2. Aktuelle experimentelle Tests des Standardmodells

2.1 Präzisionsmessungen der elektroschwachen Wechselwirkung

2.1.1 Messungen bei der Z^0- Resonanz

Am LEP-Speicherring am CERN wurde zwischen 1989 und 1995 (Phase LEP I) die Erzeugung von Fermion-Antifermion-Paaren in der e^+e^--Vernichtung bei der Z^0-Resonanz, d.h. bei einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = M_Z$ gemessen.

Bei dieser Energie vernichten sich die Elektronen und Positronen in der Kollisionszone im Zentrum des Detektors (Wechselwirkungspunkt) fast ausschließlich in reelle Z^0-Bosonen im Ruhesystem, die unter der elektroschwachen Wechselwirkung in Fermion-Antifermion-Paare mit $2m_f \leq M_Z$ zerfallen.

Im allgemeinen tritt Interferenz zwischen Photon- und Z^0-Austausch auf (elektroschwache Interferenz zwischen den beiden NC-Prozessen):

Als Funktion der Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 2E_e = \sqrt{q^2}$ und des Produktionswinkels θ des Fermions f bezüglich der Einfallsrichtung des Elektrons hat der Wirkungsquerschnitt im Schwerpunktsystem der e^+e^--Paare (=Laborsystem des Detektors) in niedrigster Ordnung die Form (siehe 3.6.5.1):

$$
\begin{aligned}
\frac{d\sigma}{d\Omega} (\; e^+e^- \to f\bar{f}) = \\
&= \quad \text{Konst.} \cdot s \cdot |\mathcal{M}_{QED} + \mathcal{M}_{\text{schwach}}|^2 \\
&= \quad \text{Konst.} \cdot s \cdot \left[|\mathcal{M}^2_{QED}|^2 + 2\mathcal{R}e(\mathcal{M}_{QED}\mathcal{M}_{\text{schwach}}) \right. \\
& \qquad\qquad\qquad \left. + \, |\mathcal{M}_{\text{schwach}}|^2 \right] \\
&= \quad N_C^f \frac{\alpha^2}{4s} [C_1^f (1 + \cos^2\theta) + C_2^f \cos\theta] \\
&= \quad \frac{1}{2\pi} \sigma_{f\bar{f}} [\frac{3}{8}(1 + \cos^2\theta) + A_{FB}^f \cos\theta]
\end{aligned}
$$

mit

$$
\begin{aligned}
C_1^f(s) &= Q_e^2 Q_f^2 + 8 Q_e Q_f v_e v_f \mathcal{R}e\chi(s) \\
&+ \quad 16(v_e^2 + a_e^2)(v_f^2 + a_f^2)|\chi(s)|^2
\end{aligned}
$$

$$
C_2^f(s) = 16 Q_e Q_f a_e a_f \mathcal{R}e\chi(s) + 32 v_e a_e v_f a_f |\chi(s)|^2
$$

$$
\sigma_{f\bar{f}}(s) = \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\cos\theta d\Phi = N_C^f \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \cdot C_1^f(s)
$$

$$
\begin{aligned}
A_{FB}^f(s) &= \frac{\int_0^{+1} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\cos\theta - \int_{-1}^{0} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\cos\theta}{\int_{-1}^{+1} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\cos\theta} \\
&= \quad \frac{N_F - N_B}{N_F + N_B} = \frac{3}{8} \cdot \frac{C_2^f(s)}{C_1^f(s)} \; ,
\end{aligned}
$$

den schwachen neutralen (Vektor- und Axialvektorstrom-) Kopplungskonstanten

$$
\begin{aligned}
v_f &= I_f^0 - 2Q_f \sin^2\theta_W \equiv \frac{1}{2} - 2Q_f \sin^2\theta_W \\
a_f &= I_f^0 \equiv \frac{1}{2}
\end{aligned}
$$

und dem Z^0-Propagatorterm

$$
\begin{aligned}
\chi(s) &= \frac{1}{16\sin^2\theta_W \cos^2\theta_W} \cdot \frac{s}{s - M_z^2 + iM_Z\Gamma_Z} \\
&= \frac{G_F M_Z^2}{8\pi\alpha\sqrt{2}} \cdot \frac{s}{s - M_z^2 + iM_Z\Gamma_Z}.
\end{aligned}
$$

Dabei ist im Schwerpunktsystem $q^2 = (p_1 + p_2)^2 =: s = E_{CMS}^2$ und $\sqrt{s} = 2E_e$.

Für den QED-Anteil (Photonaustausch allein) gilt:

$$
\Longrightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega}(e^+e^- \to f\bar{f}) = N_C^f \frac{\alpha^2 Q_f^2}{4s}(1 + \cos^2\theta);
$$

$$
\sigma_{f\bar{f}} = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} = \frac{87\ \mathrm{nb}}{s[\mathrm{GeV}^2]}.
$$

$N_C^f = 1$ für Leptonen, $N_C^f = 3$ für Quarks. Damit ist

$$
\begin{aligned}
R &= \sigma(e^+e^- \to \sum_{q(E_{CMS} > 2m_q)} q\bar{q}) / \sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-) \\
&= 3 \cdot \sum_{q(E_{CMS} > 2m_q)} Q_q^2
\end{aligned}
$$

Dabei ist schon berücksichtigt, daß das Z^0-Boson durch seine schwachen Zerfälle eine endliche Lebensdauer τ_Z und die Z^0-Resonanz im totalen Wirkungsquerschnitt $\sigma_{f\bar{f}}(s)$ eine endliche Breite $\Gamma_Z = \tau_Z^{-1}$ besitzt ($\Longrightarrow$ Breit-Wigner-Resonanzkurve).

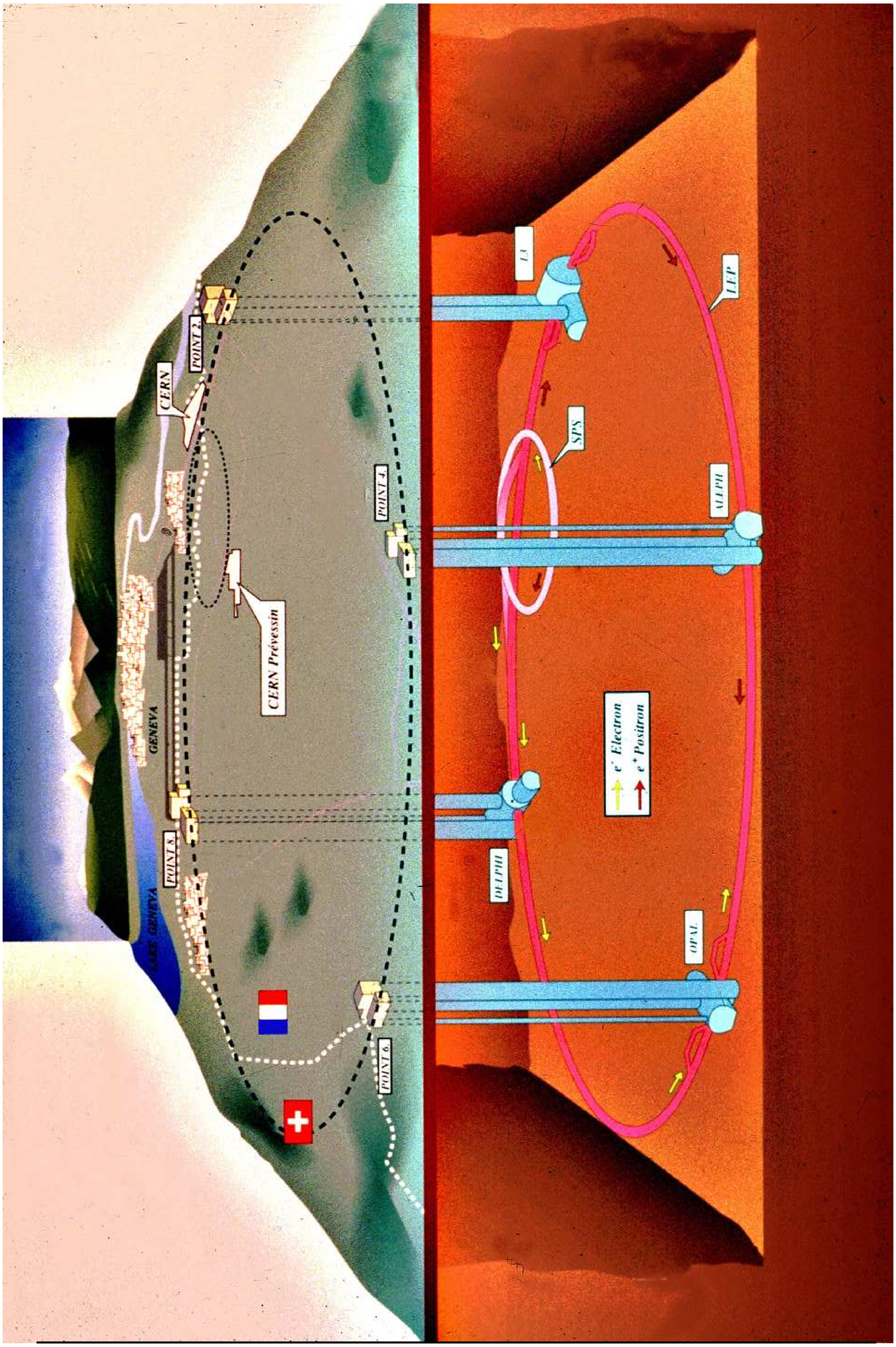
Exakt bei der Resonanz trägt nur der Z^0-Austausch bei und der Wirkungsqueschnitt ist

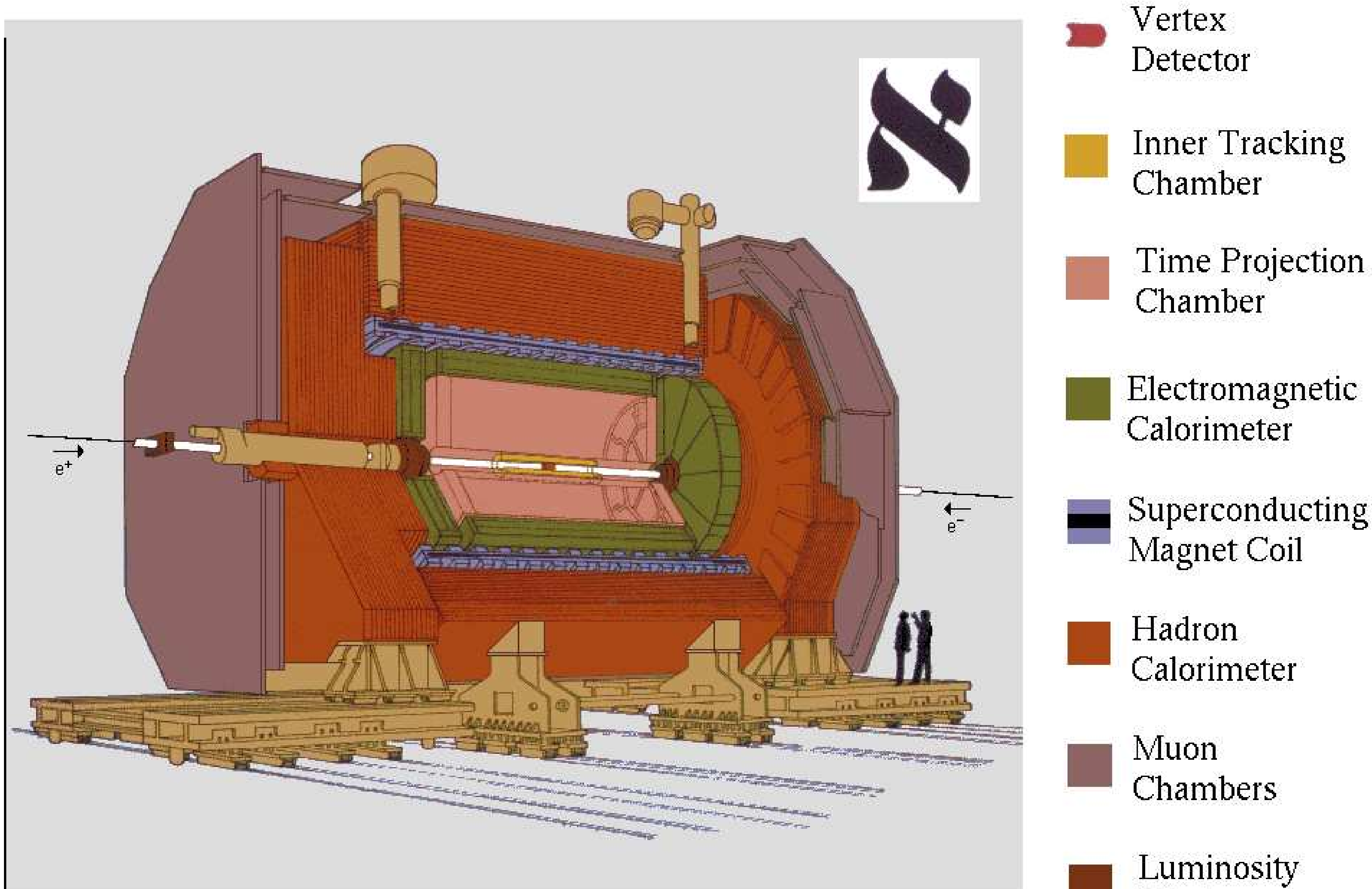
$$\begin{aligned}
\sigma^0_{f\bar{f}}(s = M_Z^2) &= N_C^f \frac{G_F^2 M_Z^4}{6\pi\Gamma_Z^2} \cdot (v_e^2 + a_e^2)(v_f^2 + a_f^2) \\
&= N_C^f \frac{12\pi\Gamma_Z^e\Gamma_Z^f}{M_Z^2\Gamma_Z^2}
\end{aligned}$$

mit den Zerfallswahrscheinlichkeiten (Zerfallsbreiten) des Z^0-Bosons:

$$\begin{aligned}
\Gamma(Z^0 \to f\bar{f}) &\equiv \Gamma_Z^f = \frac{G_F M_Z^3}{6\pi\sqrt{2}}(v_f^2 + a_f^2) \\
\Gamma(Z^0 \to e^+e^-) &\equiv \Gamma_Z^e = \frac{G_F M_Z^3}{6\pi\sqrt{2}}(v_e^2 + a_e^2) \\
\Gamma_Z &\equiv \sum_f \Gamma_Z^f \\
\Gamma_Z^{\text{had}} &\equiv \sum_q \Gamma_Z^q .
\end{aligned}$$

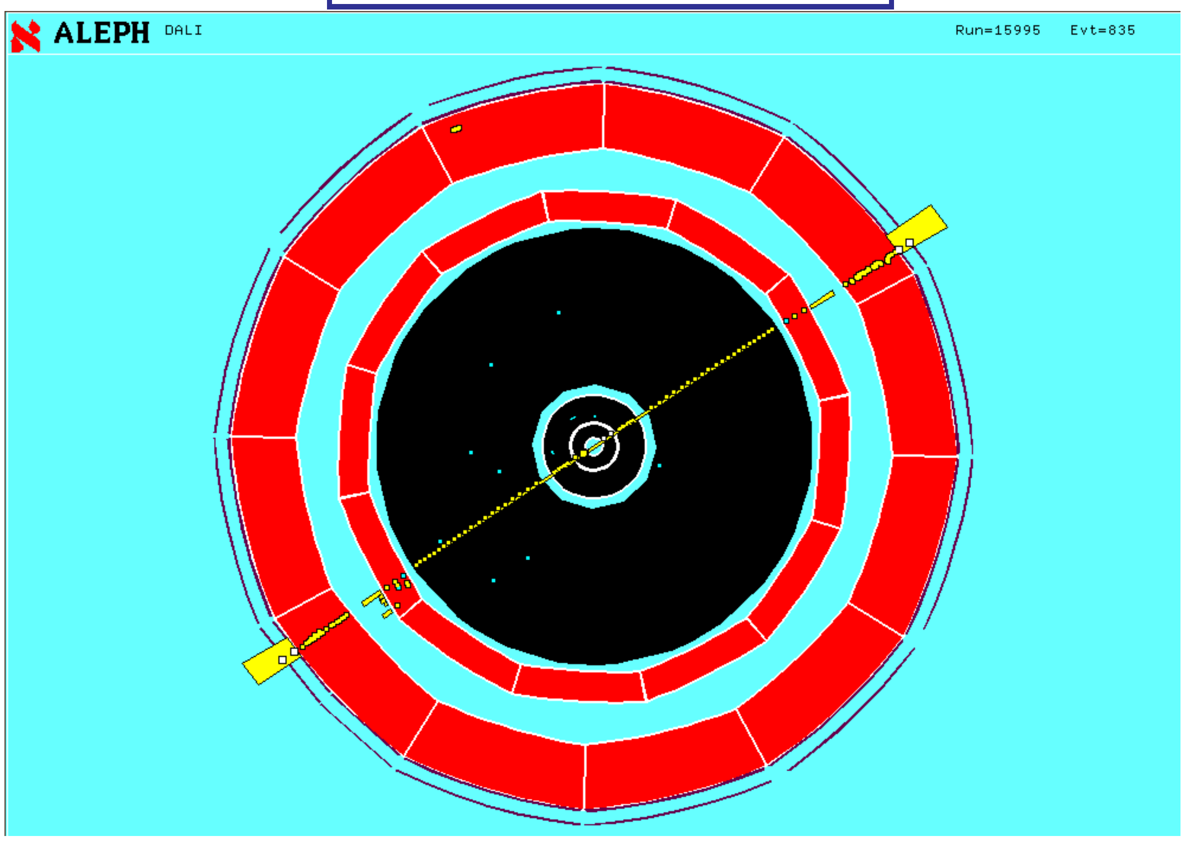
Definition: $R_f \equiv \Gamma_Z^{\text{had}}/\Gamma_Z^f$.


CERN
POINT 2
POINT 4
CERN Prévessin
GENEVA
LAKE GENEVA
POINT 8
POINT 6
L3
LEP
SPS
ALEPH
DELPHI
OPAL
e^- Electron
e^+ Positron

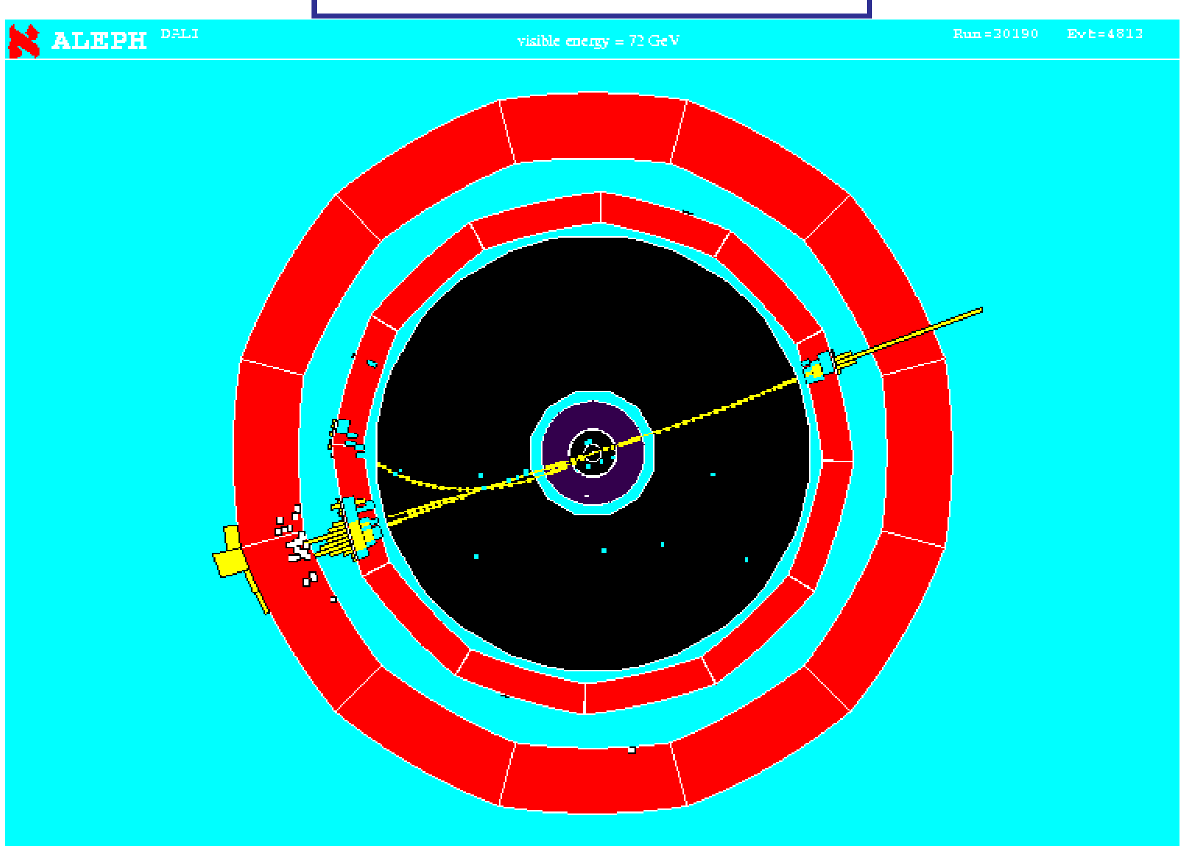


The ALEPH Detector

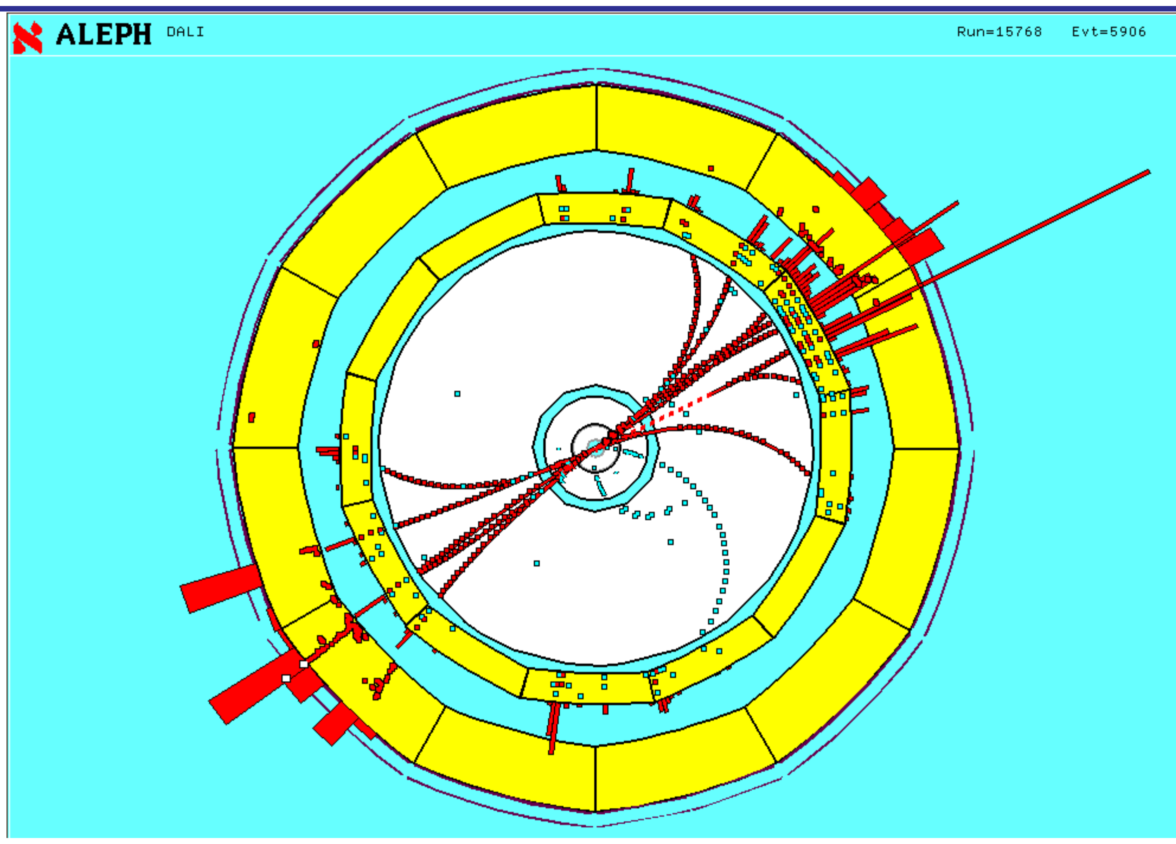
$$e^+e^- \longrightarrow \mu^+\mu^-$$



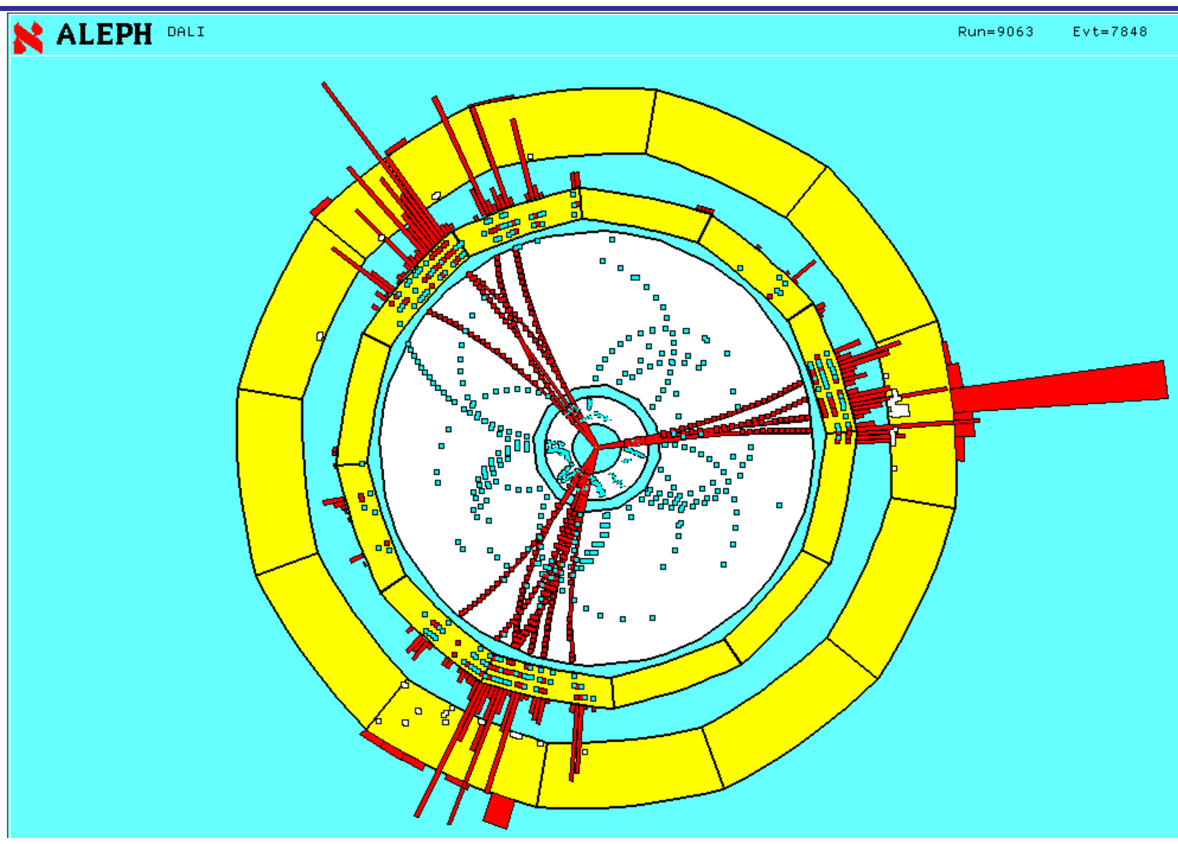
$$e^+e^- \longrightarrow \tau^+\tau^-$$



$$\boxed{e^+e^- \longrightarrow q\bar{q} \longrightarrow (\text{Hadronen})(\text{Hadronen})}$$



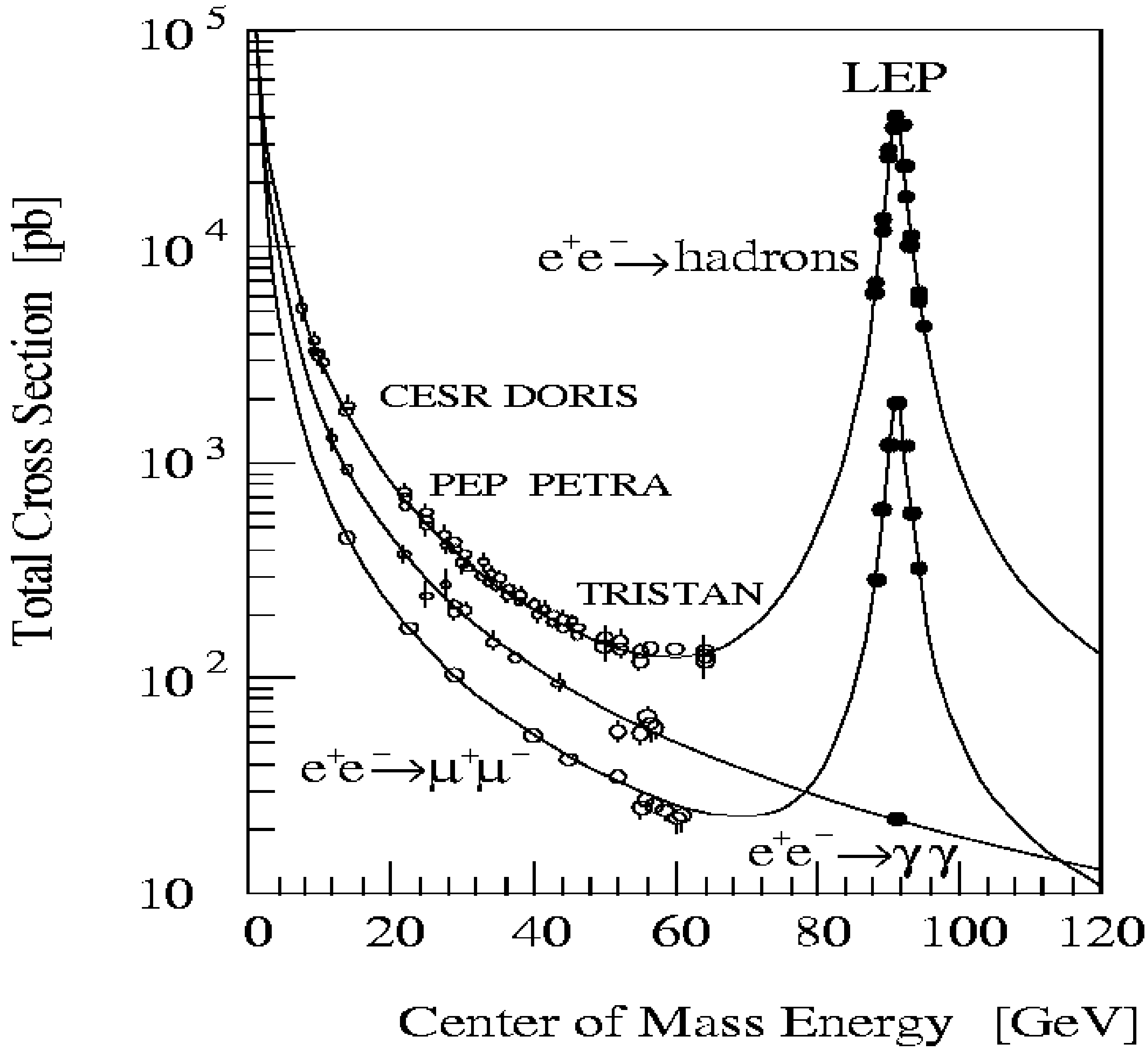
$$\boxed{e^+e^- \longrightarrow q\bar{q}\text{Gluon} \longrightarrow (\text{Hadr.})(\text{Hadr.})(\text{Hadr.})}$$



Hadronischer Wirkungsquerschnitt

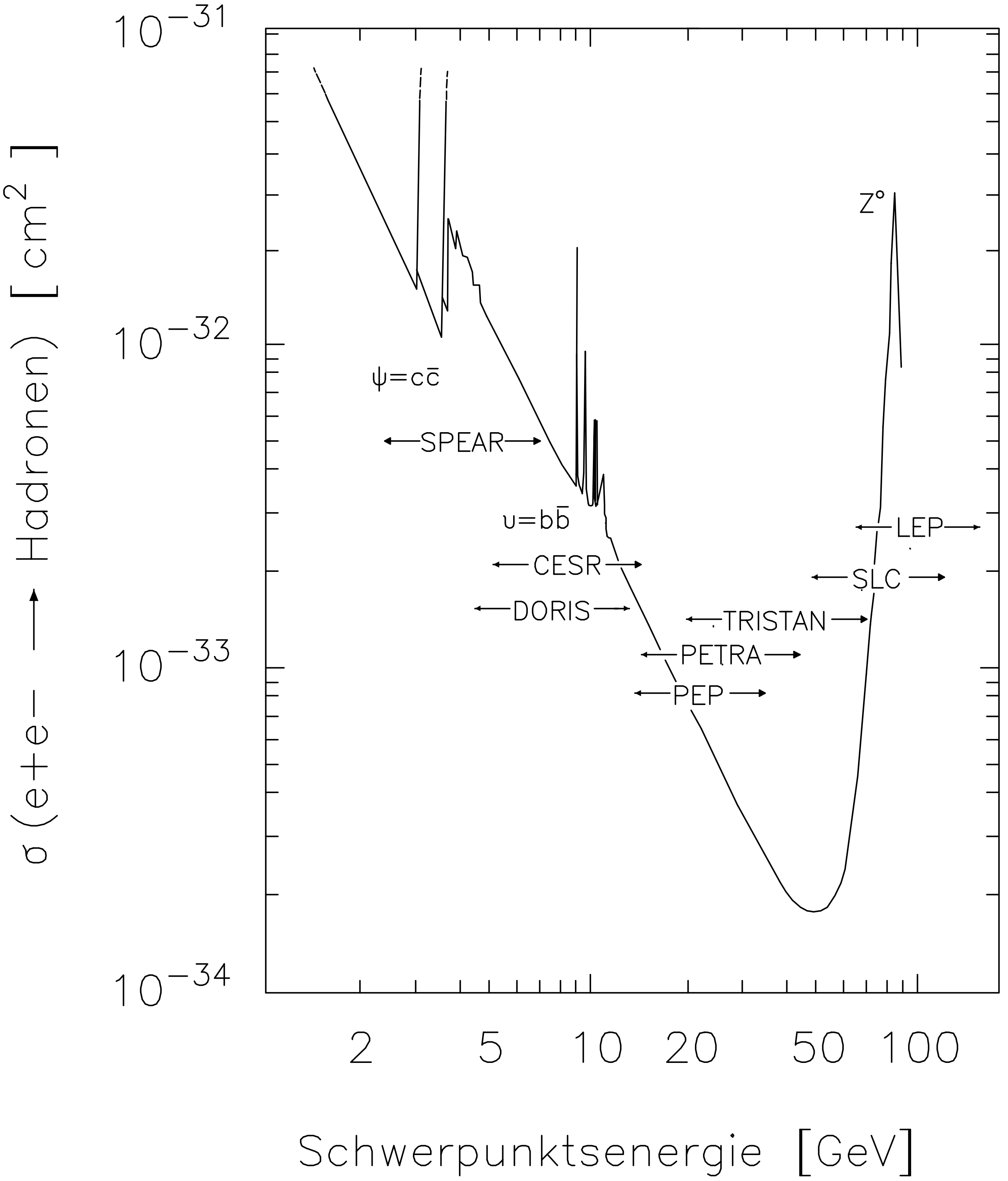
$$\sigma_{\text{had}}(s) = \sum_q \sigma_{q\bar{q}}(s)$$

in der e^+e^--Vernichtung als Funktion der Schwerpunktsenergie:

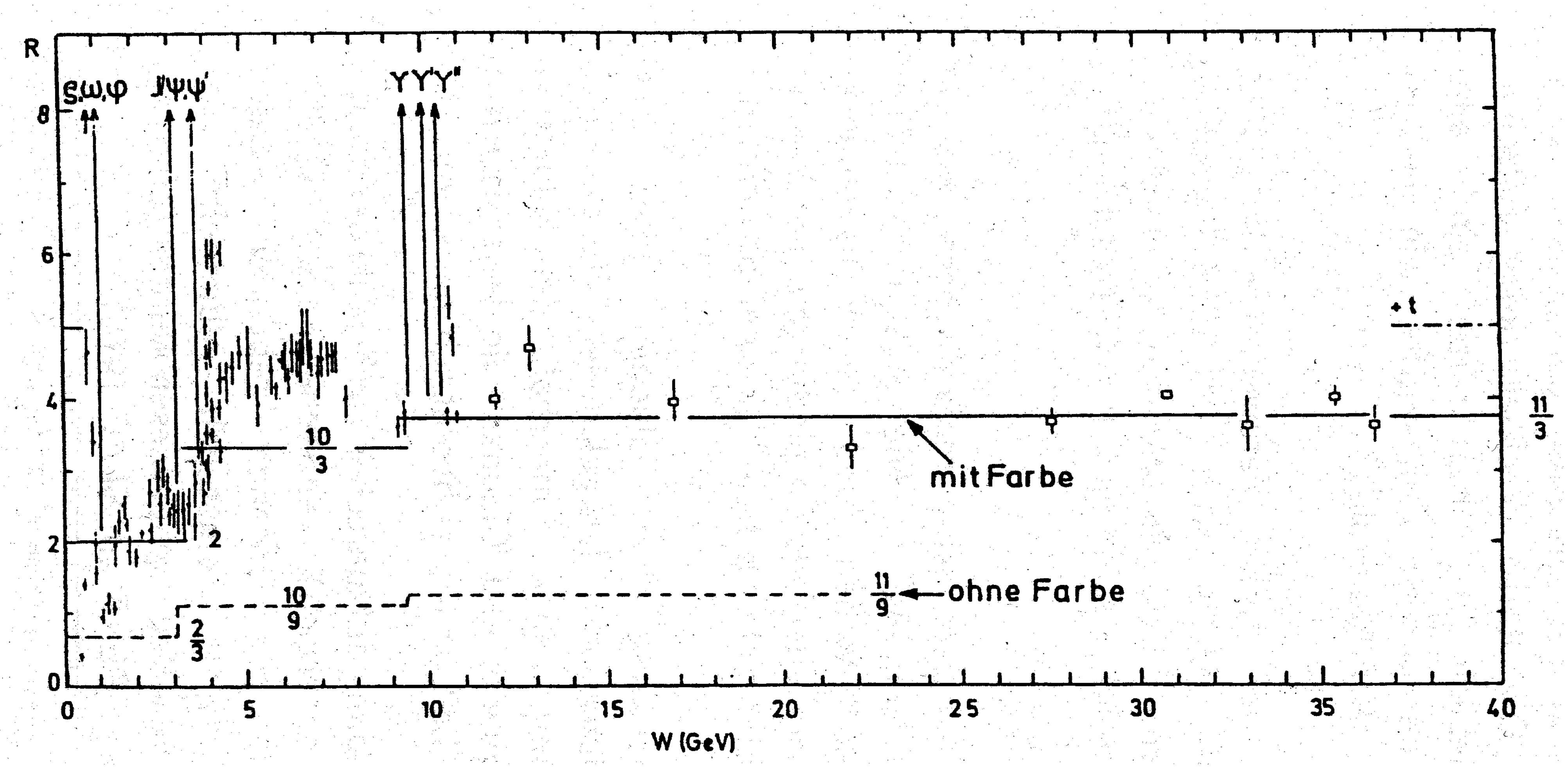


$\Longrightarrow$ Test des Standardmodells durch Messung der Observablen M_Z und Γ_Z, $\sigma_{f\bar{f}}(s = M_Z^2)$, A_{FB}^f ($\Longrightarrow \sin^2\theta_W$) bei der Z^0-Resonanz.

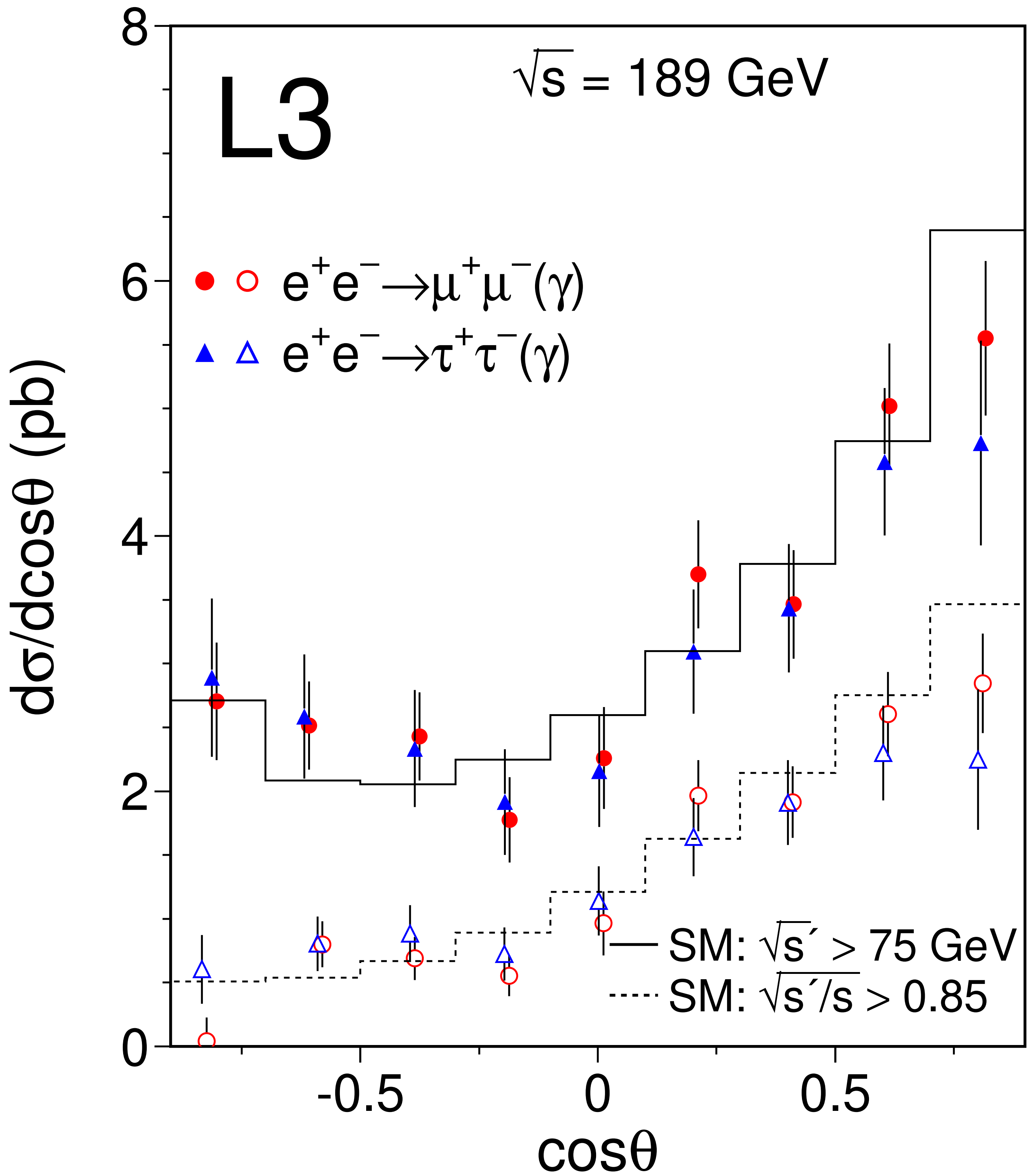
Hadronischer Wirkungsquerschnitt



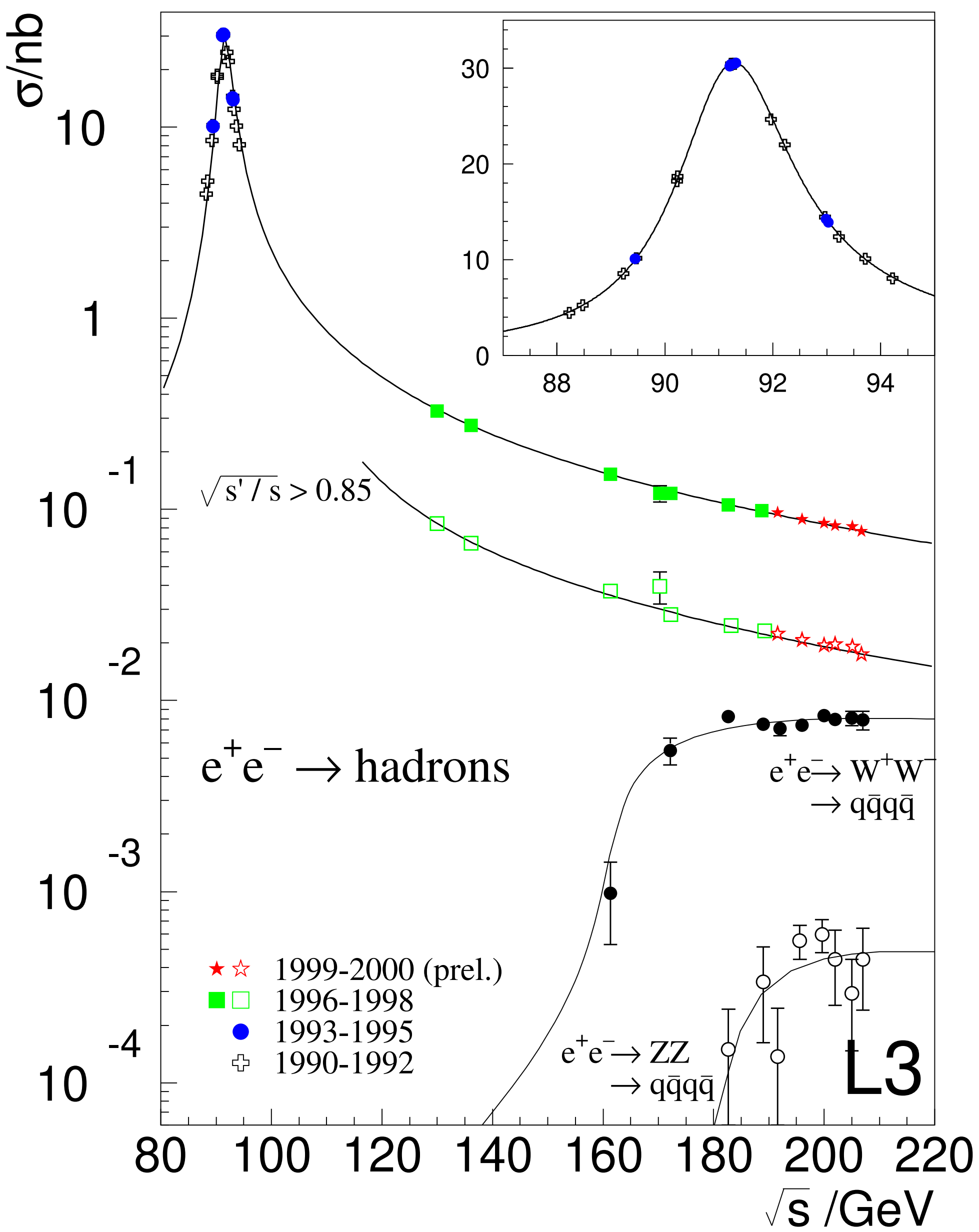
R = Hadronischer Wirkungsquerschnitt/Myonpaarproduktionsquerschnitt

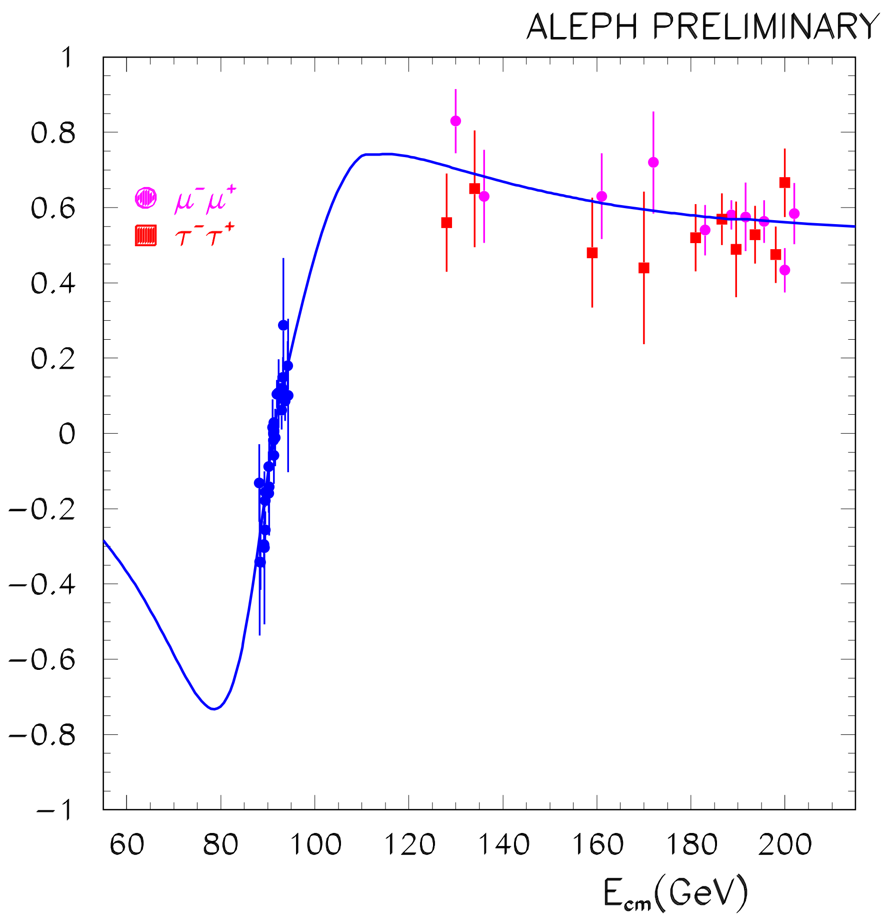


Winkelverteilung der Lepton-Paarproduktion bei LEP mit elektroschwacher Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie A_{FB}



LEPII: 2-fermion

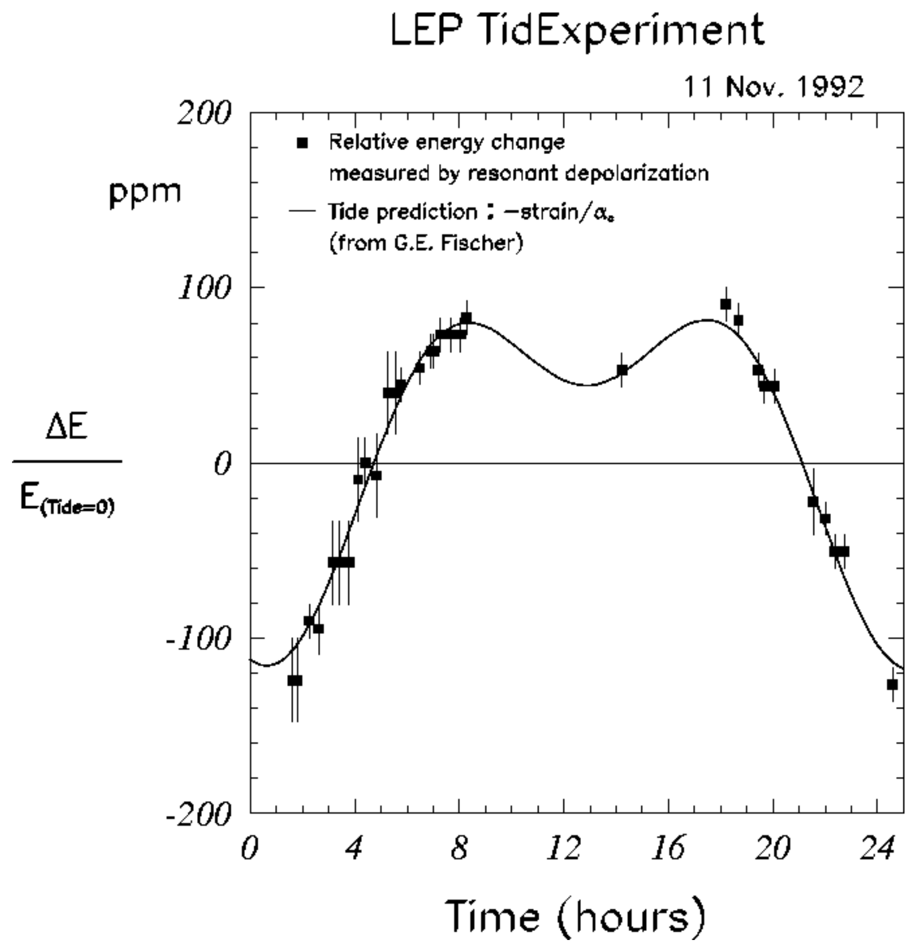




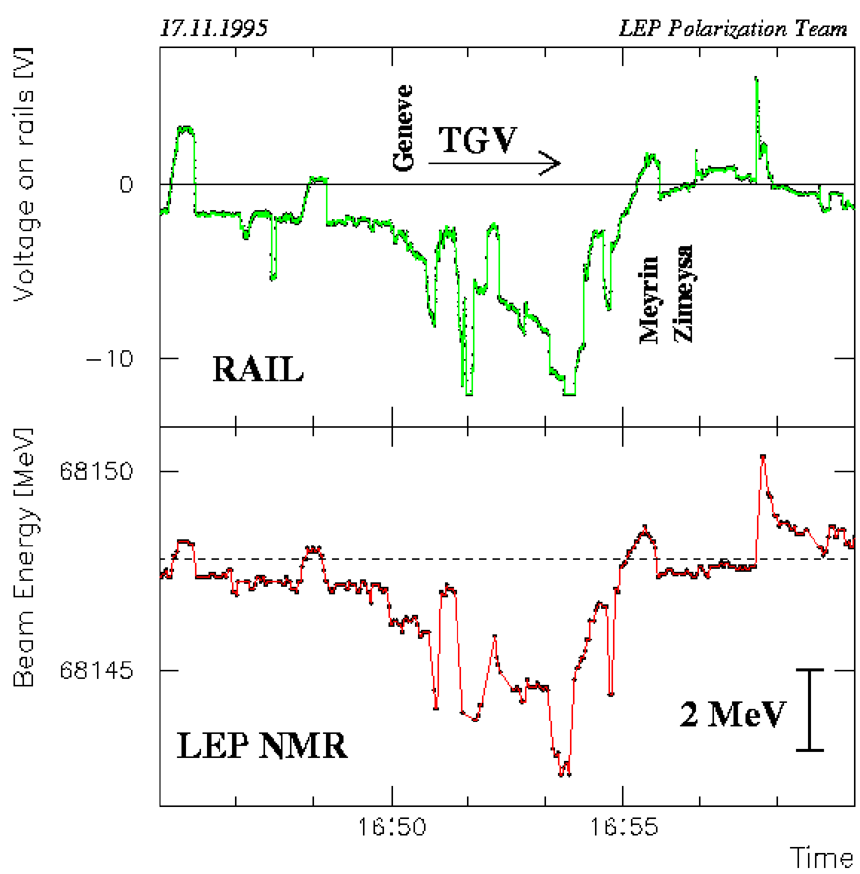
Die Resonanzüberhöhung des Wirkungsquerschnitts führt zu einer großen Zahl von Z^0-Zerfällen im Detektor, die Präzisionsmessungen der elektroschwachen Wechselwirkung einschließlich der QED- und QCD-Strahlungskorrekturen (notwendig zum Vergleich Theorie–Experiment) und der elektroschwachen Strahlungskorrekturen (Test des Standardmodells) bis zur nächst höheren Ordnung der Störungstheorie nach der niedrigsten ermöglichten.

Für die Präzisionsmessung der Z^0-Masse und der $W^{\pm}$, d.h. der exakten Lage der Z^0-Resonanz und der W-Schwelle (s.u.), mußte auch die Strahlenergie des LEP-Beschleunigers sehr genau bestimmt werden: durch Messung der Spinprezession der in den Ablenkmagnetfeldern umlaufenden Elektronen und Positronen durch Compton-Streuung an einem in das Strahlrohr eingespiegelten Laserstrahl.

Dabei mußten der Einfluß der Mondphasen (Gezeitenkräfte) und des Wasserstands im Genfer See auf Umfang und Lage des LEP-Rings (d.h. der Ablenkdipolmagnete) und der nahen TGV-Trasse Paris–Genf auf Dipolmagnetströme des Beschleunigers berücksichtigt werden. Es wurde schließlich eine Genaugkeit von 20 MeV in der Kenntnis der Strahlenergie erreicht.

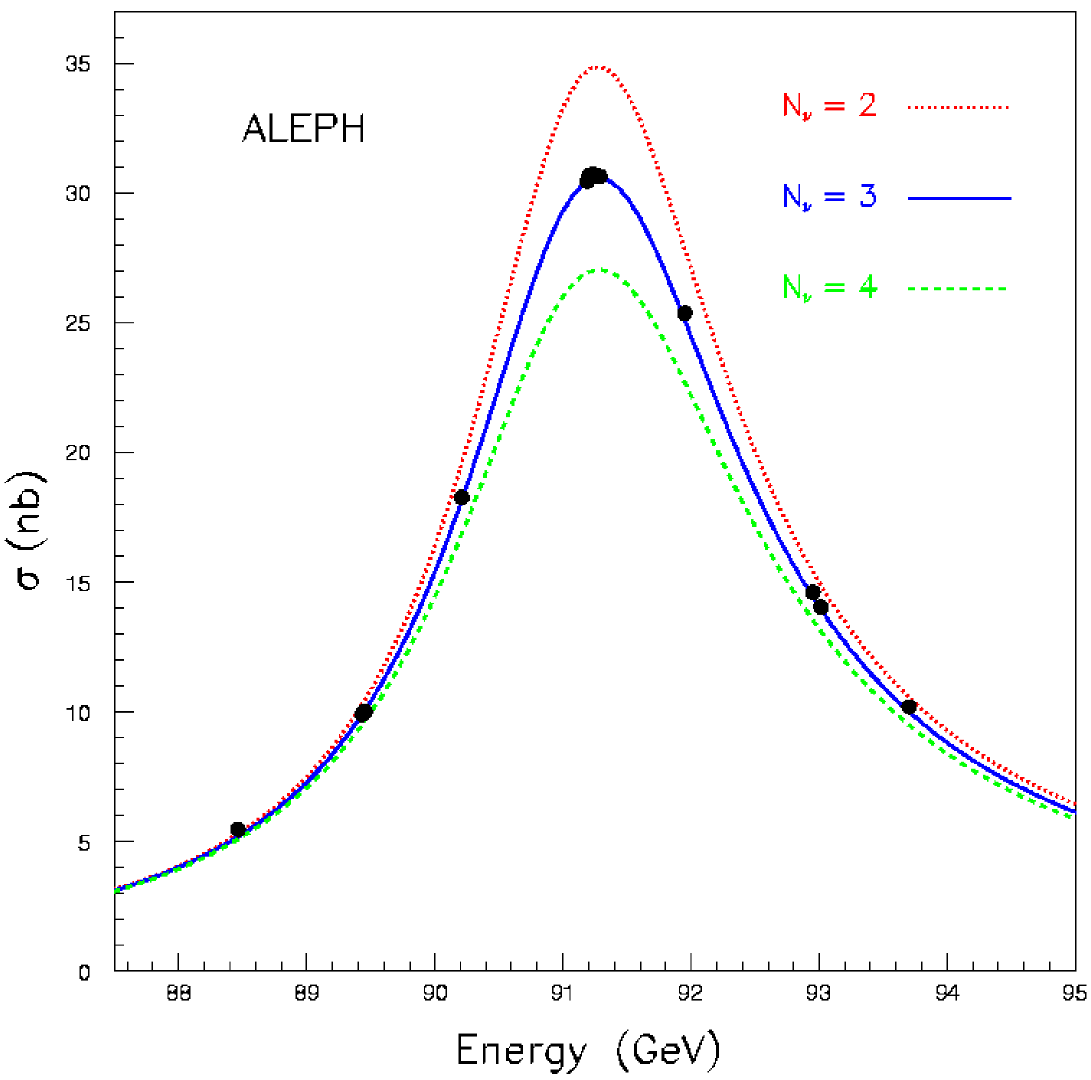


Correlation between trains and LEP energy



Zahl der Neutrino-Generationen

Z^0-Resonanzkurve $\sigma_{\text{had}}(s)$ im e^+e^--Reaktionsquerschnitt, gemessen mit dem ALEPH-Detektor bei LEP:



Gleich nach der Inbetriebnahme der Experimente am e^+e^--Speichering LEP am CERN und gleichzeitig des MARK II-Experiments am e^+e^--Collider SLC am SLAC (Stanford bei San Francisco) 1989 (Schwerpunktsenergie bei der Z^0-Resonanz) konnte die Zahl der leichten Neutrinos N_ν, in die das Z^0-Boson zerfällt ($2m_\nu \leq M_Z$), und damit die Zahl der Quark-Lepton-Generationen präzise gemessen werden:

$$N_\nu = 2.9841 \pm 0.0083 \qquad (2002).$$

Dies geschieht durch Vergleich der gemessenen Resonanzkurve für $\sigma_{\mathrm{had}}(s)$ mit der Vorhersage des Standardmodells für verschiedene Anzahlen von leichten Neutrinos.

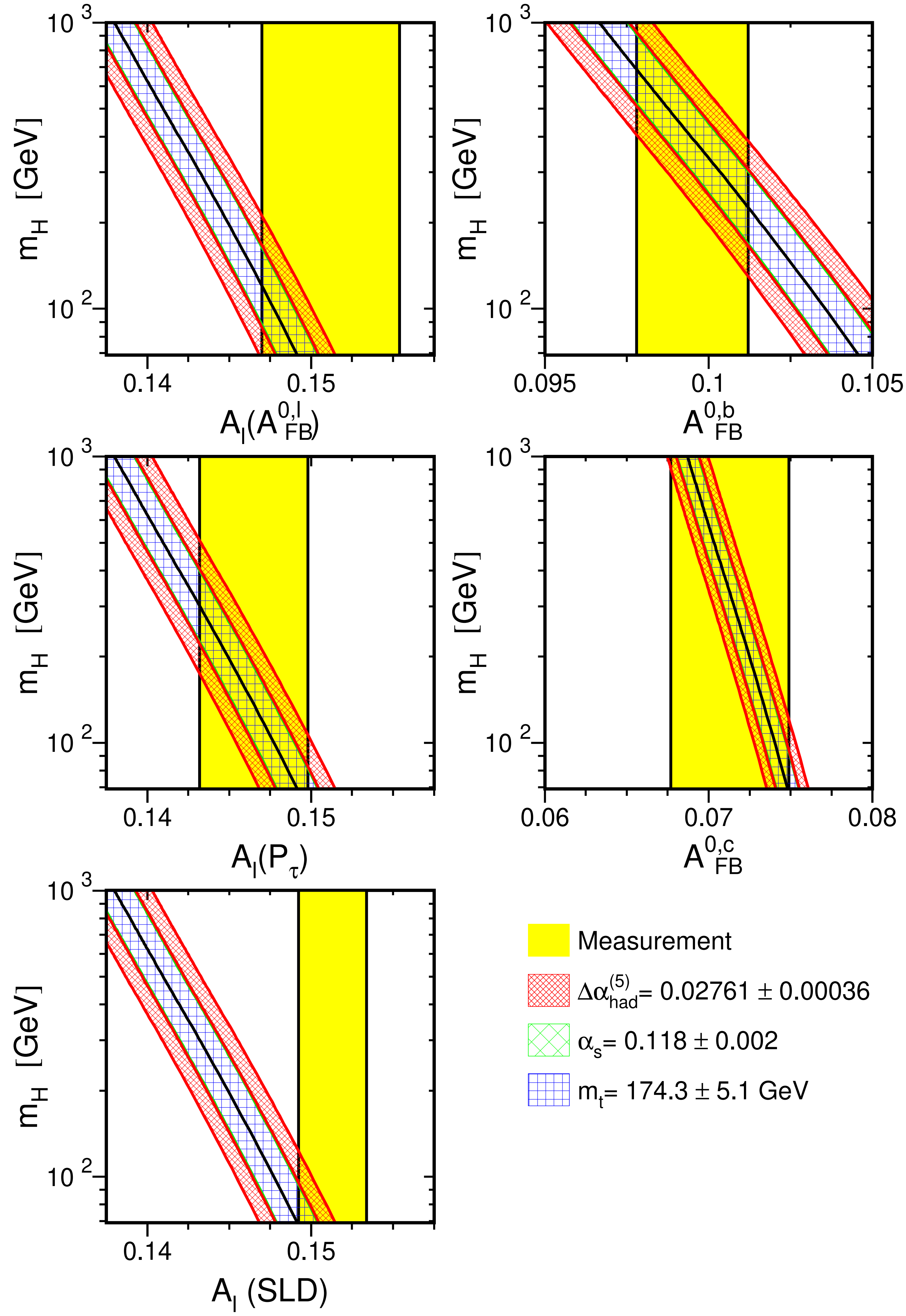
Von der Zahl der Neutrinogenerationen hängt die Gesamtbreite Γ_Z des Z^0-Bosons ab, nicht aber Γ_{had}, da Quarks eventueller neuer Generationen bei LEP nicht beobachtet wurden und ihre Massen so groß sein müßten, daß das Z^0-Boson im Ruhesystem nicht in sie zerfallen kann. Deshalb nimmt mit der Zahl der Neutrinogenerationen die Breite der Resonanz zu und entsprechend der Resonanzquerschnitt

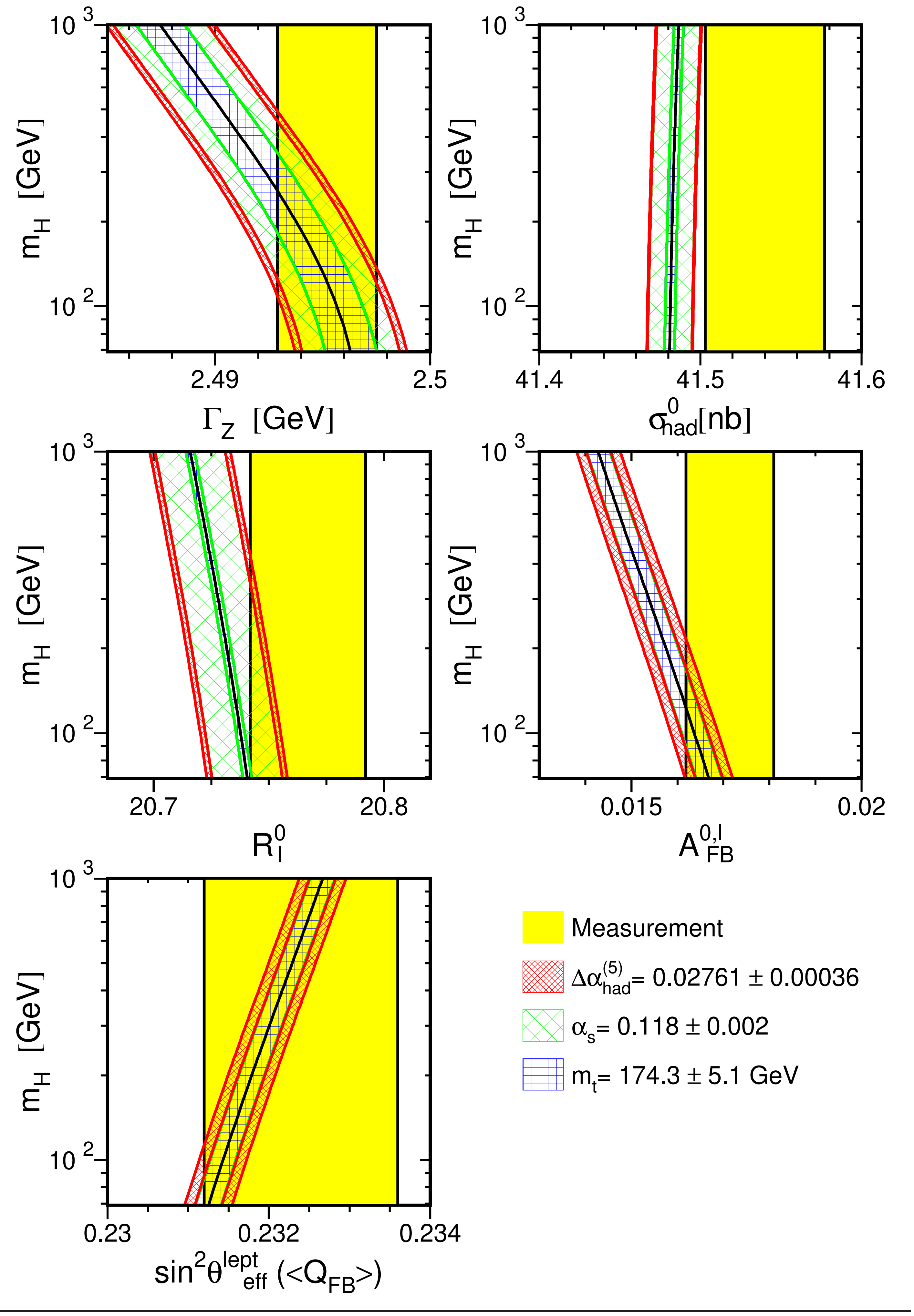
$$\sigma^0_{\mathrm{had}} = \frac{12\pi\Gamma^e_Z\Gamma^{\mathrm{had}}_Z}{M^2_Z\Gamma^2_Z}$$

ab.

Präzisionsmessungen der Parameter des Z^0-Produktionsquerschnitts bei der Resonanz bei LEP I (und SLC) im Vergleich mit den Vorhersagen des Standardmodells der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung in Abhängigkeit von der Masse des Higgs-Bosons:

Preliminary





m_H [GeV]
10^3
10^2
2.49
2.5
Γ_Z [GeV]
41.4
41.5
41.6
σ^0_{had}[nb]
20.7
20.8
R^0_l
0.015
0.02
$A^{0,l}_{FB}$
0.23
0.232
0.234
$\sin^2\theta^{lept}_{eff}$ (<Q_{FB}>)
Measurement
$\Delta\alpha^{(5)}_{had}$= 0.02761 ± 0.00036
α_s= 0.118 ± 0.002
m_t= 174.3 ± 5.1 GeV

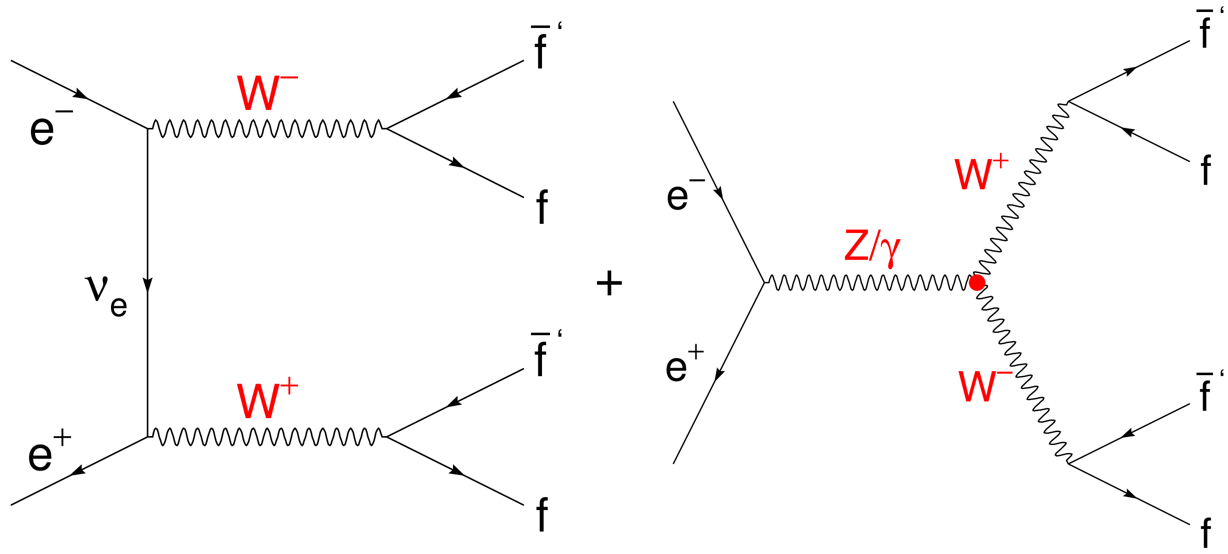
2.1.2 Messungen der W-Boson-Produktion

Von 1996 bis November 2000 wurde die Schwerpunktsenergie des LEP-Speicherrings in mehreren Schritten, 130, 161, 172 GeV (1996), 183 GeV (1997), 189 GeV (1998), 192, 196, 200, 202 GeV (1999), bis auf das Maximum von 208 GeV (2000) erhöht durch Einbau supraleitender RF-Resonatoren als Beschleunigungsstrecken.

Damit konnte die Schwelle zur Erzeugung von W^+W^--Paaren in der e^+e^--Vernichtung und damit die $W^\pm$-Masse präzise vermessen werden.

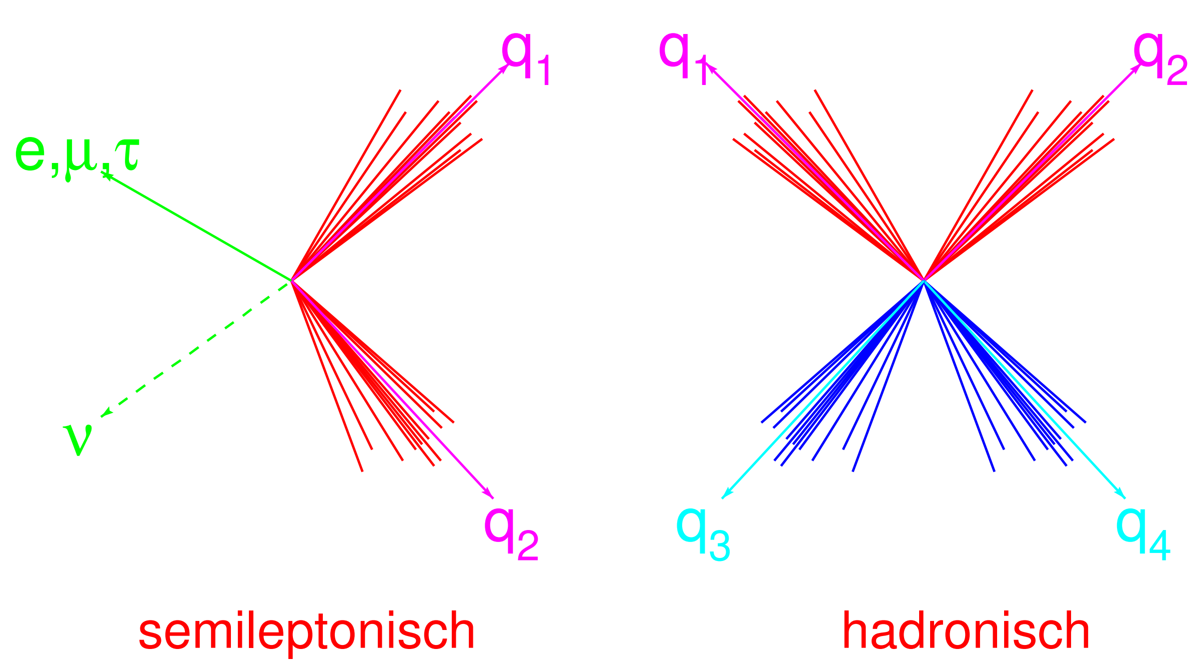
W- Boson- Produktion bei LEP

- W^+W^- -Produktion in niedrigster Ordnung :

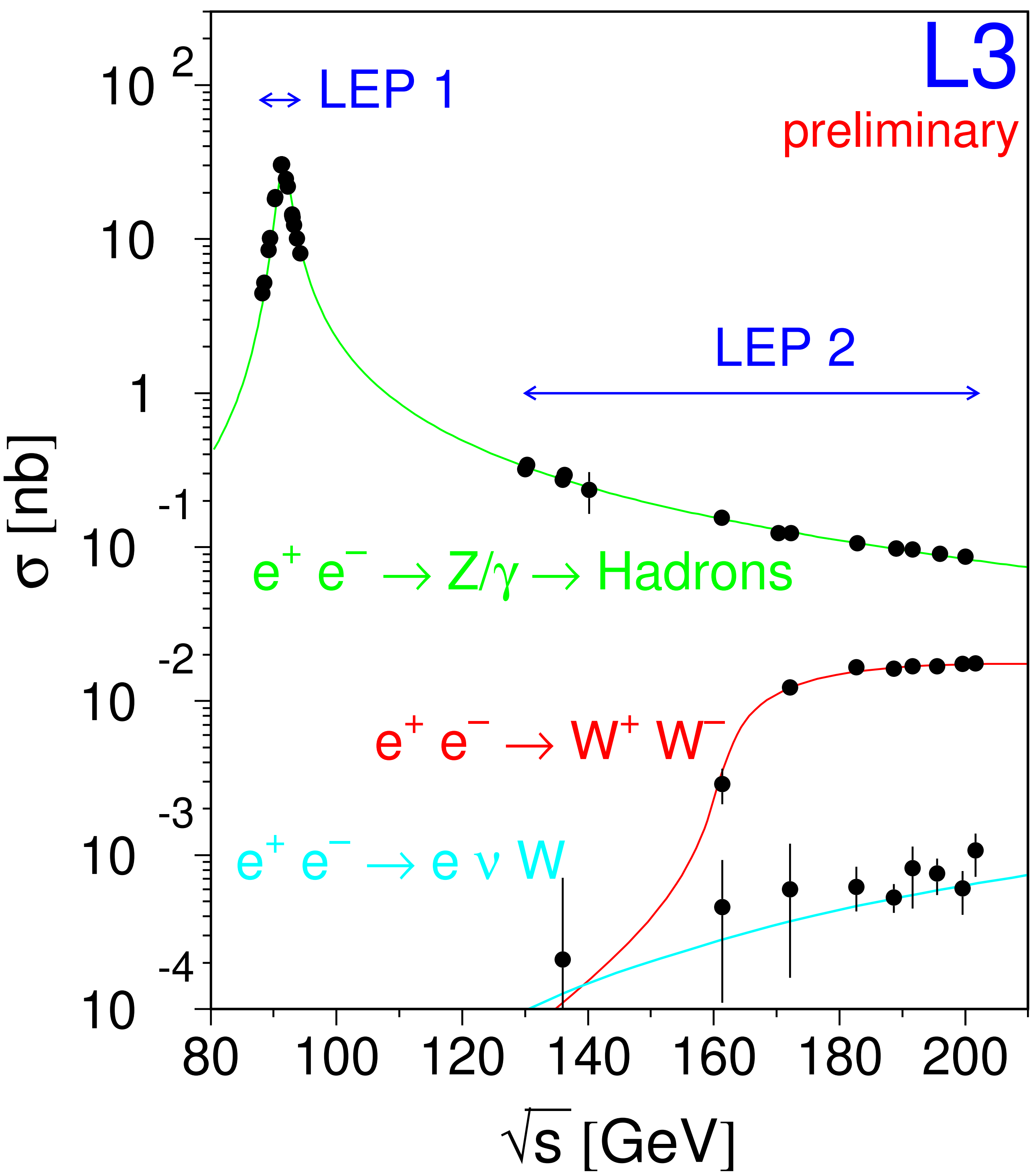


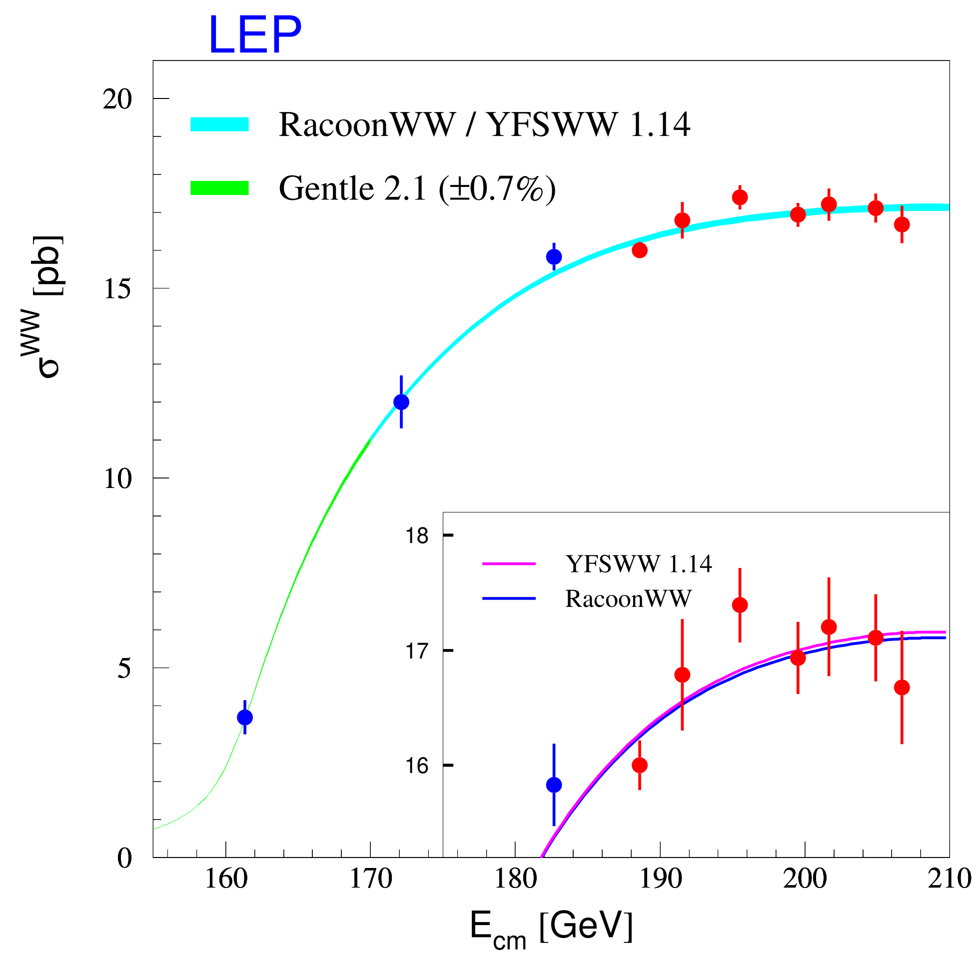
- W^+W^- -Zerfaelle :

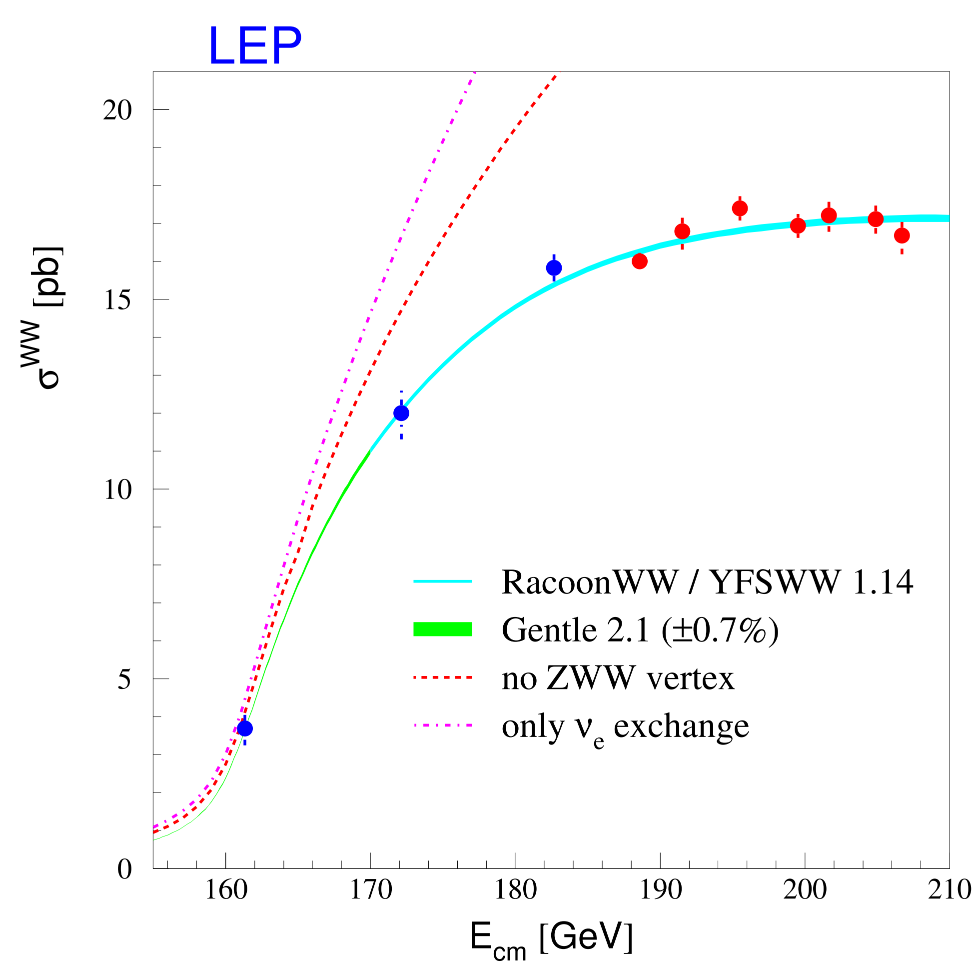
$WW \longrightarrow qqqq$		45.6 %
$WW \longrightarrow qq\ell\nu$	$\left\{ \begin{array}{c} qqe\nu \\ qq\mu\nu \\ qq\tau\nu \end{array} \right\}$	43.8 %
$WW \longrightarrow \ell\nu\ell\nu$		10.6 %



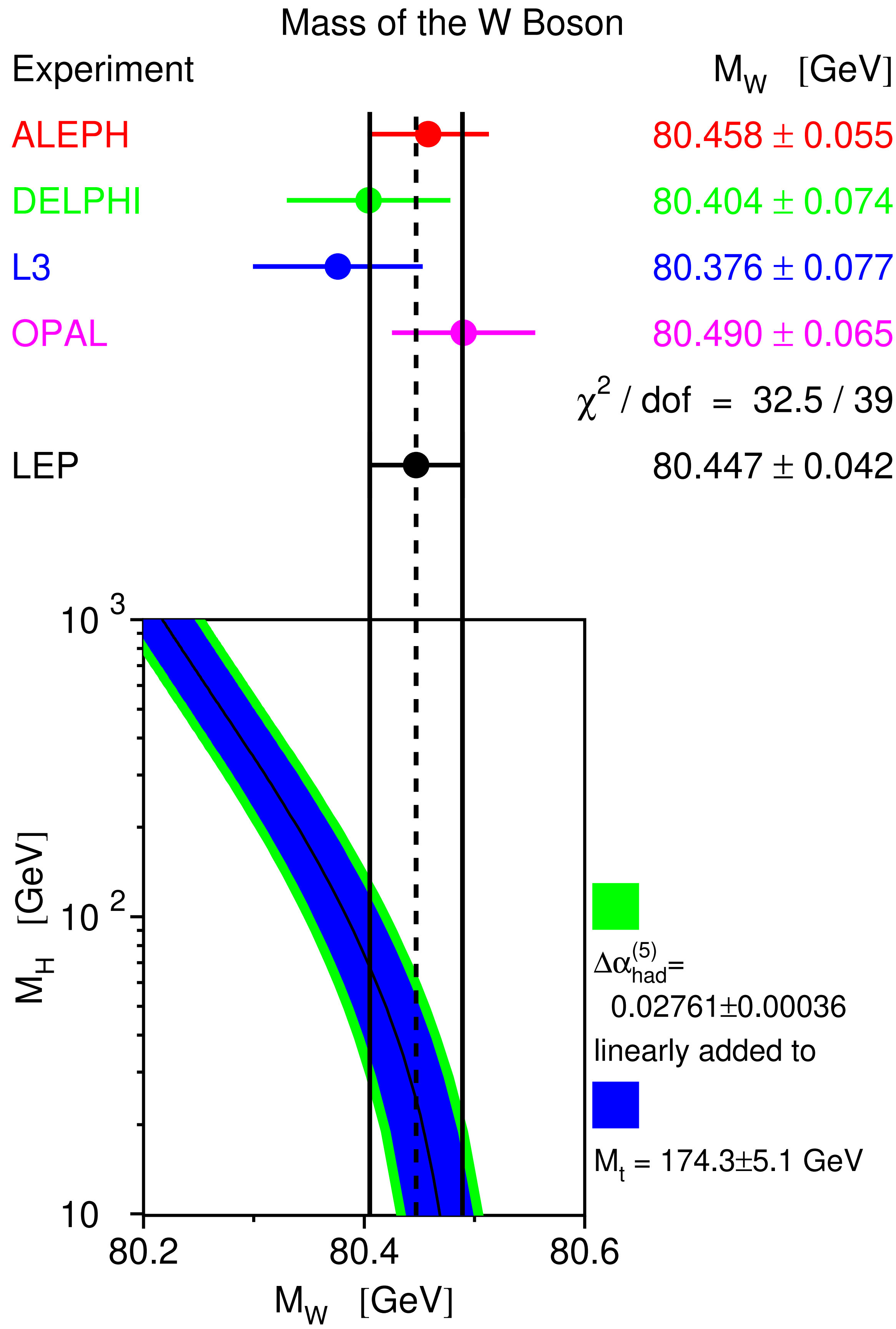
W- Boson- Produktion bei LEP

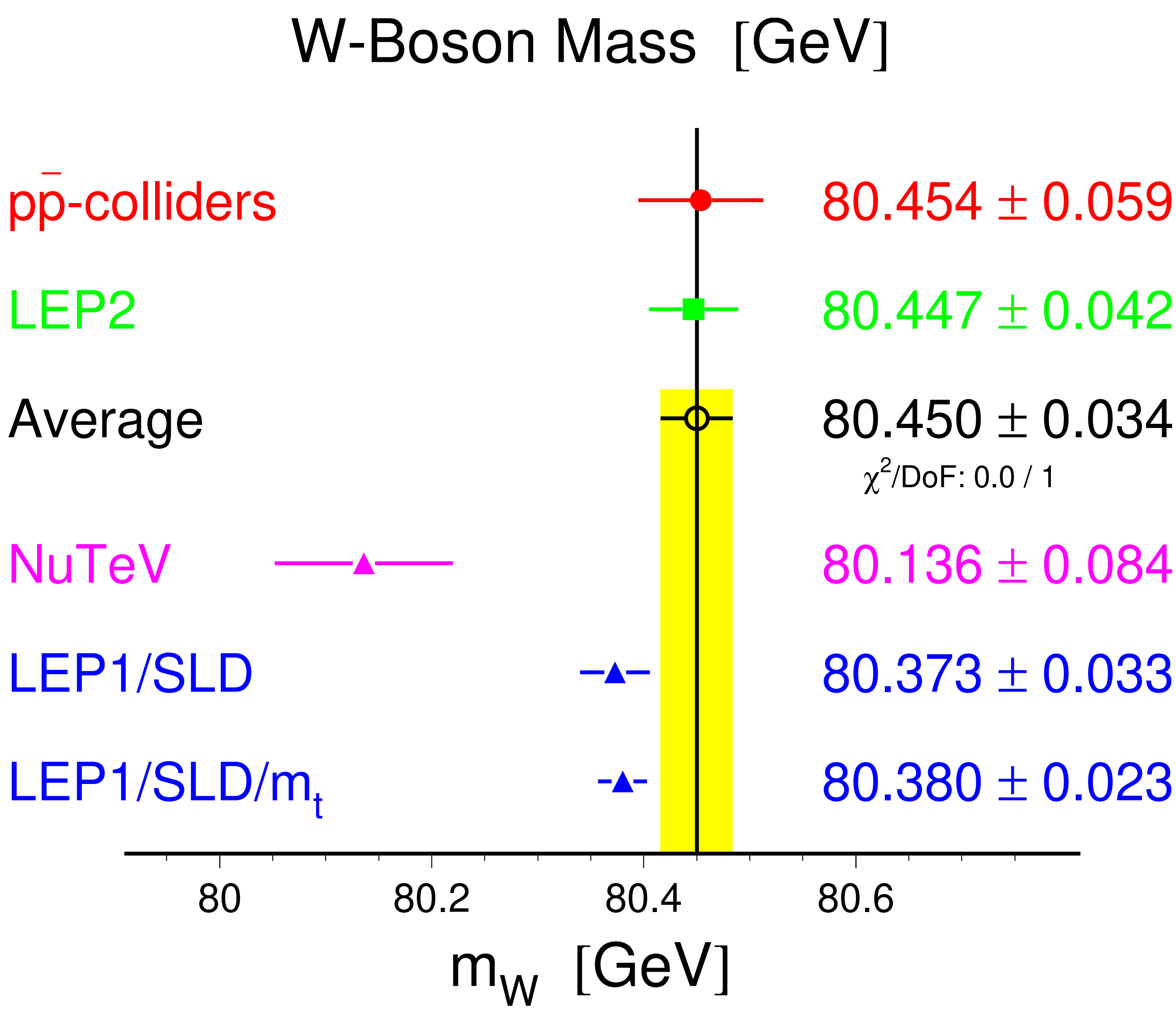



LEP
RacoonWW / YFSWW 1.14
Gentle 2.1 (±0.7%)
YFSWW 1.14
RacoonWW
σ^{WW} [pb]
E_{cm} [GeV]

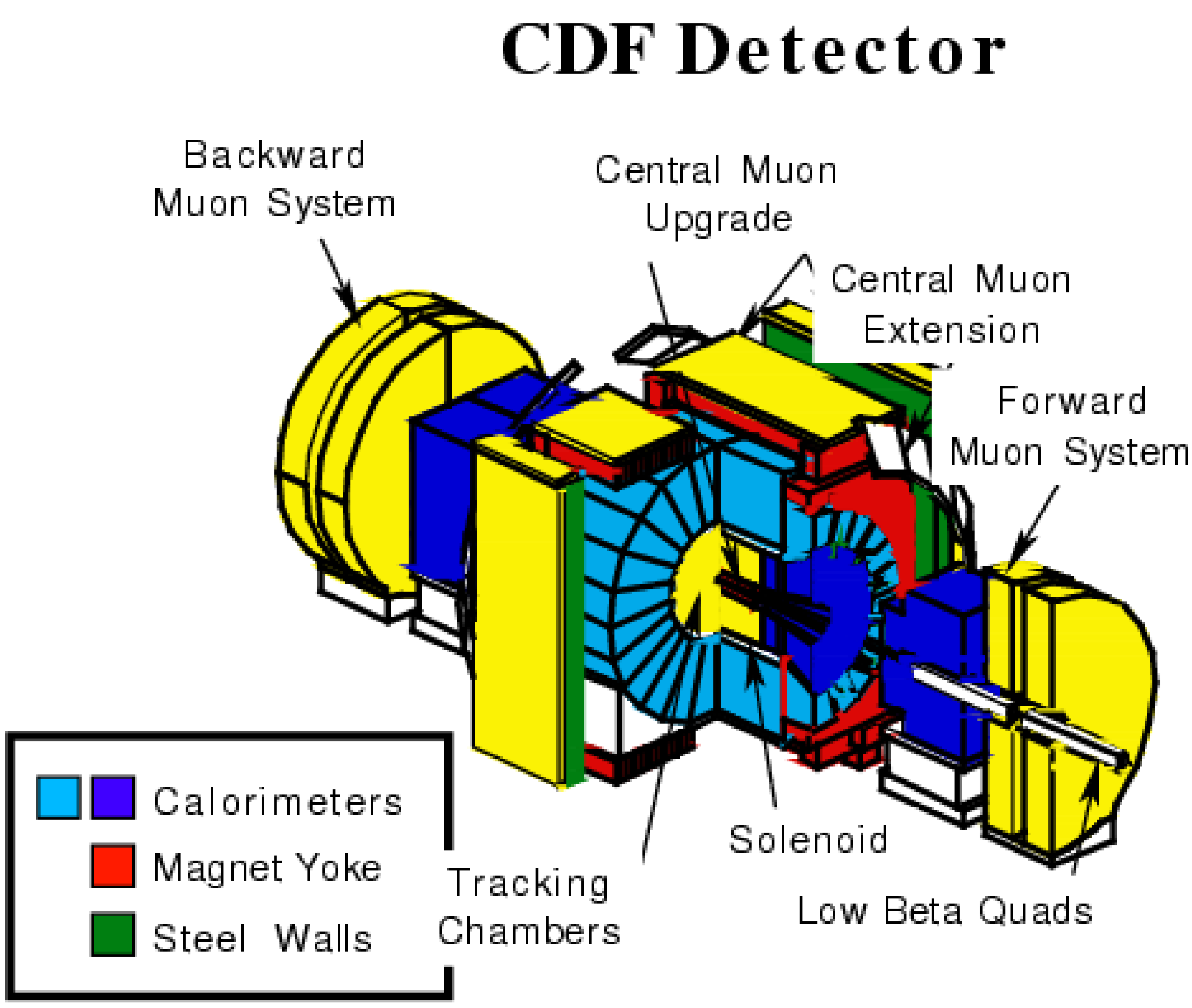

LEP
RacoonWW / YFSWW 1.14
Gentle 2.1 (±0.7%)
no ZWW vertex
only ν_e exchange
σ^{WW} [pb]
E_{cm} [GeV]

Messungen der W-Boson-Masse bei LEP II (Experimente ALEPH, DELPHI, L3, OPAL) und bei den $p\overline{p}$-Collidern SPS (Experimente UA1 und UA2) und TEVATRON (Experimente CDF und D0):

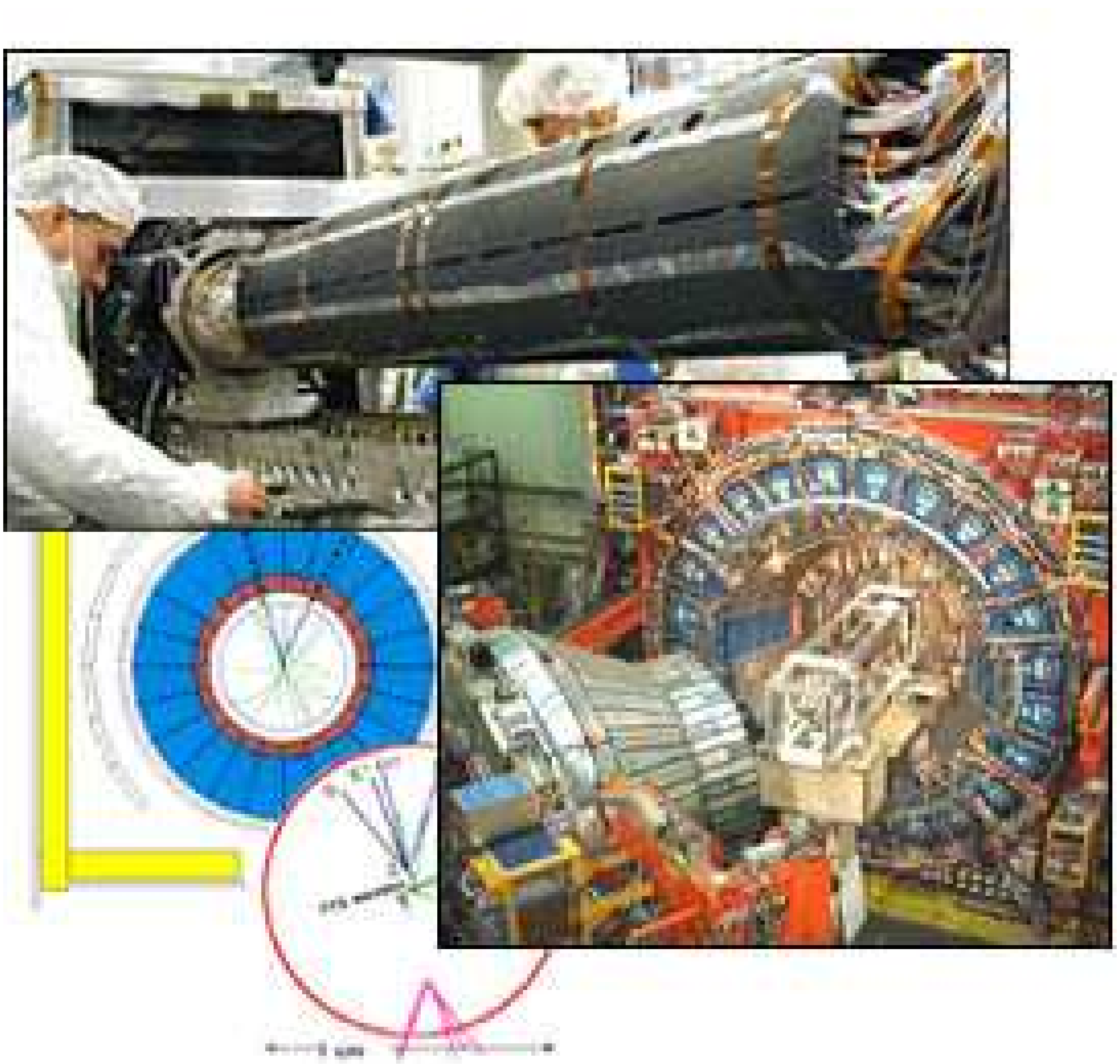



W-Boson Mass [GeV]
pp̄-colliders
80.454 ± 0.059
LEP2
80.447 ± 0.042
Average
80.450 ± 0.034
χ²/DoF: 0.0 / 1
NuTeV
80.136 ± 0.084
LEP1/SLD
80.373 ± 0.033
LEP1/SLD/m_t
80.380 ± 0.023
80
80.2
80.4
80.6
m_W [GeV]

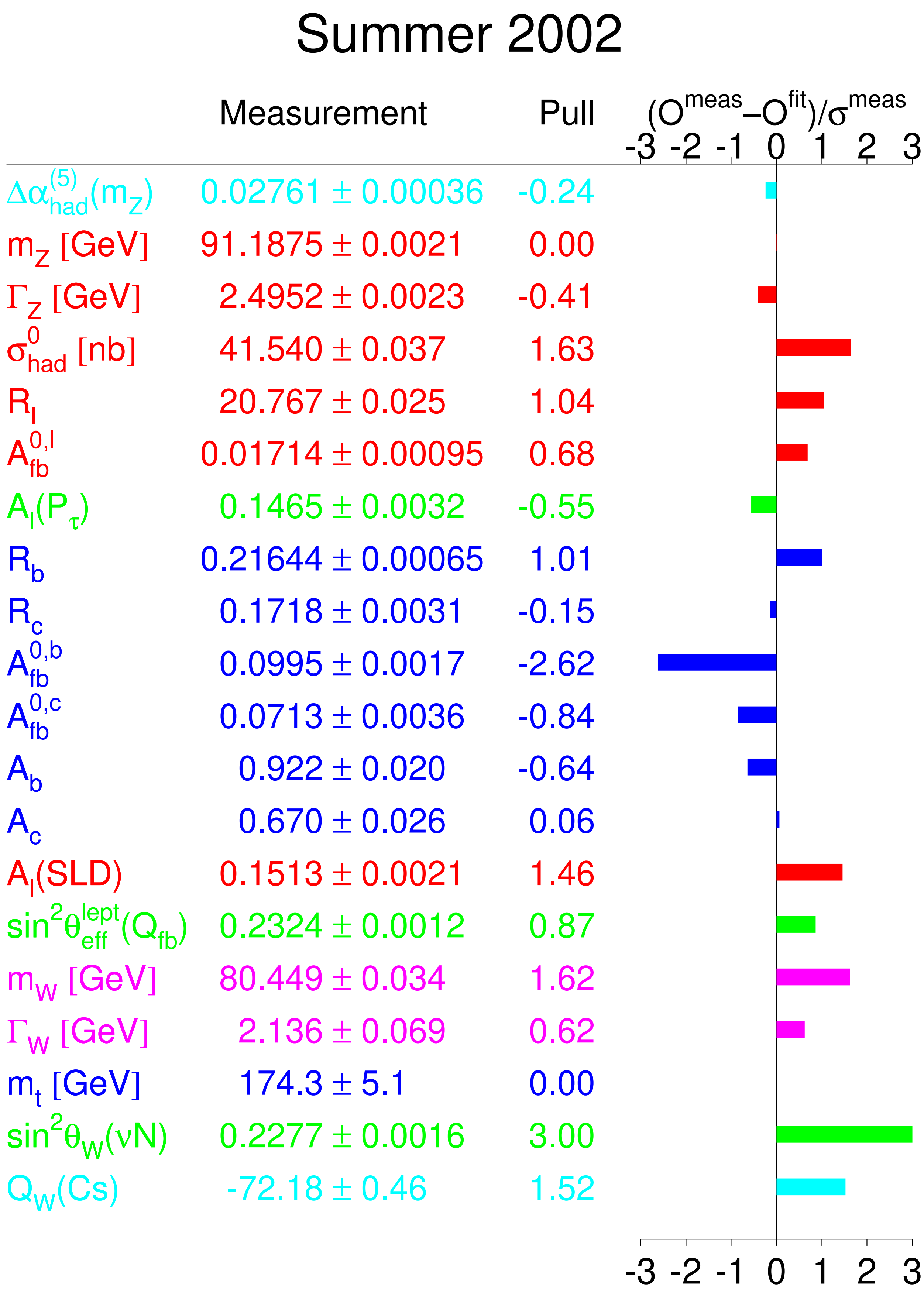
Der CDF-Detektor am TEVATRON



Der CDF-Detektor am TEVATRON



2.1.3 Präzisionstests des Standardmodells



In der 2. Ordnung der Störungstheorie der elektroschwachen Wechselwirkung (Strahlungskorrekturen) zur e^+e^--Vernichtung, werden u.a. virtuelle W-Bosonen, top-Quarks und Higgs-Bosonen ausgetauscht, die bei LEP noch nicht direkt erzeugt werden konnten. Die Beiträge der Strahlungskorrekturen hängen von den Massen M_W und m_t (quadratisch, stark) und M_H (logarithmisch, schwach) ab.
Der Vergleich mit den Präzisionsmessungen erlaubt daher die indirekte Bestimmung von M_W, m_t und M_H:

- Präzise Vorhersage von $M_W = 80.380 \pm 0.023$ GeV

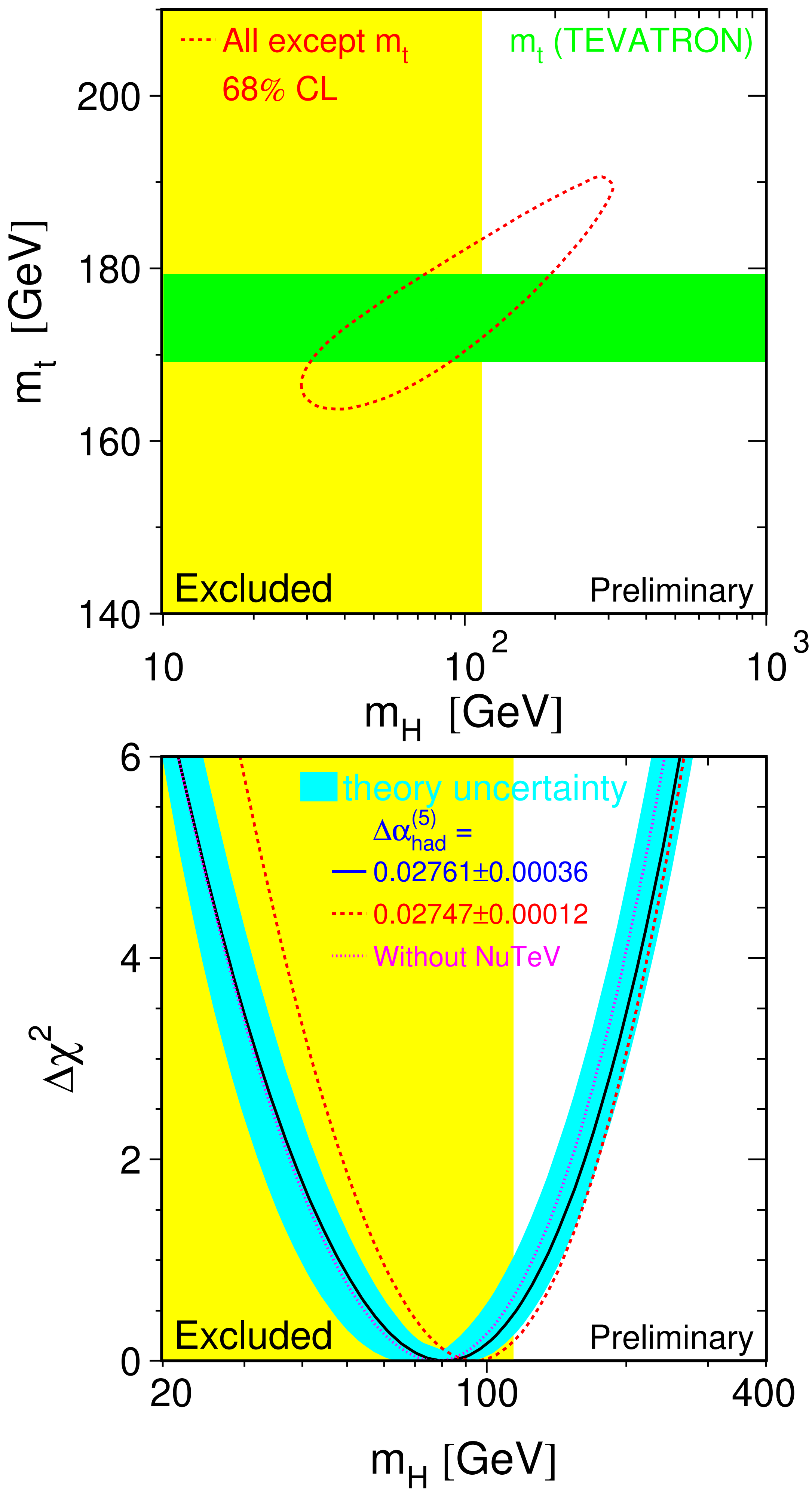
  (direkte Messungen: $M_W = 80.451 \pm 0.033$ GeV).

- Präzise Vorhersage von $m_t = 180 \pm 10$ GeV

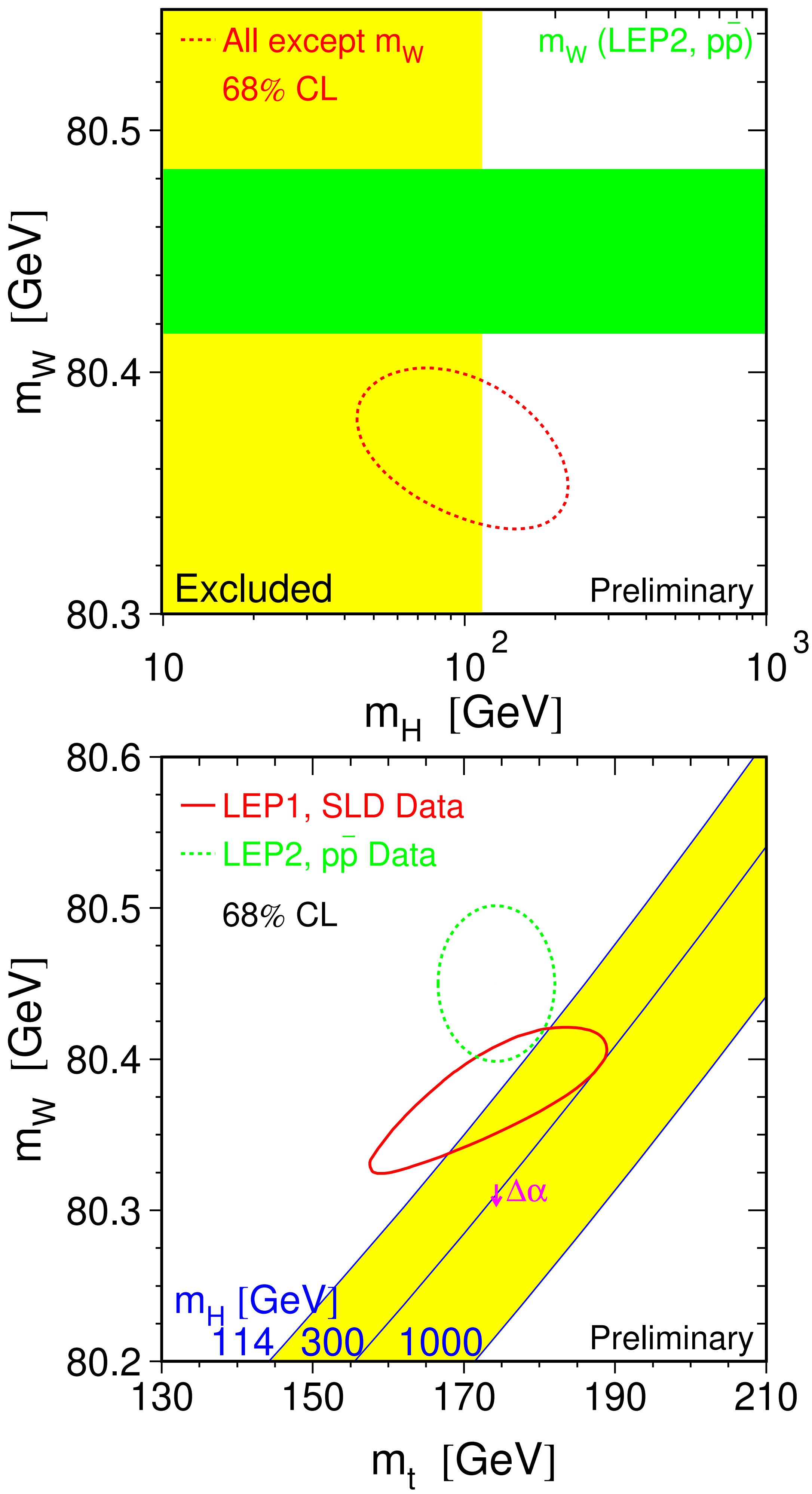
  (direkte Messung bei der Entdeckung des top-Quarks 1994/95 am TEVATRON: $m_t = 174.3 \pm 5.1$ GeV).

- Die elektroschwachen Präzisionsmessungen bevorzugen eine kleine Masse für das Higgs-Boson unterhalb des unteren Grenzwerts $M_H > 114$ GeV von der direkten Suche bei LEP. Die indirekte obere Grenze ist $M_H < 193$ GeV (95% Konfidenzniveau).

  Sie hängt erheblich von der genauen Messung der elektromagnetischen Feinstrukturkonstanten und ihrer Strahlungskorrekturen (Renormierung, Abschirmung durch Vakuumpolarisation) ab (aktuelle Messungen des Vakuumpolarisationsbeitrags der Quarks am e^+e^--Speicherring BES in Peking bei niedrigen Schwerpunktsenergien).



All except m_t
68% CL
m_t (TEVATRON)
Excluded
Preliminary
m_t [GeV]
m_H [GeV]
theory uncertainty
$\Delta\alpha_{had}^{(5)}$ =
0.02761±0.00036
0.02747±0.00012
Without NuTeV
Excluded
Preliminary
$\Delta\chi^2$
m_H [GeV]



All except m_W
68% CL
m_W (LEP2, $p\bar{p}$)
Excluded
Preliminary
m_W [GeV]
80.3
80.4
80.5
10
10^2
10^3
m_H [GeV]
LEP1, SLD Data
LEP2, $p\bar{p}$ Data
68% CL
$\Delta\alpha$
m_H [GeV]
114 300 1000
Preliminary
80.2
80.3
80.4
80.5
80.6
130
150
170
190
210
m_t [GeV]