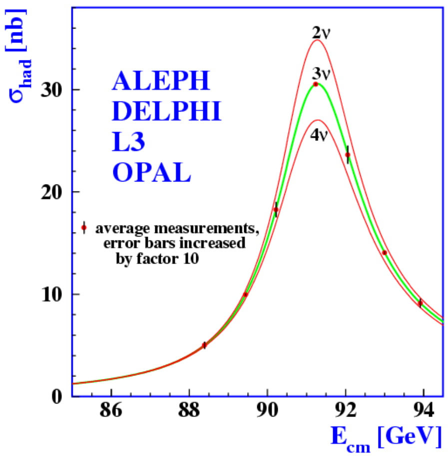
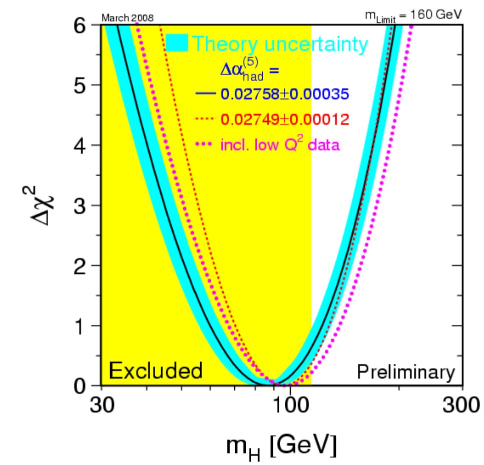
Präzisionsmessungen I

Vorlesung „Higgs und Elektroschwache Wechselwirkung“

mit Übungen

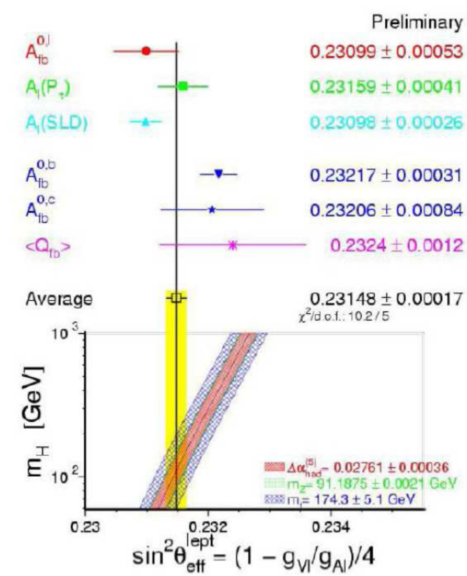


Achim Geiser, Benno List



Inhalt:

- Wiederholung: Higgs-Mechanismus
- Einführung Präzisionsmessungen
  - Messung von α_{em}
  - Messung von G_F
  - Messung von M_Z bei LEP



Wiederholung: $SU(2)_L xU(1)_Y$

- Lagrangian für $SU(2)_L xU(1)_Y$:

$$\mathcal{L} = \sum_L \bar{\Psi}_L \mathrm{i}\gamma_\mu D^\mu \Psi_L + \sum_R \bar{\Psi}_R \mathrm{i}\gamma_\mu D_0^\mu \Psi_R - \frac{1}{4} W_\mathrm{a}^{\mu\nu} W_{\mathrm{a}\mu\nu} - \frac{1}{4} B^{\mu\nu} B_{\mu\nu}$$

- Kovariante Ableitungen:

$$\begin{aligned} D^\mu &= \partial^\mu + \mathrm{i}gT_\mathrm{a}W_\mathrm{a}^\mu + \mathrm{i}g'\tfrac{Y}{2}B^\mu \\ D_0^\mu &= \partial^\mu + 0 + ig'\tfrac{Y}{2}B^\mu \end{aligned}$$

- Feldstärketensoren:

$$\begin{aligned} W_\mathrm{a}^{\mu\nu} &= \partial^\mu W_\mathrm{a}^\nu - \partial^\nu W_\mathrm{a}^\mu - g\varepsilon_\mathrm{abc} W_\mathrm{b}^\mu W_\mathrm{c}^\nu \\ B^{\mu\nu} &= \partial^\mu B^\nu - \partial^\nu B^\mu \end{aligned}$$

- Infinitesimale SU(2)-Transformationen:

$$\begin{aligned} \Psi(x) \;\rightarrow\; \Psi'(x) &= \exp\left(\mathrm{i}g\epsilon_\mathrm{a}(x)T_\mathrm{a}\right)\Psi(x) = \left(1 + \mathrm{i}g\epsilon_\mathrm{a}(x)T_\mathrm{a}\right)\Psi(x) \\ W_\mathrm{a}^\mu \;\rightarrow\; W'^\mu_\mathrm{a} &= W_\mathrm{a}^\mu - \partial^\mu\epsilon_\mathrm{a}(x) - g\varepsilon_\mathrm{abc}\epsilon_\mathrm{b}(x)W_\mathrm{c}^\mu \end{aligned}$$

- U(1)-Transformationen:

$$\begin{aligned} \Psi(x) \;\rightarrow\; \Psi'(x) &= \exp\left(\mathrm{i}g'\tfrac{Y}{2}\chi(x)\right)\right)\Psi(x) \\ B^\mu(x) \;\rightarrow\; A'^\mu(x) &= B^\mu(x) - \partial^\mu\chi(x) \end{aligned}$$

Wiederholung: Higgs-Feld

- Higgs-Feld: Komplexes $SU(2)_L$-Dublett, Hyperladung Y=1
  => $Q(\Phi^+) = T_3 + Y/2 = +1$,
  $Q(\Phi^0) = 0$

$$\phi(x) = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$$

- Lagrangian der Felder:

$$\mathcal{L}_{\phi W_3 B} = (D_\mu \phi)^\dagger (D^\mu \phi) + \mu^2 \phi^\dagger \phi - \frac{\lambda}{4}\left(\phi^\dagger \phi\right)^2 - \frac{1}{4} W_{\mathrm{a}}^{\mu\nu} W_{\mathrm{a}\mu\nu} - \frac{1}{4} B^{\mu\nu} B_{\mu\nu}$$

Imaginäre Masse!

- Kovariante Ableitung:

$$D^\mu \phi = \left(\partial^\mu + \mathrm{i} g T_{\mathrm{a}} W_{\mathrm{a}}^\mu + \mathrm{i} g' \frac{1}{2} B^\mu\right) \phi$$

- Potentialminimum von Φ bei:

$$\langle 0|\phi|0\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v/\sqrt{2} \end{pmatrix} \qquad \frac{v}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}\,\mu}{\sqrt{\lambda}}$$

Wiederholung: Higgs-Feld II

- Allgemeine Parametrisierung von Φ:

$$\phi(x) = \underbrace{\exp\left(\mathrm{i}\theta_\mathrm{a}(x) T_\mathrm{a}\right)}_{\text{Drehung in beliebige Richtung}} \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\left(v + H(x)\right) \end{pmatrix}}_{|\Phi|}$$

- Nutze Eichfreiheit aus, wähle Eichung, dass gilt:

$$\phi(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\left(v + H(x)\right) \end{pmatrix}$$

- Isospin-Matrizen:

$$T_1 = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad T_2 = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 0 & -\mathrm{i} \\ \mathrm{i} & 0 \end{pmatrix} \quad T_3 = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

=>

$$T_\mathrm{a} W_\mathrm{a}^\mu = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} W_3^\mu & W_1^\mu - \mathrm{i}W_2^\mu \\ W_1^\mu + \mathrm{i}W_2^\mu & -W_3^\mu \end{pmatrix}$$

- Kovariante Ableitung:

$$D^\mu \phi = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}\mathrm{i}g\left(W_1^\mu - \mathrm{i}W_2^\mu\right)\frac{1}{\sqrt{2}}\left(v + H(x)\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\partial^\mu H(x) - \frac{1}{2}\mathrm{i}\left(gW_3^\mu - g' B^\mu\right)\frac{1}{\sqrt{2}}\left(v + H(x)\right) \end{pmatrix}$$

Wiederholung: Higgs-Mechanismus

- Setze Parametrisierung von Φ in Lagrangian ein:

$$\mathcal{L}_{\phi W_3 B} = (D_\mu \phi)^\dagger (D^\mu \phi) + \mu^2 \phi^\dagger \phi - \frac{\lambda}{4}\left(\phi^\dagger \phi\right)^2 - \frac{1}{4} W_{\mathrm{a}}^{\mu\nu} W_{\mathrm{a}\mu\nu} - \frac{1}{4} B^{\mu\nu} B_{\mu\nu}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{HW_3B} = \;& \tfrac{1}{2}\partial_\mu H \partial^\mu H - \mu^2 H^2 \\ & -\tfrac{1}{4}\left(\partial_\mu W_{1\nu} - \partial_\nu W_{1\mu}\right)\left(\partial^\mu W_1^\nu - \partial^\nu W_1^\mu\right) + \tfrac{1}{8} g^2 v^2 W_{1\mu} W_1^\mu \\ & -\tfrac{1}{4}\left(\partial_\mu W_{2\nu} - \partial_\nu W_{2\mu}\right)\left(\partial^\mu W_2^\nu - \partial^\nu W_2^\mu\right) + \tfrac{1}{8} g^2 v^2 W_{2\mu} W_2^\mu \\ & -\tfrac{1}{4}\left(\partial_\mu W_{3\nu} - \partial_\nu W_{3\mu}\right)\left(\partial^\mu W_3^\nu - \partial^\nu W_3^\mu\right) - \tfrac{1}{4}\left(\partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu\right)\left(\partial^\mu B^\nu - \partial^\nu B^\mu\right) \\ & +\tfrac{1}{8} v^2 \left(g W_{3\mu} - g' B_\mu\right)\left(g W_3^\mu - g' B^\mu\right)\end{aligned}$$

Higgs-Feld, Masse √2 μ

W_1, W_2-Felder: Masse 1/2 gv

W_3 und B mischen, haben Massenterm

- Führe neue Felder Z und A ein:

$$\begin{aligned} Z^\mu &= \frac{1}{\sqrt{g^2+g'^2}}\left(g W_3^\mu - g' B^\mu\right) &= \cos\theta_{\mathrm{w}} W_3^\mu - \sin\theta_{\mathrm{w}} B^\mu \\ A^\mu &= \frac{1}{\sqrt{g^2+g'^2}}\left(g' W_3^\mu + g B^\mu\right) &= \sin\theta_{\mathrm{w}} W_3^\mu + \cos\theta_{\mathrm{w}} B^\mu \end{aligned}$$

- Letzte zwei Zeilen das Lagrangian:

$$\begin{aligned} & -\tfrac{1}{4}\left(\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu\right)\left(\partial^\mu Z^\nu - \partial^\nu Z^\mu\right) + \tfrac{1}{8} v^2 (g^2 + g'^2) Z_\mu Z^\mu \\ & -\tfrac{1}{4}\left(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu\right)\left(\partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu\right)\end{aligned}$$

Mischung W_3 / B → Z / A

- Definition Z, A, schwacher Mischungswinkel θ_w:

$$\begin{aligned} Z^\mu &= \frac{1}{\sqrt{g^2+g'^2}}\left(gW_3^\mu - g'B^\mu\right) &= \cos\theta_\mathrm{w} W_3^\mu - \sin\theta_\mathrm{w} B^\mu \\ A^\mu &= \frac{1}{\sqrt{g^2+g'^2}}\left(g'W_3^\mu + gB^\mu\right) &= \sin\theta_\mathrm{w} W_3^\mu + \cos\theta_\mathrm{w} B^\mu \end{aligned}$$

- Term im Lagrangian:

$$\begin{aligned} &-\tfrac{1}{4}\left(\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu\right)\left(\partial^\mu Z^\nu - \partial^\nu Z^\mu\right) + \tfrac{1}{8}v^2(g^2+g'^2)Z_\mu Z^\mu \\ &-\tfrac{1}{4}\left(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu\right)\left(\partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu\right) \end{aligned}$$

- Massen:

$$\begin{aligned} M_1 = M_2 = M_\mathrm{W} &= \frac{gv}{2} \\ M_\mathrm{Z} &= \frac{v\sqrt{g^2+g'^2}}{2} = \frac{M_\mathrm{W}}{\cos\theta_\mathrm{w}} \end{aligned}$$

- ρ-Parameter:

$$1 = \frac{M_\mathrm{W}^2}{M_\mathrm{Z}^2\cos^2\theta_\mathrm{w}} = \rho$$

- Kovariante Ableitung:

$$D^\mu = \partial^\mu + \mathrm{i}gT_1W_1^\mu + \mathrm{i}gT_2W_2^\mu + \frac{\mathrm{i}g}{\cos\theta_\mathrm{w}}\left[T_3 - \sin^2\theta_\mathrm{w}\left(T_3 + \frac{Y}{2}\right)\right]Z^\mu + \mathrm{i}g\sin\theta_\mathrm{w}\left(T_3 + \frac{Y}{2}\right)A^\mu$$

Lagrangian für Fermionfelder

- Lagrangian für Fermionfelder:

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

$$
\begin{aligned}
g_V^i &\equiv t_{3L}(i) - 2 q_i \sin^2\theta_W \\
g_A^i &\equiv t_{3L}(i) \ ,
\end{aligned}
$$

Nota Bene: Link- und rechtshändige Felder sind jetzt zusammengefasst, t_{3L} ist ein Operator:

t_{3L} =+1/2 für linkshändige u, c, t, Neutrinos

t_{3L} =-1/2 für linkshändige d, s, b, e^-, μ^-, τ^-

t_{3L} =0 für rechtshändige Teilchen

- Beachte: $T^\pm = T_1 \pm \mathrm{i} T_2 \quad W_\mu^\pm = W_\mu^1 \mp \mathrm{i} W_\mu^2$

Diskussion $\sin\theta_w$

- Definition von $\sin\theta_w$ erfolgt über g, g'
- => $\sin\theta_w$ kann aus Kopplungsstärken bestimmt werden,
  z.B. Vergleich von $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$ und $\mu^- e^- \rightarrow \mu^- e^-$
- $\sin\theta_w$ bestimmt *auch* das Massenverhältnis M_Z/M_W
  - Das ist eine nichttriviale Vorhersage des GSW-Modells
  - Diese Vorhersage ändert sich, wenn andere Ansätze für das Higgs-Feld gemacht werden (z.B. Higgs als Isospin-Triplett!)
  - Diese Vorhersage kann experimentell überprüft werden

Elektroschwache Präzisionsmessungen

Fundamentale Parameter im Standardmodell mit minimalem Higgs-Sektor (1 Higgs-Dublett):

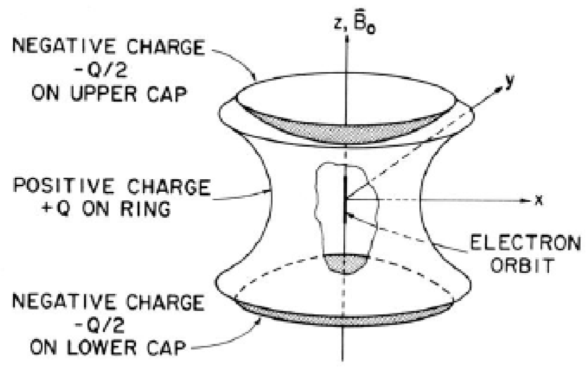
- Kopplungen g, g'
- Higgs-Kopplungen λ, μ
- Fermionmassen (6+6),
  Fermion-Mischungswinkel (3+3), Phasen (1+3)
- Experimentell am besten zugänglich:

$$\left.\begin{array}{l} -\alpha_{em} = e^2/4\pi\varepsilon_0 = (g')^2/(4\pi\varepsilon_0\,(g^2+g'^2)) \\ -G_F/\sqrt{2} = g^2/(8\,M_W^2) = 1/(2\,v^2) = \lambda/(2\mu^2) \\ -M_Z^2 = 1/4\,v^2\,(g^2+g'^2) = 1/4\,\mu^2/\lambda\,(g^2+g'^2) \end{array}\right\}\; g,\, g',\, v^2=\mu^2/\lambda$$

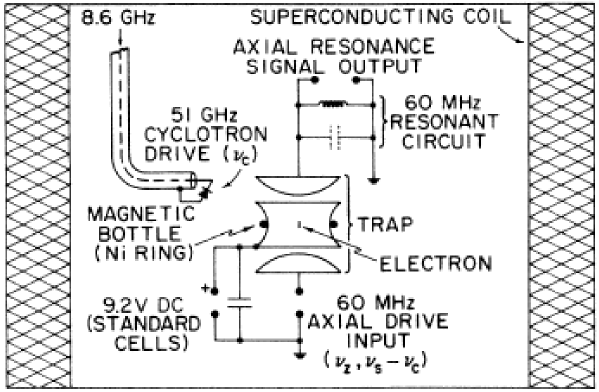
- Bisher nicht gemessen:
  - $M_H = \sqrt{2}\,\mu$
- Aber: Theorem von Veltman sagt: Alle Observablen (außer M_H) hängen nur logarithmisch von M_H ab!

Messung von α_{em}

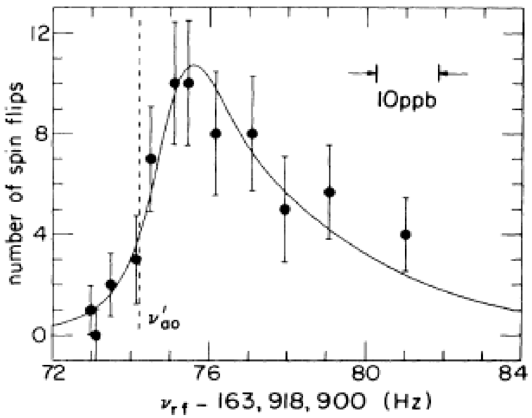
- Messung der magnetischen Anomalie a_e=(|g|-2)/2 des Elektrons in einer Penning-Falle
- Resultat: a_e=1.159 652 1883(42)·10^{-3} (3.7ppb)



Van Dyck *et al.*, Phys. Rev. **D34**(1986)722, Fig. 1



Van Dyck *et al.*, Phys. Rev. **D34**(1986)722, Fig. 2



Van Dyk *et al.*, Phys. Rev. Lett. **59**(1987)26, Fig. 2

R.S. Van Dyck, P.B. Schwinberg and H.G. Dehmelt, Electron magnetic moment from geonium spectra: Early experiments and background concepts, Phys. Rev. **D34** (1986) 722.
idem, *New high precision comparison of electron and positron g factors*, Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 26.

Messung von α_{em}, cont'd

- Magnetische Anomalie ist bekannt in 5. Ordnung QCD!
  $(\alpha/\pi)^5 = 6.76 \cdot 10^{-14}$
- Weitere Korrekturen aus schwacher WW und QCD sind klein, theoretische Unsicherheit aus QCD entspricht 0.16ppb
- $a_e(\text{th}) = 0.5(\alpha/\pi) - 0.328\,478\,444\,00\,(\alpha/\pi)^2 + \ldots\,(\alpha/\pi)^5$
  $+\,0.030(1) \cdot 10^{-12}\,(\text{weak}) + 1.671(19) \cdot 10^{-12}\,(\text{had})$
- => $\alpha^{-1} = 137.035\,998\,80(52)$ (3.8ppb)
- Kombination mit anderen Messungen (Quanten-Hall-Effekt):
  $\alpha^{-1} = 137.035\,999\,11(46)$ (3.3ppb)

P.J. Mohr and B.N.Taylor, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002*, Rev. Mod. Phys. **77** (2005) 1.

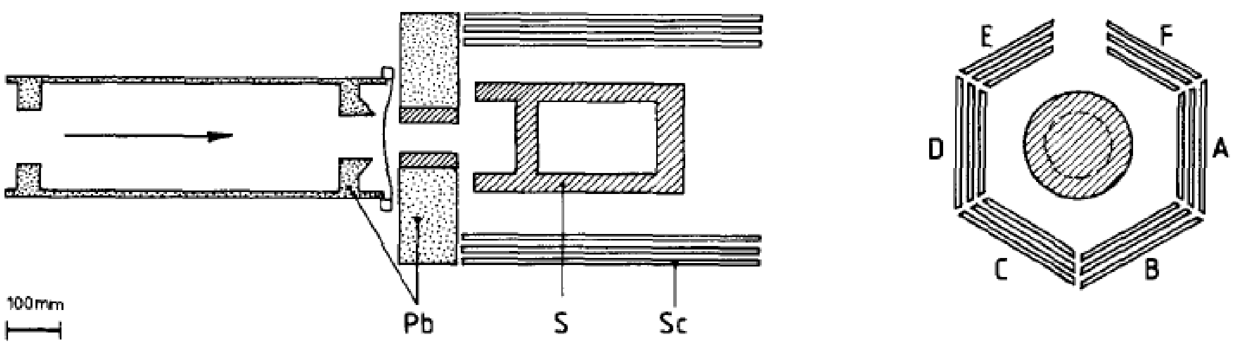
Bestimmung von G_F

- Myon-Lebensdauer gegeben durch
  $\tau_\mu = G_F^2\, m^5 / 192\pi^3\, (1+\Delta q)$
- Δq: Korrekturen für Elektronmasse, Photonabstrahlung, Schleifen
- Radiative Korrekturen bekannt bis $O(\alpha^2)$
  [van Rittbergen & Stuart 1999]
- PDG-Wert 2007: τ_μ=2.197 03(4)µs (18ppm)
- Myon-Masse(PDG): m_μ=105.658 3692(94) MeV (0.089ppm)
- => G_F = 1.166 37(1) $\cdot 10^{-5}$ GeV-2 (9ppm)

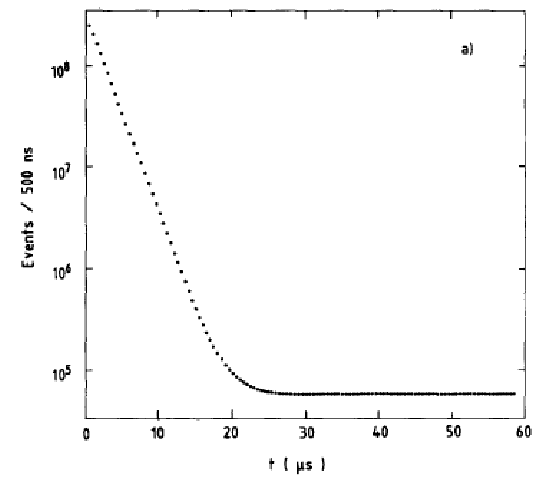
T. van Ritbergen and R.G.Stuart, *Complete 2-loop quantum electrodynamic contributions to the muon lifetime in the Fermi model*, Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 488.

Messung der Myon-Lebensdauer

- Technik:
  - 140MeV π^+-Strahl wird in Target gestoppt
  - Pionen zerfallen in Ruhe (τ_π=26ns), produzieren Myonen in Ruhe
  - Myonen zerfallen in $e^+\nu\nu$, Nachweis der e^+ mit Szintillatoren
  - Messe Mittelwert der Zerfallszeiten
- Beste Einzelmessung: τ_μ=2.197 078(73)µs (33ppm): Bardin 1984



Bardin, Phys. Lett. **137B**(1984)135, Fig. 1



Bardin, Phys. Lett. **137B**(1984)135, Fig. 3

- PDG-Wert 2007: τ_μ=2.197 03(4)µs (18ppm)

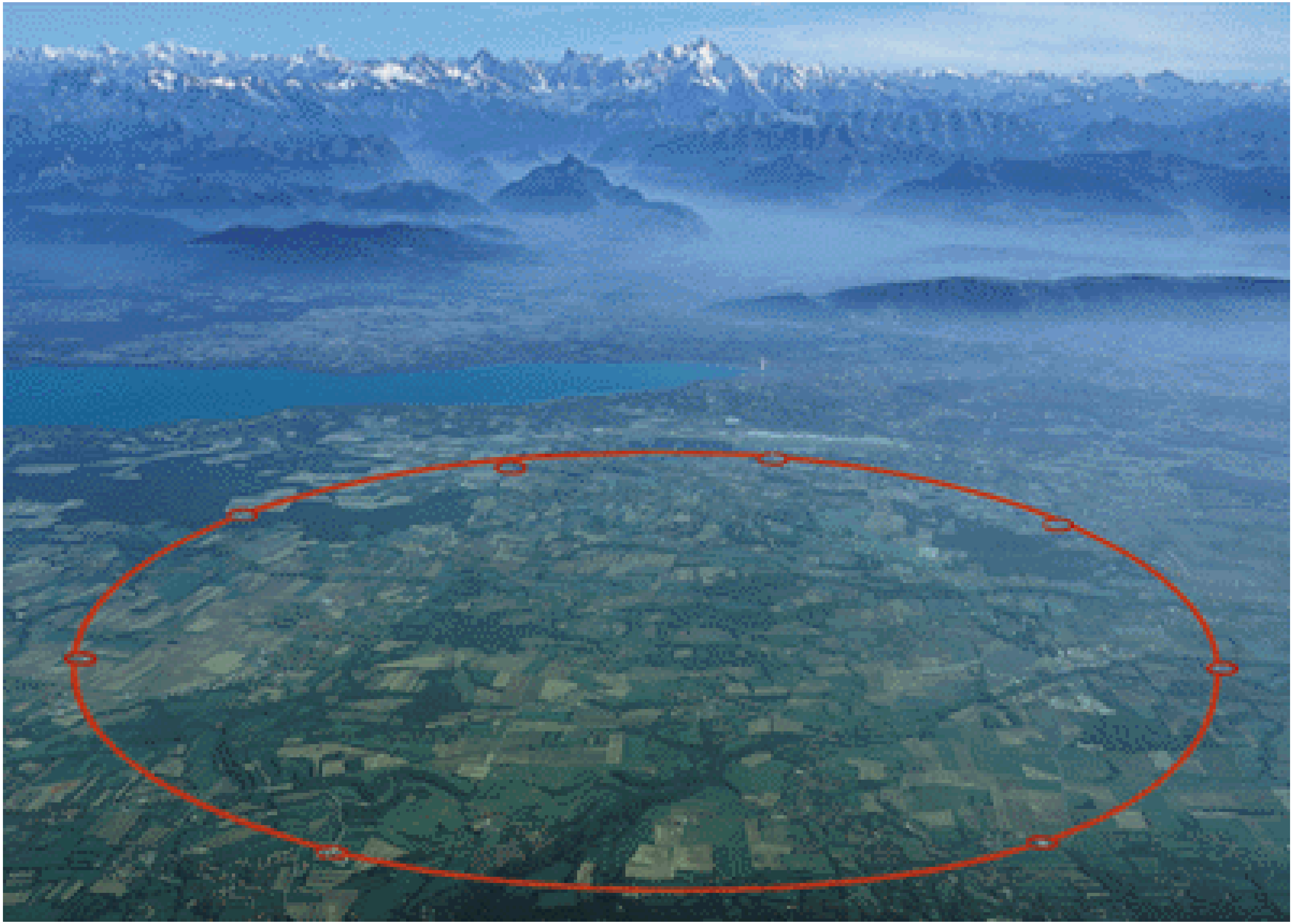
G. Bardin *et al.*, *A new measurement of the positive muon lifetime*, Phys. Lett. **137B**(1984)135.

Messung der Z-Masse

Übersicht:

- Der LEP-Beschleuniger
- Die Experimente ALEPH, DELPHI, L3 und OPAL
- Energiemessung bei LEP: Resonante Depolarisation
- Energiekalibration: Einige Effekte]
- Messung der Z-Linienform
- Extraktion der Z-Masse

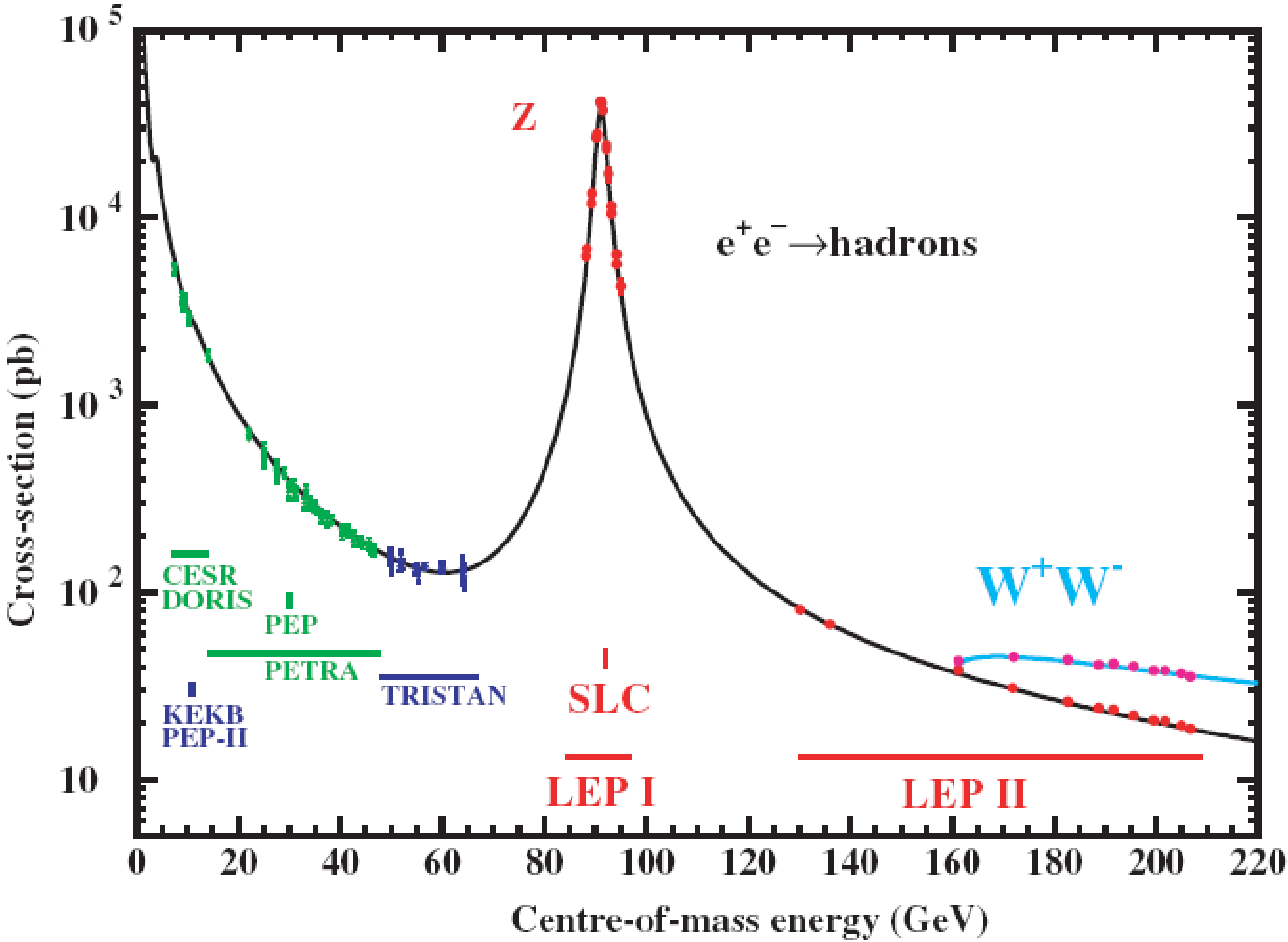
LEP



LEP

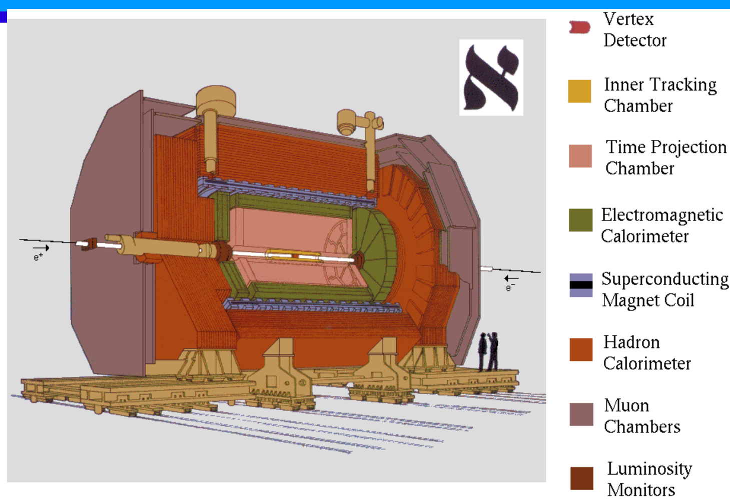
- e^+e^--Beschleuniger am CERN (Genf)
- Umfang: 27km
- LEP-1: 1989-1995
  - $\sqrt{s}$ = 91GeV (Z-Resonanz)
  - 200 pb^{-1} Luminosität => ca. 4.5 Millionen Z-Zerfälle pro Experiment
- LEP-2: 1996-2000
  - $\sqrt{s}$ = 161GeV (W-Schwelle) - 209GeV
  - 700 pb^{-1} Luminosität => ca. 12000 W-Paare pro Experiment
- 4 Experimente: ALEPH, DELPHI, L3, OPAL

$e^+e^- \to$ Hadrons

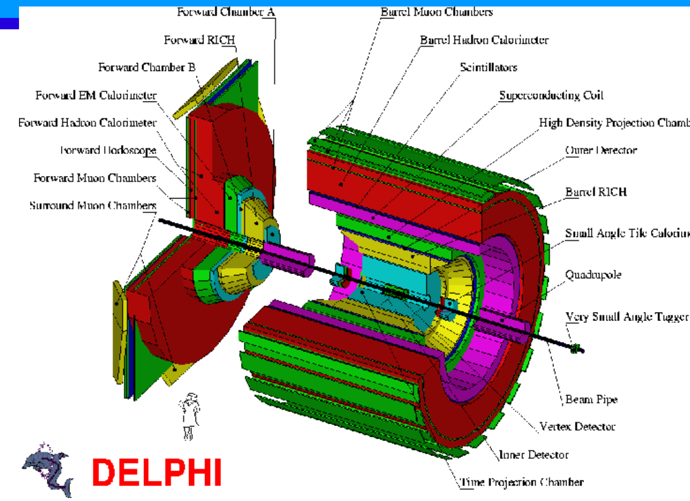


LEP and SLD Coll., Phys. Rept. **427** (2006) 257, Fig. 1.2

Die 4 LEP-Experimente



The ALEPH Detector



ALEPH: http://aleph.web.cern.ch/aleph/aleph/alephgif/alephpict.html

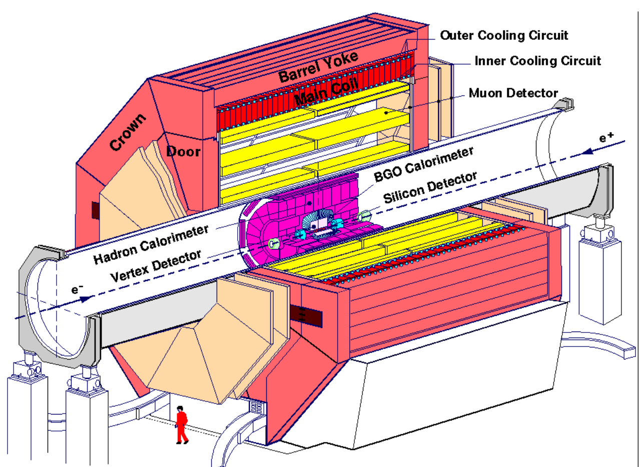
Große TPC, Supraleitender Magnet

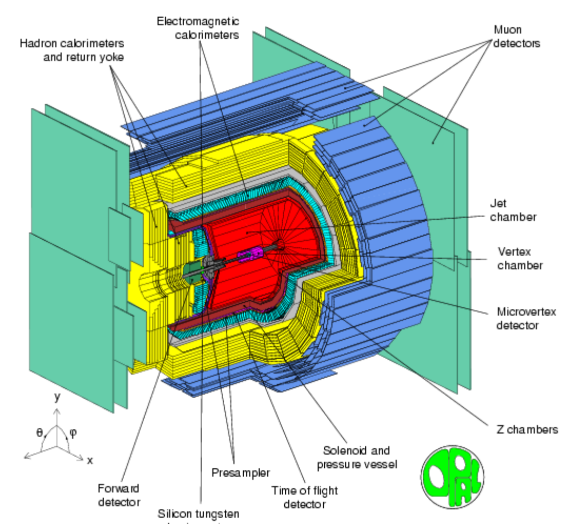
Moderne Technologie, sehr gute Performance

DELPHI: http://delphiwww.cern.ch/offline/physics/delphi-detector.html

Große TPC, Supraleitender Magnet,RICH-Detektor

Neueste Technologie mit allen Problemen





L3: http://l3.web.cern.ch/l3/PR/detector.html

Riesiger Magnet, BGO-Kalorimeter, kleiner Tracker:

Spezialisiert auf γ, e, μ-Nachweis, radikales Design

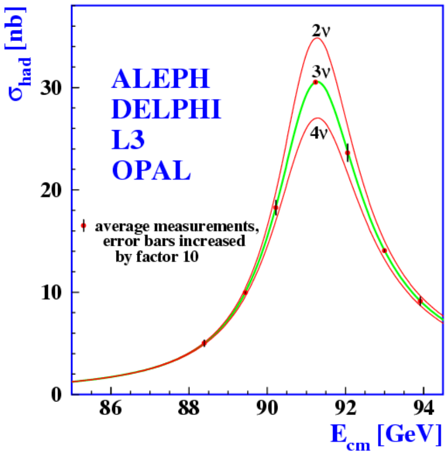
OPAL: http://opal.web.cern.ch/opal/group/pix/many-pix.html

Große Jetkammer, Bleiglas-Kalorimeter

„Proven Technology“ (JADE at LEP)

LEP-Energiekalibration

- Messung der Z-Masse:
  - Messe σ(e+e-→hadrons) als Fkt. von E_{cm}
  - Fitte Resonanzkurve
  - Extrahiere Z-Masse (und Breite)
- Entscheidend: Genaue Messung der Strahlenergie!
- Strahlenergie ist proportional zum B-Feld der Magneten
- Benötige Referenz: Strahlenergiemessung mit resonanter Depolarisation



Resonante Depolarisation

- In Elektron-Speicherringen:
  Synchrotronstrahlung führt zur Polarisation der Elektronen (Sokolov-Ternov-Effekt), Spin parallel zum B-Feld
  => transversale Polarisation der Elektronen
- Spin präzessiert. Anzahl der Präzessionen pro Strahlumlauf heißt „Spin-Tune" ν_0, ist gegeben durch

$$\nu_0 = a_e \gamma = \frac{a_e E}{m_e c^2} = \frac{E[\mathrm{MeV}]}{440.6486(1)[\mathrm{MeV}]},$$

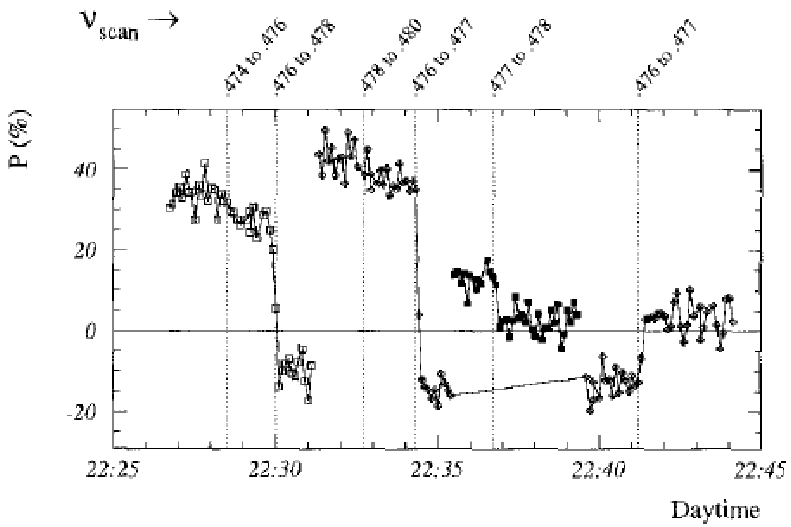
  (a_e: Magnetische Anomalie des Elektrons (g-2)/2)
- Bei LEP: E=45.6 GeV => ν_0, = 103.48382
- Idee:
  Gebe Spin bei jedem Umlauf einen „Kick", z.B. durch HF-Feld
  - Wenn das Elektron nach einem Umlauf wiederkommt, hat sich der Spin um 2π*0.48383 gedreht. Wähle HF so, dass das HF-Feld nach einem Umlauf dieseelb Phasenänderung hat => Kicks mitteln sich nicht heraus, sondern klappen Polarisation um!

Lit: A.A. Solokov & I.M. Ternov, Sov. Phys. Dokl. **8** (1964) 1203.
R. Assmann et al., Z. Phys. **C66** (1995) 567 und Eur. Phys. J. **C6** (1999) 187.

Resonante Depolarisation II

Messung der Strahlenergie:

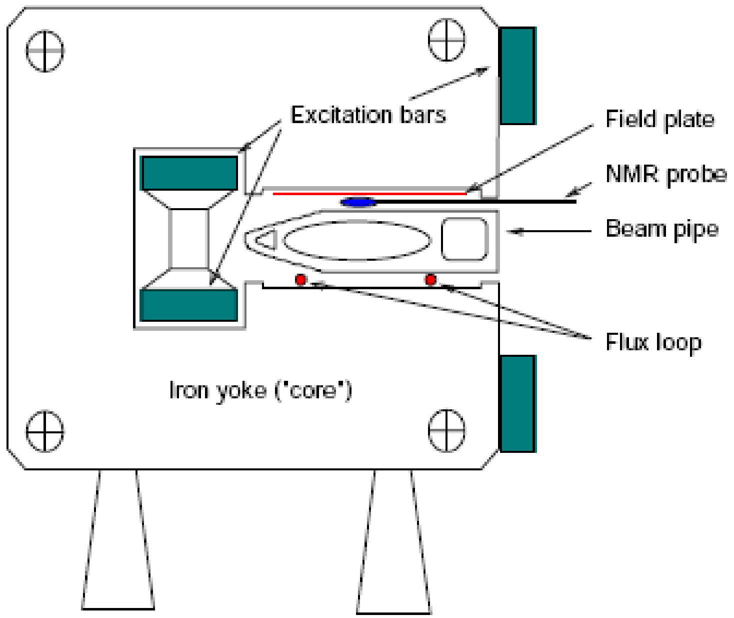
- Messe Polarisation der Elektronen
- Variiere Frequenz des HF-Feldes
- Beobachte, bei welcher Frequenz die Polarisation umklappt
- => Man hat eine Messung des nichtganzzahliegen Teils des Spin-Tunes
  (Messung des B-Feldes liefert Strahlenergie mit hinreichender Genauigkeit, dass man den ganzzahligen Anteil kennt)
- Erreichbare Genauigkeit: 0.9MeV + 1.1MeV(syst)
- Problem: Messung kann nicht während des Lumi-Betriebes durchgeführt werden, nur am Anfang/Ende eines Fills
  => Brauche Modelle, die die Energievariation während eines Fills beschreiben!



R. Assmann et al., Z. Phys. **C66** (1995) 567, Fig. 1

LEP-Energiemessung 2

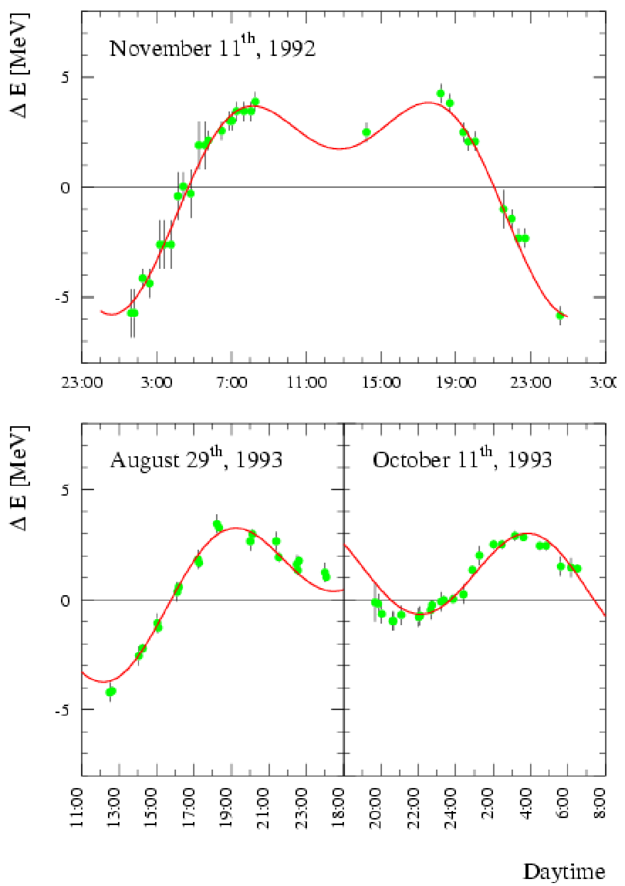
- Energie des Strahls ist proportional zu $\int B\,dl$
- Hauptkomponente des B-Feldes: Feld der Dipolmagnete
  => monitore B-Feld durch NMR-Sonden in Magneten
- 2. Komponente: Feld der Quadrupole
  => Änderung der Strahllage bewirkt Änderung von $\int B\,dl$
  Strahllage ändert sich bei mechanischer Deformation des Ringes!



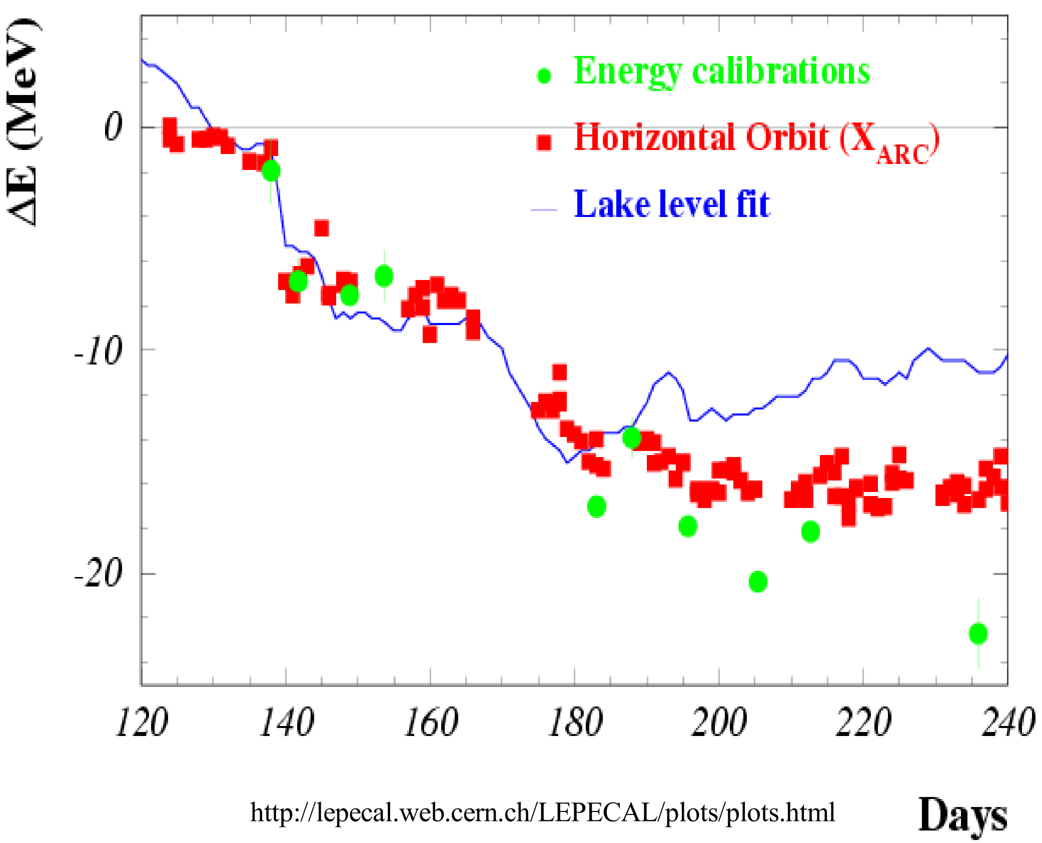
R. Assmann et al., Eur. Phys. J. **C6** (1999) 187, Fig. 1.

LEP-Energie: Tiden und Wasserstand

- Gezeitenkräfte deformieren LEP-Ring => Energieänderung!
- Weitere Deformation: Korreliert mit Wasserstand im Genfer See



http://lepecal.web.cern.ch/LEPECAL/plots/plots.html

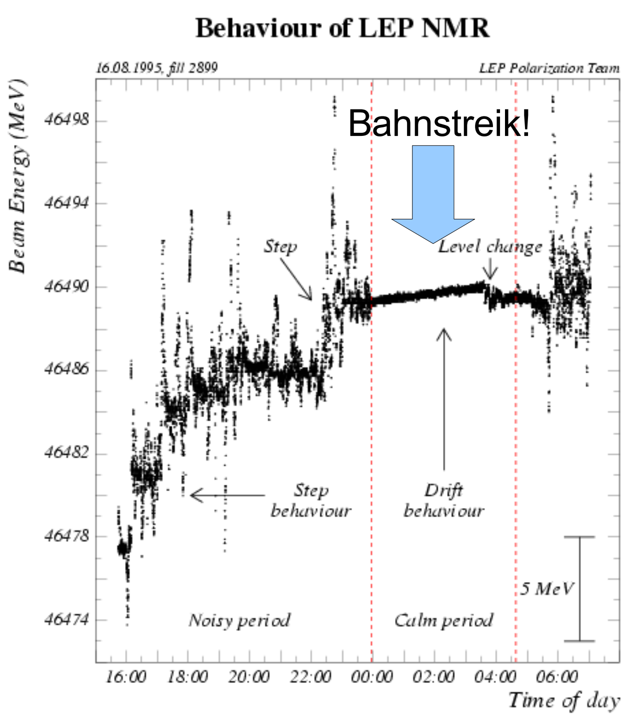


http://lepecal.web.cern.ch/LEPECAL/plots/plots.html

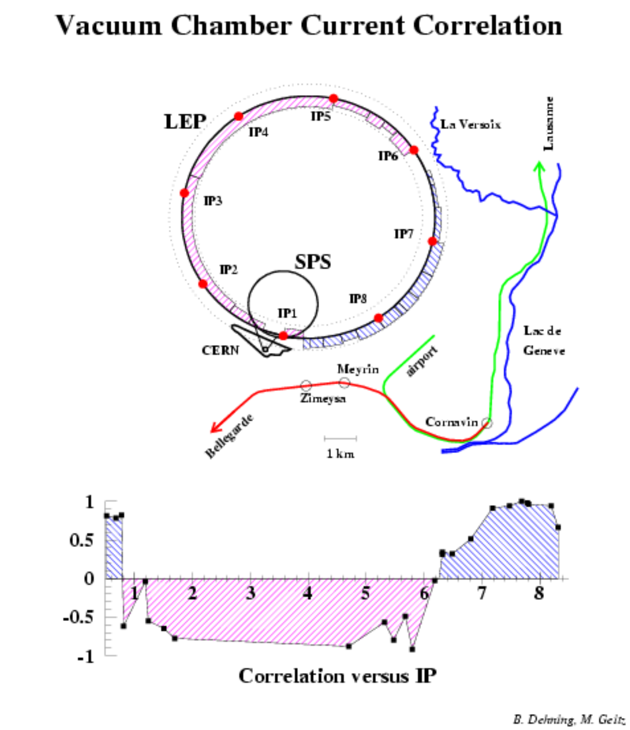
R. Assmann *et al.*, *Calibration of centre-of-mass energies at LEP1 for precise measurements of Z properties*, Eur. Phys. J. **C6** (1999) 187

LEP-Energie: TGV-Effekt

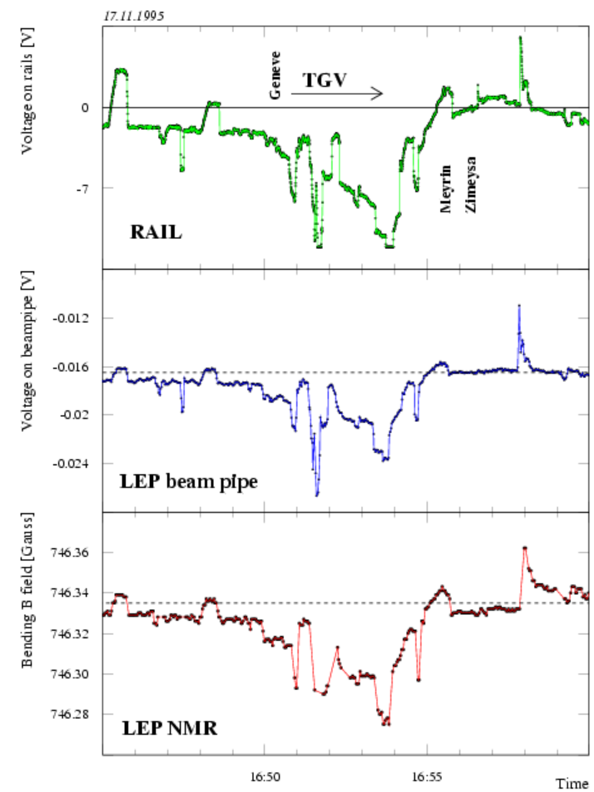
- Problem: NMR-Sonden zeigten irreguläre Schwankungen
- Schwankungen waren weg während eines Bahnstreiks!!!
- Lösung: Fahrstrom des TGV fließt durch den LEP-Ring, führt zu Magnetfeldern und Energieverschiebung!



http://lepecal.web.cern.ch/LEPECAL/plots/plots.html



http://lepecal.web.cern.ch/LEPECAL/plots/plots.html

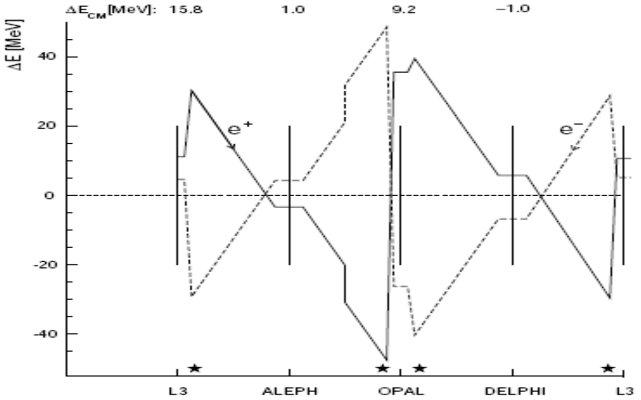


http://lepecal.web.cern.ch/LEPECAL/plots/plots.html

R. Assmann *et al.*, *Calibration of centre-of-mass energies at LEP1 for precise measurements of Z properties*, Eur. Phys. J. **C6** (1999) 187

LEP-Energiekalibration, Zusammenfassung

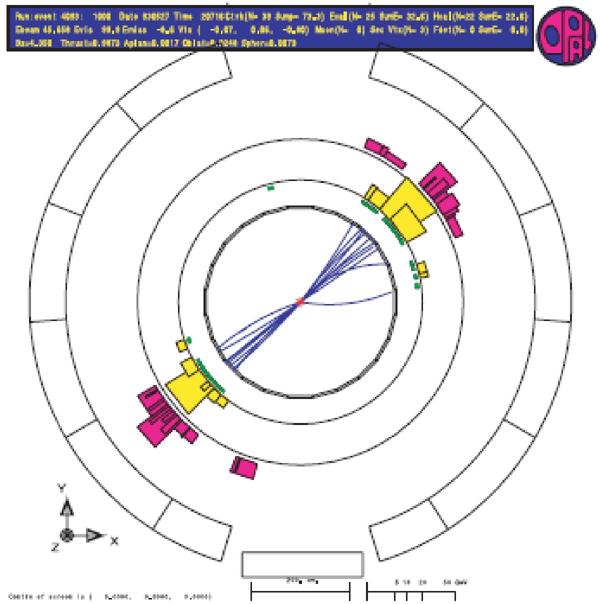
- Absolute Energiemessung am Anfang/Ende eines Fills durch resonante Depolarisation
- Bestimme *Strahlenergie* während des Fills durch Korrekturen für:
  - Parasitäre Felder (TGV-Effekt)
  - Temperatureffekte
  - Tiden-Effekte
  - Effekte durch horizontale Korrekturspulen
  - \+ weitere Effekte

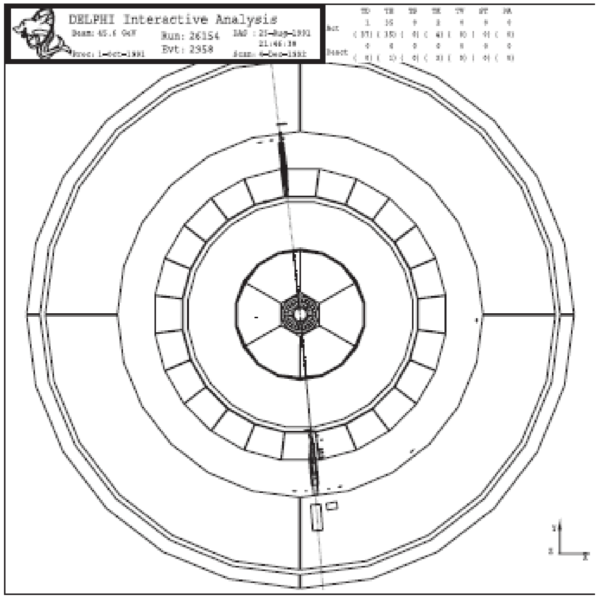


- Strahlenergie in den einzelnen Wechselwirkungszonen muss noch korrigiert werden auf Energieverlust durch Synchrotronstrahlung
- Erreichte Genauigkeit: ca. 1.7MeV! (1995 off-peak data)

Ereignistypen bei LEP

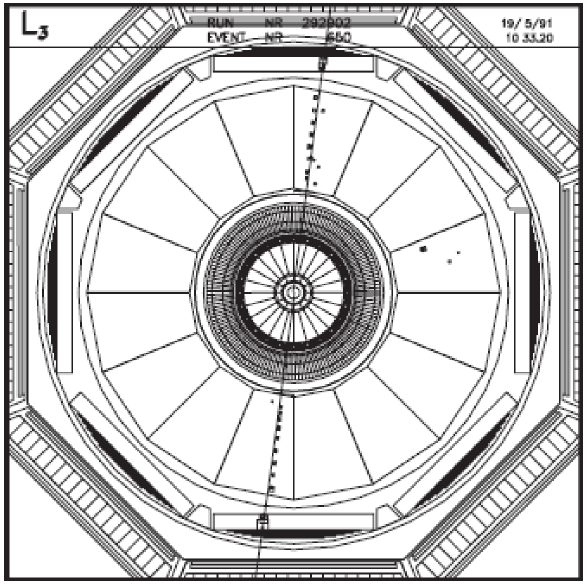
OPAL:
Z->had
(87% aller
sichtbaren
Ereignisse)

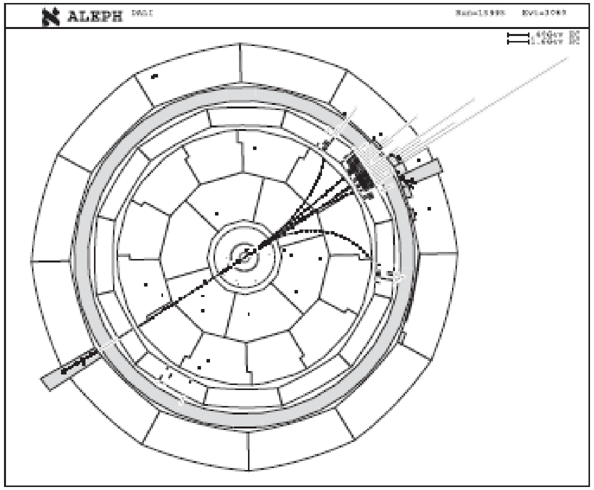




DELPHI:
$Z \to e^+e^-$
(4.2%)

L3:
$Z \to \mu^+\mu^-$
(4.2%)





ALEPH:
$Z \to \tau^+\tau^-$
(4.2%)

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

Z-Zerfälle

- Lagrangian:

$$\mathscr{L}_F = \sum_i \overline{\psi}_i \left(i\,\partial\!\!\!/ - m_i - \frac{g m_i H}{2 M_W} \right) \psi_i$$
$$- \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \overline{\psi}_i\, \gamma^\mu\, (1-\gamma^5)(T^+\, W_\mu^+ + T^-\, W_\mu^-)\, \psi_i$$
$$- e \sum_i q_i\, \overline{\psi}_i\, \gamma^\mu\, \psi_i\, A_\mu$$
$$\boxed{- \frac{g}{2\cos\theta_W} \sum_i \overline{\psi}_i\, \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5)\, \psi_i\, Z_\mu\ .}$$

- Zerfallsbreiten (auf Tree-Level):

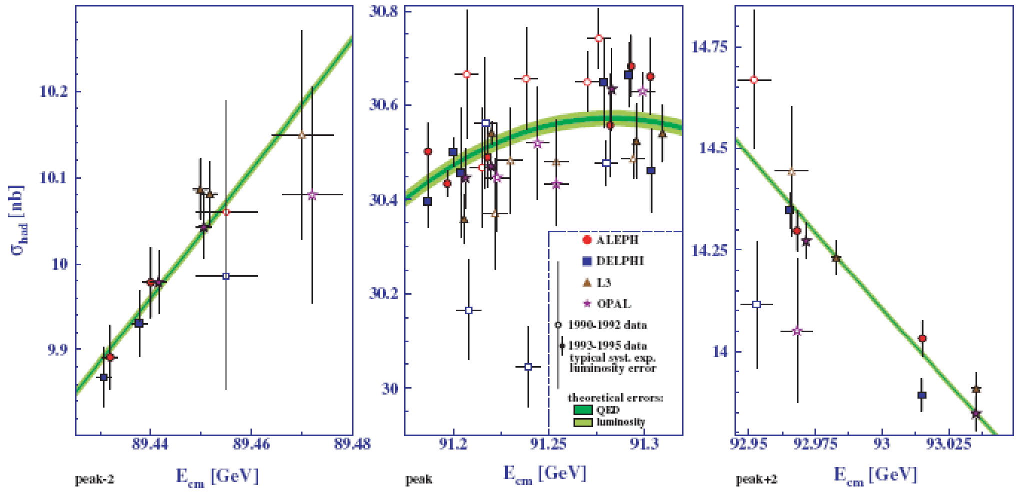
$$\Gamma_{f\bar{f}} = N_C^f \frac{\alpha_{em} M_Z}{12 \sin^2\theta_W \cos^2\theta_W} [g_{Vf}^2 + g_{Af}^2] = N_C^f \frac{G_F M_Z^3}{6\sqrt{2}\pi} [g_{Vf}^2 + g_{Af}^2]\ ,$$

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

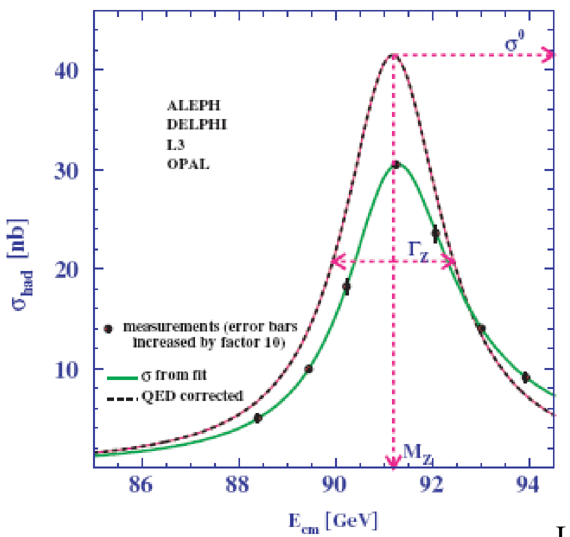
Teilchen	t_{3L}	q	$g_V = t_{3L} - 2q\sin^2\theta_W$	$g_A = t_{3L}$	$g_V^2 + g_A^2$	N_C	N_f	BR
u, c	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	0.19203	$+\frac{1}{2}$	0.28687	3	2	23.6 %
d, s, b	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	−0.34601	$-\frac{1}{2}$	0.36973	3	3	45.5 %
ν_e, ν_μ, ν_τ	$+\frac{1}{2}$	0	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$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

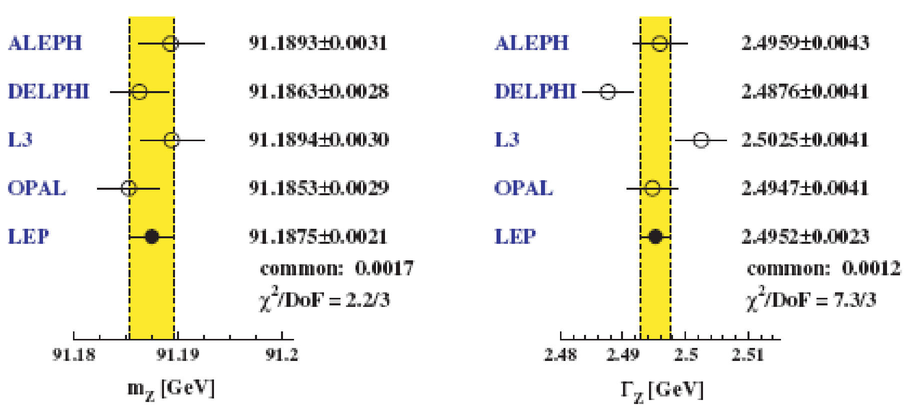
Messung der Z-Linienform

- Strategie:
  - Messe auf Maximum (P) und bei P±2GeV
  - Fitte Linienform
- Resultat:
  - M_Z = 91.1875(21) GeV (23ppm)
  - Γ_Z=2.4952(23) GeV (0.9‰)



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

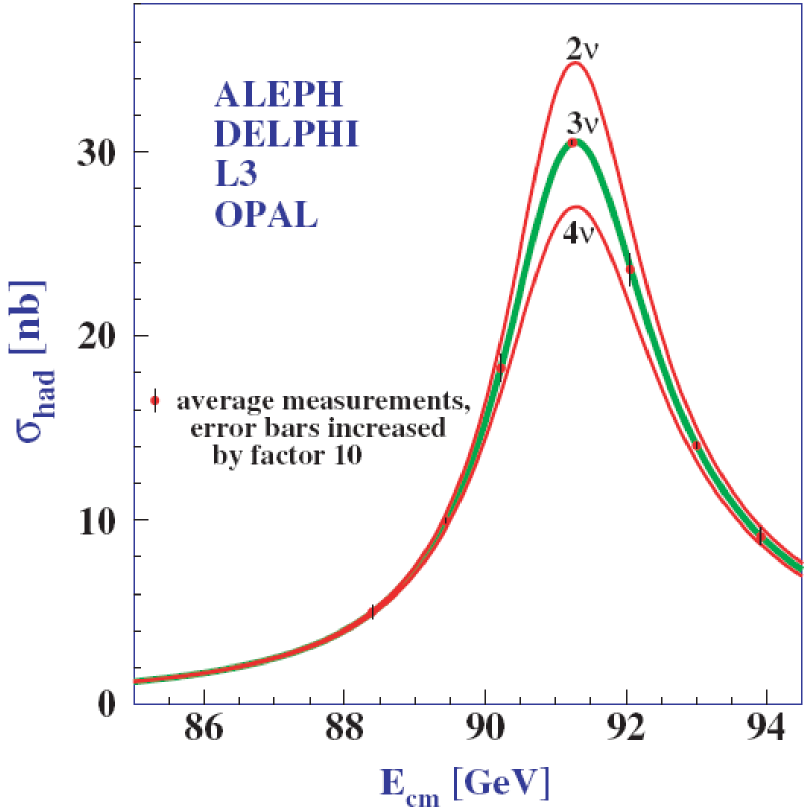




LEP and SLD Coll., Phys. Rept. **427** (2006) 257, Fig. 1.12, Fig. 2.10

Anzahl der Neutrino-Generationen

- Breite des Z: $\Gamma_Z = \Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \boxed{\Gamma_{inv}} + \Gamma_{had}$
- Annahme: Alle unsichtbaren Zerfälle (Γ_{inv}) sind Zerfälle in leichte Neutrinos: $\Gamma_{inv} = N_\nu \Gamma_{\nu\nu}$
- Messe Gesamtbreite Γ_Z und die Breiten für sichtbare Zerfälle als $\Gamma_{ff} = BR(Z \to ff)\ \Gamma_Z$
  => der Rest ist Γ_{inv}
- Anzahl der leichten Neutrinos:
  $N_\nu = \Gamma_{inv}/\Gamma_{\nu\nu}$
- Ergebnis:
  $N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082$



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