

LEP Resultate im Rückblick

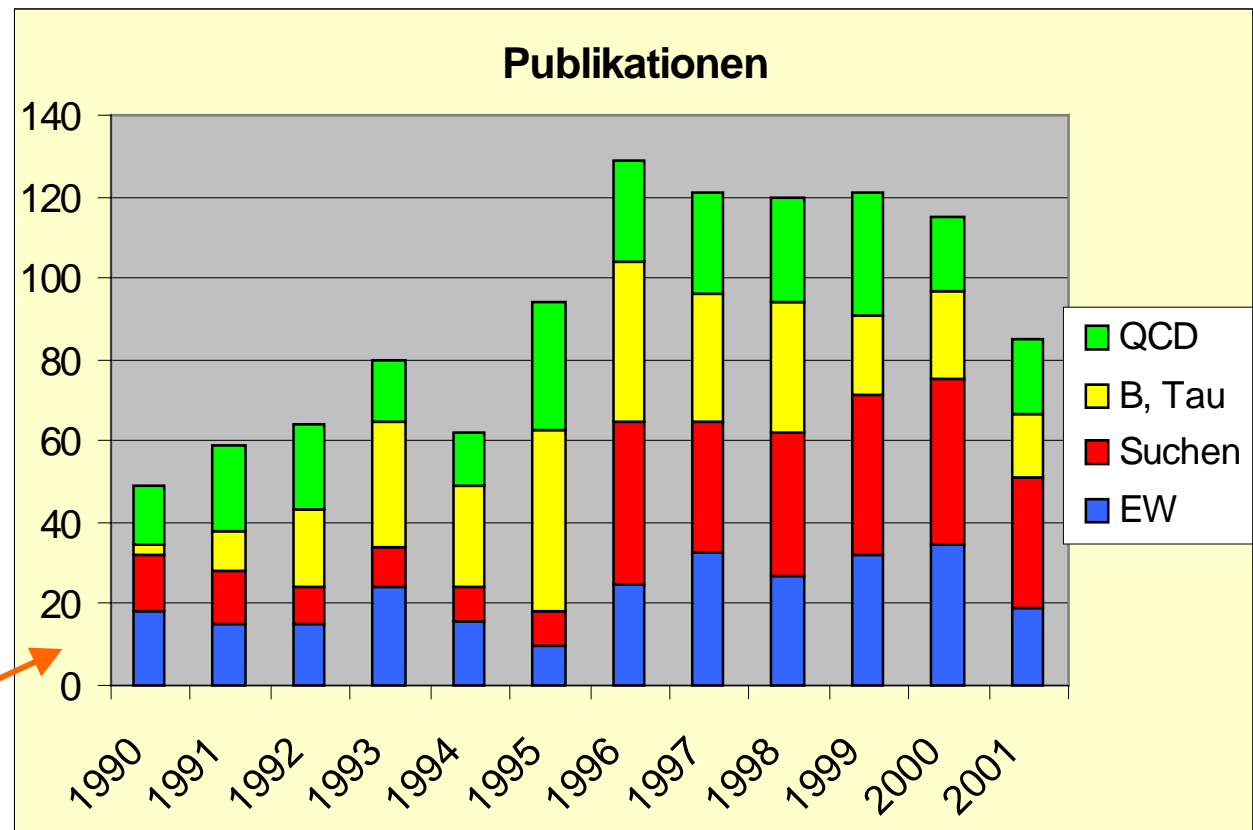
J. Drees

CERN / Universität Wuppertal

Letzte Kollision am 2. Nov.
2000 nach 12 Jahren
erfolgreichem Betrieb.

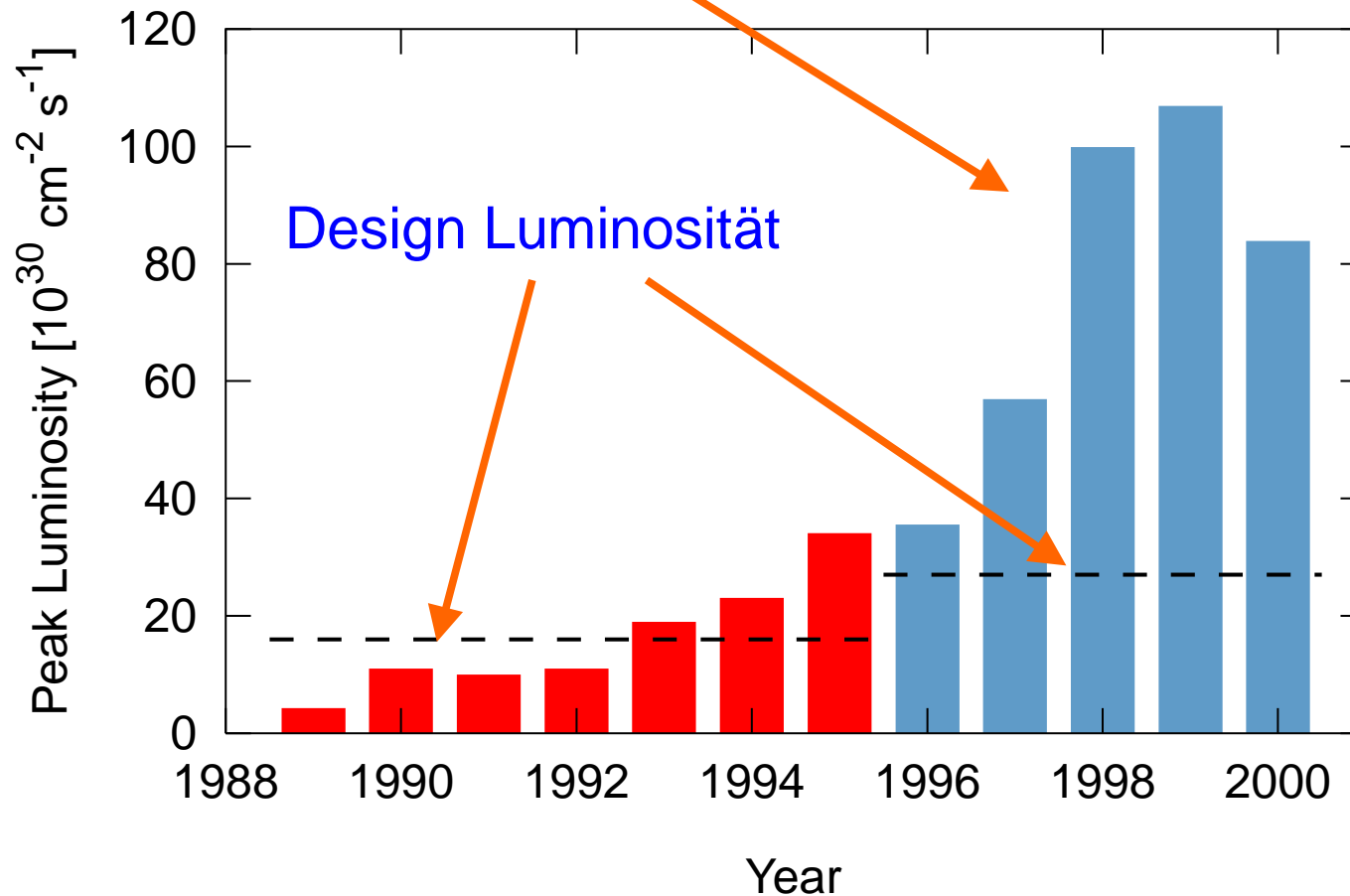
Bisher mehr als 1000 wiss.
Publikationen, viele
Analysen noch nicht
endgültig abgeschlossen.

Hauptthemen



Beispiel für die Leistung von LEP: Peak-Luminosität

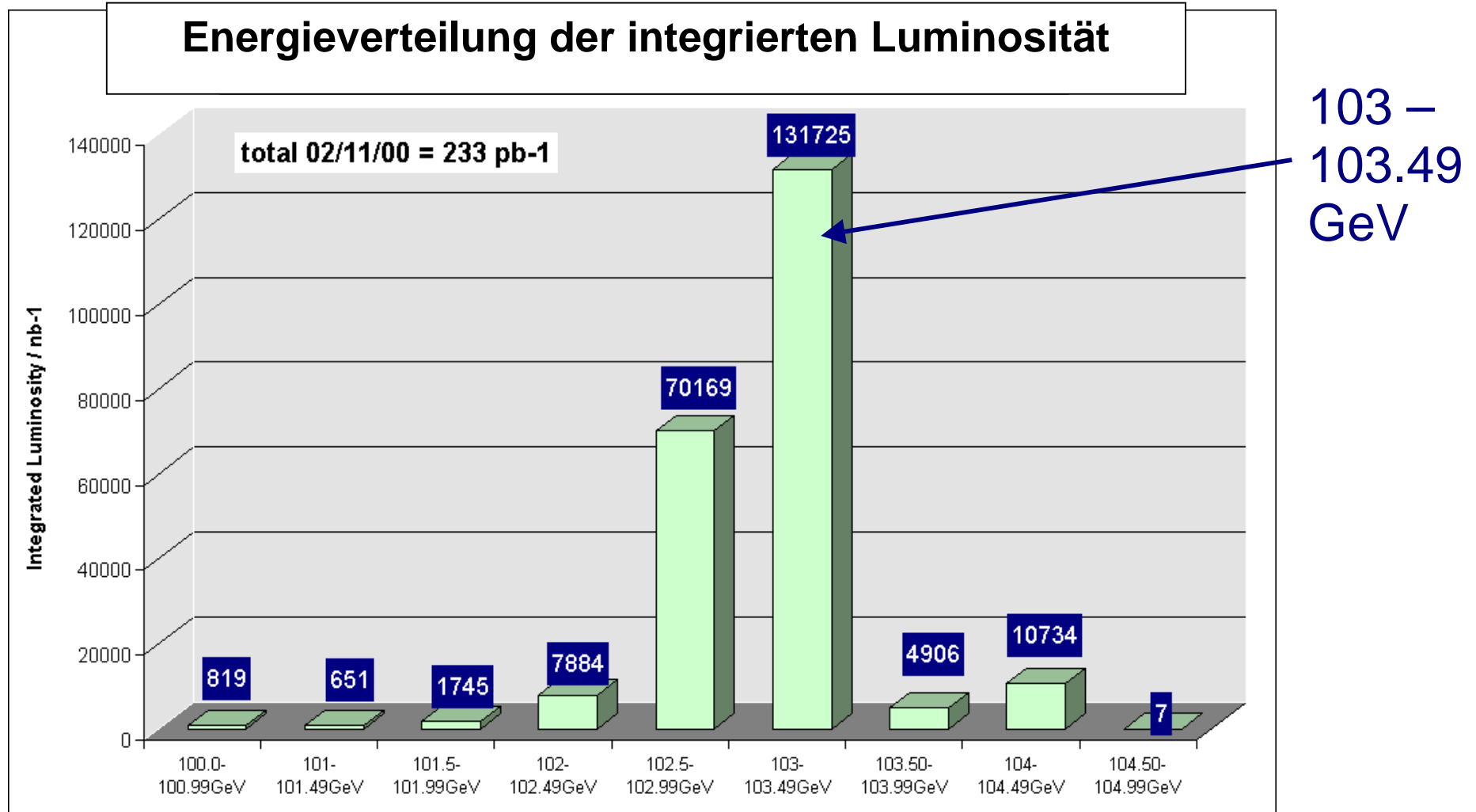
Folge der starken Dämpfung durch Synchrotronstrahlung



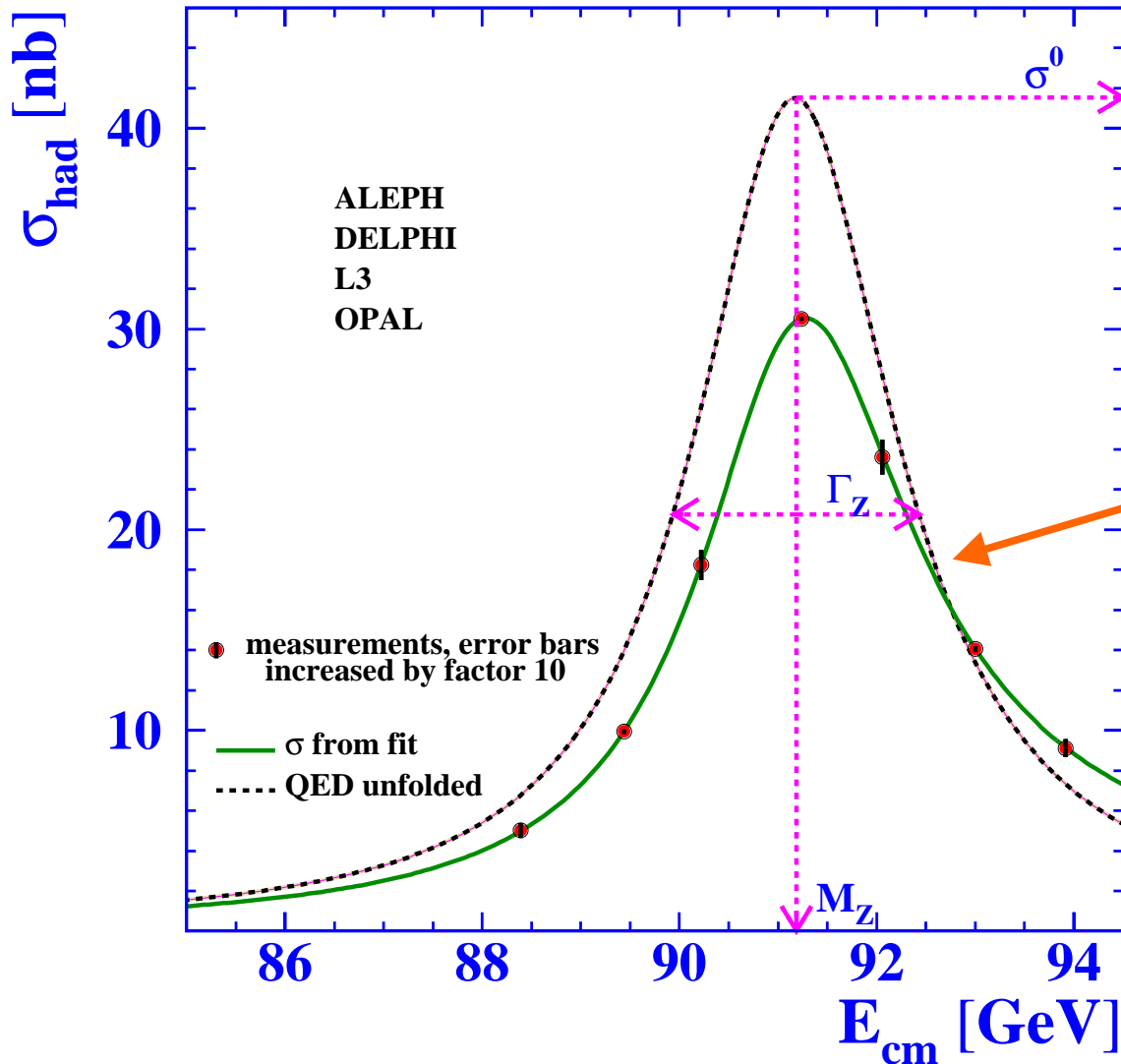
Integrierte Luminosität während LEP1 Phase $L \cong 200 \text{ pb}^{-1}$,
oberhalb W^+W^- Schwelle $L \cong 700 \text{ pb}^{-1}$ pro Exp.

LEP in 2000

Jagd auf Higgs: Höchste Strahlenergie 104.4 GeV, mehr als erhofft, $>130 \text{ pb}^{-1}$ oberhalb 103 GeV, 100 pb^{-1} in den letzten 110 Tagen.



Präzision auf dem Z



Insgesamt registriert:
 15.5×10^6 Z-Zerfälle in Quarks,
plus 1.7×10^6 Zerfälle in gela-
dene Leptonen.

Der endgültige hadronische
Wirkungsquerschnitt,
gemessen und strahlungs-
korrigiert.

Strahlungskorrekturen sind
groß aber sehr gut bekannt.

Das wichtigste Ergebnis der LEP1 Phase

$2 \cdot 10^{-5}$ Genauigkeit für eine fundamentale Naturkonstante:

$$m_Z = 91.1875 \pm \mathbf{0.0021} \text{ GeV}$$

Im Vergleich: Genauigkeit von $\alpha_{\text{QED}}(m_Z)$ nur ca. $40 \cdot 10^{-5}$,
nur G_F besser bekannt ($0.9 \cdot 10^{-5}$).

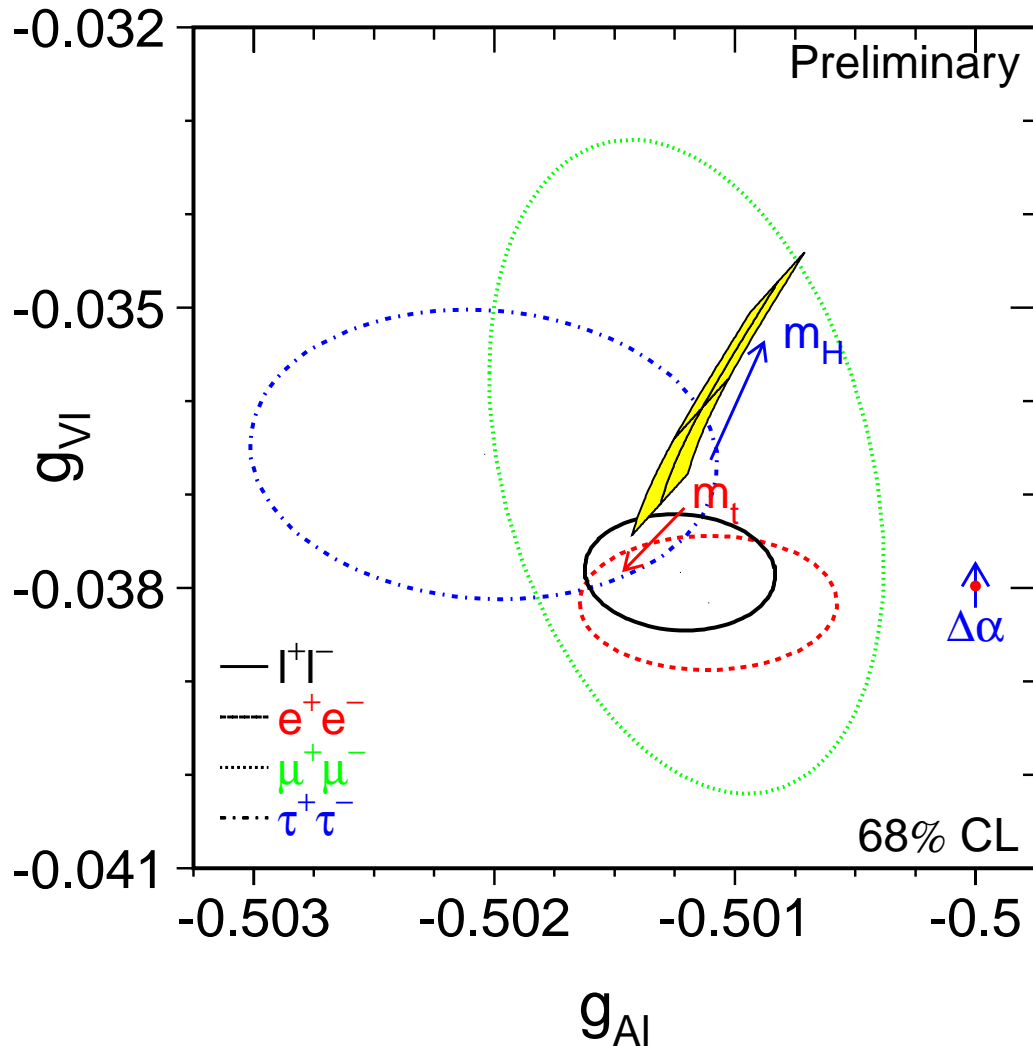
Entscheidend:

- Messung der Strahlenergie mittels resonanter Depolarisation und sorgfältige Kontrolle aller Maschinenparameter, trotzdem dominierender Fehler von $\pm \mathbf{1.7 \text{ MeV}}$,
- Enge Zusammenarbeit mit der Theorie.

Totale Z-Breite:

$$\Gamma_Z = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}$$

Z - Kopplung an geladene Leptonen



Ergebnisse von LEP:

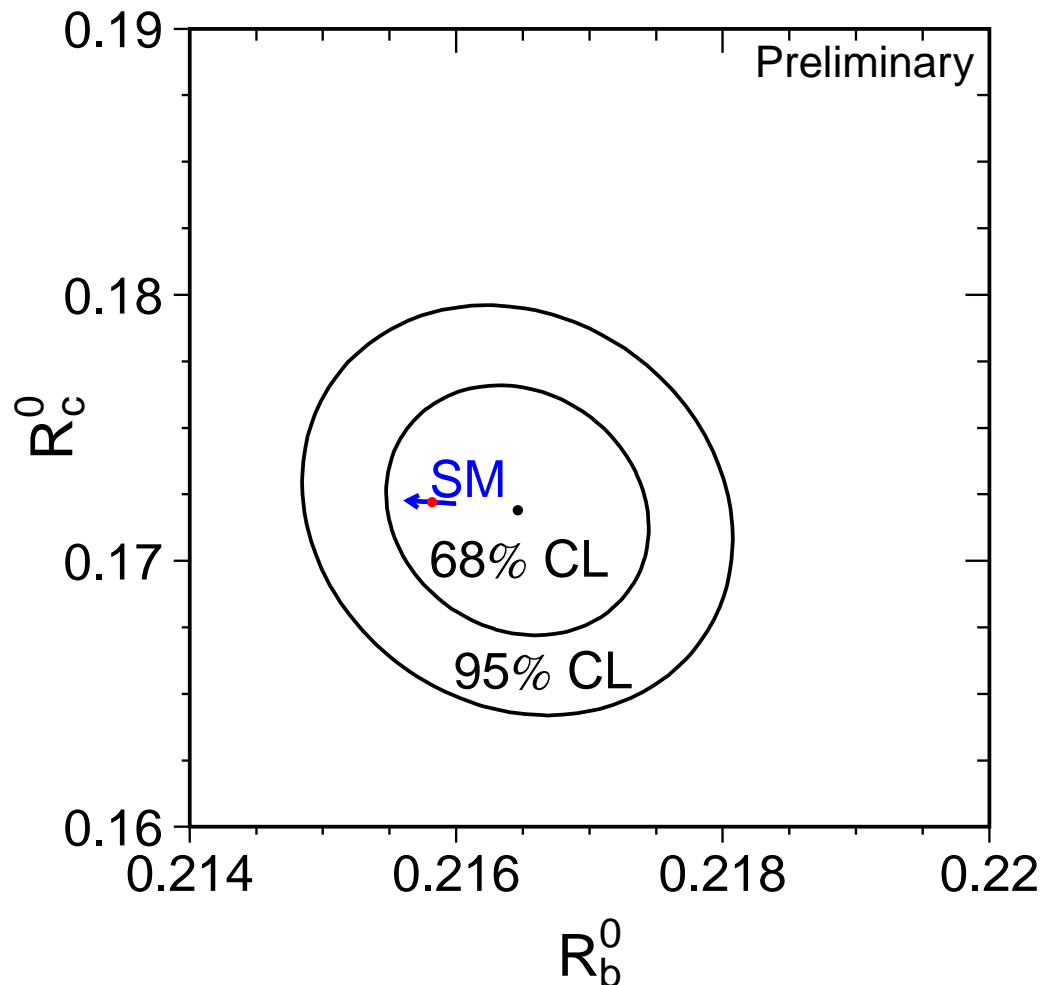
- A_{FB} auf dem Z-Pol $\rightarrow g_{VI}/g_{AI}$,
- Partielle Z-Breiten
 $\rightarrow \Gamma_{ff} \sim g_{Vf}^2 + g_{Af}^2$,
- Longitudinale τ Polarisation
 $\rightarrow g_{VI}/g_{AI}$ für τ, e .

Ergebnisse von SLD:

- Asymmetrie A_{LR} für links- und rechtshändig polarisierte e^- : genaueste g_{Ve}/g_{Ae} Messung,
- A_{FB}^{LR} : $\rightarrow g_{VI}/g_{AI}$ für e, μ, τ .

$$g_{VI}/g_{AI} = 1 - 4 \sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}$$

Z → Quarks



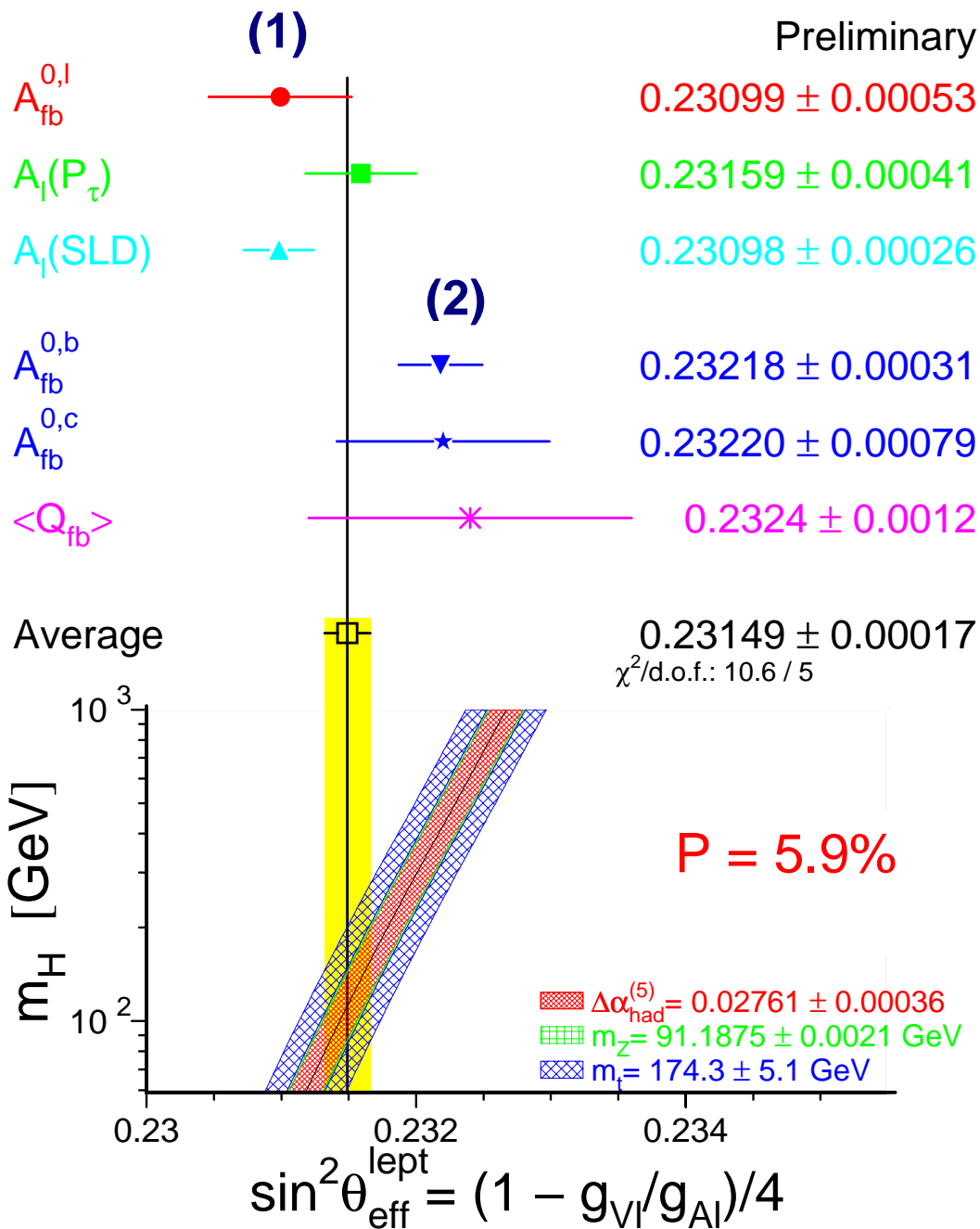
R_b stimmt jetzt mit SM überein

$$R_b^0 \equiv \frac{\Gamma_{b\bar{b}}}{\Gamma_{had}} \quad R_c^0 \equiv \frac{\Gamma_{c\bar{c}}}{\Gamma_{had}}$$

R_b testet Vertexkorrekturen,
sensitiv auf neue Physik, z.B.
SUSY-Higgs,
praktisch unabhängig von QCD,
QED oder ew. Korrekturen.

Sehr schwierige Messung,
erfordert extreme Qualität der
b Identifizierung.

→ Hoch auflösende Mikrovertex-
Detektoren + Ausnutzung aller
topologischen Information für b tag
+ Kontrolle der Hemisphärenkorre-
lationen.



Eine 3 σ Abweichung

Vergleich von $\sin^2 \theta_{\text{eff}}$, bestimmt aus 2 Datensätzen

- (1) Rein leptonische Daten,
von LEP: $A_{\text{FB}}^{0,l}$, $A_l(P_\tau)$
von SLD: A_{LR} , $A_{\text{FB}}^{\text{LR}}$

$$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}} = .23113 \pm .00021$$

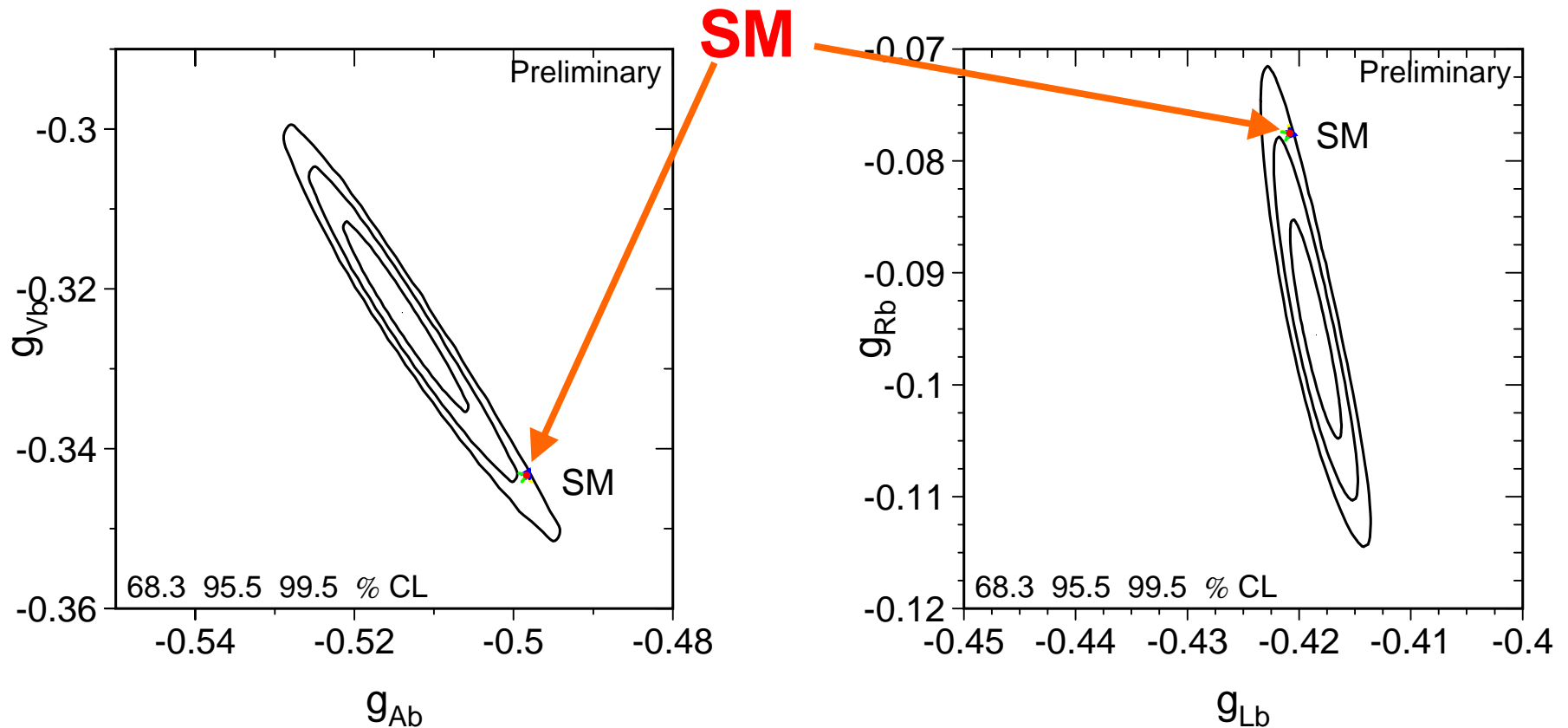
- (2) Hadronische Asymmetrien,
 $A_{\text{FB}}^{0,b}$, $A_{\text{FB}}^{0,c}$, $\langle Q_{\text{FB}} \rangle$

$$\sin^2 \theta_{\text{eff}}^{\text{lept}} = .23220 \pm .00029$$

Statistische Fluktuation
oder
Anzeichen für neue Physik?

g_{Vb} gegen g_{Ab} und g_{Rb} gegen g_{Lb}

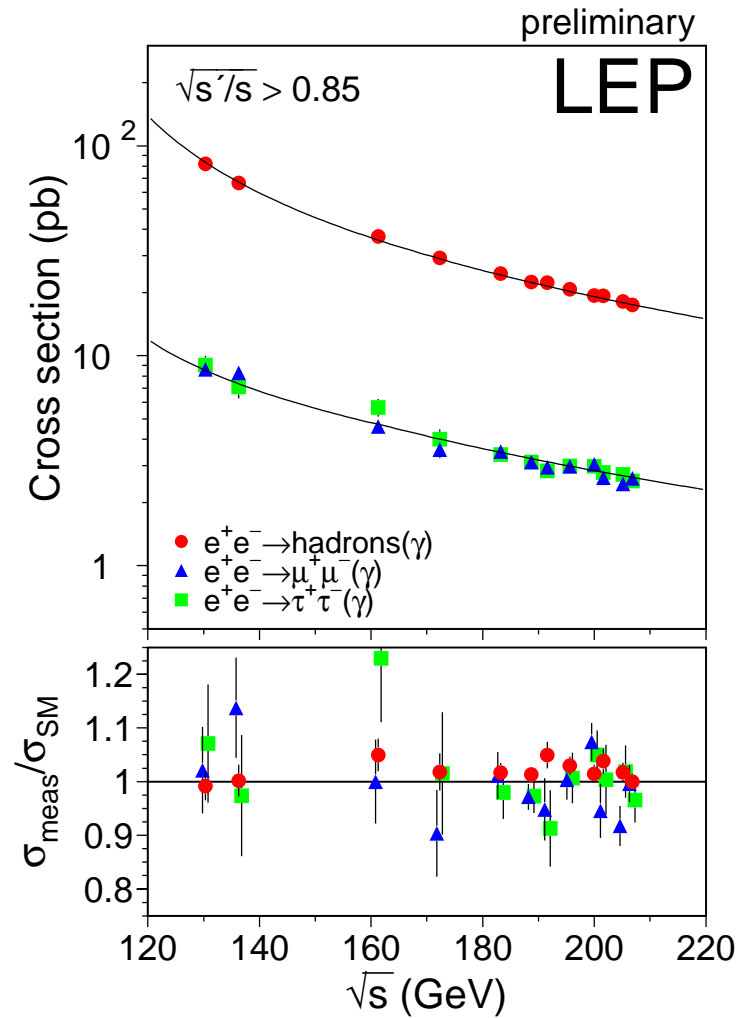
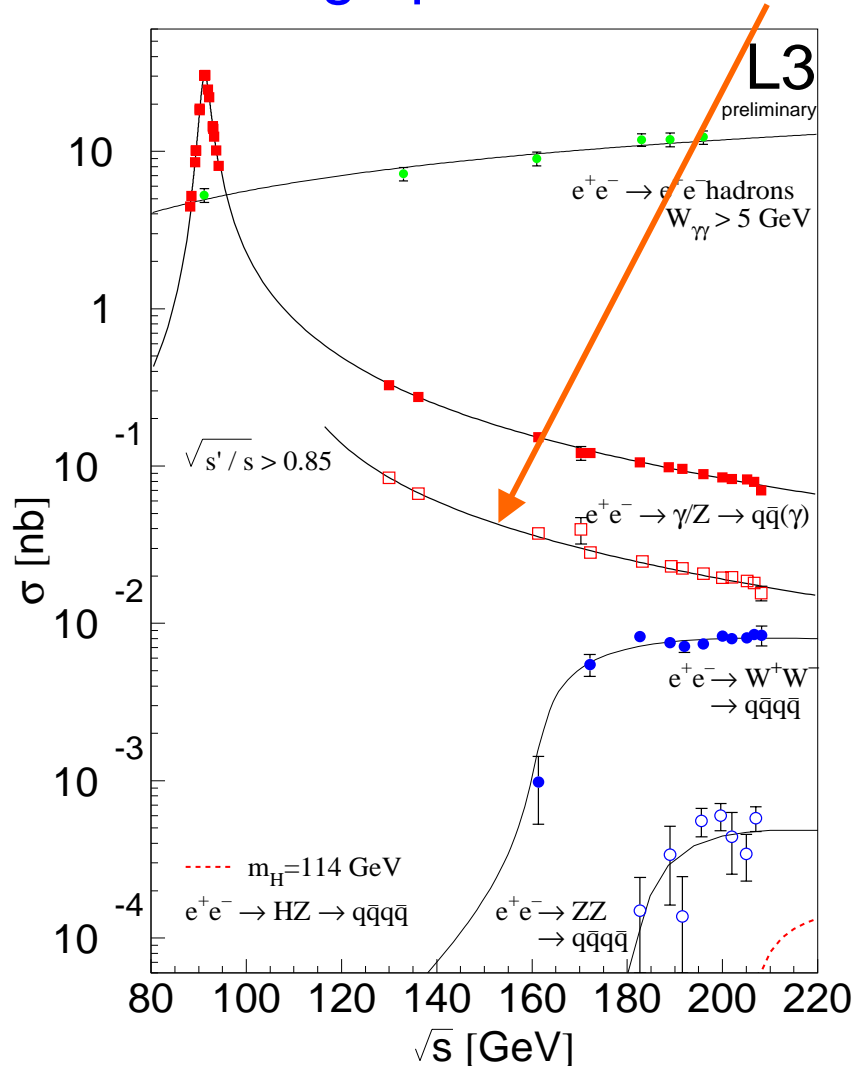
Aus R_b , g_{Vb}/g_{Ab} (SLD), A_{FB}^b , Leptonuniversalität angenommen.



Antikorrelation von g_{Vb} , g_{Ab} infolge Festlegung der Summe der Quadrate durch präzise R_b Messung. Abweichung vom SM hauptsächlich für g_{Rb} .

2 Fermion Produktion bei LEP2

Wirkungsquerschnitt hoch verglichen mit anderen Prozessen.



Schnitt auf $\sqrt{s'/s}$ selektiert interessante Ereignisse.

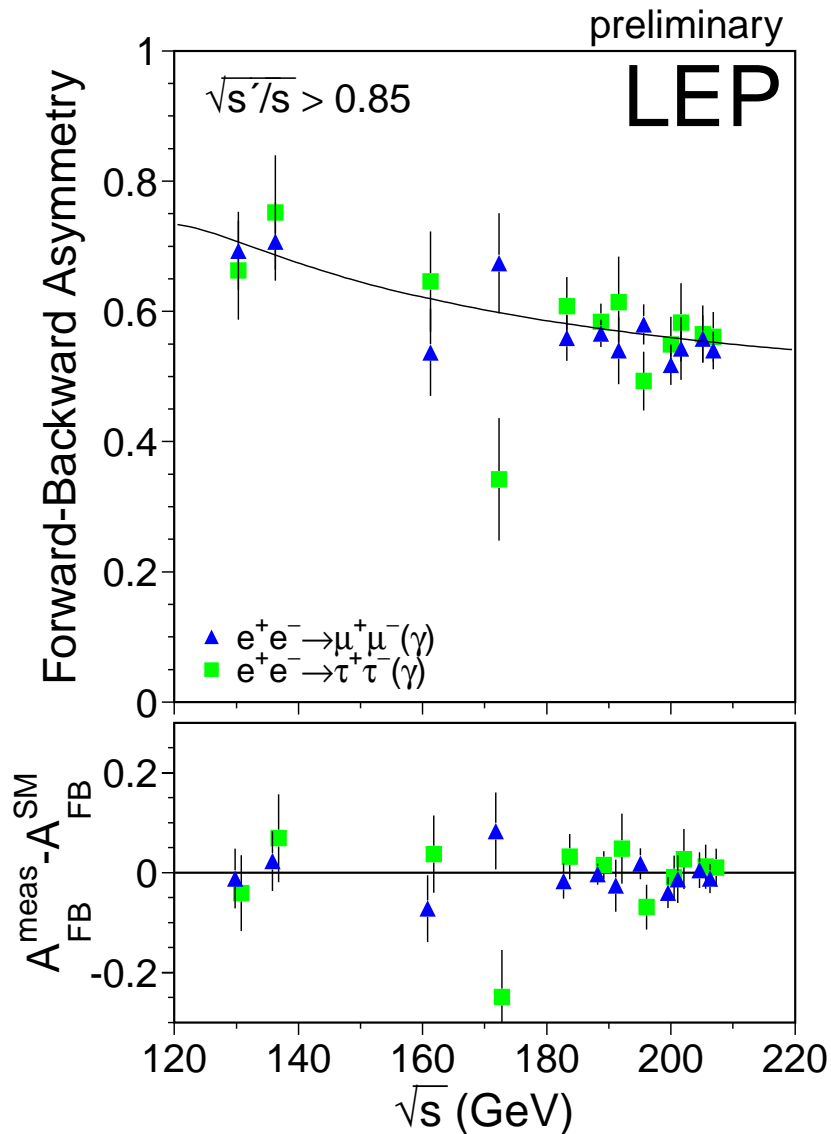
Kombiniert für Hadronen, $\mu\mu$, $\tau\tau$, bb , cc durch EWWG.

Übereinstimmung mit SM, aber hadronischer Wq. 1.8 σ zu hoch.

LEP2 μ und τ Asymmetrie

Labor für Test auf neue Physik,
mit kombinierten Daten:

- Zusätzliches Z' , z.B. Grenze für $m_{Z'}$ (keine ZZ' Mischung) im
 - LR Modell 0.80 TeV (95% CL),
 - χ Modell 0.68 TeV,
- Grenze für Kontaktwechselwirkung
 - zwischen Leptonen: $\sqrt{4\pi\Lambda/g} > 8.5$ bis 26 TeV,
 - zwischen Leptonen und schweren Quarks. Für eb: $\sqrt{4\pi\Lambda/g} > 2.2$ bis 15 TeV.

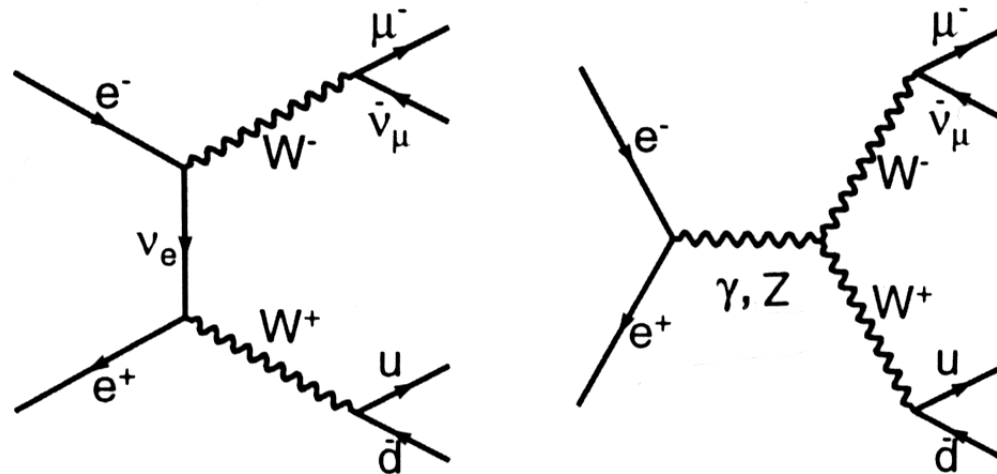


Quantengravitation in extra Raum-
dimensionen:

Einschließlich e^+e^- Daten: $M_s > 1$ TeV.

W^+W^- Produktion

Wichtigster SM Test bei LEP2: Messung von $m_W \leftrightarrow$ Vergleich mit m_W aus Z-Präzisionsdaten, Struktur des 3-Boson Vertex.

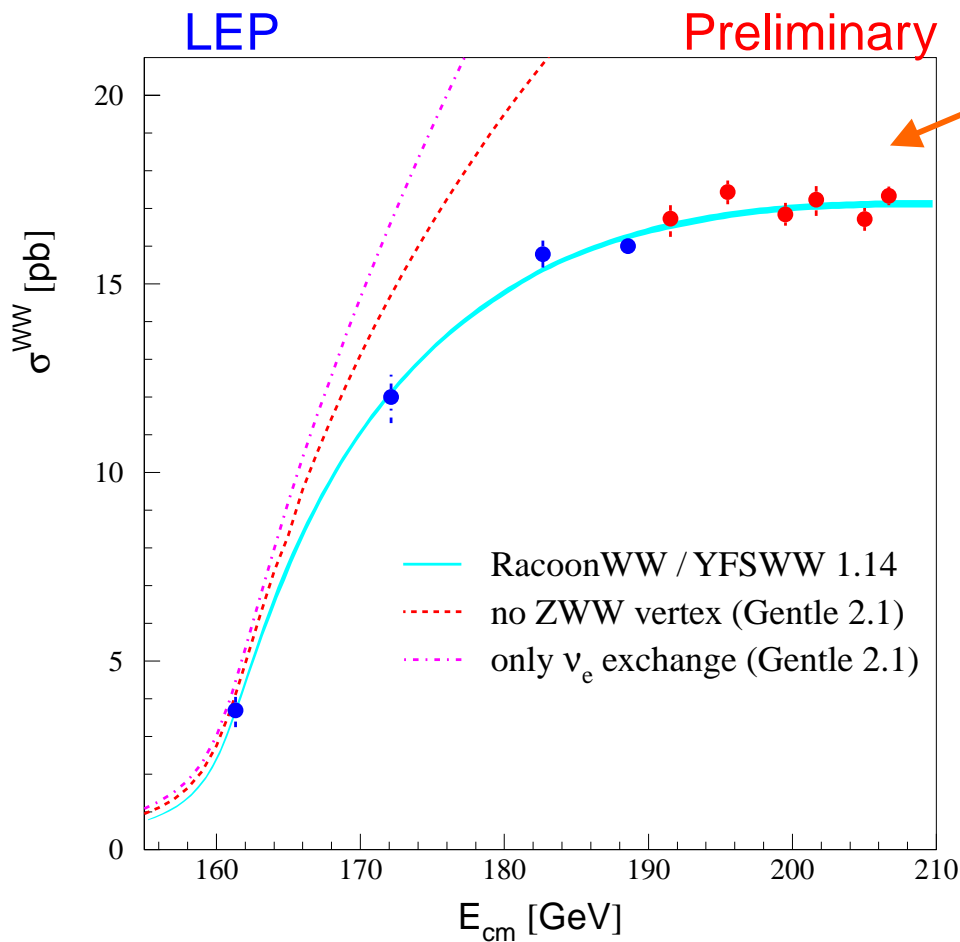


CC03
Diagramme

Jedes LEP Experiment hat ca. 10000 W^+W^- Ereignisse registriert.
Fünf Zerfallsklassen: Voll hadronische (45.6%), 3 semileptonische (je 14.6%), rein leptonische (10.6%).

Effektive Methoden, um 4-Fermionereignisse herrührend von W Produktion vom Untergrund zu trennen, z.B. neuronale Netzwerke.
Typische Effizienz für WW Selektion 85% bei sehr hoher Reinheit.

$\sigma(e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow 4 \text{ Fermionen})$



Kombinierte Ergebnisse der 4 Kollaborationen

Offensichtlich: Alle t- und s-Kanal Beiträge notwendig, um die Daten zu verstehen.

Subtiler: Vergleich mit neuen MC Generatoren mit verbesserten Strahlungskorrekturen, DPA für virtuelle $O(\alpha)$ Korrekturen zur resonanten W-Paar Produktion (plus alle anderen QED Korrekturen) für 0.5% Genauigkeit.

$$\sigma_{\text{gemessen}} / \sigma_{\text{Theorie (RacoonWW)}} = 1.000 \pm 0.009 \quad (\sqrt{s} > 180 \text{ GeV})$$

W Masse

Aus LEP1 Phase: Präzise Vorhersage von m_W basierend auf SM.
Neuster **indirekter** Wert mit m_t von CDF und D0:

$$m_W = 80.379 \pm 0.023 \text{ GeV} .$$

Der kleine Fehler setzt die Skala für die direkte Massenmessung.

Im SM hängt m_W von m_t , m_H und $\Delta\alpha$ ab (2-Schleifen, Freitas et al.):

$$m_W = 80.3767 + 0.5235\left(\left(\frac{m_t}{174.3}\right)^2 - 1\right) - 0.05613 \ln\left(\frac{m_H}{100}\right) - 1.081\left(\frac{\Delta\alpha}{0.05924} - 1\right) + \dots$$

Signifikante Abweichung der indirekten von der direkten Messung?
→ **neue Physik und Existenz neuer Teilchen.**

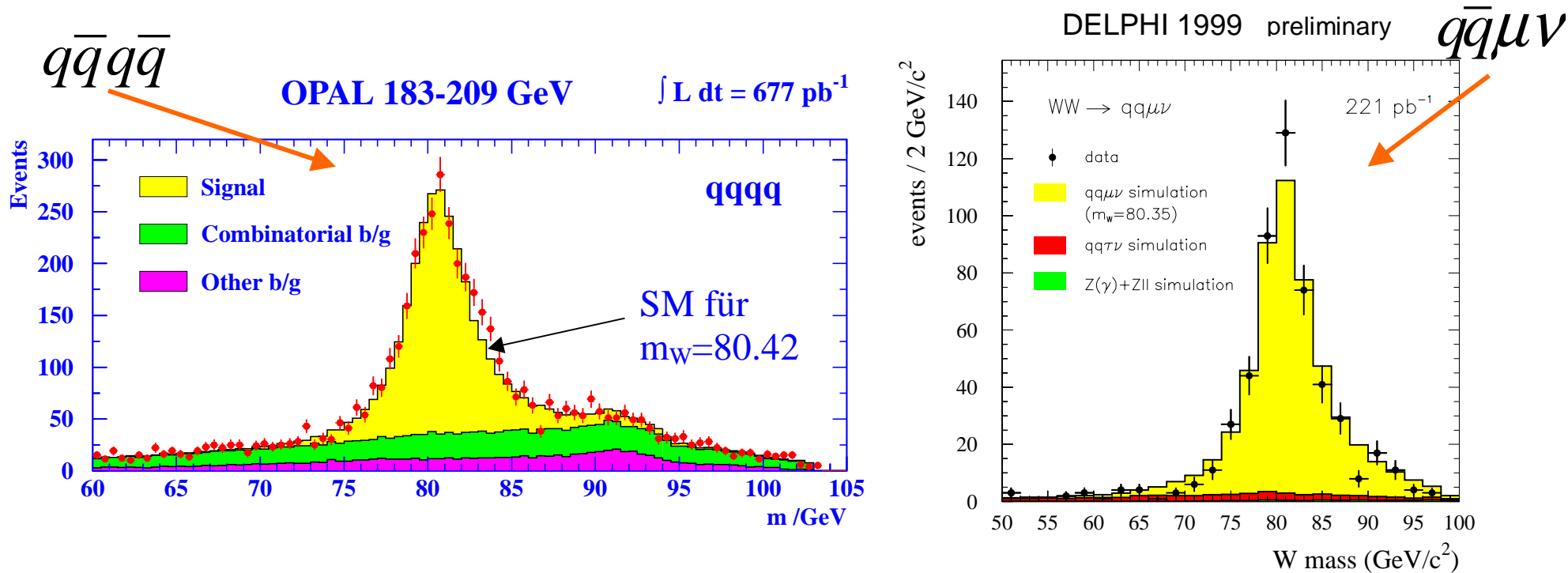
Im Prinzip zwei unabhängige Methoden:

- Messg. des totalen Wq. nahe Schwelle bei $E_{CM} = 161 \text{ GeV}$:

$$m_W = 80.40 \pm 0.21 \text{ GeV} \quad (\text{geschätzter Fehler für GigaZ: } \Delta m_W = 0.006 \text{ GeV}).$$

Direkte m_W Messung

Aus Verteilung der invarianten Masse (Energie- und Impulserhaltung):



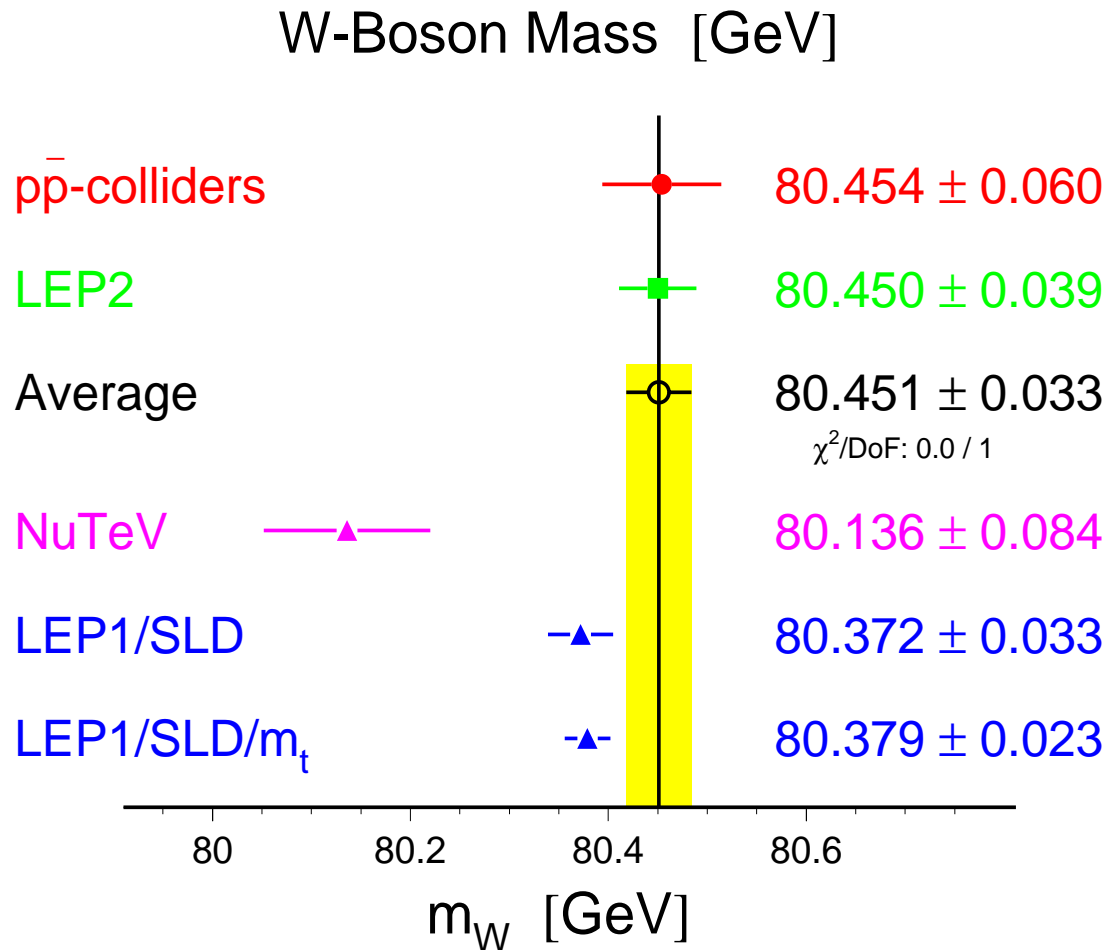
Systematischer Fehler von m_W :

- 29 MeV für semileptonische Kanäle, (Fragmentierung, Strahlenergie, Detektoreffekte, γ - Emission, ...)
- 54 MeV für voll hadronische, (colour reconnection, BE).

Konsistenz:
$$\Delta m_W (q\bar{q}q\bar{q} - q\bar{q}l\bar{\nu}) = +9 \pm 44 \text{ MeV}$$

Ergebnisse

LEP: $m_W = 80.450 \pm 0.026 \pm 0.030$ GeV, Gewicht 4q Kanal 26%.



Übereinstimmung
zwischen direkter und
indirekter Messung
innerhalb von 1.8σ .

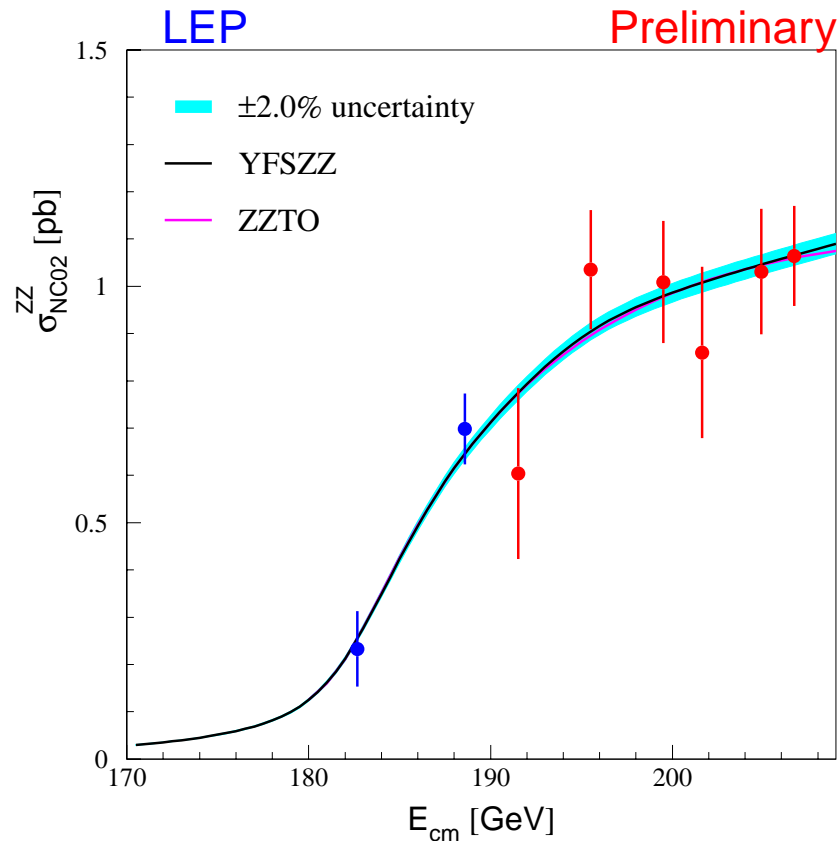
Aber 3.5σ gegenüber
NuTeV?

LEP endgültig:
 $\Delta m_W \cong 35$ bis 30 MeV !

Aus direkter Rekonstruktion:
 $\Gamma_W = 2.150 \pm 0.091$ GeV,
Übereinstimmung mit SM.

ZZ Produktion

- Neuer SM-Test. Suche nach anomalen Kopplungen der neutralen Eichbosonen (ZZZ , $ZZ\gamma$). Irreduzibler Untergrund der Higgs-Suche.



Kombinierte Ergebnisse (NC02, nur t- und u-Kanal Austausch).

Geringe Statistik,
ca. 600 Ereignisse pro Exp.

**Kein Anzeichen für
anomale Kopplungen
der Eichbosonen!**

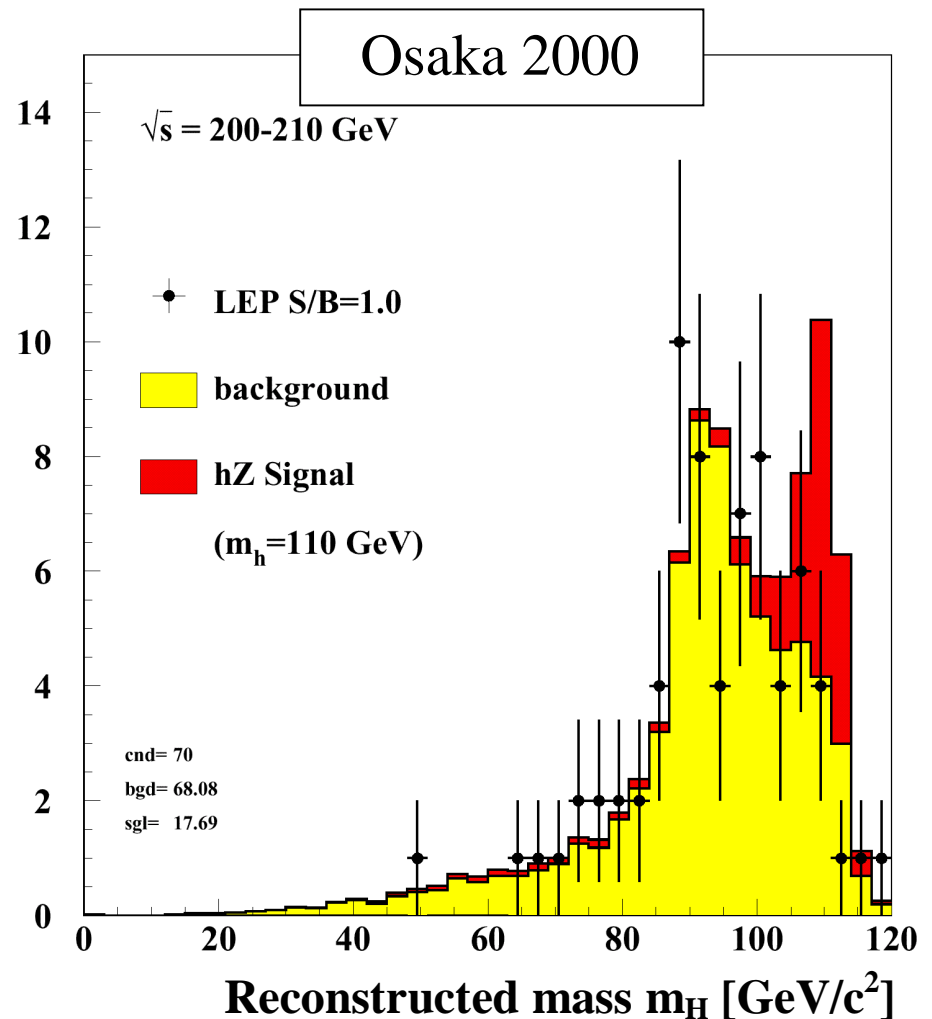
Suchen

nach SM Higgs, supersymmetrischen oder sonstigen neuen Teilchen.

Kurze Historie der SM Higgs-Suche:

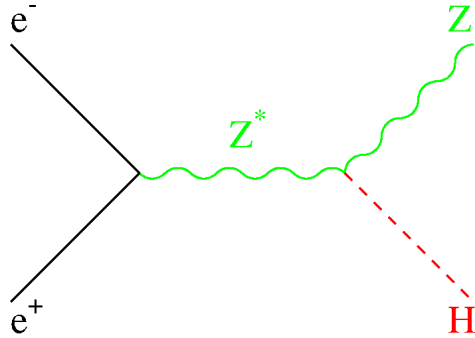
- **ICHEP in Osaka Ende Juli 2000**, Daten bis 24. Juli, $L \cong 350 \text{ pb}^{-1}$ bei $\sqrt{s} = 200 - 210 \text{ GeV}$, nur SM Untergrund, $m_H > 113 \text{ GeV}$,
- **LEPC 5. September**, ALEPH zeigt Überschuß von Higgs-Kandidaten bei $m_H \cong 115 \text{ GeV}$. DG entscheidet, den LEP Run bis Ende Oktober auszudehnen,
- **Ende 2000**, kombiniertes Ergebnis, alle Experimente, alle Kanäle
→ **Überschuß von 2.9σ Signifikanz** konsistent mit Higgs-Signal bei ca. 115 GeV ?

Events / $3 \text{ GeV}/c^2$

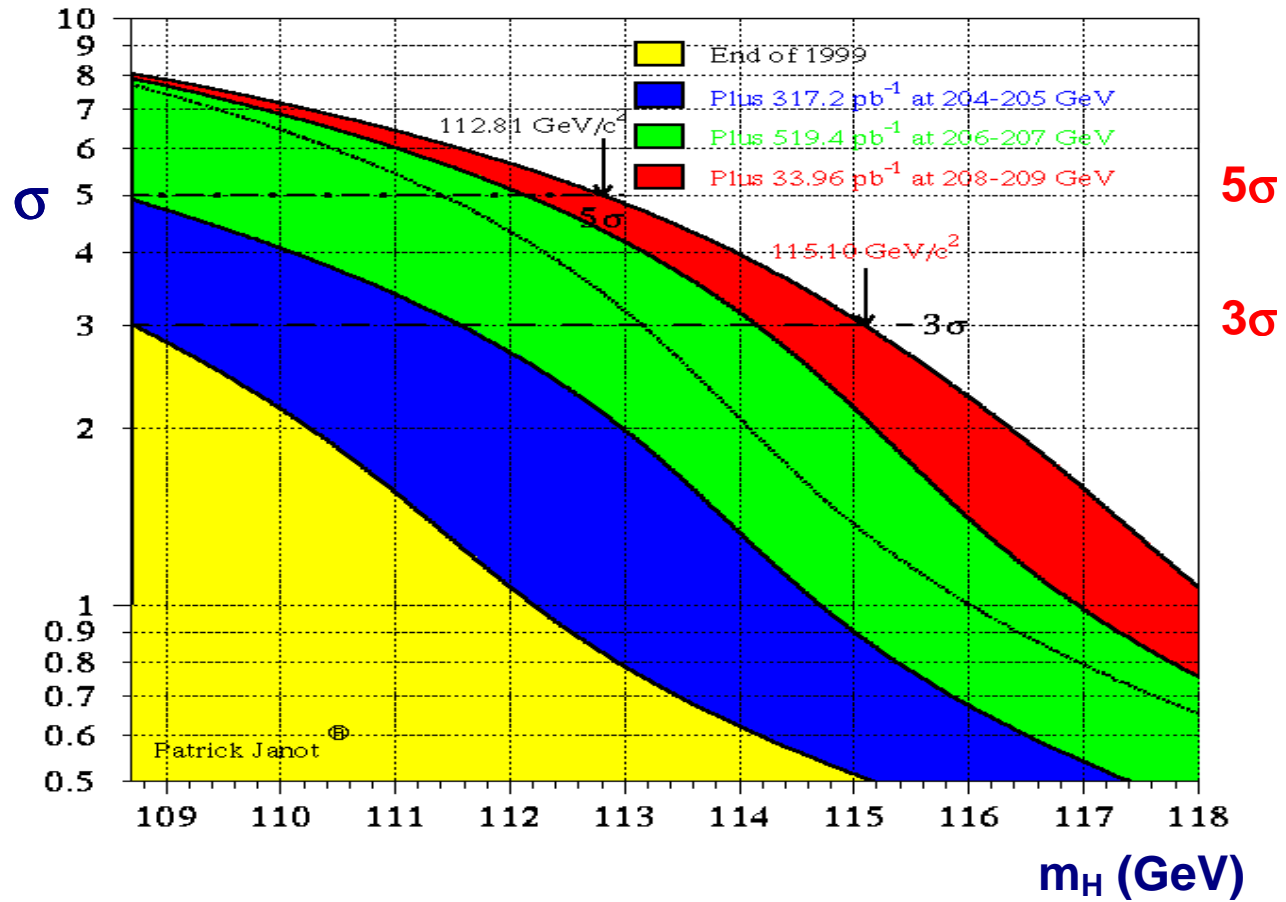
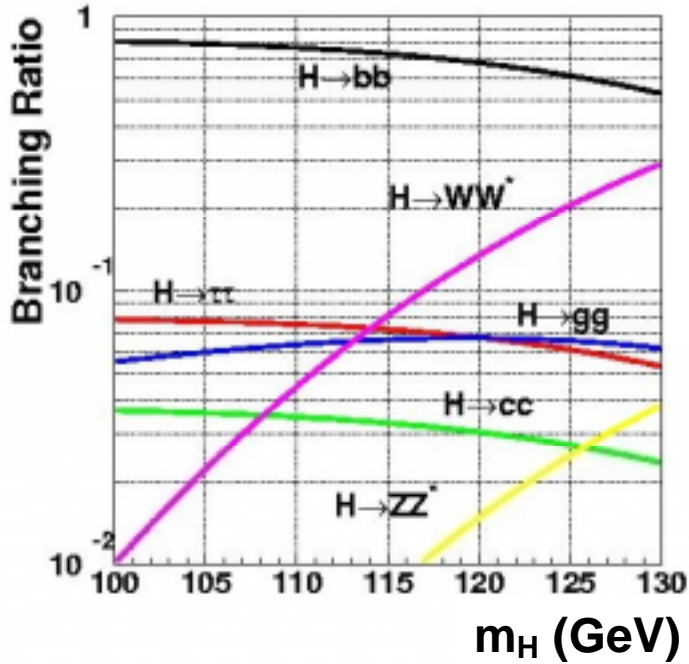


Higgs ?

$$e^+e^- \rightarrow Z^* \rightarrow ZH$$



Zeitliche Entwicklung der Sensitivität der SM Higgs-Suche.



ALEPH 4-Jet Ereignis mit höchstem Gewicht

$$s/b_{115} = 4.6$$

$$e^+e^- \rightarrow bbqq$$

μ

- Sehr klare sekundäre Vertizes,
- Fehlender Impuls im Jet mit identifiziertem Müon,
- Invariante Masse der beiden b-Jets $\cong 114.1$ GeV,
- Invariante Masse der beiden anderen Jets $\cong 92$ GeV.

$$E_{\text{CM}} = 206.7 \text{ GeV}$$

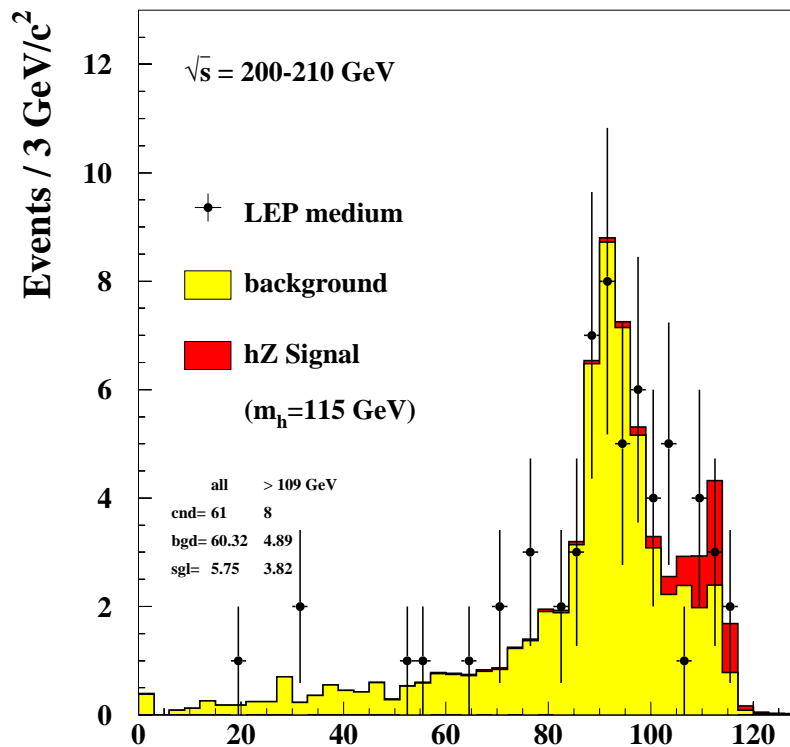
Stand der SM Higgs-Analyse

ALEPH-, L3-Ergebnisse publiziert. Endgültige Kombination im Sommer.

Mittlere Signal-Reinheit

8 Kandidaten bei $m > 109$ GeV

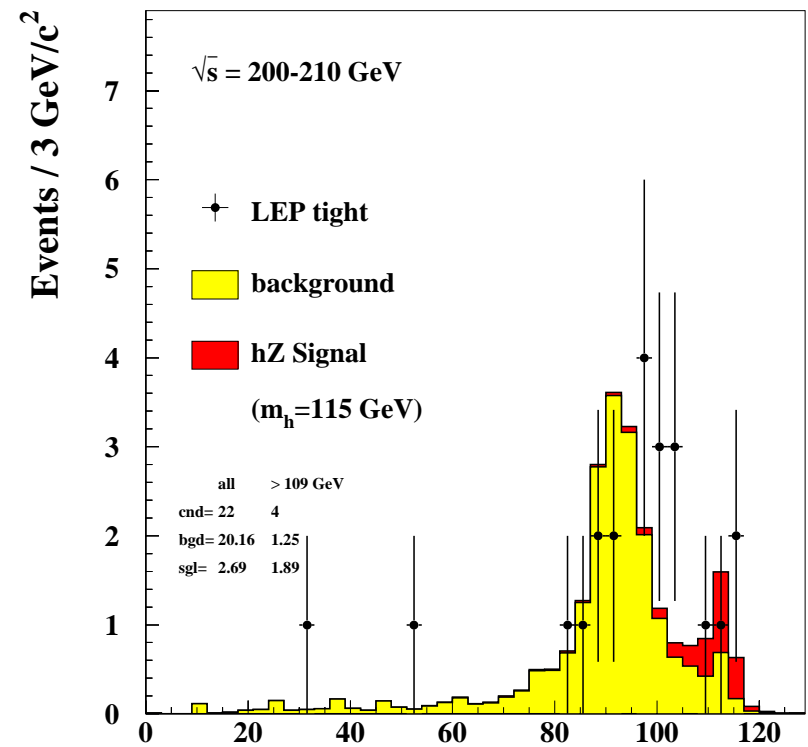
MC: 4.89 Untergrund, 3.82 Signal ($m_H = 115$ GeV)



Hohe Reinheit

4 Kandidaten

1.25 Untergrund, 1.89 Signal

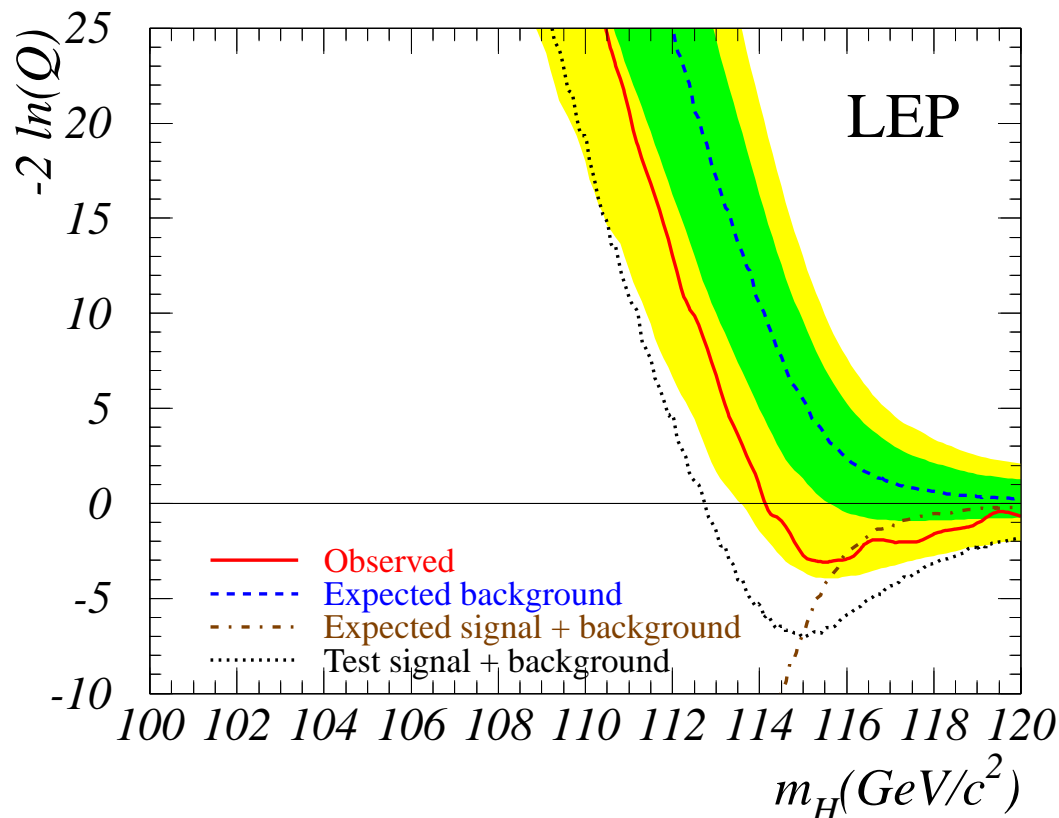


Rekonstruierte Masse der Higgs-Kandidaten [GeV]

Überschuß bei hohen Massen?

Ja oder Nein?

Teststatistik $Q = L(s+b)/L(b)$ erlaubt Kombination aller Ereignis-
topologien aller Experimente als Signal oder Untergrund ähnlicher
zu beurteilen ($-2 \ln(Q)$ Verallgemeinerung von $\chi^2(s+b) - \chi^2(b)$).



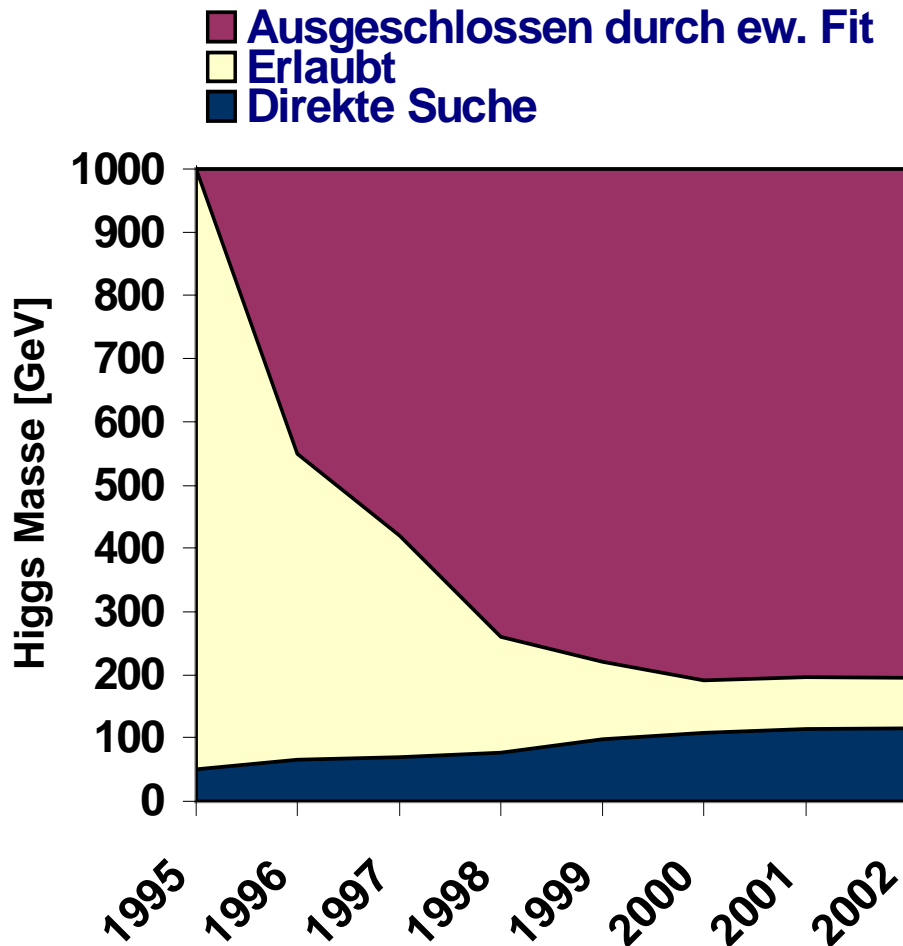
Stand Frühjahr 2002:

- Minimum bei $m_H = 115.6 \text{ GeV}$,
- etwa 2σ Anzeichen für Higgs-Signal.

Untere Grenze für m_H :

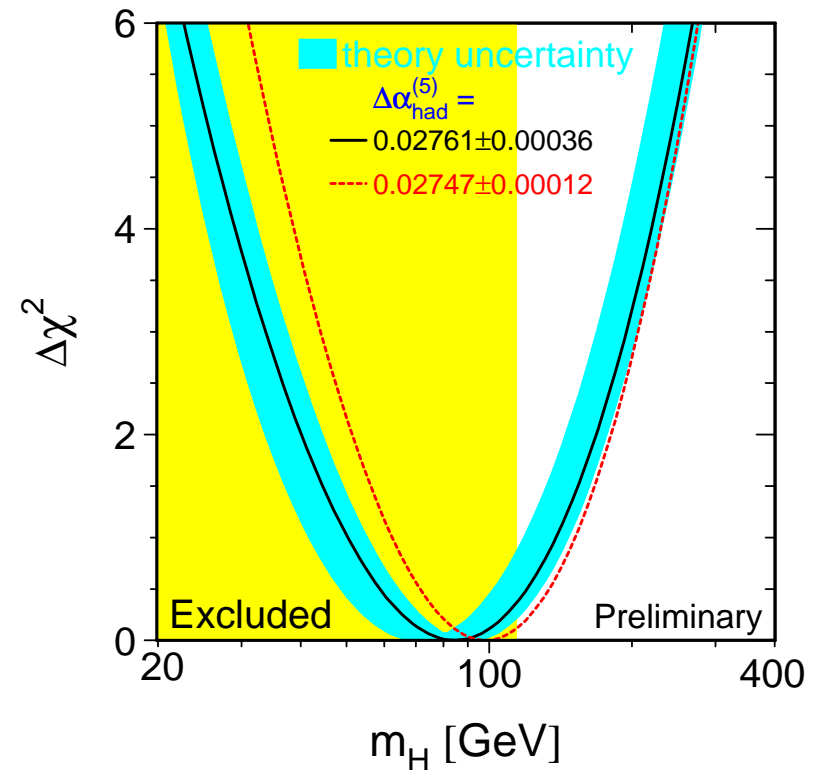
114.1 GeV (95% CL).

Resümee der MSM Higgs-Suche



Fit an:

- alle Daten von LEP1 und SLD,
- m_t , m_W ,
- $\sin^2\theta_W$ von CCFR, NuTeV,
- APV.



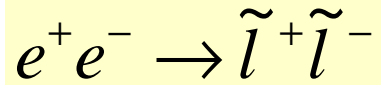
$m_H < 196 \text{ GeV (95\% CL)}$

Supersymmetrie

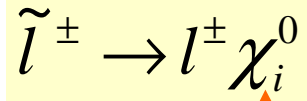
Umfassende Suche nach supersymmetrischen Partnern der Teilchen des SM.
 Sehr viele Parameter, 124 im MSSM → spezielle Annahmen notwendig.

Beispiel LEP2 **Slepton** Suche.

Produktion:



Wichtigster Zerfall:



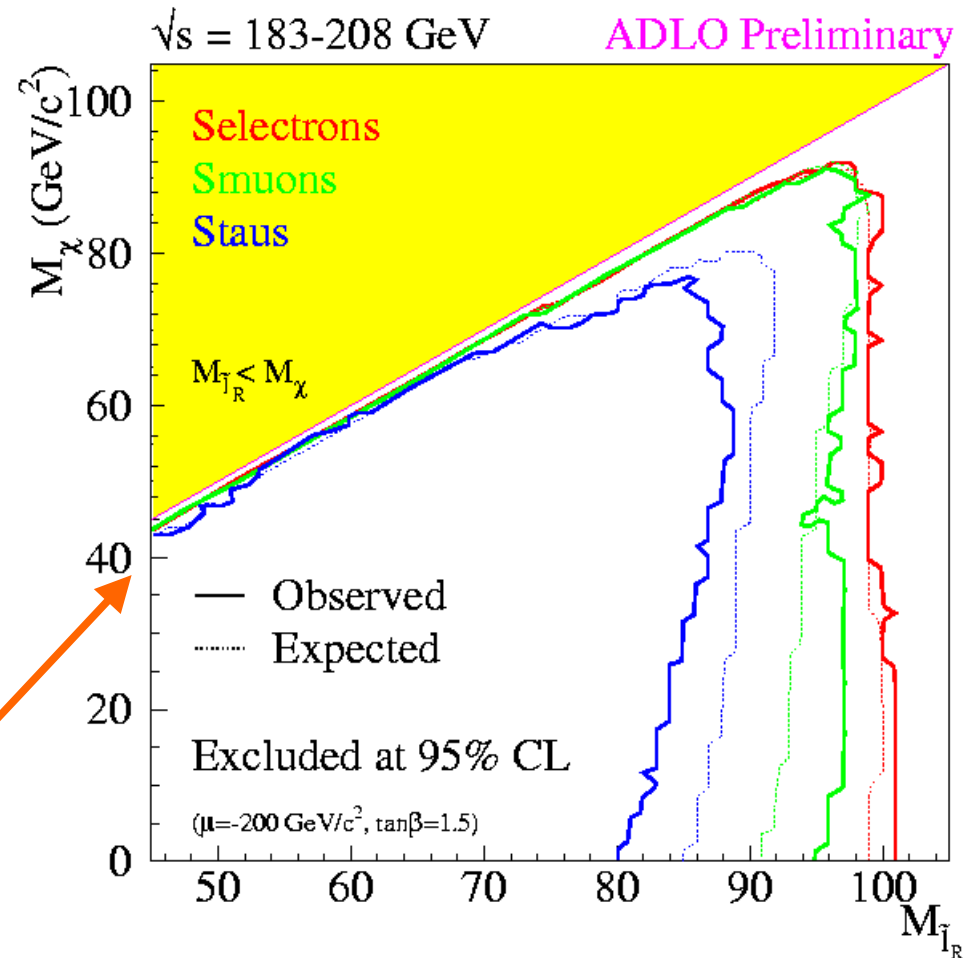
leichteste Neutralino **stabil**

Typische Signatur:

- **2 akoplanare Leptonen,**
- **fehlende Energie.**

Grenzen bei $m_\chi = 40$ GeV,

$m_{\text{Selektron}} > 99.4$ GeV, $m_{\text{Smuon}} > 96.4$ GeV, $m_{\text{Stau}} > 87.1$ GeV.



Interpretation der SUSY Suchen

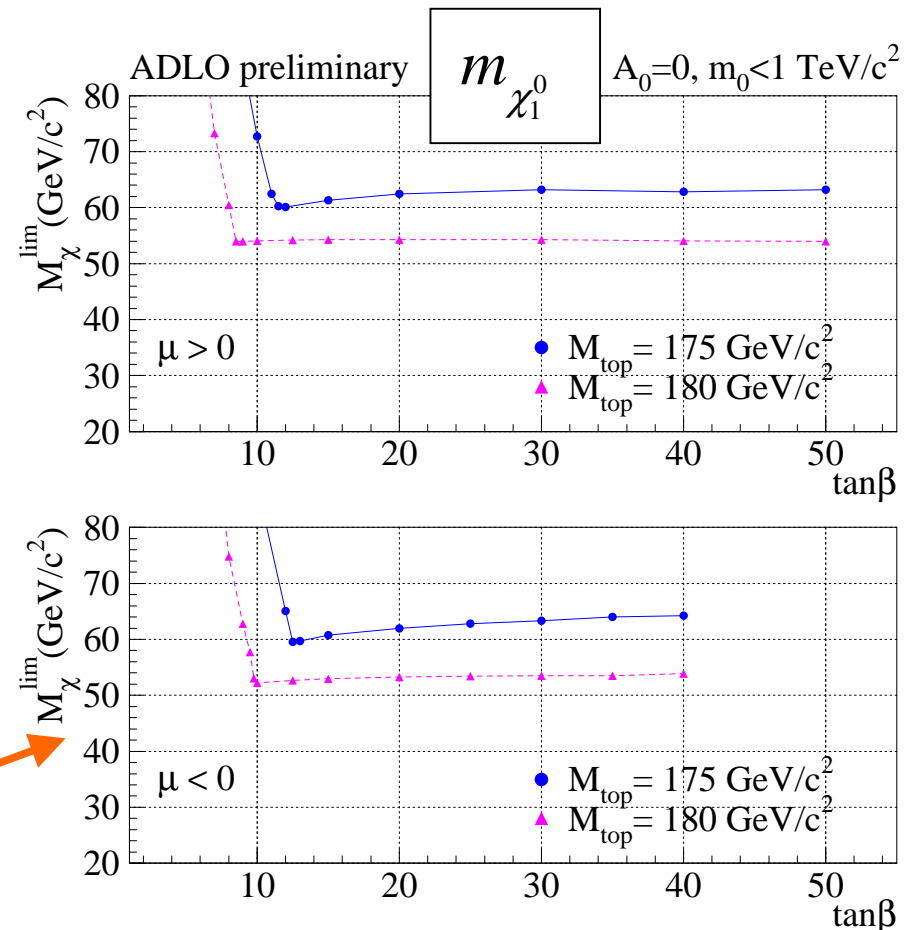
Im mSUGRA Model, d.h. Brechung der Supersymmetrie wird vermittelt durch Gravitationswechselwirkung, minimale Anzahl neuer Parameter.

→ Leichtestes SUSY-Teilchen χ^0_1 stabil, Kandidat für kalte dunkle Materie.

5 Parameter:

- m_0 = universelle skalare Masse auf GUT Skala,
- $m_{1/2}$ = universelle Gaugino Masse,
- $\tan \beta = v_u/v_d$,
- A_0 = trilineare *Higgs* - \tilde{f} - \tilde{f} Kopplung,
- $\text{sign}(\mu)$, μ = Higgs Mischungsparameter.

Gemeinsame Analyse der SUSY Suchen (Sleptonen, Charginos, Higgs)



Keine direkte Evidenz, nur Massengrenzen.

Beiträge zur CKM-Matrix

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

LEP:

- W Verzweigungsverhältnisse,
- Hohe $Z \rightarrow \bar{b}b$ Statistik,
~ 4 M Ereignisse,
 - Schnelle B-Hadronen,
 - B-Zerfallsteilchen klar vom QCD Rest getrennt,
 - Teilchenidentifizierung,
 - Volle B_s^0 -Rekonstruktion,
 - 12 Jahre Erfahrung.

Einige Beispiele:

$$|V_{ub}|$$

$$|V_{ub}|^2 = BR(B \rightarrow X_u l \nu) / \tau_b \gamma_b$$

Fehler von γ_b bekannt.

Charmlose b Zerfälle sind nur schwer vom dominanten $b \rightarrow c$ Untergrund zu trennen.

CKM Workshop im Februar:

$$|V_{ub}| = (4.09_{-0.69}^{+0.63}) \times 10^{-3}$$

incl. theoretischer Unsicherheit (QCD, m_b).

$B^0_s - \bar{B}^0_s$ Oszillationen

Interesse:

$$\frac{\Delta m_s}{\Delta m_d} = \frac{m_{B_s}}{m_{B_d}} \xi^2 \left| \frac{V_{ts}}{V_{td}} \right|^2$$

mit $\xi = 1.16 \pm 0.05$. Bisher keine Δm_s Messung, aber neue obere Grenze mittels Amplitudenmethode (ALEPH):

$$P(B_s^0 \rightarrow \bar{B}_s^0) = \frac{1}{2} (1 - A \cos(\Delta m_s t)) e^{-t/\tau_{B_s^0}}$$

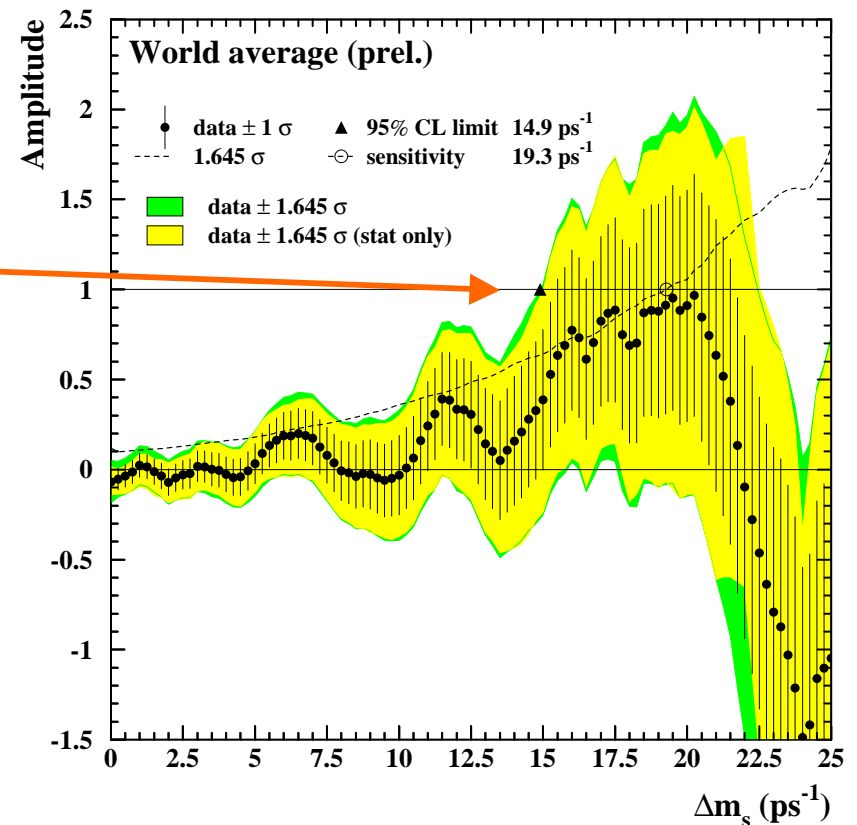
A angepaßt an Daten für verschiedene Δm_s .

Gegenwärtige Grenze, einschließlich **SLD**, **CDF** und neuer Daten von **ALEPH**,
Gewicht aller LEP Daten 65% :

$$\Delta m_s > 14.9 \text{ ps}^{-1} \text{ (95\% CL)}$$

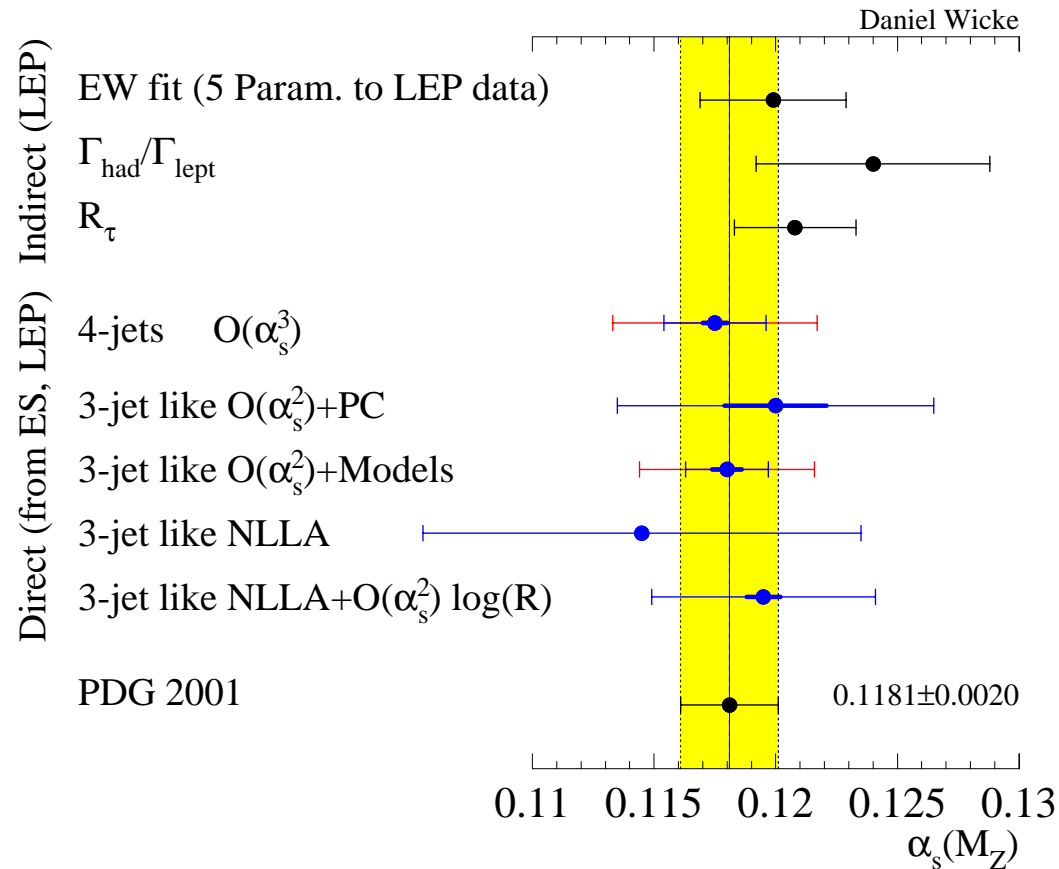
$$\longrightarrow \left| \frac{V_{td}}{V_{ts}} \right| < 0.21$$

Weltmittel



QCD

Alle LEP α_s Messungen



Umfangreiche Studien:

- Eichstruktur der QCD,
- Laufende b-Quark Masse,
- Farbkohärenz,
- Hadronisierungs-Modelle,
- Potenzkorrekturen als Alternativen zu Hadronisierungs-Modellen,
- Unterschiede zwischen Quark- und Gluon-Jets,
- usw.

Völlig konsistent mit QCD Vorhersagen.

Für diese Abb.: Theoretische Unsicherheit von allen α_s -Werten aus Ereignisformvariablen durch Änderung der Renormierungsskala um Faktor 2

Was hat LEP erreicht

Was wurde vor dem Start von LEP im Sommer 1989 erwartet
(G. Altarelli; LP, Stanford und R. Barbieri; EPS, Madrid):

Messgröße	Erwarteter Fehler	Erreicht
m_Z	50 to 20 MeV	2.1 MeV
m_W	100 MeV	39 MeV
N_ν	0.3	0.008
$A_{FB}^{0,\mu}$	0.0035	0.0013
$A_{FB}^{0,b}$	0.0050	0.0017
A_τ	0.0110	0.0043

**Im Endeffekt sind alle Messungen viel genauer.
SM beschreibt alle elektroschwachen Daten (P = 12.6% ohne
 $\sin^2\theta_W$ von NuTeV, mit NuTeV nur 1.7%).**

LEP Bilanz

- **Dedizierte Maschinengruppe, hohe Luminosität, hohe Maximalenergie, geringer Untergrund,**

- **Die Detektoren**

ALEPH, DELPHI, L3, OPAL

haben vom Pilot-Run an effektiv Daten genommen. Größere Verbesserungen: Silizium Mikro-Vertexdetektoren, Präzisions-Luminositätsdetektoren ($1^0/_{00}$), ...

- **Neue Form der Zusammenarbeit in LEP Arbeitsgruppen:**
 - **Electroweak Working Group, LEP Energy WG,**
 - **Higgs, SUSY, Exotica, Heavy Flavour Groups, QCD,**
- **Enge Zusammenarbeit mit Theoriegruppen.**

Reiche wiss. Ernte, noch ca. 240 Publikationen erwartet.