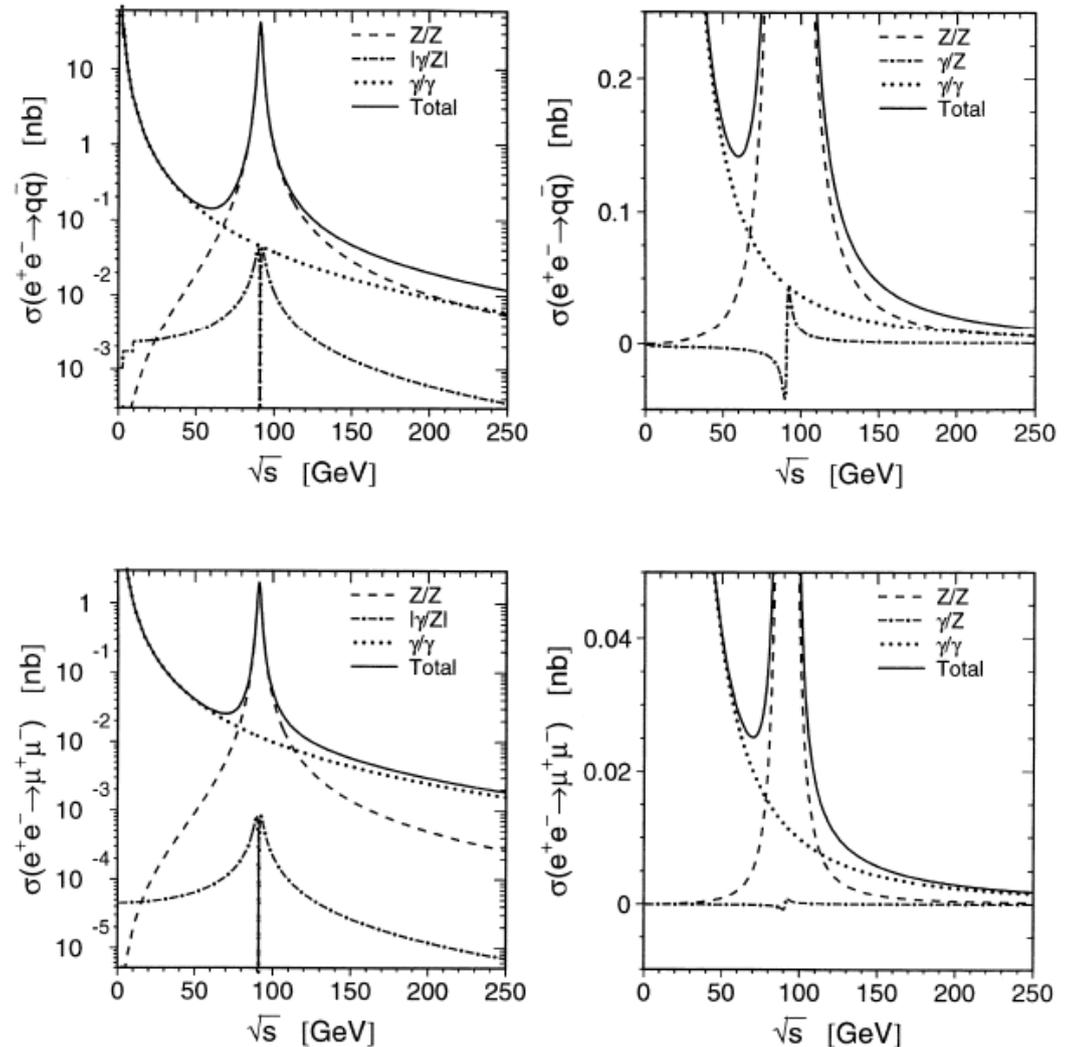
LEP and SLD Coll., Phys. Rept. **427** (2006) 257, Fig.2.3



ALEPH	91.1893 ± 0.0031	ALEPH	2.4959 ± 0.0043
DELPHI	91.1863 ± 0.0028	DELPHI	2.4876 ± 0.0041
L3	91.1894 ± 0.0030	L3	2.5025 ± 0.0041
OPAL	91.1853 ± 0.0029	OPAL	2.4947 ± 0.0041
LEP	91.1875 ± 0.0021	LEP	2.4952 ± 0.0023
common: 0.0017		common: 0.0012	
$\chi^2/\text{DoF} = 2.2/3$		$\chi^2/\text{DoF} = 7.3/3$	

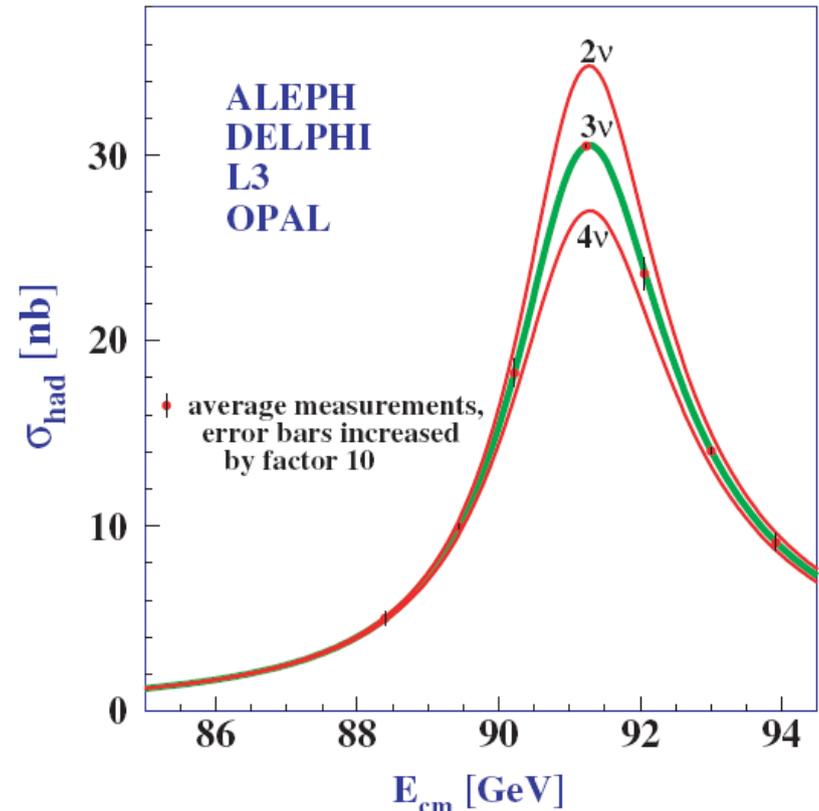
LEP and SLD Coll., Phys. Rept. **427** (2006) 257, Fig. 1.12, Fig. 2.10

- Z-Resonanz:
Relativistischer Breit-Wigner
(Breite hängt von s ab)
- Interferenz mit γ -Austausch,
wechselt Vorzeichen bei M_Z



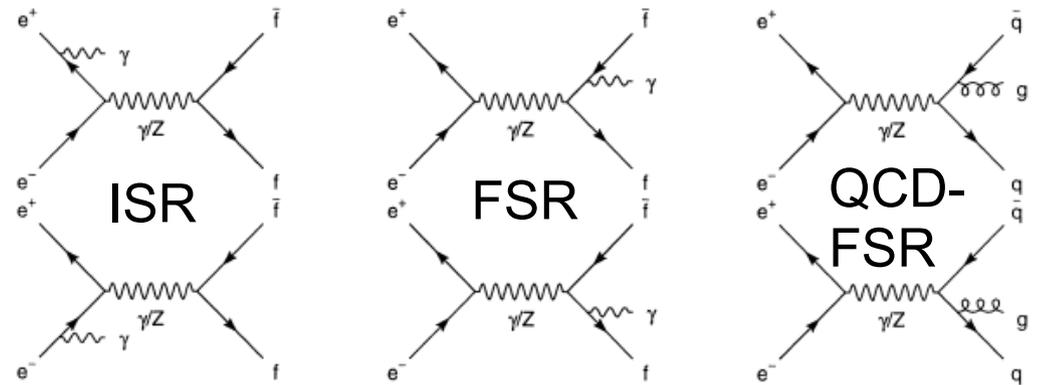
Grünewald, Phys. Rept. **322**(1999)125, Fig. 3.5.

- Breite des Z: $\Gamma_Z = \Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \Gamma_{\text{inv}} + \Gamma_{\text{had}}$
- Annahme: Alle unsichtbaren Zerfälle (Γ_{inv}) sind Zerfälle in leichte Neutrinos: $\Gamma_{\text{inv}} = N_\nu \Gamma_{\nu\nu}$
- Messe Gesamtbreite Γ_Z
- Messe Breiten für sichtbare Zerfälle aus $\sigma_{\text{ff}}^0 = \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{\text{ff}}}{\Gamma_Z^2}$.
- => der Rest ist Γ_{inv}
- Anzahl der leichten Neutrinos: $N_\nu = \Gamma_{\text{inv}}/\Gamma_{\nu\nu}$
- Ergebnis: $N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082$

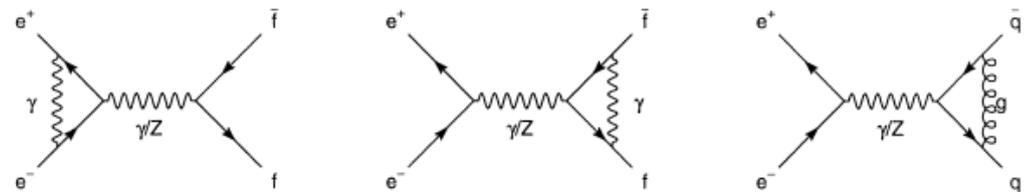


LEP and SLD Coll., Phys. Rept. **427** (2006) 257, Fig. 1.13

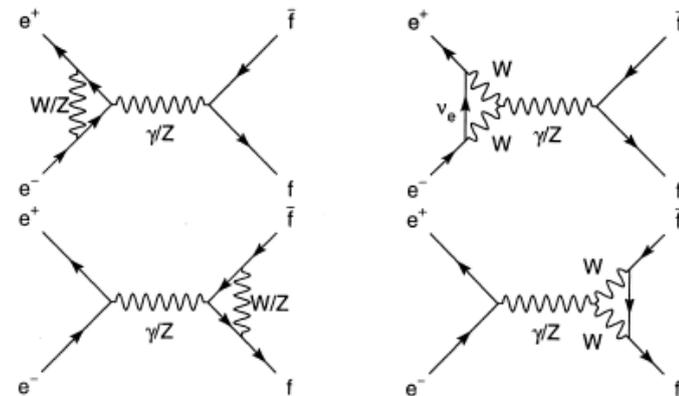
- Radiative Korrekturen: Abstrahlung von Photonen oder Gluonen im
 - Anfangszustand: ISR (Initial State Radiation)
 - Endzustand: FSR (Final State Radiation)
- Reine QED-Diagramme bilden eichinvariante Untermenge aller Korrekturen



QED- und QCD-Vertex-Korrekturen

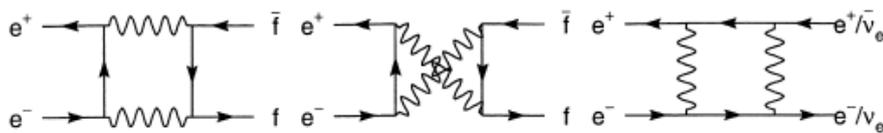


Elektroschwache Vertex-Korrekturen



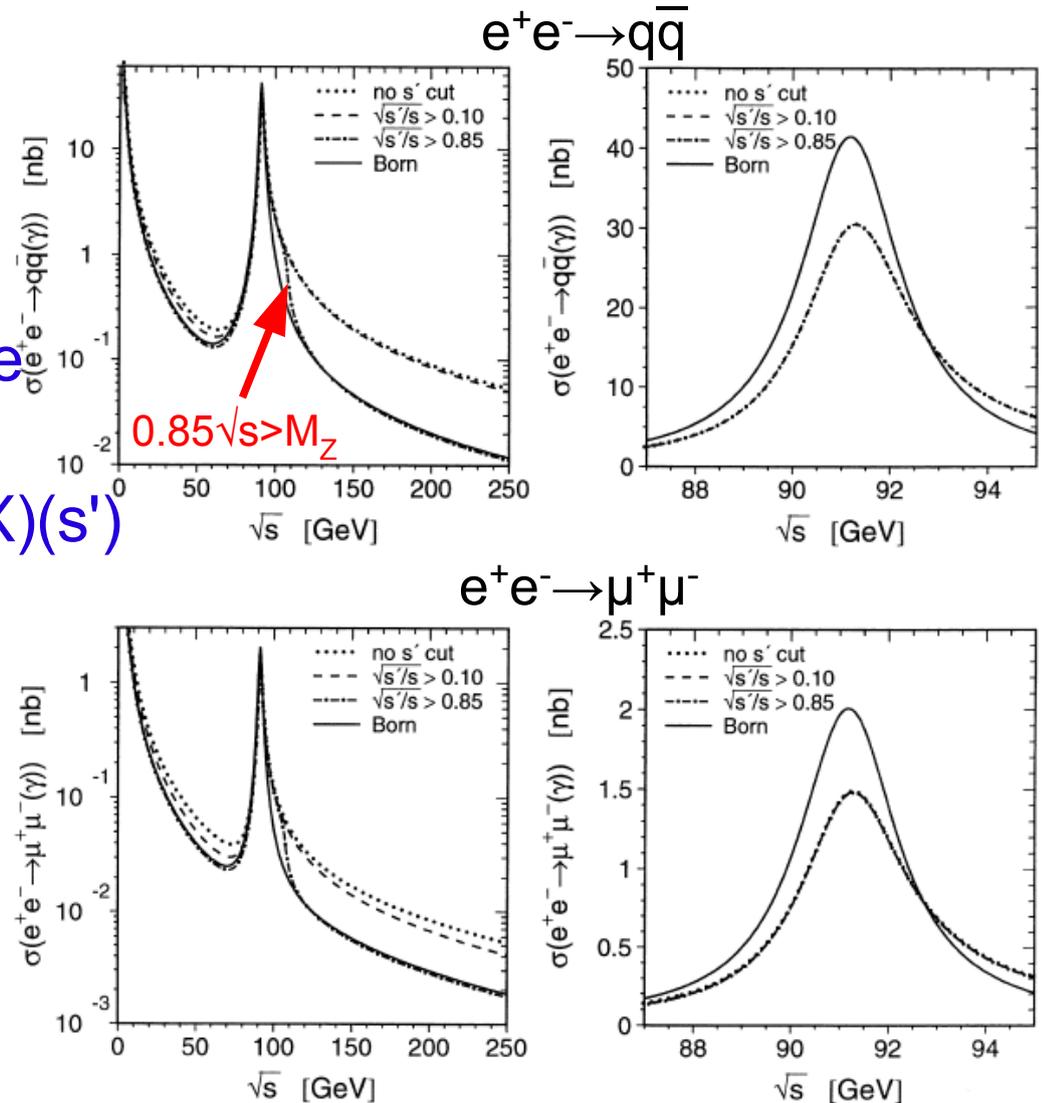
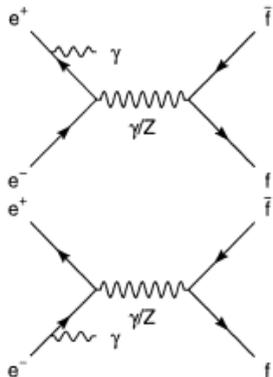
Grünwald, Phys. Rept. 322(1999)125, Figs. 3.8-3.10.

Box-Korrekturen



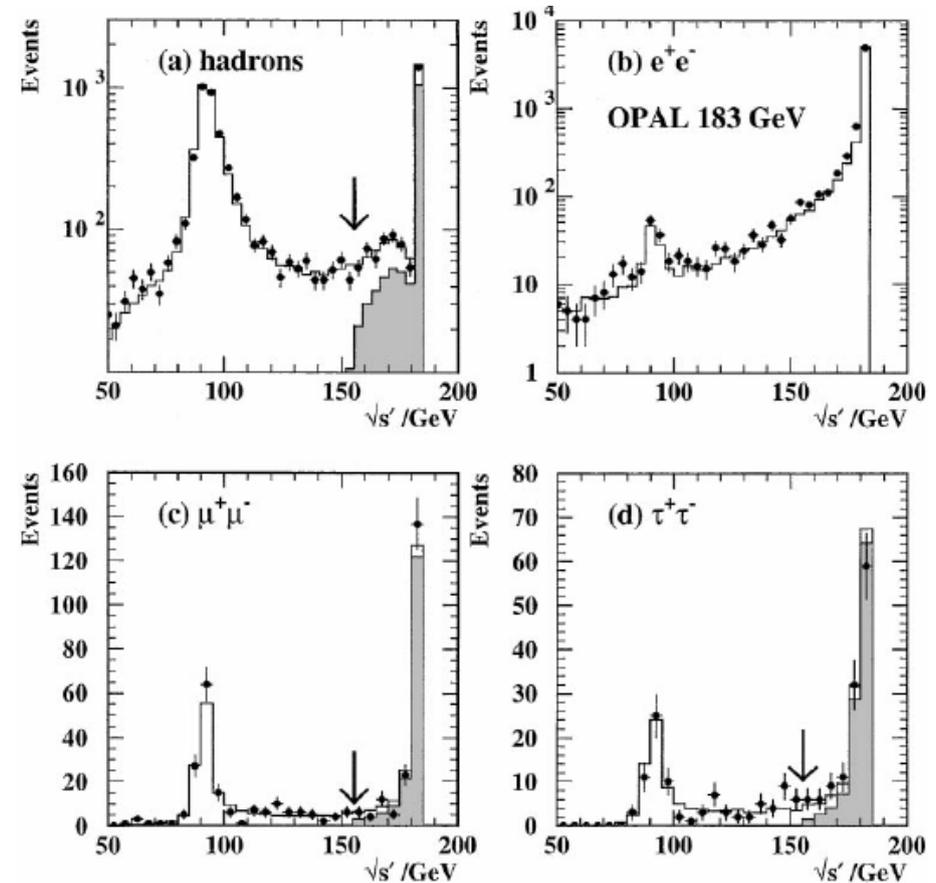
ISR und „Radiative Returns“

- Besonders wichtig: ISR
- Photonen kollinear mit e^+ / e^-
=> verschwinden im Strahlrohr
- s' : Quadr. Schwerpunktsenergie nach Photonabstrahlung
- $\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma X)(s) \sim f_\gamma \times \sigma(e^+e^- \rightarrow X)(s')$
- „Radiative Return“: $s' = M_Z^2$
- Nahe der Z-Resonanz: Rad. Korr. verringern σ
- Sonst: Vergrößerung von σ



Grünwald, Phys. Rept. 322(1999)125, Fig. 3.12.

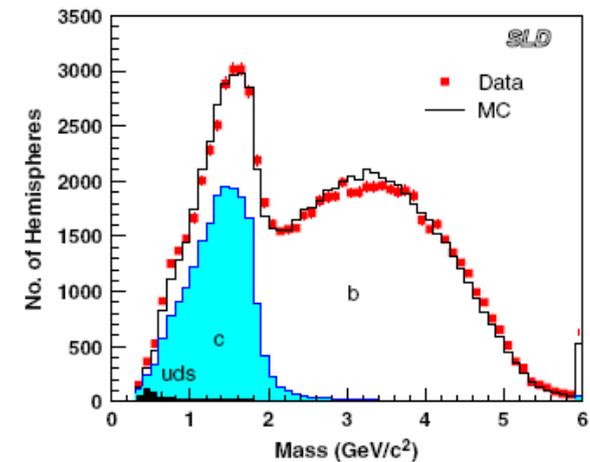
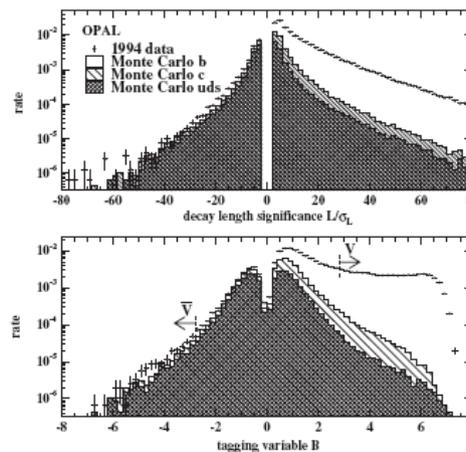
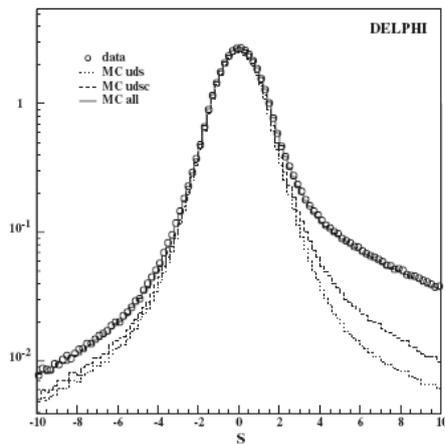
- Mehr als die Hälfte aller hadr. Ereignisse bei 183GeV sind radiative Returns!



Grünewald, Phys. Rept. **322**(1999)125, Fig. 5.9.
OPAL, Eur. Phys. J. C**6**(1999)1.

Messungen mit schweren Quarks (c, b)

- Wichtige Meßgrößen: R_b , R_c :
Anteil von b bzw. c-Quarks an allen hadronischen Z-Zerfällen
- Messung erfordert präzises b/c-Tagging:
 - Über Lebensdauer (Impakt-Parameter und/oder sek. Vertex)
 - Über Nachweis von semileptonischen Zerfällen
 - Kombination, z.B. durch neuronales Netz



b-Tagging performance of the different experiments at the cut where the R_b analyses are performed

	ALEPH	DELPHI	L3	OPAL	SLD
b Purity (%)	97.8	98.6	84.3	96.7	98.3
b Efficiency (%)	22.7	29.6	23.7	25.5	61.8

The lifetime tagging is combined with other information (see text). The OPAL tag is an OR of a secondary vertex and a lepton tag.

LEP&SLD, Phys. Rept. **427**(2006)257, Figs. 5.1, 5.3, 5.4, Tab. 5.2..

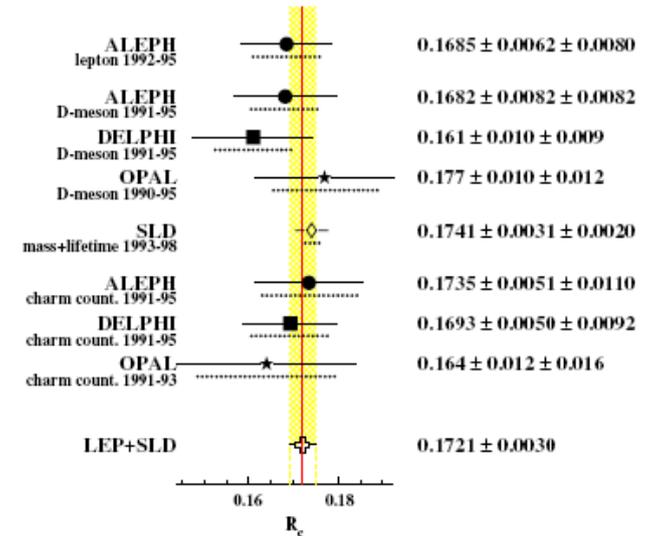
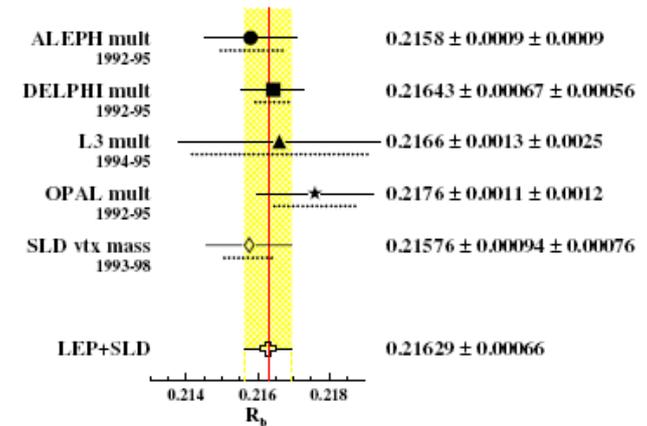
- Problem: Effizienz des b-Tags muss sehr genau bekannt sein
=> bestimme ε_b möglichst aus Daten
aber wie?
- Idee: c- und b-Quarks treten paarweise auf
=> vergleiche Raten mit nur einem getaggten Jet (single tag)
und zwei getaggten Jets (double tag):

$$f_s = \varepsilon_b R_b + \varepsilon_c R_c + \varepsilon_{uds}(1 - R_b - R_c),$$

$$f_d = \varepsilon_b^{(d)} R_b + \varepsilon_c^{(d)} R_c + \varepsilon_{uds}^{(d)}(1 - R_b - R_c), \quad \varepsilon_f^{(d)} = (1 + \mathcal{C}_f)\varepsilon_f^2,$$

- Nehme Effizienzen für c und uds aus MC, dann liefern single- und double-Tag-Raten zwei Gl. für zwei Unbekannte (ε_b und R_b)
- Wichtig: Tagging-Raten sind nicht unkorreliert!
=> Erste LEP-Messungen haben das nicht berücksichtigt,
ergab erhebliche Abweichungen vom Standard-Modell!

- Messung von R_b und R_c sind sehr schwierig: große Systematik
- Ergebnisse (LEP&SLD):
 - $R_b = 0.21629(66)$ (0.31%)
 - $R_c = 0.1721(30)$ (1.7%)

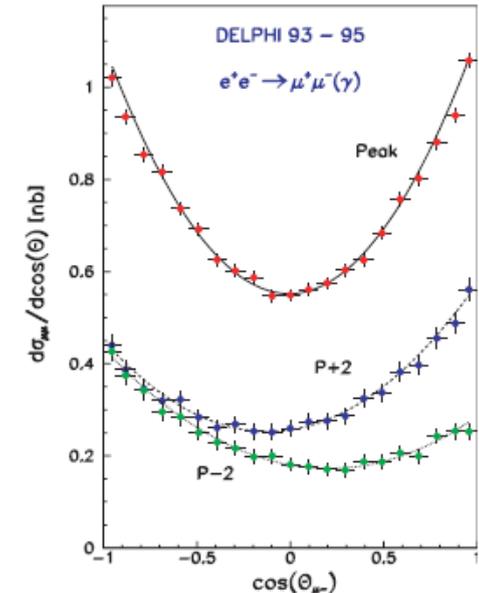
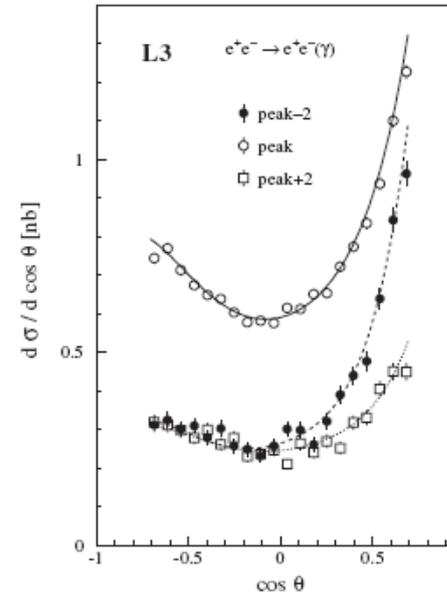


Forward-Backward Asymmetries

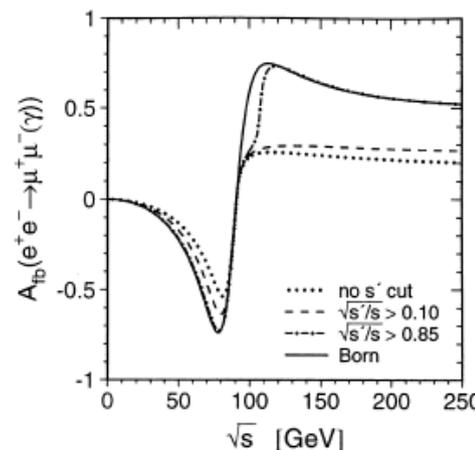
- Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie:

$$A_{FB} = (N_F - N_B) / (N_F + N_B)$$

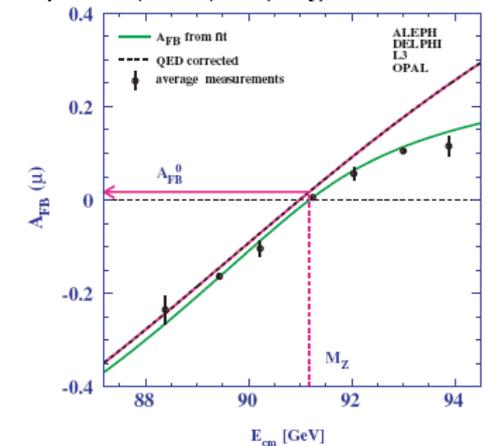
- Messung über Zählen in eingeschränktem Winkelbereich, oder durch Fit an $\cos\theta$ -Verteilung
- Extrapolation auf vollen Winkelbereich nötig
- Starke s -Abhängigkeit, Asymmetrie fast 0 bei M_Z^2
- Korrigiere auf $s=M_Z^2$
=> Asymmetrien werden in globalem Fit zusammen mit M_Z , Γ_Z , σ_{had}^0 bestimmt



LEP & SLD Collab. Phys. Rept. **427**(2006)257, Fig. 2.5.

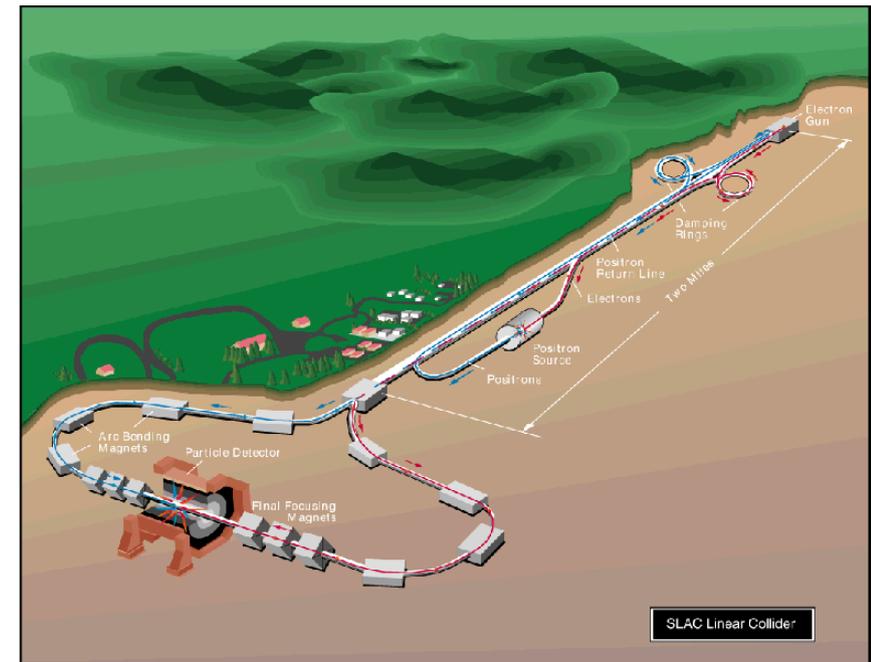


Grünwald, Phys. Rept. **322**(1999)125, Fig. 3.13.



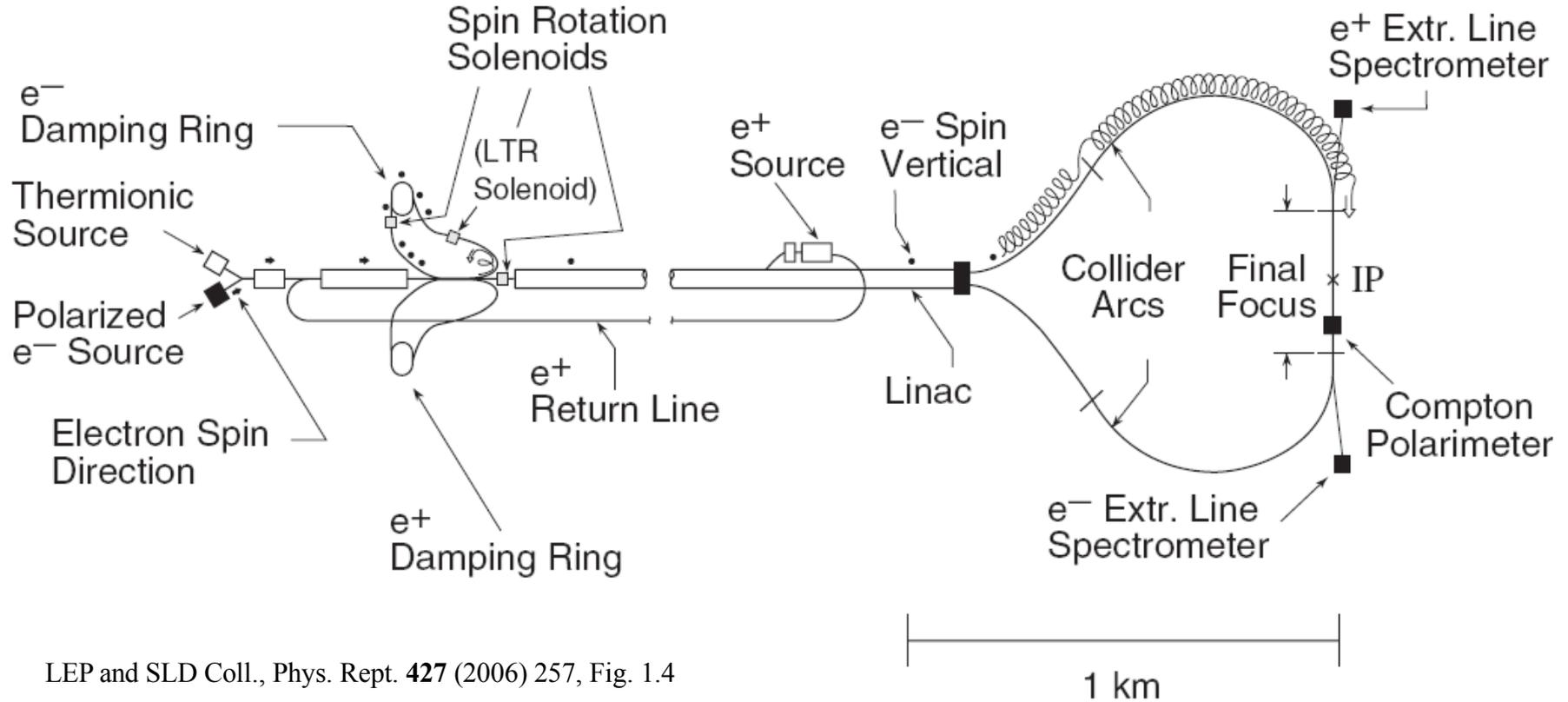
LEP&SLD, Phys.Rept. **427**(2006)257, Fig. 1.12.

- SLC: Stanford Linear Collider
- Basierend auf SLAC (Stanford Linear Accelerator)
- In Betrieb 1989 - 1998
- Luminosität am Ende: $3.0 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (50% vom Designwert),
120 Hz Rate, ca 1Z pro 1000 Pulse
- ca. 560k Z-Events (160k bis Ende von LEP-1)
(vgl. LEP: 4.5M pro Experiment)
- Besonderes Kennzeichen:
Polarisation!
- Detektoren:
 - 1989/1990: Mark-II
 - 1991-1998: SLD



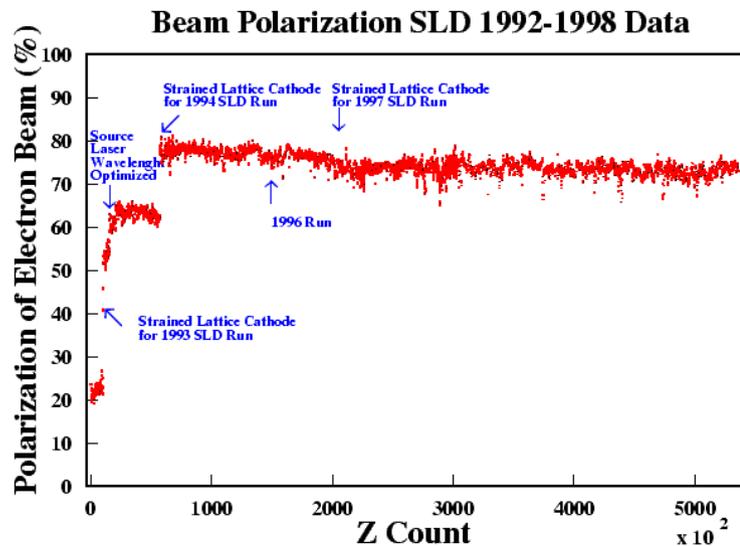
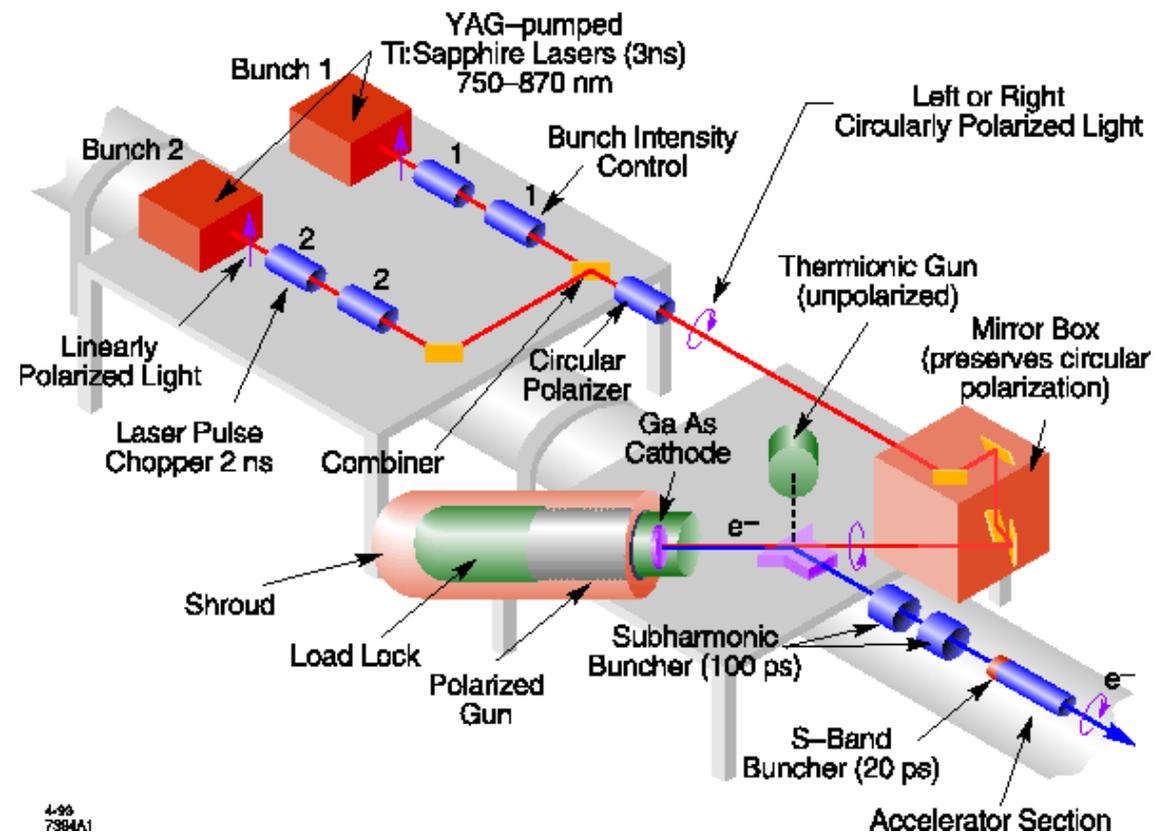
<http://www-sld.slac.stanford.edu/sldwww/slc/slc.html>

- Gesamtlänge: ca. 3km



LEP and SLD Coll., Phys. Rept. **427** (2006) 257, Fig. 1.4

- 1992: 22% mit Photokathode und pol. Laserlicht
- dann: „Strained Lattice“-Photokathode => 70-80% Polarisation der Elektronen
- Positronen unpolarisiert

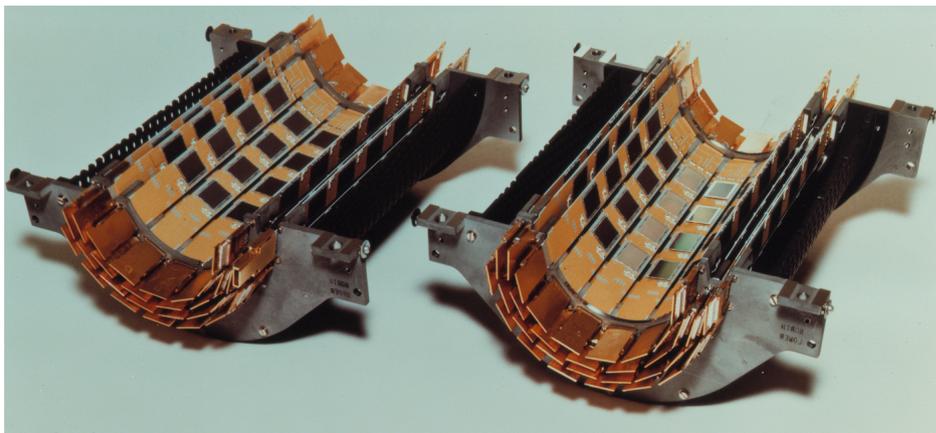


4-98
7984A1

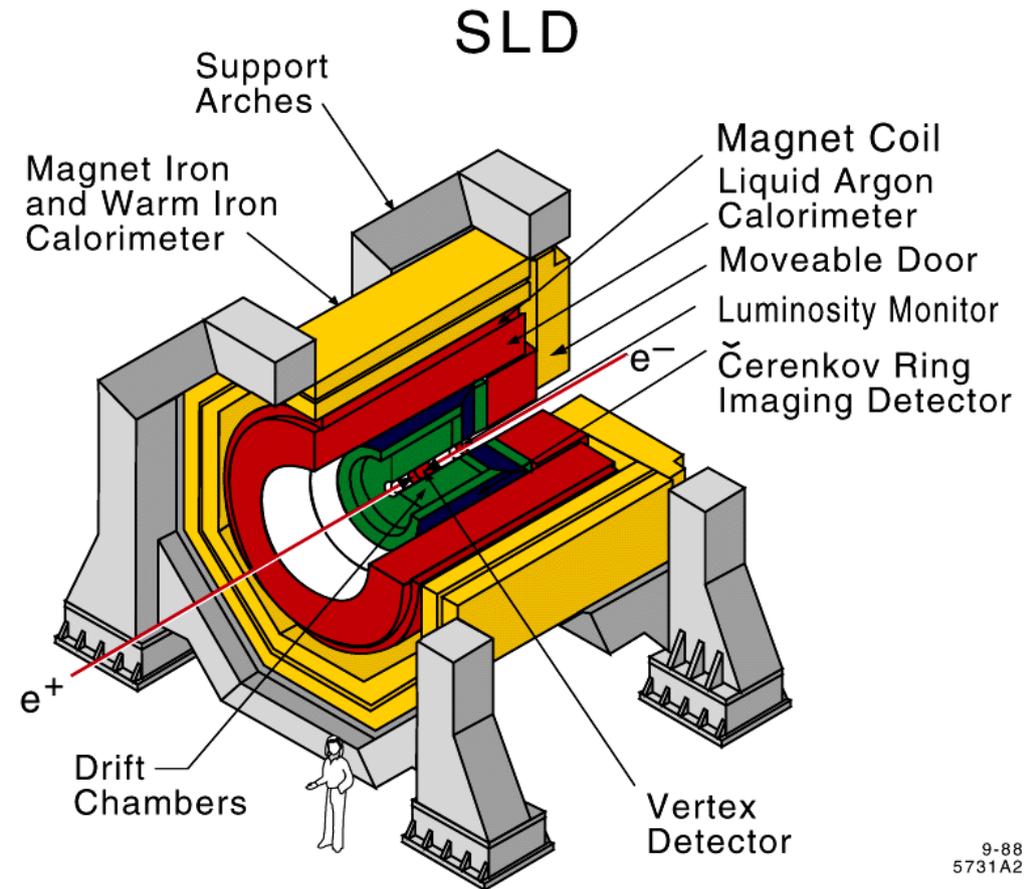
http://www.slac.stanford.edu/exp/sld/figure/top20/polarized_source/gif

http://www.slac.stanford.edu/exp/sld/figure/top20/pol_vs_time_92-98

- SLD: Stanford Linear Collider Detector
 - Normalleitende Spule
 - Driftkammer
 - Lar-Kalorimeter
 - Vertex-Detektor: Pixel-Detektor (CCD), 307MPixel! Betrieb bei 190K
=> Exzellente Vertex-Auflösung,
=> Exzellentes b/c-Tagging



<http://www-sldnt.slac.stanford.edu/sldbb/SLD%20History.ppt>



<http://www-sld.slac.stanford.edu/sldwww/sld.gif>

9-88
5731A2

Left-Right Asymmetries

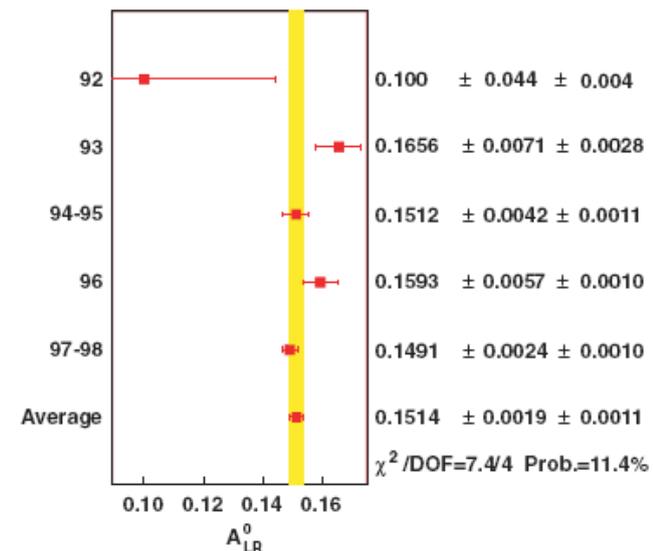
- Bei SLC: Polarisierte Elektronen (aber unpolarisierte Positronen)
- Messe Wirkungsquerschnitte für linkshändige oder rechtshändige einlaufende Elektronen
- Definiere Links-Rechts-Asymmetrie ($\langle P_e \rangle$: mittlere Elektronpolarisation)

$$A_{LR} = (N_L - N_R) / (N_L + N_R) / \langle P_e \rangle$$

- Korrigiere auf $s = M_Z^2 \Rightarrow A_{LR}^0$

$$A_{LR}^0 = \frac{2(1 - 4 \sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}})}{1 + (1 - 4 \sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}})^2}$$

- $\Rightarrow A_{LR}^0$ liefert direkte Messung des effektiven Mischungswinkels $\sin \theta_{\text{eff}}^l$
- Ergebnis hängt nur von der Kopplung des Z^0 an das Elektron ab

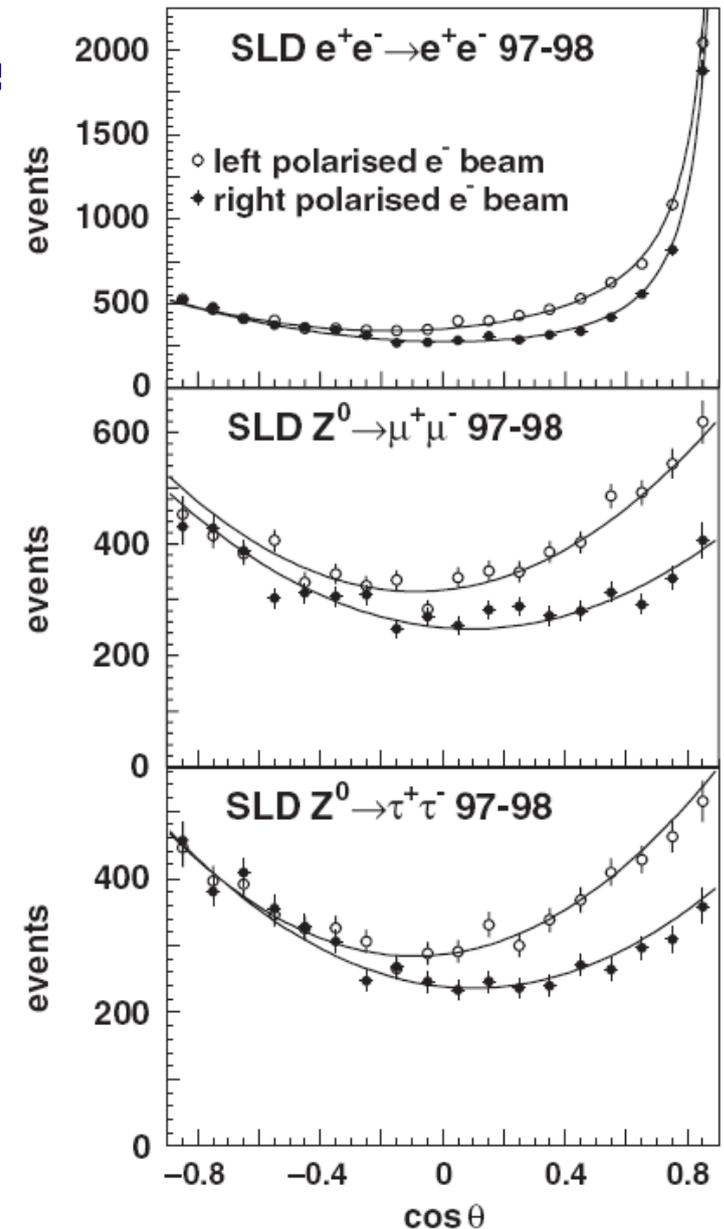


LEP&SLD, Phys. Rept. 427(2006)257, Fig. 3.6.

- Kombination der FB- und LR-Asymmetrie

$$A_{\text{LRFB}} = \frac{(\sigma_F - \sigma_B)_L - (\sigma_F - \sigma_B)_R}{(\sigma_F + \sigma_B)_L + (\sigma_F + \sigma_B)_R} \langle |\mathcal{P}_e| \rangle.$$

- Messung nur bei SLC möglich
- Ergebnis hängt nur von den Kopplungen an das Fermion im Endzustand ab!



LEP&SLD, Phys. Rept. 427(2006)257, Fig. 3.7.

- Wirkungsquerschnitte für $e^-e^+ \rightarrow f\bar{f}$,
Elektron-Helizität L/R, Fermion-Helizität l/r:

$$\frac{d\sigma_{Ll}}{d\cos\theta} \propto g_{Le}^2 g_{Lf}^2 (1 + \cos\theta)^2, \quad \frac{d\sigma_{Lr}}{d\cos\theta} \propto g_{Le}^2 g_{Rf}^2 (1 - \cos\theta)^2,$$

$$\frac{d\sigma_{Rr}}{d\cos\theta} \propto g_{Re}^2 g_{Rf}^2 (1 + \cos\theta)^2, \quad \frac{d\sigma_{Rl}}{d\cos\theta} \propto g_{Re}^2 g_{Lf}^2 (1 - \cos\theta)^2.$$

- Kopplungen:
bzw. $g_L^{\text{tree}} = \sqrt{\rho_0} (T_3^f - Q_f \sin^2 \theta_W^{\text{tree}}), \quad g_R^{\text{tree}} = -\sqrt{\rho_0} Q_f \sin^2 \theta_W^{\text{tree}},$
 $g_V^{\text{tree}} \equiv g_L^{\text{tree}} + g_R^{\text{tree}} = \sqrt{\rho_0} (T_3^f - 2Q_f \sin^2 \theta_W^{\text{tree}}), \quad g_A^{\text{tree}} \equiv g_L^{\text{tree}} - g_R^{\text{tree}} = \sqrt{\rho_0} T_3^f.$

- Asymmetrie-Parameter: $\mathcal{A}_f = \frac{g_{Lf}^2 - g_{Rf}^2}{g_{Lf}^2 + g_{Rf}^2} = \frac{2g_V^f g_A^f}{g_V^f{}^2 + g_A^f{}^2} = 2 \frac{g_V^f / g_A^f}{1 + (g_V^f / g_A^f)^2}.$

- Asymmetrien: $A_{\text{FB}} = \frac{\sigma_F - \sigma_B}{\sigma_F + \sigma_B}, \quad A_{\text{FB}}^{0,f} = \frac{3}{4} \mathcal{A}_e \mathcal{A}_f,$
 $A_{\text{LR}} = \frac{\sigma_L - \sigma_R}{\sigma_L + \sigma_R} \frac{1}{\langle |\mathcal{P}_e| \rangle}, \quad A_{\text{LR}}^0 = \mathcal{A}_e,$
 $A_{\text{LRFB}} = \frac{(\sigma_F - \sigma_B)_L - (\sigma_F - \sigma_B)_R}{(\sigma_F + \sigma_B)_L + (\sigma_F + \sigma_B)_R} \frac{1}{\langle |\mathcal{P}_e| \rangle}, \quad A_{\text{LRFB}}^0 = \frac{3}{4} \mathcal{A}_f,$

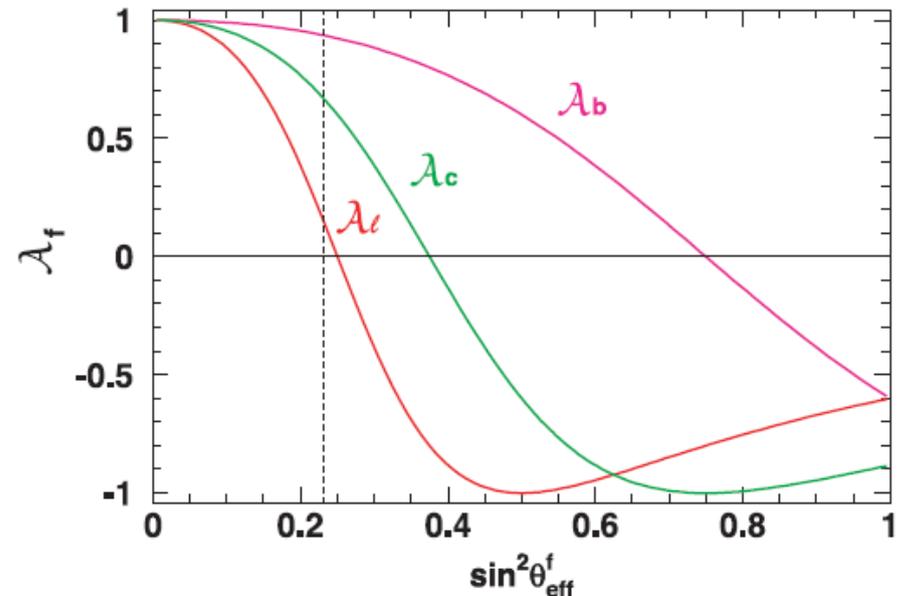
- Asymmetrie-Parameter:

$$\mathcal{A}_f = \frac{g_{L_f}^2 - g_{R_f}^2}{g_{L_f}^2 + g_{R_f}^2} = \frac{2g_{V_f}g_{A_f}}{g_{V_f}^2 + g_{A_f}^2} = 2 \frac{g_{V_f}/g_{A_f}}{1 + (g_{V_f}/g_{A_f})^2}.$$

$$\frac{g_{V_f}}{g_{A_f}} = 1 - \frac{2Q_f}{T_3^f} \sin^2 \theta_{\text{eff}}^f = 1 - 4|Q_f| \sin^2 \theta_{\text{eff}}^f,$$

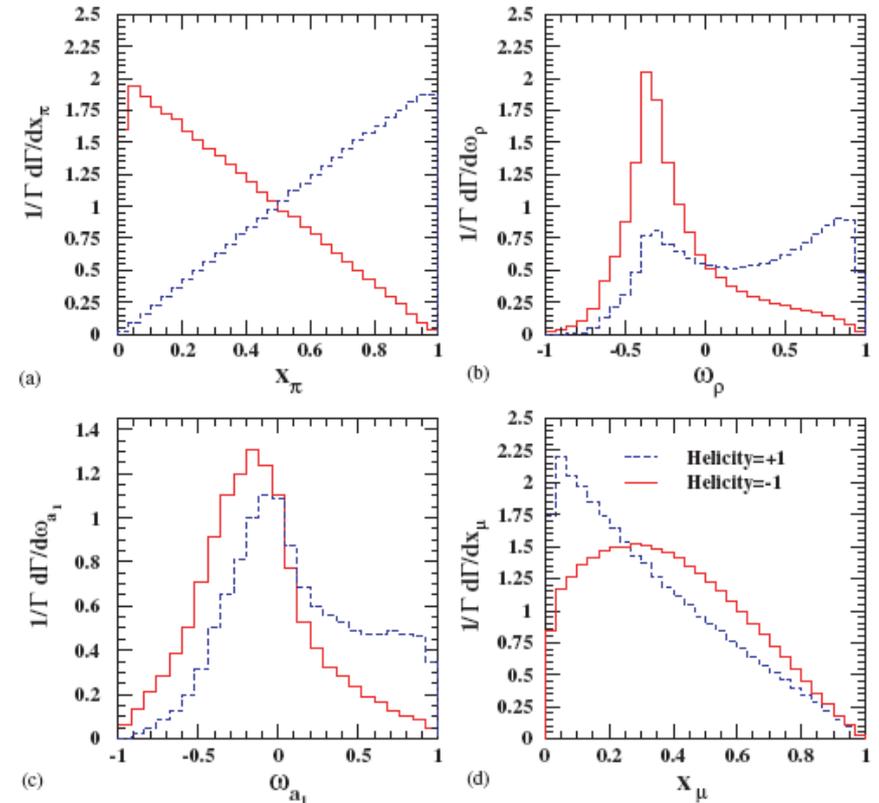
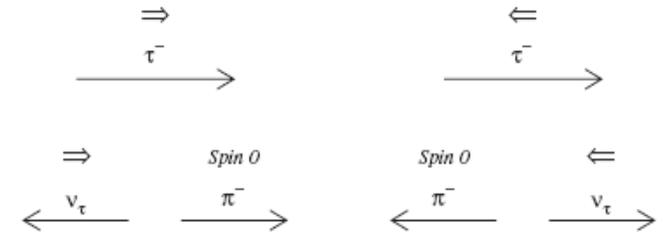
=> im SM hängt A direkt von $\sin \theta_w$ ab

- LEP misst $A_{\text{FB}}^{0,f} = \frac{3}{4} \mathcal{A}_e \mathcal{A}_f$, : $\frac{3}{4} A_1^2$
(bei Lepton-Universalität)
- SLD misst $A_{\text{LR}}^0 = \mathcal{A}_e$, : A_e direkt,
außerdem $A_{\text{LRFB}}^0 = \frac{3}{4} \mathcal{A}_f$, : A_f direkt!



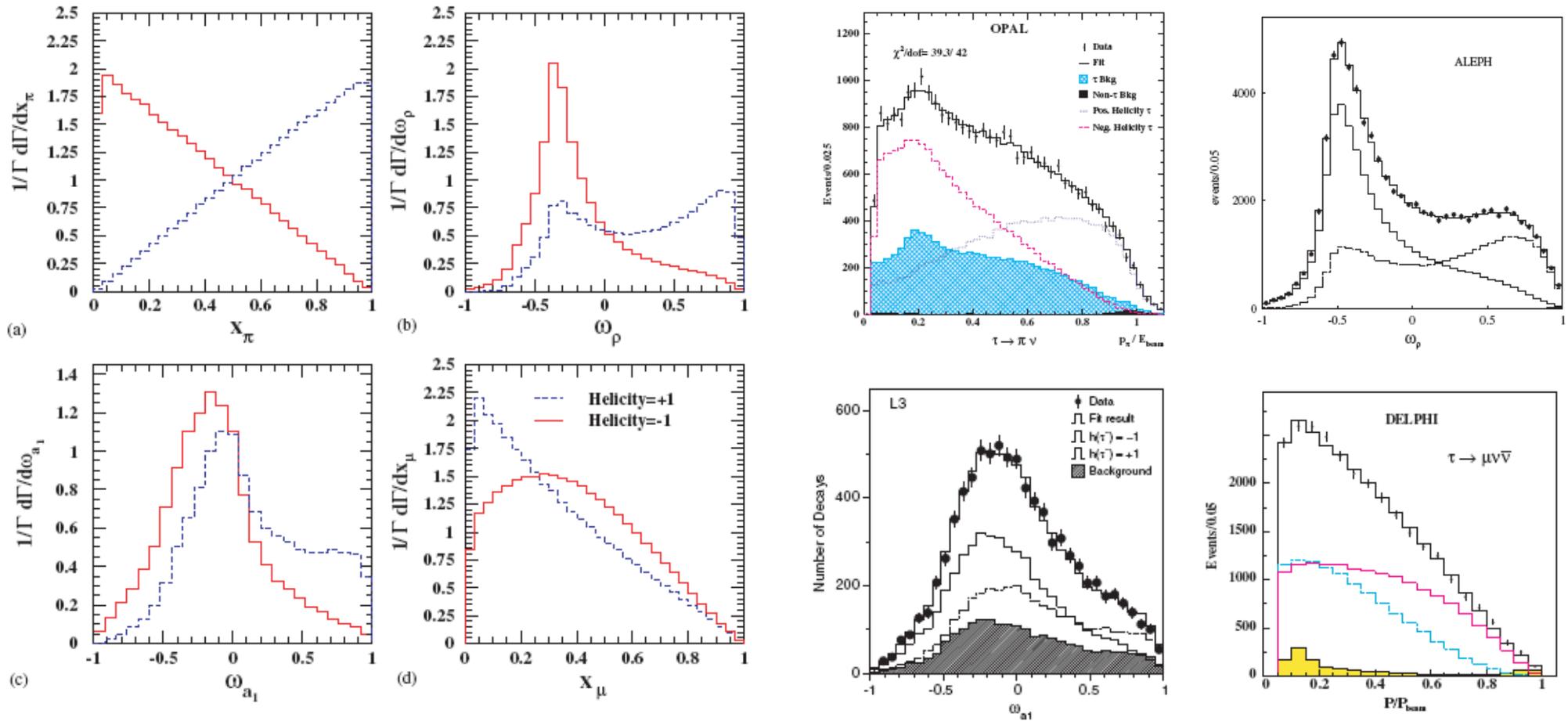
LEP&SLD, Phys. Rept. 427(2006)257, Fig. 1.14.

- V-A-Struktur der schwachen WW führt zu asymmetrischem Tau-Zerfall
=> Tau-Polarisation ist meßbar
- Besonders einfach im Zerfall $\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau$,
 $BR(\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau) = 10.9\%$
- Andere Kanäle sind auch nutzbar,
z.B. $BR(\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \nu_e) = 17.8\%$



LEP&SLD, Phys. Rept. 427(2006)257, Fig. 4.2.

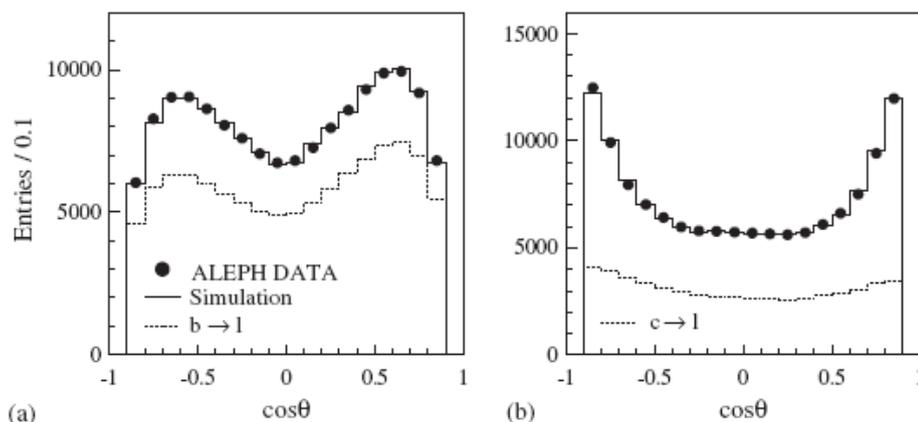
Tau-Polarisation II



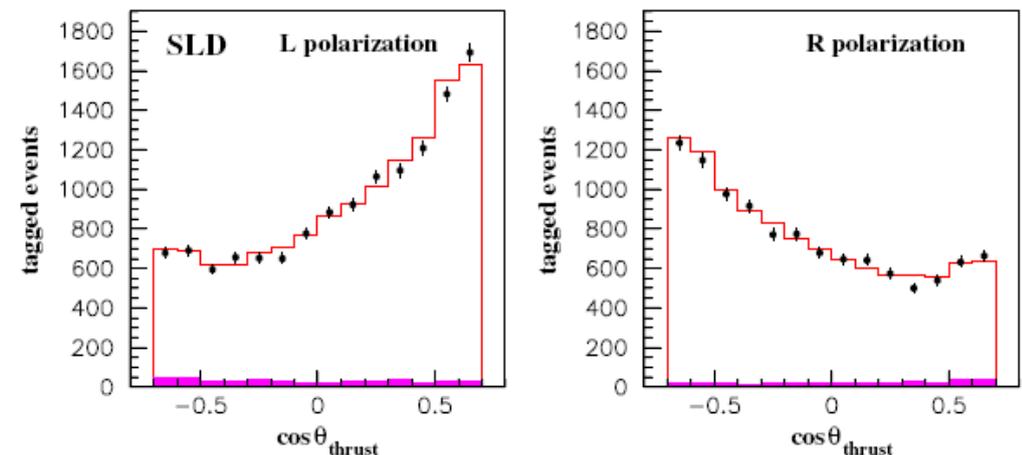
LEP&SLD, Phys. Rept. 427(2006)257, Fig. 4.2.

LEP&SLD, Phys. Rept. 427(2006)257, Figs. 4.3-4.6.

- Asymmetriemessungen von c und b erfordern Bestimmung der Ladung des b/c-Quarks und des Streuwinkels
- Streuwinkel: Angenähert durch Thrust-Achse
- Ladung:
 - Zerfallsleptonen (Problem: Kaskadenzerfälle: $b \rightarrow l^-$, aber $b \rightarrow c \rightarrow l^+$)
 - Vertexladung: Bestimme Summe(Q) am Sekundärvertex
 - Jetladung: Wichte Teilchenladungen mit Impulsen
 - Ladung von Kaonen mit großem Impaktparameter
 - Kombination, z.B. durch neuronales Netz



LEP&SLD, Phys. Rept. 427(2006)257, Fig. 5.10.



LEP&SLD, Phys. Rept. 427(2006)257, Fig. 5.11.