

# Moderne Experimentalphysik III: Kerne und Teilchen (Physik VI)

**Günter Quast, Roger Wolf, Pablo Goldenzweig**  
18. Juli 2017

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IEKP) – PHYSICS FACULTY



# Kapitel 10: Moderne Teilchenphysik



# Kapitel 10.1: Schlüsselexperimente der elektroschwachen WW an Collidern

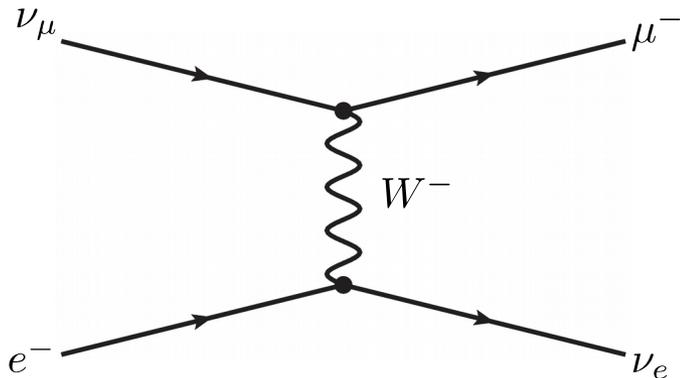


# Entdeckung neutraler Ströme...

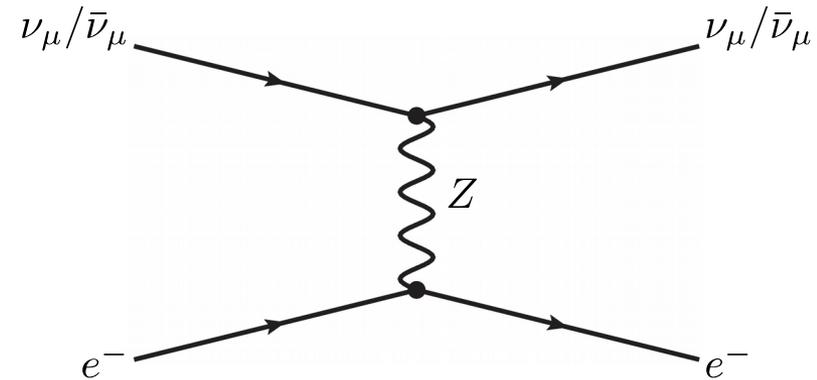
... durch Z-Boson Austausch

- In elastischer Elektron-Elektron Streuung überlagert durch elektromagnetische WW  
→ wähle **elastische Neutrino-Elektron Streuung** für Nachweis
- Erzeugung eines Strahls aus  $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$  durch Reaktion  $p + X \rightarrow \pi^\pm(\mu\nu_\mu)/K^\pm(\mu\nu_\mu) + X'$

**Geladener Strom:**

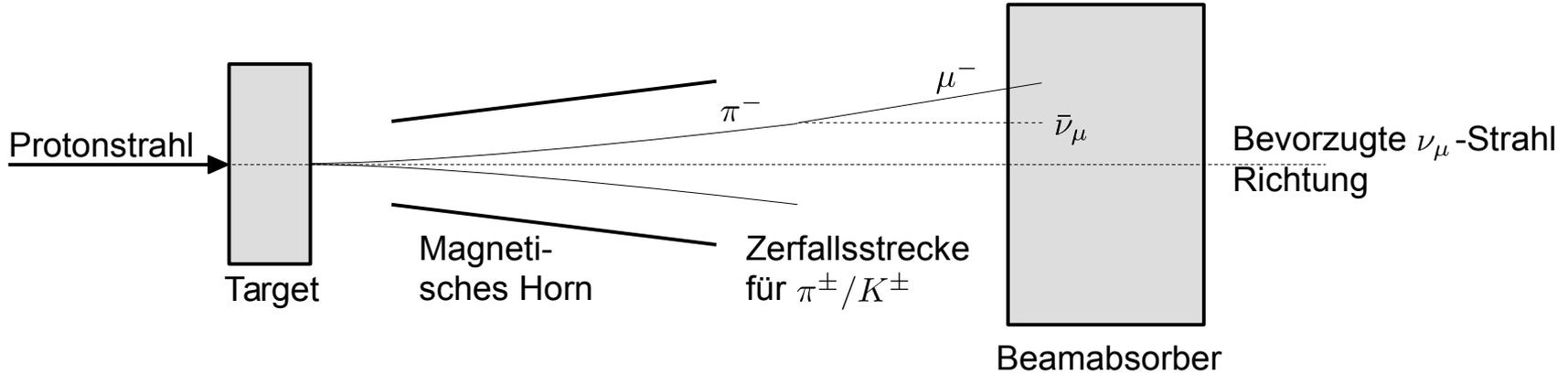


**Neutraler Strom:**

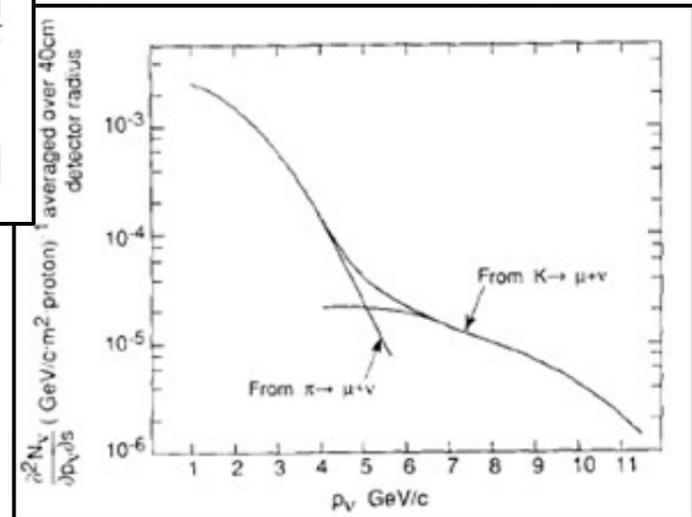


# Experimentelles Layout (1964 – 74)

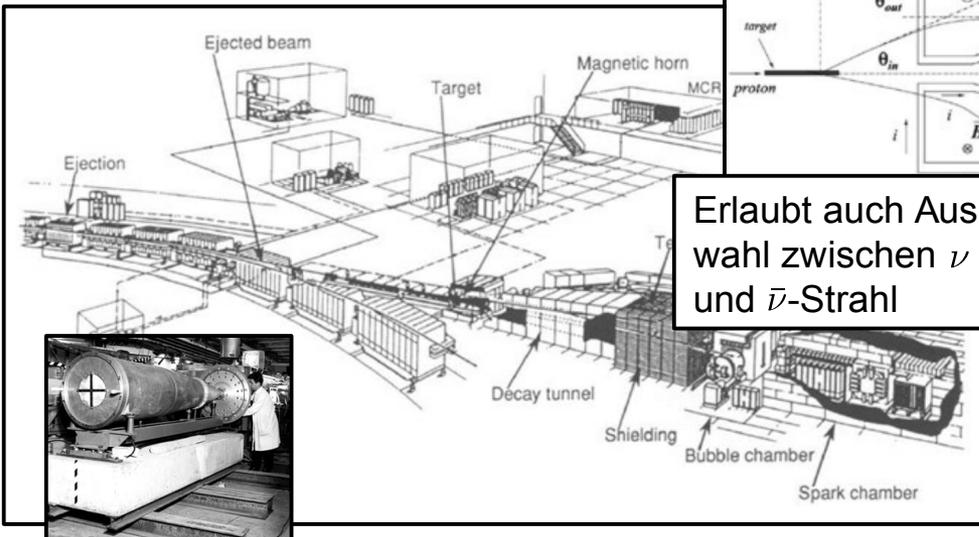
- **Fokussierung Neutrinostrahl** (soweit möglich) durch **magnetisches Horn** (Simon van der Meer; fokussiere  $\pi^\pm / K^\pm$ -Strahl von bestimmter Energie)



Typisches Neutrino-Energiespektrum

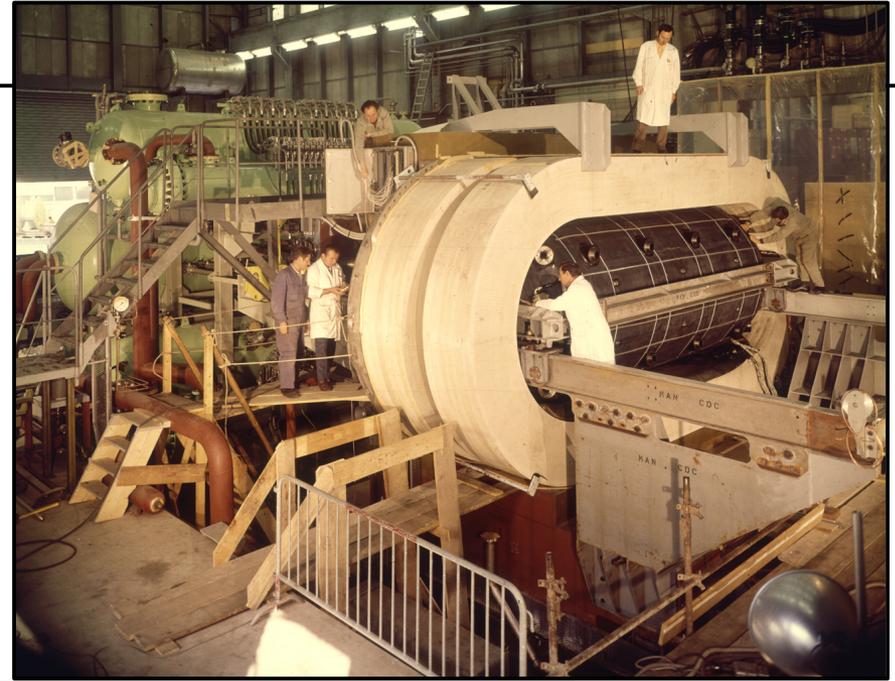


Erlaubt auch Auswahl zwischen  $\nu$  und  $\bar{\nu}$ -Strahl

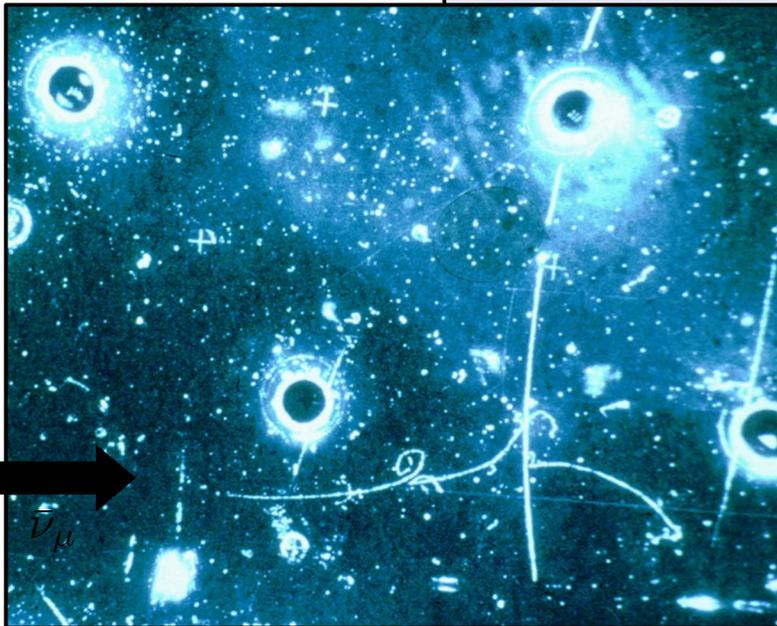
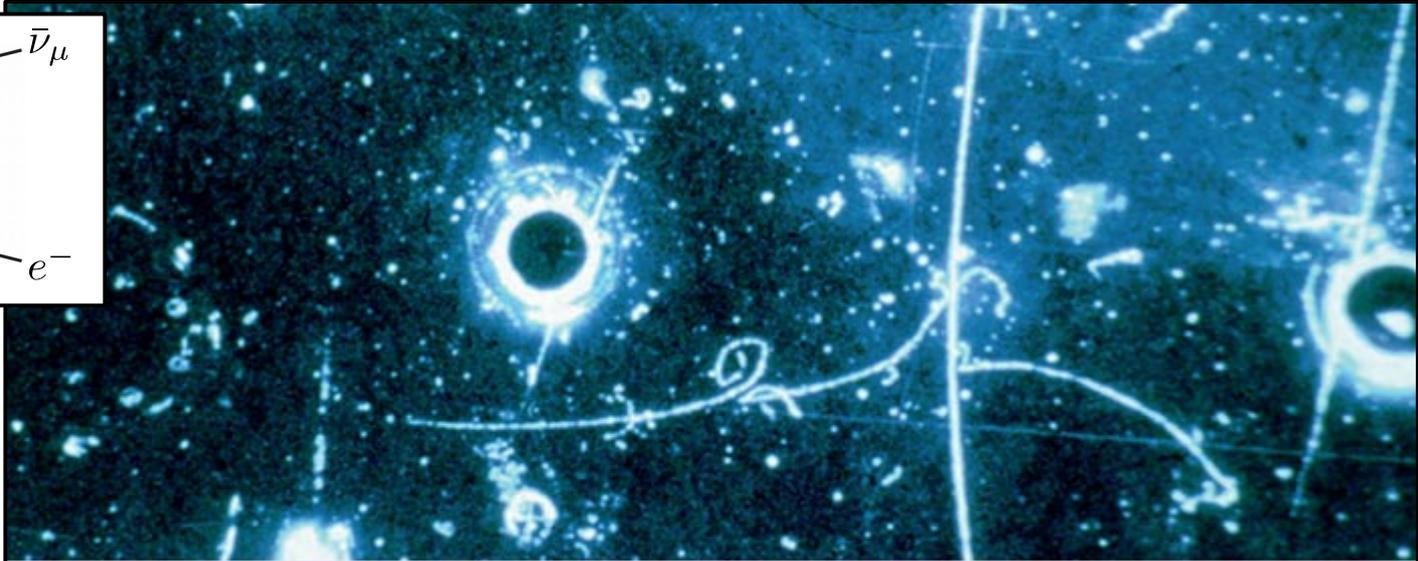
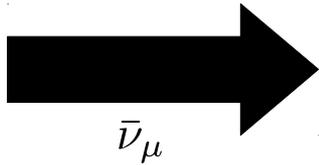
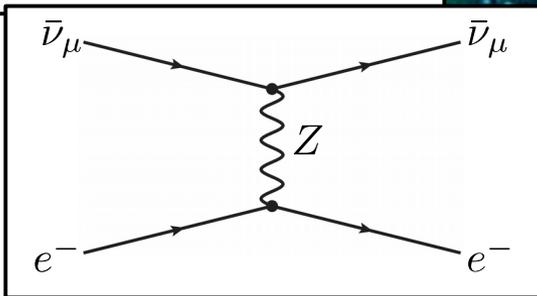


# Gargamelle Blasenkammer

- Erfasse  $\nu$ -Wechselwirkung in  $12\text{m}^3$  schwerer Flüssigkeit unter Druck ( $\rightarrow$  überkritisch)
- Magnetfeld (2T) zur Ablenkung geladener Teilchen
- Ionisationsenergie geladener Teilchen  $\rightarrow$  **Kondensationskeime** für Blasen (vgl [VL-04 Folie 5](#), Größe einige mm)
- Datennahme: 8 Kameras, mehr als eine Millionen detaillierte Photons (aus kompletter Datennahme)



# Nachweis: Neutrino-Elektron Streuung (1974)

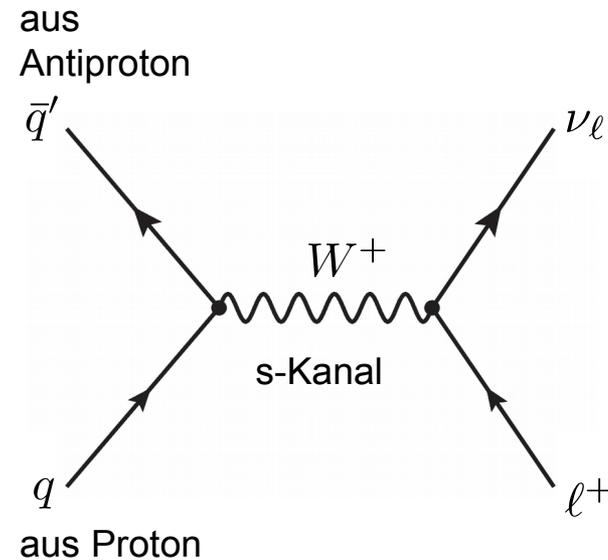
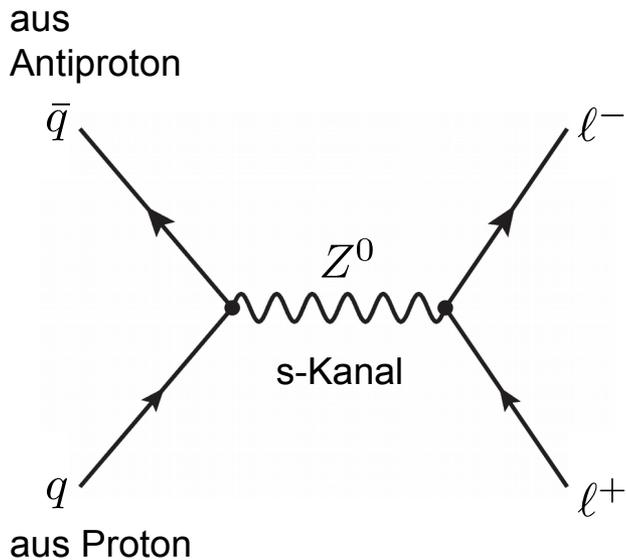


Ausgeschlagenes Elektron in  $\bar{\nu}_\mu$ -Strahlrichtung

Erwarteter Untergrund aus  $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$   
mit  $E_e > 300$  MeV und  $\theta_e < 5^\circ \rightarrow 0.03 \pm 0.02$   
während Beobachtungszeit

# Direkter Nachweis W- und Z-Bosonen (1981)

- Aus “Stärke” der schwachen WW (vgl [VL-20 Folie 11](#)) → **untere Schranke** auf  $m_{W/Z} > 60 \text{ GeV}$  (@ 95% CL)
- In  $e^+e^-$ -Kollisionen **nötige Schwerpunktsenergie** zur Erzeugung von W- und Z-Bosonen zur damaligen Zeit nicht erreichbar
- Erzeugung in  $p\bar{p}$ -Kollisionen am [CERN SppS](#) (→ bis zu 400 GeV Strahlenergie)



- **NB:** Quarks tragen nur Impulsbruchteil  $x$  an (Anti-)proton (vgl [VL-19 Folie 11ff](#))

# $p\bar{p}$ -Kollisionen vs $pp$ -Kollisionen

- Quarks tragen nur Impulsbruchteil  $x$  an (Anti-)proton (vgl [VL-19 Folie 11ff](#))



Bei 300 GeV  $pp$ -Kollisionen (head-on) beträgt die Schwerpunktsenergie 600 GeV. Mittlerer Impulsbruchteil für Valenzquarks:  $\langle x \rangle_V \approx 0.12$ ; mittlerer Impulsbruchteil für Seequarks:  $\langle x \rangle_{see} \approx 0.04$

Berechnen Sie die mittlere Schwerpunktsenergie auf Partonlevel für  $pp$ - Kollisionen

# $p\bar{p}$ -Kollisionen vs $pp$ -Kollisionen

- Quarks tragen nur Impulsbruchteil  $x$  an (Anti-)proton (vgl [VL-19 Folie 11ff](#))



Bei 300 GeV  $pp$ -Kollisionen (head-on) beträgt die Schwerpunktsenergie 600 GeV. Mittlerer Impulsbruchteil für Valenzquarks:  $\langle x \rangle_V \approx 0.12$ ; mittlerer Impulsbruchteil für Seequarks:  $\langle x \rangle_{see} \approx 0.04$

Berechnen Sie die mittlere Schwerpunktsenergie auf Partonlevel für  $pp$ - Kollisionen

$$\sqrt{\langle s \rangle} \approx 600 \text{ GeV} \sqrt{0.12 \cdot 0.04} \approx 41.6 \text{ GeV}$$

# $p\bar{p}$ -Kollisionen vs $pp$ -Kollisionen

- Quarks tragen nur Impulsbruchteil  $x$  an (Anti-)proton (vgl [VL-19 Folie 11ff](#))



Bei 300 GeV  $pp$ -Kollisionen (head-on) beträgt die Schwerpunktsenergie 600 GeV. Mittlerer Impulsbruchteil für Valenzquarks:  $\langle x \rangle_V \approx 0.12$ ; mittlerer Impulsbruchteil für Seequarks:  $\langle x \rangle_{see} \approx 0.04$

Berechnen Sie die mittlere Schwerpunktsenergie auf Partonlevel für  $p\bar{p}$ - Kollisionen

# $p\bar{p}$ -Kollisionen vs $pp$ -Kollisionen

- Quarks tragen nur Impulsbruchteil  $x$  an (Anti-)proton (vgl [VL-19 Folie 11ff](#))



Bei 300 GeV  $pp$ -Kollisionen (head-on) beträgt die Schwerpunktsenergie 600 GeV. Mittlerer Impulsbruchteil für Valenzquarks:  $\langle x \rangle_V \approx 0.12$ ; mittlerer Impulsbruchteil für Seequarks:  $\langle x \rangle_{see} \approx 0.04$

Berechnen Sie die mittlere Schwerpunktsenergie auf Partonlevel für  $p\bar{p}$ - Kollisionen

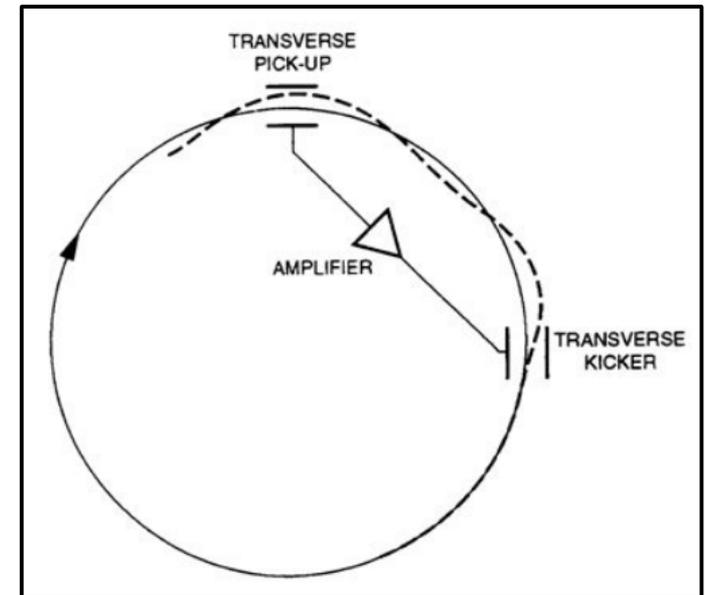
$$\sqrt{\langle s \rangle} \approx 600 \text{ GeV} \sqrt{0.12 \cdot 0.12} \approx 72 \text{ GeV}$$

# Erzeugung mono-energetischer Antiprotonen

- Beschuß Cu-Target mit 26 GeV Protonen → 1 Antiproton/1Mio Kollisionen
- Antiprotonen müssen **gesammelt und “gekühlt”** werden → **stochastische Kühlung** (Simon van der Meer)

## Stochastische Kühlung:

- Lokalisieren Phasenraumposition von Teilchen in “Transverse Pick-Up”
- Versuche Teilchen strahlabwärts mit Hilfe elektromagnetischer Einstrahlung in Mitte des Phasenraumvolumens zu bewegen (“Transverse Kicker”).
- Ermöglicht **Sammlung und Fokussierung** von bis zu  $10^{11}$  Antiprotonen pro Tag

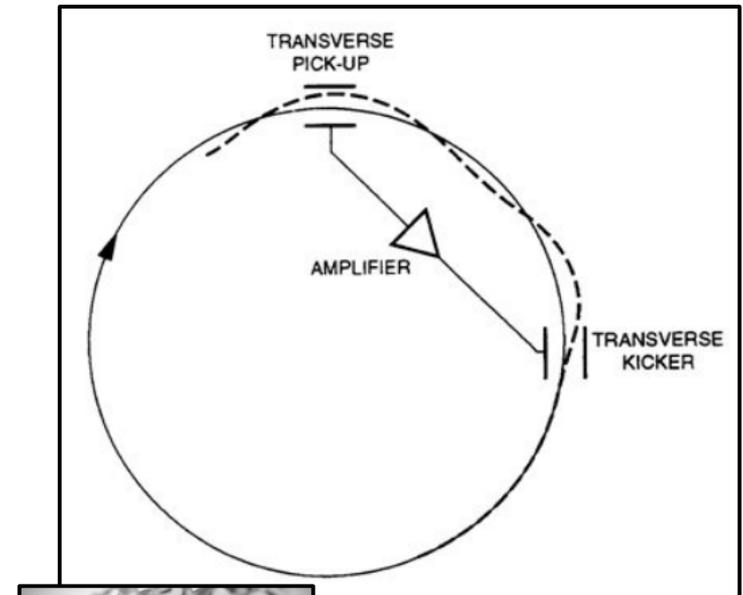


# Erzeugung mono-energetischer Antiprotonen

- Beschuß Cu-Target mit 26 GeV Protonen → 1 Antiproton/1Mio Kollisionen
- Antiprotonen müssen **gesammelt und “gekühlt”** werden → **stochastische Kühlung** (Simon van der Meer)

## Stochastische Kühlung:

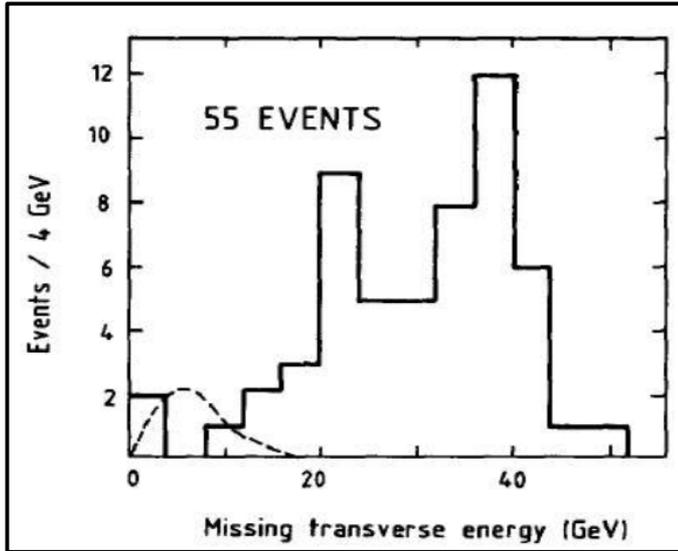
- Lokalisieren Phasenraumposition von Teilchen in “Transverse Pick-Up”
- Versuche Teilchen strahlabwärts mit Hilfe elektromagnetischer Einstrahlung in Mitte des Phasenraumvolumens zu bewegen (“Transverse Kicker”).
- Ermöglicht **Sammlung und Fokussierung** von bis zu  $10^{11}$  Antiprotonen pro Tag



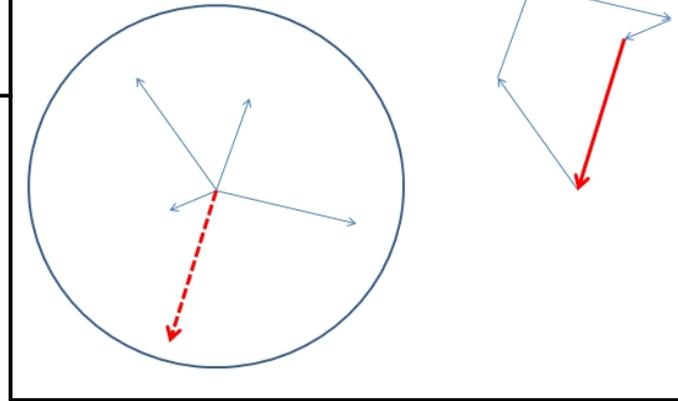
Warum zerfallen die Antiprotonen nicht?

# Entdeckung des W

- Mit den Experimenten UA1 und UA2 am SpS



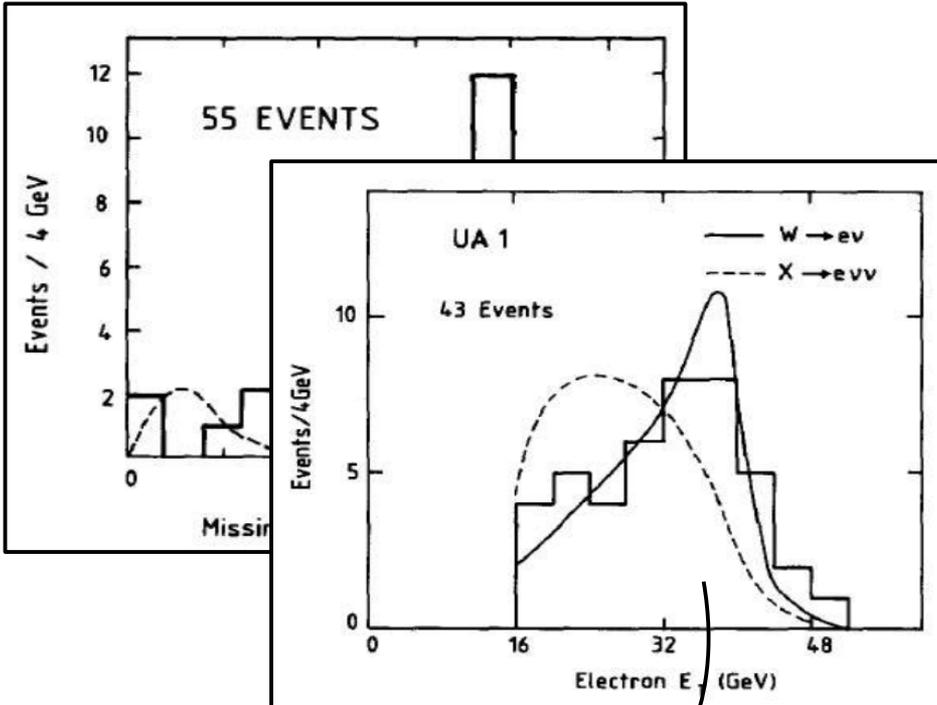
Rekonstruktion von  $\cancel{E}_T$ :



- Klar identifiziertes und isoliertes Elektron im Detektor ( $\rightarrow$  **55 aus 150'000 Ereignissen**)
- Ereignisse zeichnen sich durch außergewöhnlich große “fehlende Transversalenergie”  $\cancel{E}_T$  aus

# Entdeckung des W

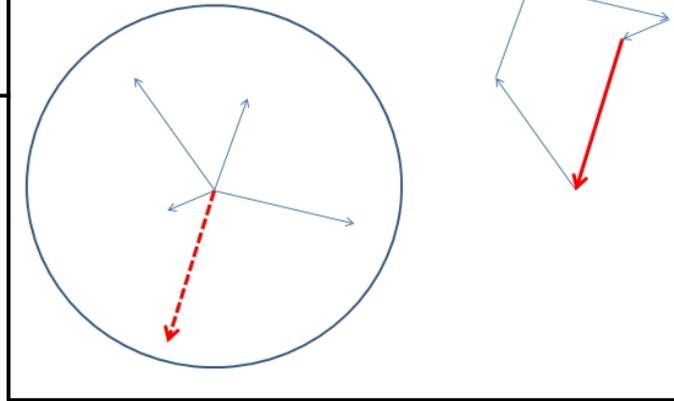
- Mit den Experimenten UA1 und UA2 am SppS



$$\cancel{E}_T \approx m_W/2$$



Rekonstruktion von  $\cancel{E}_T$ :



- Elektromagnetischer Schauer vollständig in ECAL enthalten
- $\cancel{E}_T > 15 \text{ GeV}$

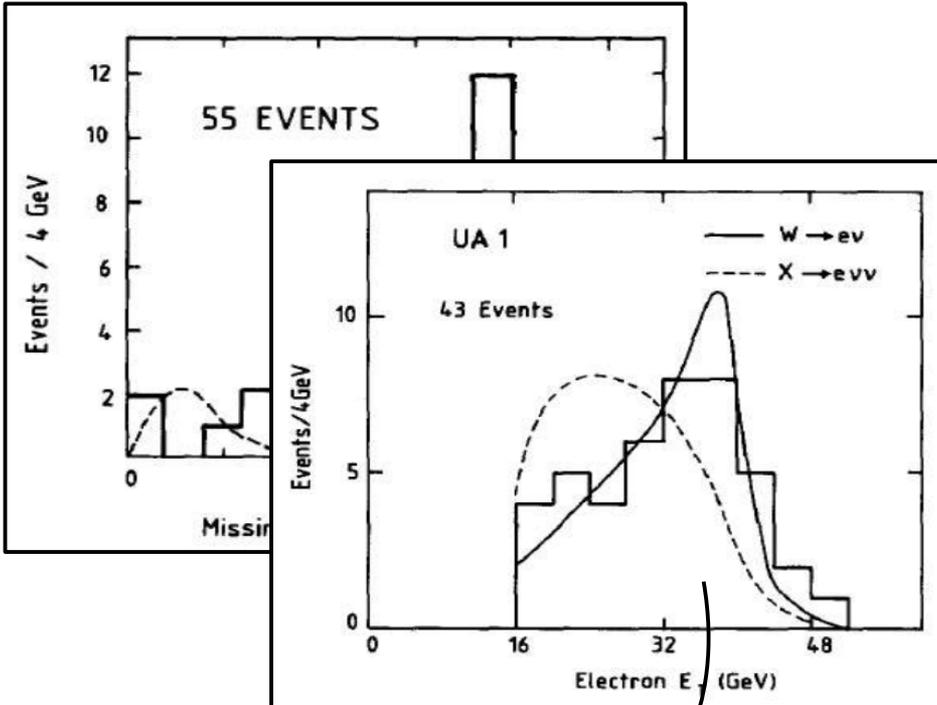
$$p_T(e) \approx \frac{m_W}{2} \cdot \sin \theta$$

$$\frac{d\sigma}{dp_T} = \frac{d\sigma}{d \cos \theta} \cdot \frac{d \cos \theta}{dp_T} = ?$$

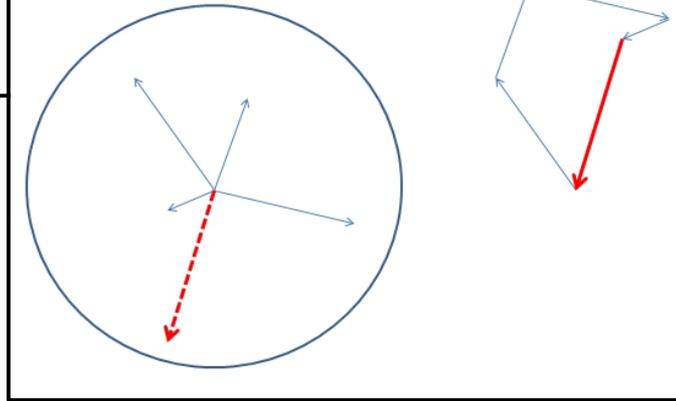
Zeigen Sie, dass bei einem in Ruhe zerfallenden W-Boson der WQ bei  $\cancel{E}_T \approx m_W/2$  ein Maximum aufweist

# Entdeckung des W

- Mit den Experimenten UA1 und UA2 am SppS



Rekonstruktion von  $\cancel{E}_T$ :



- Elektromagnetischer Schauer vollständig in ECAL enthalten
- $\cancel{E}_T > 15$  GeV

$$p_T(e) \approx \frac{m_W}{2} \cdot \sin \theta$$

$$\frac{d\sigma}{dp_T} = \frac{d\sigma}{d \cos \theta} \cdot \frac{d \cos \theta}{dp_T} =$$

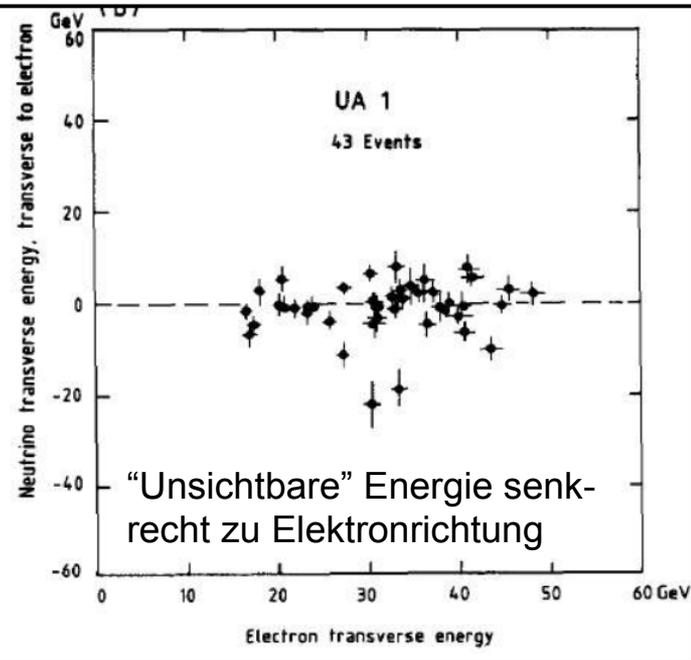
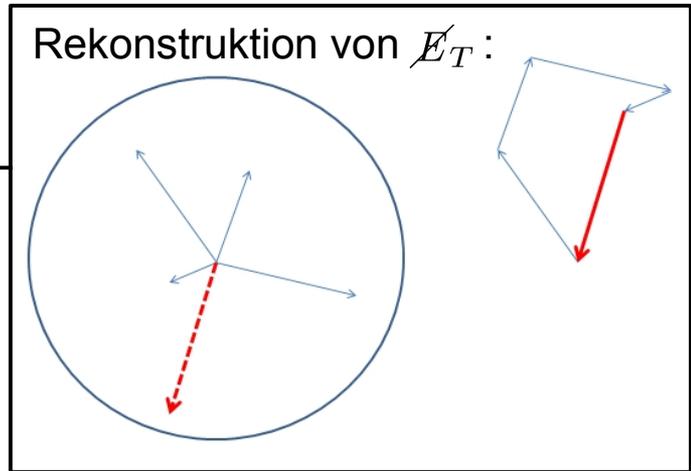
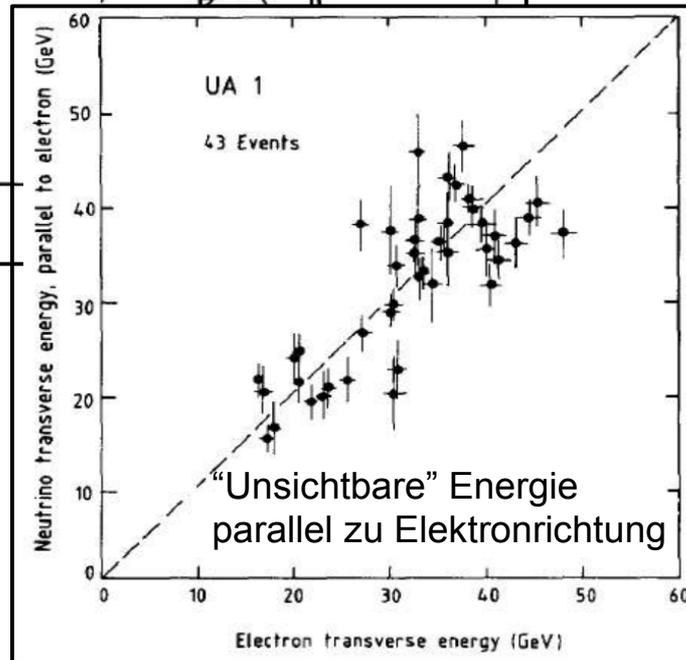
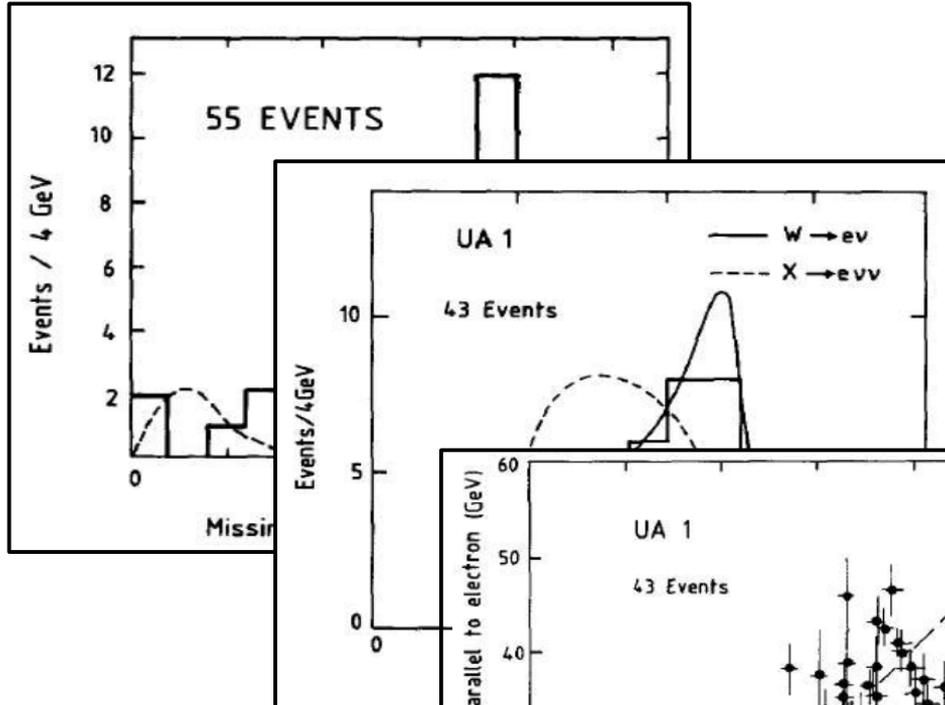
$$= \frac{d\sigma}{d \cos \theta} \cdot \frac{2 p_T / m_W}{\sqrt{\left(\frac{m_W}{2}\right)^2 - p_T^2}}$$

$$\cancel{E}_T \approx m_W / 2$$



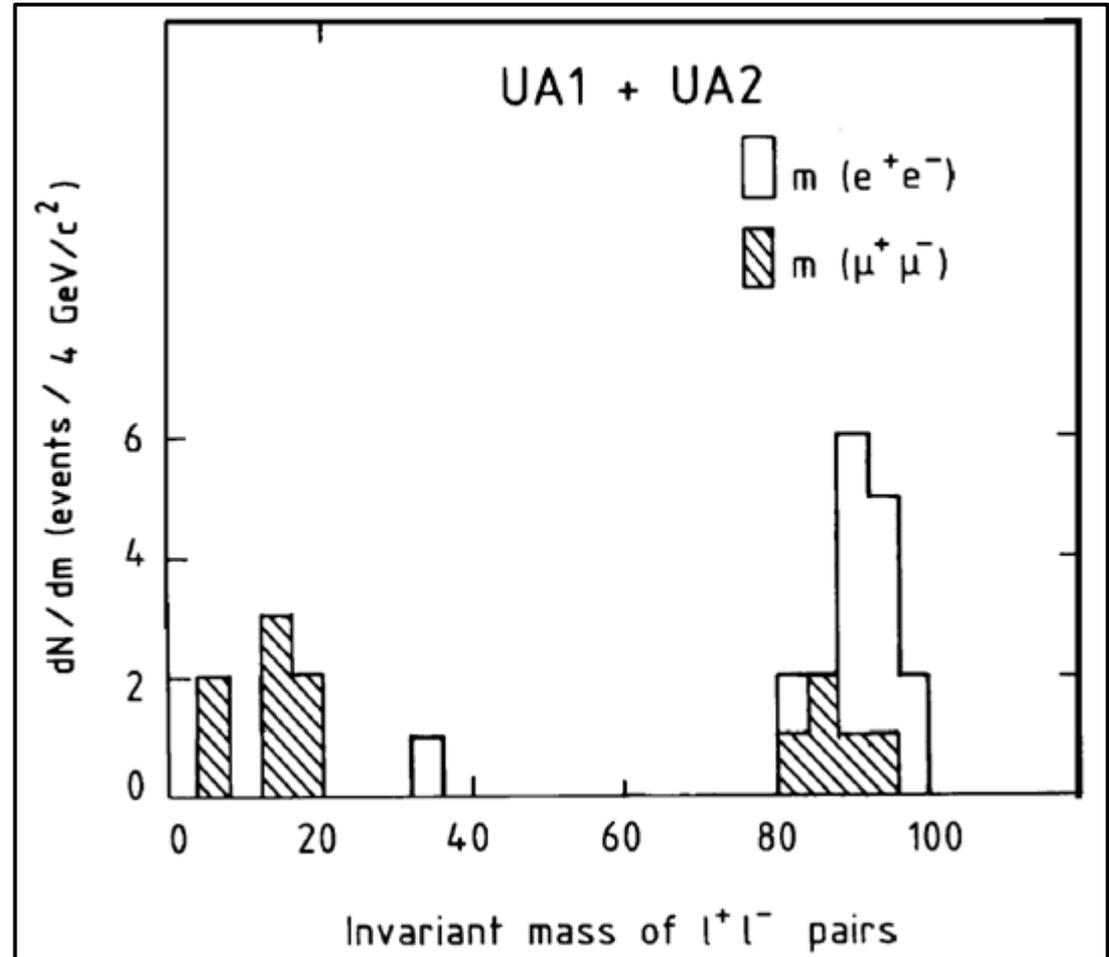
# Entdeckung des W

- Mit den Experimenten UA1 und UA2 am SppS



# Entdeckung des Z

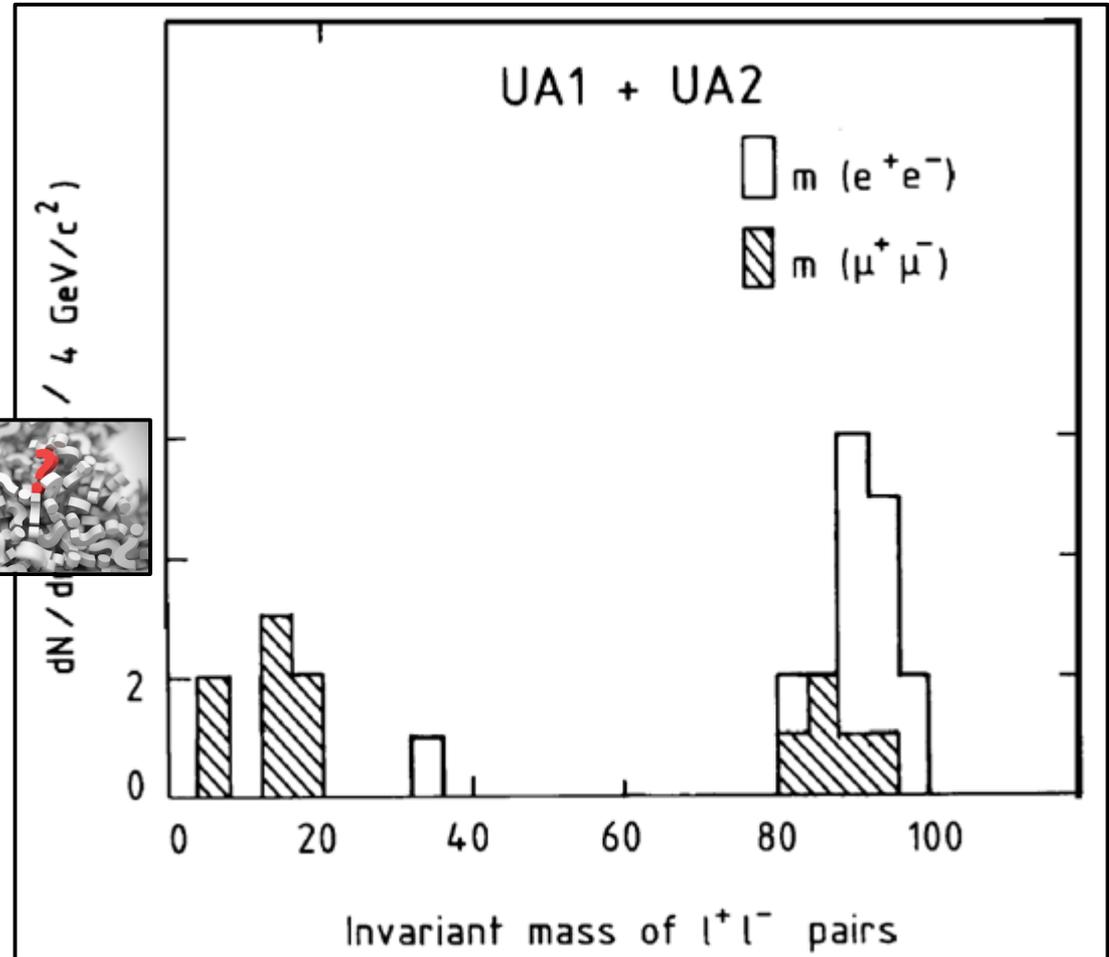
- Mit den Experimenten UA1 und UA2 am SpS
- Zwei klar identifizierte isoliert im Detektor auftretende Leptonen (Elektron oder Myon)



# Entdeckung des Z

- Mit den Experimenten UA1 und UA2 am SpS
- Zwei klar identifizierte isoliert im Detektor auftretende Leptonen (Elektron oder Myon)

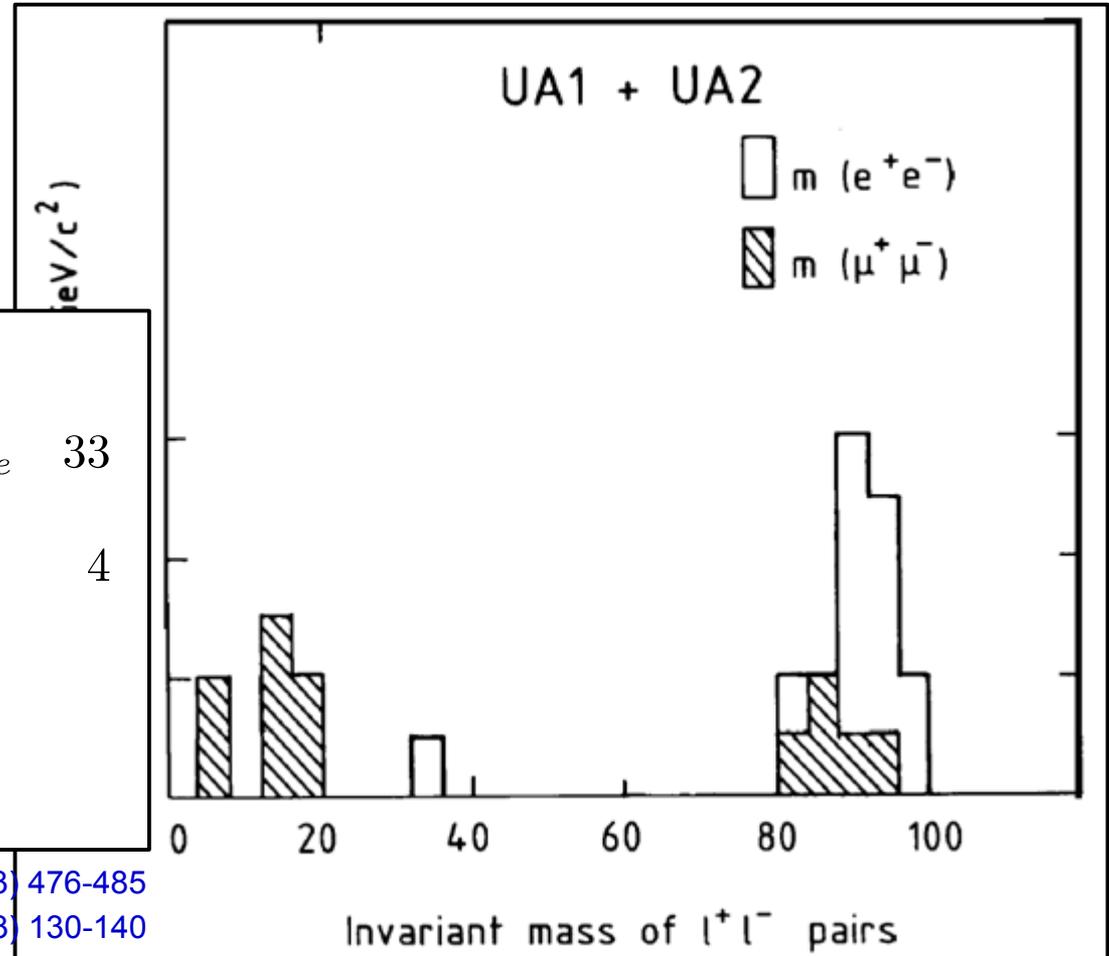
Warum verlangt man, dass die Leptonen isoliert von weiterer hadronischer Aktivität im Detektor auftreten?



# Entdeckung des Z

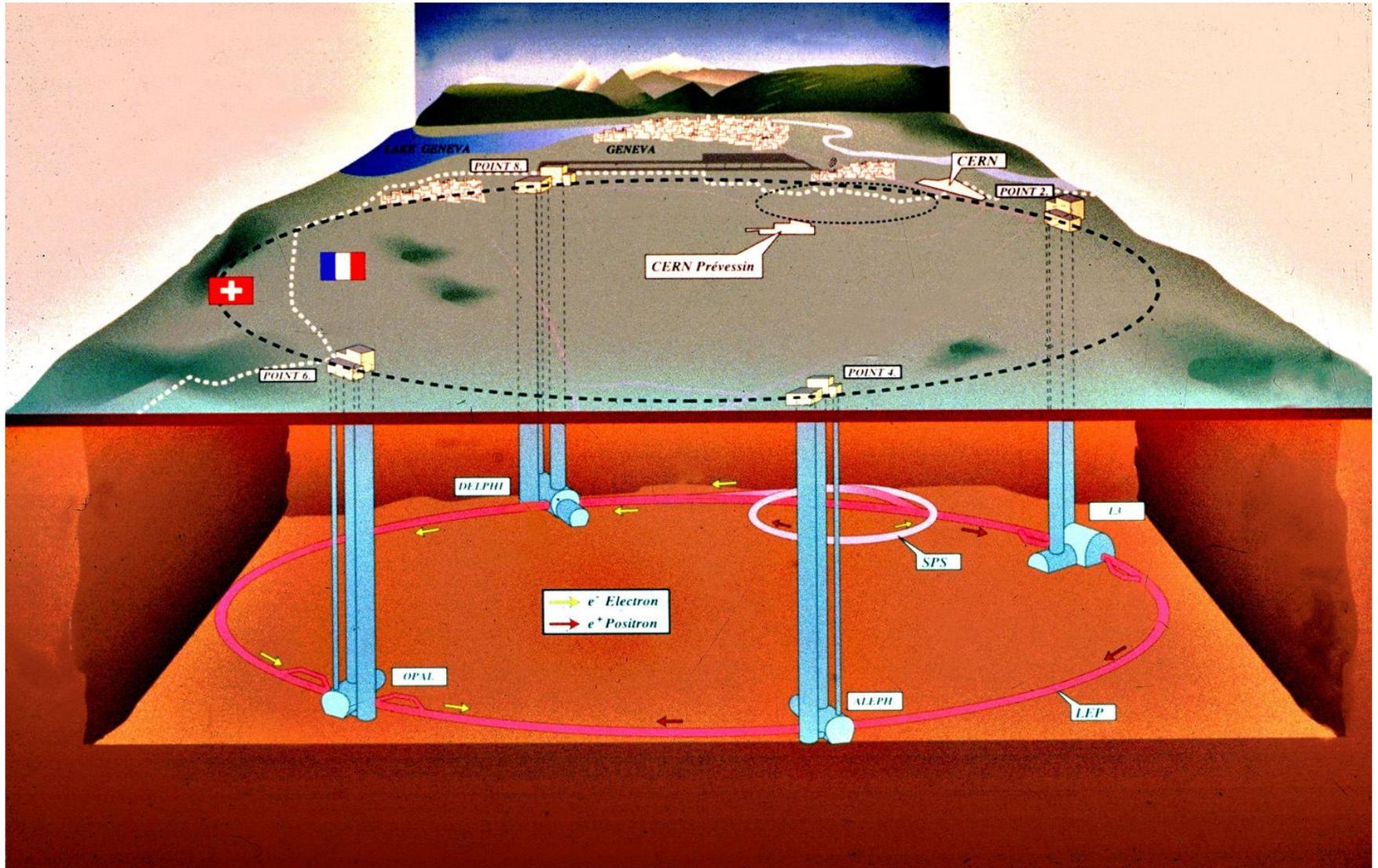
- Mit den Experimenten UA1 und UA2 am SpS
- Zwei klar identifizierte isoliert im Detektor auftretende Leptonen (Elektron oder Myon)
- Gefundene Ereignisse:

UA1		UA2	
$W \rightarrow e\nu_e$	43	$W \rightarrow e\nu_e$	33
$W \rightarrow \mu\nu_\mu$	14		
$Z \rightarrow ee$	5	$Z \rightarrow ee$	4
$Z \rightarrow \mu\mu$	5		
$m_W = 82.1 \pm 1.7 \text{ GeV}$			
$m_Z = 93.0 \pm 1.7 \text{ GeV}$			



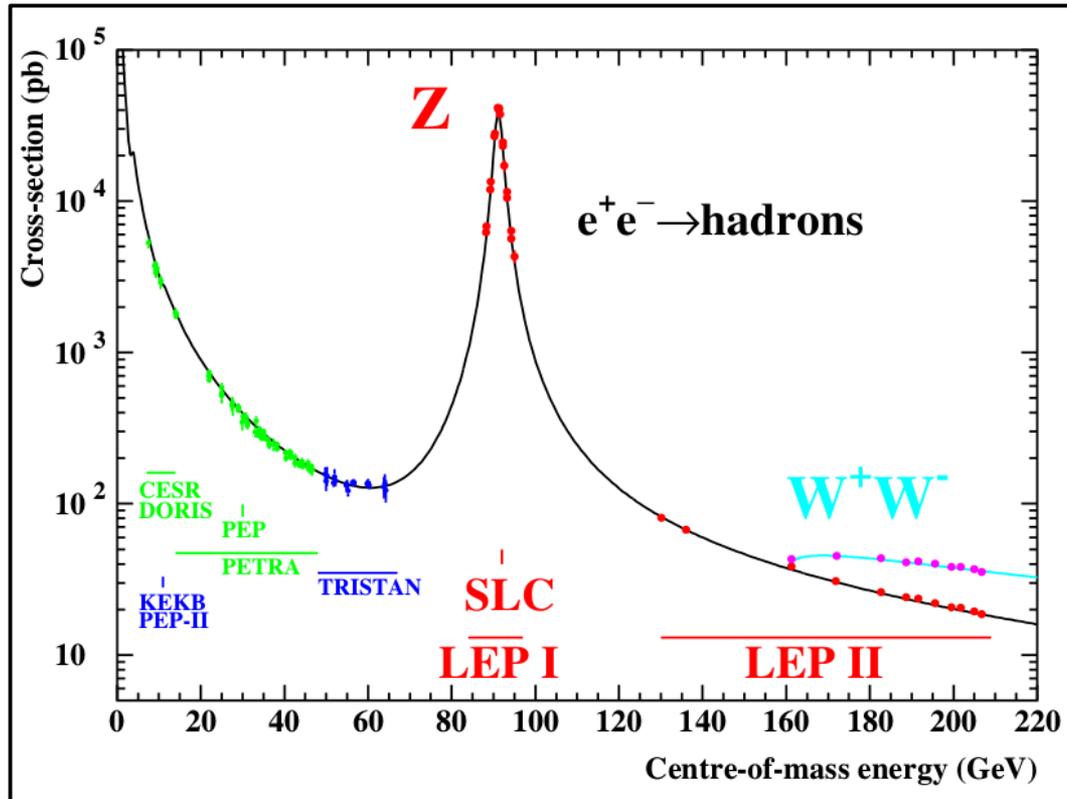
PLB 122 (1983) 103-116    PLB 122 (1983) 476-485  
 PLB 126 (1983) 398-410    PLB 129 (1983) 130-140

# Präzisionsmessungen auf der Z-Resonanz



# Präzisionsmessungen auf der Z-Resonanz

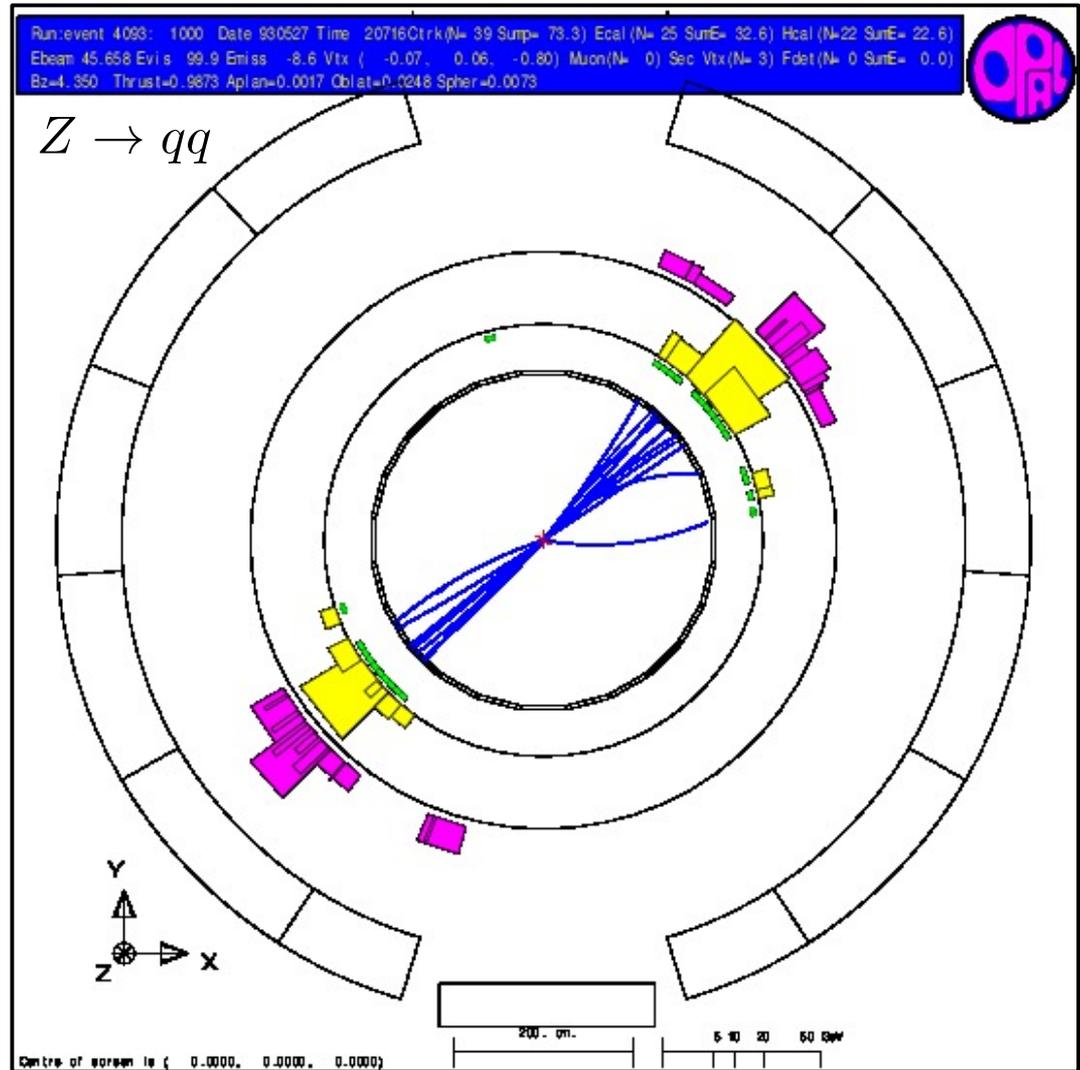
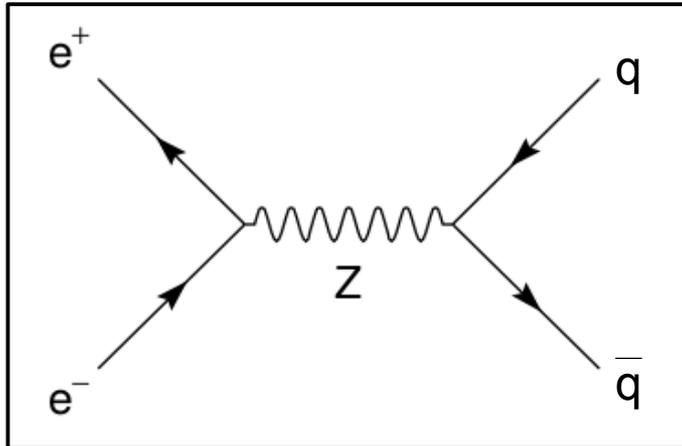
- $e^+e^-$ -Kollisionen bei  $\sqrt{s} \approx m_Z$  (während LEP-I Datennahmeperiode):



Year	Centre-of-mass energy range [GeV]	Integrated luminosity [pb <sup>-1</sup> ]
1989	88.2 – 94.2	1.7
1990	88.2 – 94.2	8.6
1991	88.5 – 93.7	18.9
1992	91.3	28.6
1993	89.4, 91.2, 93.0	40.0
1994	91.2	64.5
1995	89.4, 91.3, 93.0	39.8
		202.1

- $15 \cdot 10^6$   $Z \rightarrow qq$  events
- $1.7 \cdot 10^6$   $Z \rightarrow ll$  events

# Typisches $Z \rightarrow qq$ Ereignis bei LEP



# Anzahl aktiver Neutrino Flavor

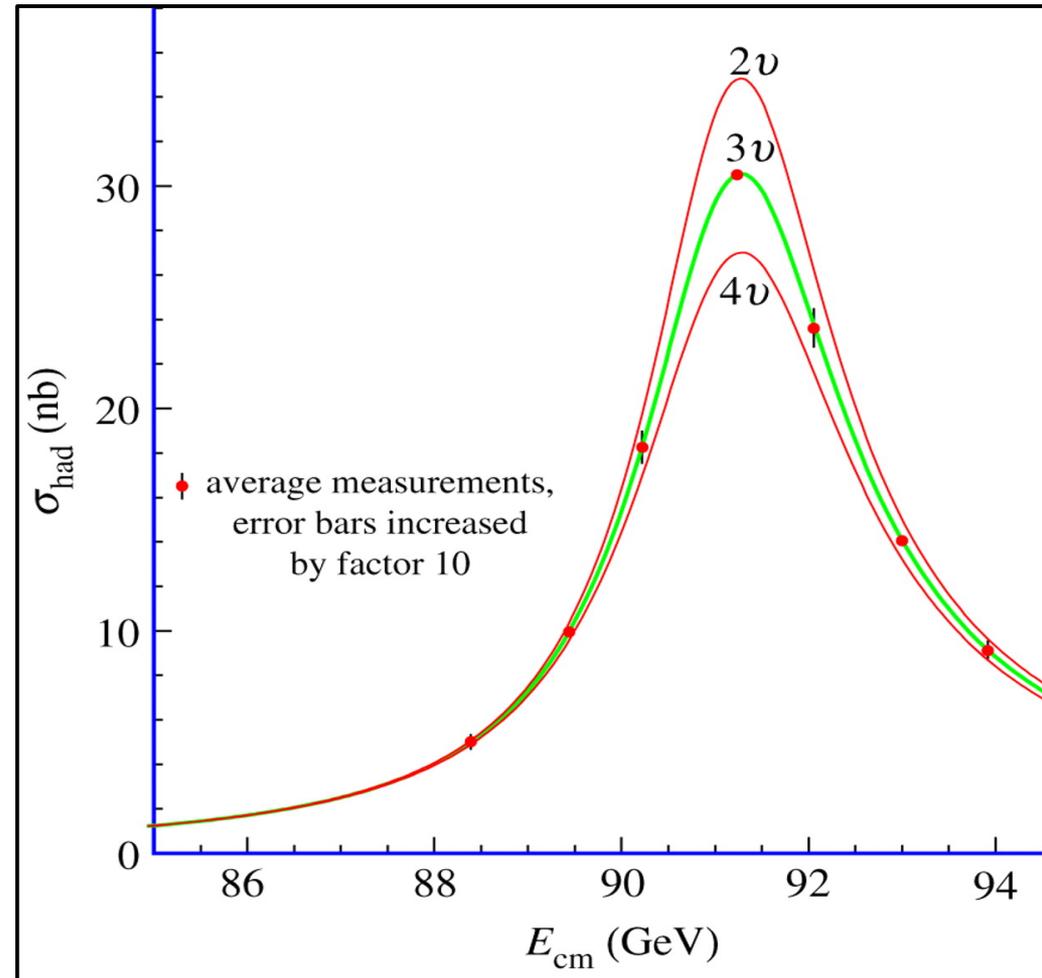
- Bestimmt aus Wirkungsquerschnitt (WQ) für  $Z \rightarrow qq$  in peak Region:

$$BR(Z \rightarrow qq) = \frac{\Gamma_{had}}{\sum \Gamma_i}$$

$$i = \{q_j\}, \{\ell_k\}, \{\nu_{\ell,k}\}$$

- Mehr unsichtbare Zerfälle (z.B. in  $\nu$ )  $\rightarrow$  **geringeres Verzweigungsverhältnis**  $BR(Z \rightarrow qq)$
- $\sigma_{had}$  um 13% niedriger für vier statt drei Neutrino-Generationen
- Ergebnis aus Anpassung an Daten:  

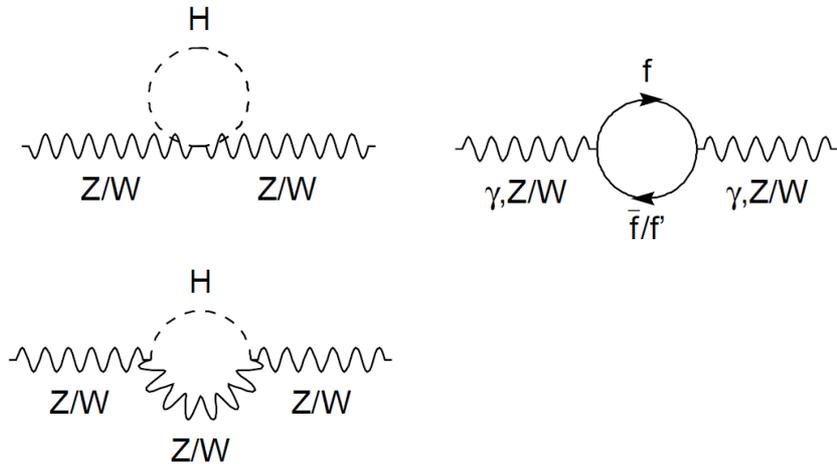
$$N_\nu = 2.984 \pm 0.008 \quad (2001)$$



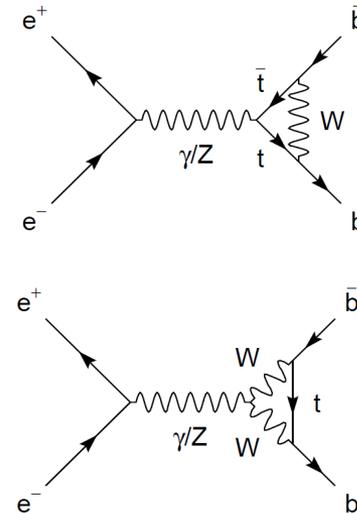
# Effekte höherer Ordnung

- Teilchen die (bei niedrigen Skalen) nicht direkt beobachtet werden können haben immer noch **Einfluß auf Meßgrößen durch Effekte höherer Ordnung**

Higgs/Top in “Propagator Schleifen”:



Top-Quark in “Vertex-Schleifen”:



- Indirekte Abhängigkeiten der effektiven W/Z-Masse und der Kopplung an Quarks von Top-Quark und Higgs-Boson Masse

# Korrekturen höherer Ordnung auf $m_W$

$$m_W^2 = \frac{m_Z^2}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - 4 \frac{\alpha \pi}{\sqrt{2} G_F m_Z^2} \cdot \frac{1}{1 - \Delta r}} \right) \quad \Delta r = \Delta \alpha + \Delta r_W$$

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_{\text{lep}} + \Delta \alpha_{\text{top}} + \Delta \alpha_{\text{had}}^{(5)}$$

$$\Delta r_W(m_t, m_H) \simeq \frac{\alpha}{\pi \sin^2 \theta_W} \left( -\frac{3 \cos^2 \theta_W}{16 \sin^2 \theta_W} \frac{m_t^2}{m_W^2} + \frac{11}{24} \log(m_H/m_Z) \right)$$

(1-loop precision)

 $\propto m_t^2$  $\propto \log(m_H)$ 

- Effekte setzen ein bei  $\mathcal{O}(\alpha)$  (Amplituden-Niveau)  $\rightarrow \mathcal{O}(\alpha^2) \approx \mathcal{O}(10^{-4})$  (Cross-Section Niveau)  $\rightarrow$  **höchste Präzision erforderlich** bei Observablen aber auch theoretischer Vorhersage

# Elektroschwache Präzisions Observablen bei LEP

Pseudo-Observable	Measured Value		
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02758	$\pm$	0.00034
$m_Z$ [GeV]	91.1875	$\pm$	0.0021
$\Gamma_Z$ [GeV]	2.4952	$\pm$	0.0023
$\sigma_{\text{had}}^0$ [nb]	41.540	$\pm$	0.037
$R_l^0$	20.767	$\pm$	0.025
$R_b^0$	0.21629	$\pm$	0.00066
$R_c^0$	0.1721	$\pm$	0.0030
$A_{FB}^{0,l}$	0.0171	$\pm$	0.0010
$A_{FB}^{0,b}$	0.0992	$\pm$	0.0016
$A_{FB}^{0,c}$	0.0707	$\pm$	0.0035
$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lep}}$	0.2324	$\pm$	0.0012
$\mathcal{A}_l(\mathcal{P}_\tau)$	0.1465	$\pm$	0.0033
$\mathcal{A}_b$	0.923	$\pm$	0.020
$\mathcal{A}_c$	0.670	$\pm$	0.027
$\mathcal{A}_l(\text{SLD})$	0.1513	$\pm$	0.0021

(as of [hep-ex/0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008))

- 14(+1) Observablen
- Präzision zwischen  $\mathcal{O}(10^{-5})$  für  $m_Z$  und  $\mathcal{O}(10^{-2})$  für  $\mathcal{A}_l(\text{SLD})$  (incl. theoretischer Unsicherheiten).
- **Nutze**  $\propto m_t^2$ - und  $\propto \log(m_H)$ -Abhängigkeiten aufgrund höherer Ordnungen für  $m_W$  und  $\sin \theta_{\text{eff}}$  zur **Vorhersage für  $m_t$  und  $m_H$**

# $\Delta\alpha_{\text{had}}^5(m_Z)$ as additional “observable”

Pseudo-Observable	Measured Value		
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02758	$\pm$	0.00034
$m_Z$ [GeV]	91.1875	$\pm$	0.0021
$\Gamma_Z$ [GeV]	2.4952	$\pm$	0.0023
$\sigma_{\text{had}}^0$ [nb]	41.540	$\pm$	0.037
$R_l^0$	20.767	$\pm$	0.025
$R_b^0$	0.21629	$\pm$	0.00066
$R_c^0$	0.1721	$\pm$	0.0030
$A_{FB}^{0,l}$	0.0171	$\pm$	0.0010
$A_{FB}^{0,b}$	0.0992	$\pm$	0.0016
$A_{FB}^{0,c}$	0.0707	$\pm$	0.0035
$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lep}}$	0.2324	$\pm$	0.0012
$\mathcal{A}_l(\mathcal{P}_\tau)$	0.1465	$\pm$	0.0033
$\mathcal{A}_b$	0.923	$\pm$	0.020
$\mathcal{A}_c$	0.670	$\pm$	0.027
$\mathcal{A}_l(\text{SLD})$	0.1513	$\pm$	0.0021

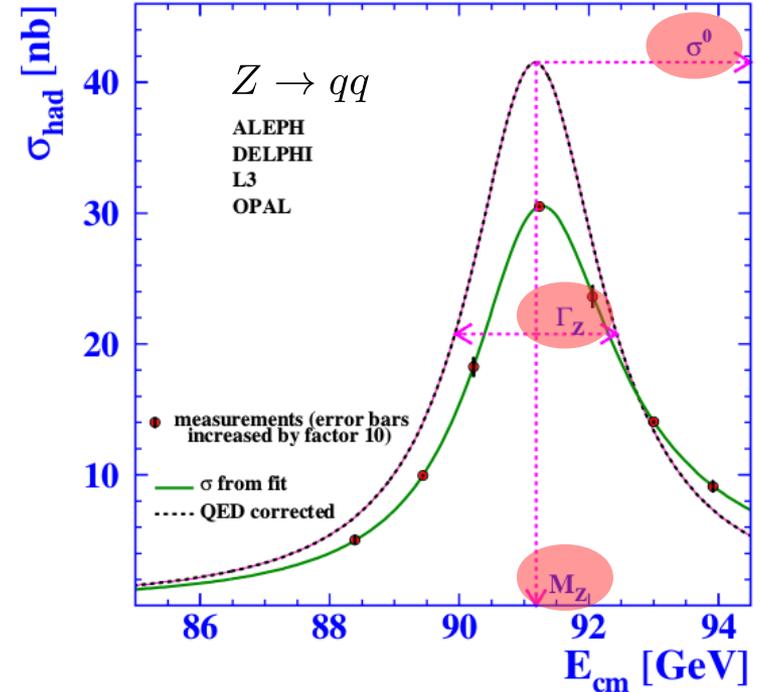
(as of [hep-ex/0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008))

- $\Delta\alpha_{\text{had}}^5(m_Z)$  as obtained from independent measurements at lower energies.

# Z-pole observables

Pseudo-Observable	Measured Value	
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02758	$\pm 0.00034$
$m_Z$ [GeV]	91.1875	$\pm 0.0021$
$\Gamma_Z$ [GeV]	2.4952	$\pm 0.0023$
$\sigma_{\text{had}}^0$ [nb]	41.540	$\pm 0.037$
$R_l^0$	20.767	$\pm 0.025$
$R_b^0$	0.21629	$\pm 0.00066$
$R_c^0$	0.1721	$\pm 0.0050$
$A_{FB}^{0,l}$	0.0171	$\pm 0.0010$
$A_{FB}^{0,b}$	0.0992	$\pm 0.0016$
$A_{FB}^{0,c}$	0.0707	$\pm 0.0035$
$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lep}}$	0.2324	$\pm 0.0012$
$\mathcal{A}_l(\mathcal{P}_\tau)$	0.1465	$\pm 0.0033$
$\mathcal{A}_b$	0.923	$\pm 0.020$
$\mathcal{A}_c$	0.670	$\pm 0.027$
$\mathcal{A}_l(\text{SLD})$	0.1513	$\pm 0.0021$

(as of [hep-ex/0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008))



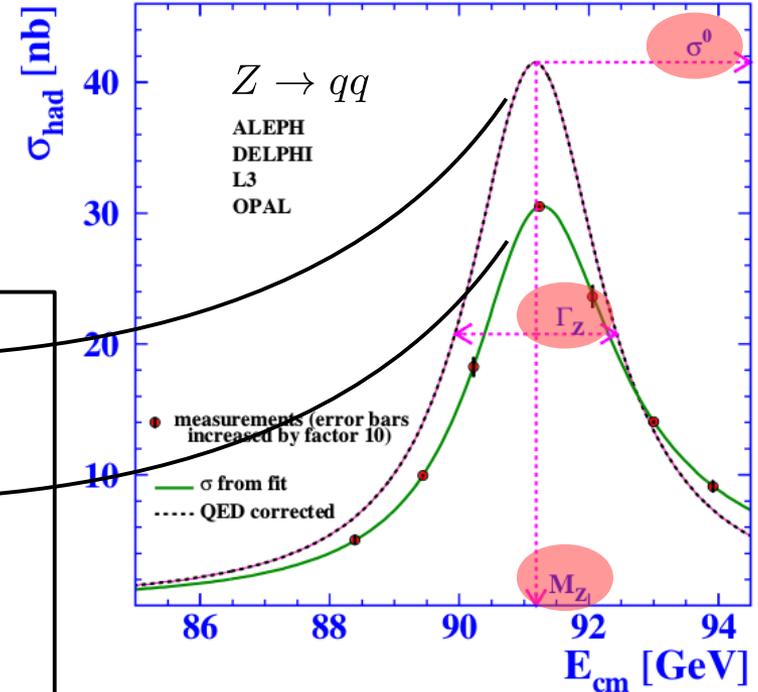
# Z-pole observables

Pseudo-Observable	Measured Value	
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02758	$\pm 0.00034$
$m_Z$ [GeV]	91.1875	$\pm 0.0021$
$\Gamma_Z$ [GeV]	2.4952	$\pm 0.0023$
$\sigma_{\text{had}}^0$ [nb]	41.540	$\pm 0.037$

After correction for HO effects. ←

Actual measurement. ←

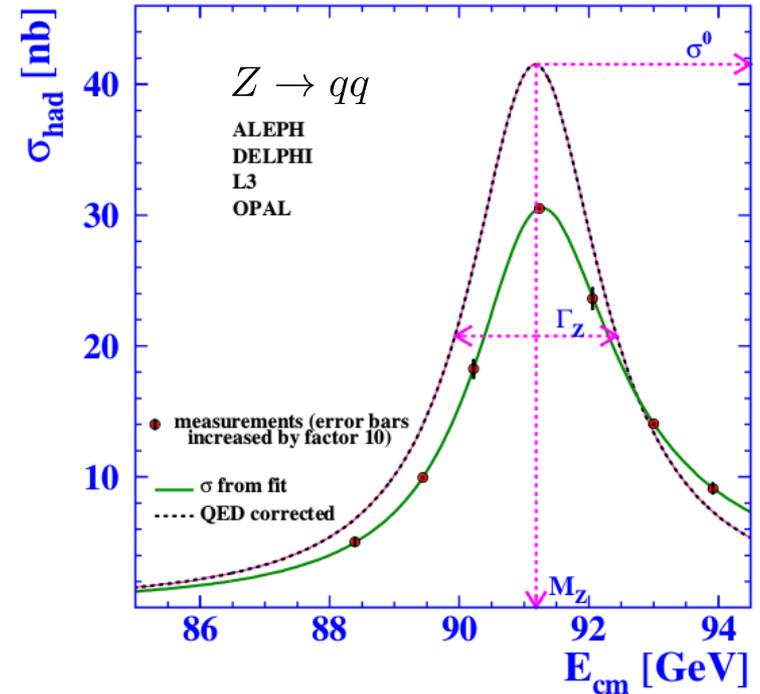
- ISR up to  $\mathcal{O}(\alpha^3)$ .
- FSR up to  $\mathcal{O}(\alpha_s^3)$  and  $\mathcal{O}(\alpha \cdot \alpha_s)$ .
- ISR FSR interference effects up to  $\mathcal{O}(\alpha)$ .
- Since corrections are sizable these variables are referred to as “**pseudo-observables**”.



# Partial decay widths

Pseudo-Observable	Measured Value	
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02758	$\pm 0.00034$
$m_Z$ [GeV]	91.1875	$\pm 0.0021$
$\Gamma_Z$ [GeV]	2.4952	$\pm 0.0023$
$\sigma_{\text{had}}^0$ [nb]	41.540	$\pm 0.037$
$R_l^0$	20.767	$\pm 0.025$
$R_b^0$	0.21629	$\pm 0.00066$
$R_c^0$	0.1721	$\pm 0.0030$
$A_{FB}^{0,l}$	0.0171	$\pm 0.0010$
$A_{FB}^{0,b}$	0.0992	$\pm 0.0016$
$A_{FB}^{0,c}$	0.0707	$\pm 0.0035$
$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lep}}$	0.2324	$\pm 0.0012$
$\mathcal{A}_l(\mathcal{P}_\tau)$	0.1465	$\pm 0.0033$
$\mathcal{A}_b$	0.923	$\pm 0.020$
$\mathcal{A}_c$	0.670	$\pm 0.027$
$\mathcal{A}_l(\text{SLD})$	0.1513	$\pm 0.0021$

(as of [hep-ex/0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008))



Ratios of partial decay widths:

$$R_\ell^0 = \frac{\Gamma_{\text{had}}^0}{\Gamma_{\ell\ell}} \quad R_c^0 = \frac{\Gamma_{cc}}{\Gamma_{\text{had}}^0} \quad R_b^0 = \frac{\Gamma_{bb}}{\Gamma_{\text{had}}^0}$$

$$\Gamma_{\text{had}}^0 = \frac{\sigma_{\text{had}}^0 m_Z^2}{12\pi} \cdot \frac{\Gamma_Z^2}{\Gamma_{ee}}$$

# Asymmetries ( $\rightarrow$ sensitive to $\sin \theta_{\text{eff}}$ )

Pseudo-Observable	Measured Value		
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02758	$\pm$	0.00034
$m_Z$ [GeV]	91.1875	$\pm$	0.0021
$\Gamma_Z$ [GeV]	2.4952	$\pm$	0.0023
$\sigma_{\text{had}}^0$ [nb]	41.540	$\pm$	0.037
$R_l^0$	20.767	$\pm$	0.025
$R_b^0$	0.21629	$\pm$	0.00066
$R_c^0$	0.1721	$\pm$	0.0030
$A_{FB}^{0,l}$	0.0171	$\pm$	0.0010
$A_{FB}^{0,b}$	0.0992	$\pm$	0.0016
$A_{FB}^{0,c}$	0.0707	$\pm$	0.0035
$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lep}}$	0.2324	$\pm$	0.0012
$\mathcal{A}_l(\mathcal{P}_\tau)$	0.1465	$\pm$	0.0033
$\mathcal{A}_b$	0.923	$\pm$	0.020
$\mathcal{A}_c$	0.670	$\pm$	0.027
$\mathcal{A}_l(\text{SLD})$	0.1513	$\pm$	0.0021

(as of [hep-ex/0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008))

- Z boson has different coupling to left- and right-handed fermions.
- Leads to:
  - net polarization in final states.
  - different rates on polarized beams.

$$\mathcal{A}_f = \frac{g_L^2 - g_R^2}{g_L^2 + g_R^2} \Big|_f = \frac{2g_V g_A}{g_V^2 + g_A^2} \Big|_f$$

$$\frac{g_V}{g_A} \Big|_f = 1 - 4|Q_f| \sin^2 \theta_{\text{eff}}$$

$$A_{FB}^{0,f} = \frac{3}{4} \mathcal{A}_e \mathcal{A}_f$$

$$\langle \mathcal{P}_\tau^0 \rangle = -\mathcal{A}_\tau$$

# Asymmetries ( $\rightarrow$ sensitive to $\sin \theta_{\text{eff}}$ )

Pseudo-Observable	Measured Value
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02758 $\pm$ 0.00034
$m_Z$ [GeV]	91.1875 $\pm$ 0.0021
$\Gamma_Z$ [GeV]	2.4952 $\pm$ 0.0023
$\sigma_{\text{had}}^0$ [nb]	41.540 $\pm$ 0.037
$R_l^0$	20.767 $\pm$ 0.025
$R_b^0$	0.21629 $\pm$ 0.00066
$R_c^0$	0.1721 $\pm$ 0.0030
$A_{FB}^{0,l}$ $A_{FB}^{0,b}$ $A_{FB}^{0,c}$ $\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lep}}$	Forward-Backward Asymmetry
$\mathcal{A}_l(\mathcal{P}_\tau)$	0.1465 $\pm$ 0.0033
$\mathcal{A}_b$	0.923 $\pm$ 0.020
$\mathcal{A}_c$	0.670 $\pm$ 0.027
$\mathcal{A}_l(\text{SLD})$	0.1513 $\pm$ 0.0021

(as of [hep-ex/0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008))

- Z boson has different coupling to left- and right-handed fermions.
- Leads to:
  - net polarization in final states.
  - different rates on polarized beams.

$$\mathcal{A}_f = \frac{g_L^2 - g_R^2}{g_L^2 + g_R^2} \Big|_f = \frac{2g_V g_A}{g_V^2 + g_A^2} \Big|_f$$

$$\frac{g_V}{g_A} \Big|_f = 1 - 4|Q_f| \sin^2 \theta_{\text{eff}}$$

$$A_{FB}^{0,f} = \frac{3}{4} \mathcal{A}_e \mathcal{A}_f$$

$$\langle \mathcal{P}_\tau^0 \rangle = -\mathcal{A}_\tau$$

# Asymmetries ( $\rightarrow$ sensitive to $\sin \theta_{\text{eff}}$ )

Pseudo-Observable	Measured Value	
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02758	$\pm$ 0.00034
$m_Z$ [GeV]	91.1875	$\pm$ 0.0021
$\Gamma_Z$ [GeV]	2.4952	$\pm$ 0.0023
$\sigma_{\text{had}}^0$ [nb]	41.540	$\pm$ 0.037
$R_l^0$	20.767	$\pm$ 0.025
$R_b^0$	0.21629	$\pm$ 0.00066
$R_c^0$	0.1721	$\pm$ 0.0030
$A_{FB}^{0,l}$	0.0171	$\pm$ 0.0010
$A_{FB}^{0,b}$	0.0992	$\pm$ 0.0016
$A_{FB}^{0,c}$	0.0707	$\pm$ 0.0035
$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lep}}$	0.2324	$\pm$ 0.0012
$\mathcal{A}_l(\mathcal{P}_\tau)$	0.1465	$\pm$ 0.0033
$\mathcal{A}_b$	0.0710	$\pm$ 0.020
$\mathcal{A}_c$	0.0710	$\pm$ 0.027
$\mathcal{A}_l(\text{SLD})$	0.1513	$\pm$ 0.0021

(as of [hep-ex/0509008](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0509008))

- Z boson has different coupling to left- and right-handed fermions.
- Leads to:
  - net polarization in final states.
  - different rates on polarized beams.

$$\mathcal{A}_f = \frac{g_L^2 - g_R^2}{g_L^2 + g_R^2} \Big|_f = \frac{2g_V g_A}{g_V^2 + g_A^2} \Big|_f$$

$$\frac{g_V}{g_A} \Big|_f = 1 - 4|Q_f| \sin^2 \theta_{\text{eff}}$$

$$A_{FB}^{0,f} = \frac{3}{4} \mathcal{A}_e \mathcal{A}_f$$

$$\langle \mathcal{P}_\tau^0 \rangle = -\mathcal{A}_\tau$$

# Parameter estimate

- Five parameter  $\chi^2$  fit:

Parameter	Best Fit Value	$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	$\alpha_s(m_Z)$	$m_Z$	$m_t$	$\log(m_H/\text{GeV})$
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	$0.02759 \pm 0.00035$	1.0				
$\alpha_s(m_Z)$	$0.1190 \pm 0.0027$	-0.04	1.0			
$m_Z$	$91.1874 \pm 0.0021$	-0.01	-0.03	1.0		
$m_t$	$173 \pm 11.5$	-0.03	0.19	-0.07	1.0	
$\log(m_H/\text{GeV})$	$2.05 \pm 0.385$	-0.29	0.25	-0.02	0.89	1.0

Fit of Z-pole observables only: <sup>(1)</sup>

$$\chi^2/n_{dof} = 16/10$$

$$\mathcal{P}(\chi^2) = 9.9\%$$

(2005)

Fit of Z-pole observables +  $m_W, \Gamma_W, m_t$ : <sup>(2)</sup>

$$\chi^2/n_{dof} = 16.9/13$$

$$\mathcal{P}(\chi^2) = 20.2\%$$

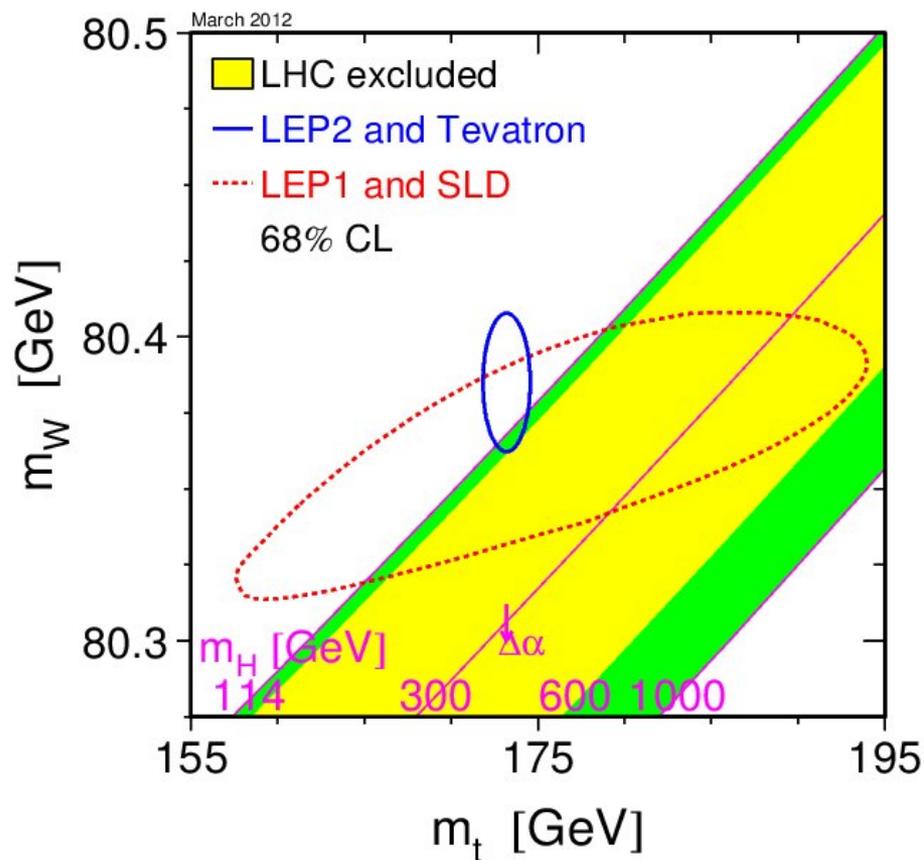
(2012)



<sup>(1)</sup> (as of hep-ex/0509008)

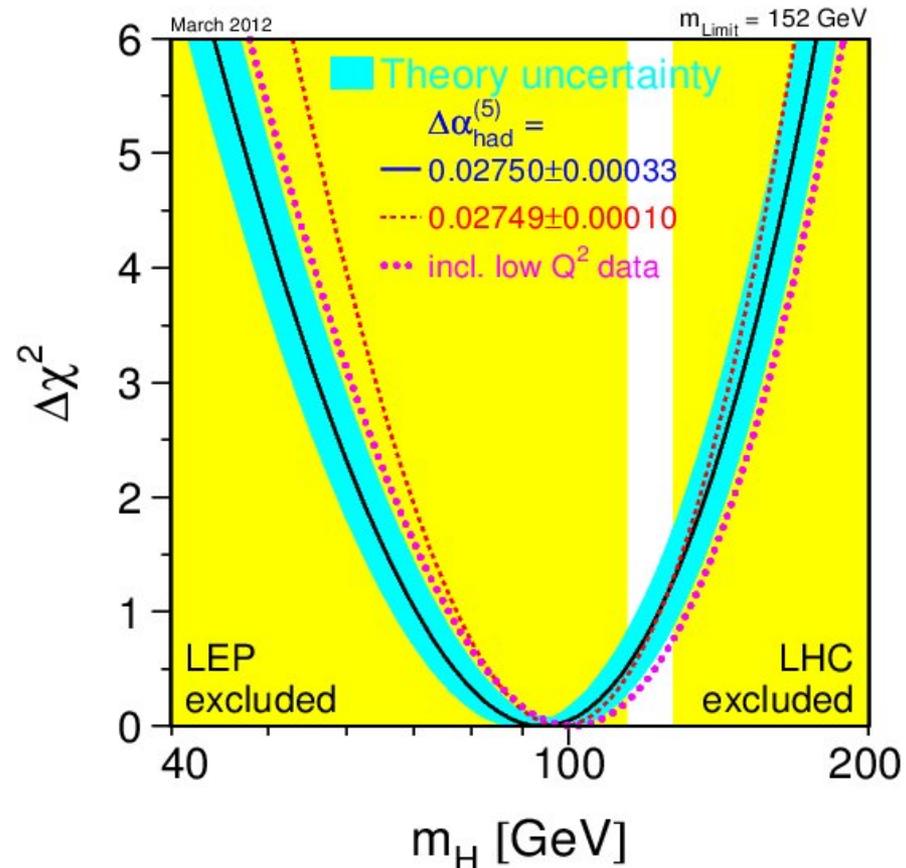
<sup>(2)</sup> [http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/winter12\\_results](http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/winter12_results)

# Main fit results



Z-pole +  $m_W + \Gamma_W$ :

$$m_t = 178.1 \pm_{7.8}^{10.9} \text{ GeV}$$

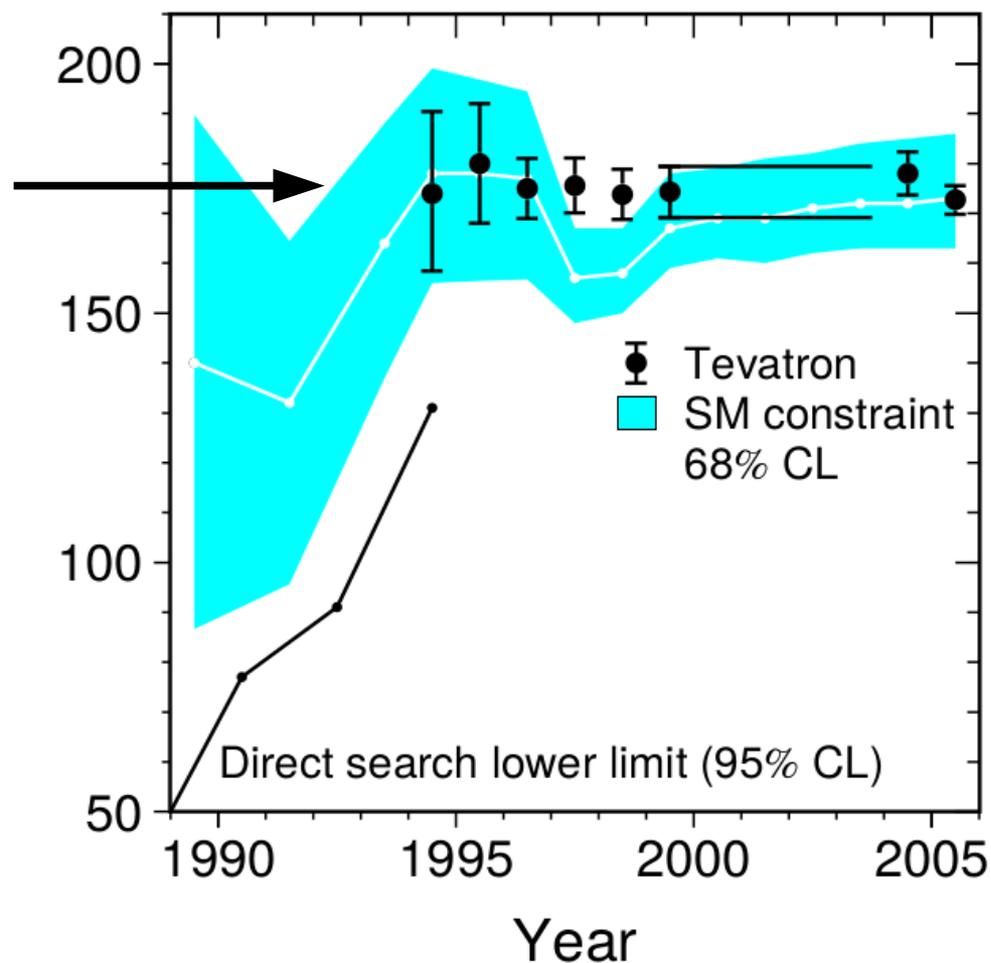


Z-pole +  $m_W + \Gamma_W + m_t$ :

$$m_H = 98 \pm_{21}^{25} \text{ GeV}$$

# Pre-discovery constraints on $m_t$ & $m_H$

- Consistency checks of the SM turned out as great success:
- Constraints on  $m_t$  spot on with direct measurements before discovery
- Constraints on  $m_H$  in good agreement with direct measurements before discovery



KW-26-28

**9 Elektroschwache Physik**

9.1 Eigenschaften der elektroschwachen Wechselwirkung . . . . .

9.2 Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung . . . . .

9.3 Quarkmischung und CP-Verletzung . . . . .

KW-29

**10 Moderne Teilchenphysik**

10.1 Schlüsselexperimente der elektroschwachen Wechselwirkung an Collidern . . . . .

10.2 Neutrino-physik . . . . .

10.3 Astroteilchenphysik . . . . .

KW-30

**11 Offene Fragen der Teilchenphysik**

11.1 Grenzen des SM . . . . .

11.2 Teilchenphysik und Kosmologie . . . . .

