Status des Standardmodells der Elementarteilchenphysik

Joachim Mnich

III. Phys. Inst. B

RWTH Aachen

Münster, 16. Mai 2001

Inhalt:

- Standardmodell
- Eigenschaften der Z- und W-Bosonen
- Die Suche nach dem Higgs-Boson
- Ausblick

Theorie der fundamentalen Bausteine der Materie und ihrer Wechselwirkungen

I. Bausteine der Materie

Elementarteilchen sind punktförmig
mit Eigenschaften wie Masse, Ladung, Spin

- Elektron e^-
- Neutrino ν_e (β-Zerfall, z.B.: $n \rightarrow p\, e^- \, \nu_e$)
- up-Quark (u) und down-Quark (d)

Hadronen: Nichtelementare Teilchen zusammengesetzt aus Quarks und Anti-Quarks

Proton	$\|p>=\|uud>$	Neutron	$\|n>=\|udd>$
Ladung	$Q_u = +2/3\, e$		$Q_d = -1/3\, e$
Pion	$\|\pi^+>=\|u\bar{d}>$	...	

Alle bekannte Materie des Universums besteht aus 4 Teilchen:

$$\text{Leptonen:} \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \qquad \text{Quarks:} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

Punktförmigkeit experimentell nachgewiesen bis

$$R_e \lesssim 10^{-18}\ \text{m}$$

Eigenschaften der Elementarteilchen:

- **Quarks und Leptonen haben Eigendrehimpuls (Spin)** $s = 1/2\,\hbar$
  $\Longrightarrow$ **Die fundamentalen Bausteine der Materie sind Fermionen**
- **Die Fermionen tragen Ladungen, z.B. elektrische Ladung, die ihre Wechselwirkungen bestimmen**
- **Von jedem Fermion existieren 3 Kopien**
  $\Longrightarrow$ **3 Generationen oder Familien**
  Gleiche Ladungen, nur durch Masse unterschieden
  Warum?
- **Zu jedem Fermion gibt es ein Antiteilchen (entgegengesetzte Ladungen)**
  $\mathrm{e}^- \leftrightarrow \mathrm{e}^+$, $\nu_\mu \leftrightarrow \bar{\nu}_\mu$, $\mathrm{b} \leftrightarrow \bar{\mathrm{b}}$, ...
- **Die Teilchen der II. und III. Generation sind instabil und zerfallen in die Fermionen der I. Generation**
  Beispiel: Zerfall eines Myons in ein Elektron und Neutrinos
  $$\mu^- \to \mathrm{e}^- \, \bar{\nu}_\mathrm{e} \, \nu_\mu$$
  Neutrinos?
  Evidenz für Neutrino-Oszillationen
  $$\Longrightarrow m_\nu > 0$$
- **Alle fundamentalen Fermionen sind nachgewiesen worden**

		Ladungen elektrisch	schwach*	Farbe	Masse ($c = 1$)	$[m_{\mathrm{p}}]^*$
Leptonen						
I	Neutrino ν_e	0	$+1/2$	–	< 2 eV	$< 2 \cdot 10^{-9}$
	Elektron e^-	$-e$	$-1/2$	–	511 keV	$0.5 \cdot 10^{-3}$
II	Neutrino ν_μ	0	$+1/2$	–	< 170 keV	$< 1.8 \cdot 10^{-4}$
	Myon μ^-	$-e$	$-1/2$	–	106 MeV	0.1
III	Neutrino ν_τ	0	$+1/2$	–	< 18 MeV	$< 2 \cdot 10^{-2}$
	Tau τ^-	$-e$	$-1/2$	–	1.8 GeV	1.9
Quarks						
I	Up u	$+2/3\,e$	$+1/2$	r g b	≈ 3 MeV	$3 \cdot 10^{-3}$
	Down d	$-1/3\,e$	$-1/2$	r g b	≈ 6 MeV	$6 \cdot 10^{-3}$
II	Charm c	$+2/3\,e$	$+1/2$	r g b	≈ 1.2 GeV	1.3
	Strange s	$-1/3\,e$	$-1/2$	r g b	≈ 100 MeV	0.1
III	Top t	$+2/3\,e$	$+1/2$	r g b	175 GeV	187
	Bottom b	$-1/3\,e$	$-1/2$	r g b	≈ 4.5 GeV	4.8

* T_3 schwacher Isospin

* Protonmasse 938.3 MeV ≈ 1 GeV

I. Die fundamentalen Wechselwirkungen

1. **Gravitation:**
   vernachlässigbar bei heute erreichbaren Energien $\mathcal{O}(10^3)$ GeV
   wird wichtig bei der Planck-Masse:

$$M_{\mathrm{PL}} = \sqrt{\frac{\hbar\, c}{\gamma}} = 2.2 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{kg}$$
$$= 1.2 \cdot 10^{19}\ \mathrm{GeV}$$

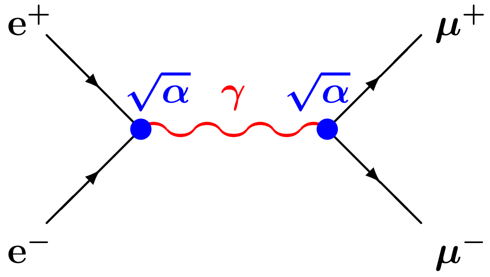
   Gravitation ist kein Teil des heutigen Standardmodells!

2. **Elektromagnetismus**

3. **Schwache Wechselwirkung** (z.B.: $\mathrm{n} \rightarrow \mathrm{p} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}_{\mathrm{e}}$)
   wirkt auf linkshändige Fermionen (rechtshändige Antifermionen)
   Paritätsverletzung

4. **Starke Wechselwirkung** z.B. Bindung der Quarks in den Nukleonen
   $|\mathrm{p}\rangle = |\mathrm{u\,u\,d}\rangle \qquad |\mathrm{n}\rangle = |\mathrm{u\,d\,d}\rangle$
   Keine freien Quarks beobachtbar, nur farbneutrale Teilchen
   Grund: Potential $V \propto r \quad (r > 10^{-15}\ \mathrm{m})$

Wechselwirkungen werden durch Austausch von Bosonen vermittelt (Feldquanten)
Beispiel: Myonpaarproduktion $\mathrm{e^+e^-} \rightarrow \mu^+\mu^-$



Elektron-Positron-Collider, z.B. LEP

Wechselwirkung	Teilchen	Spin [$\hbar$]	Ladungen			Masse
			elektrisch	schwach	Farbe	
Gravitation	?					
Elektromagn.	Photon γ	1	0	0	–	0
Schwache	Z Boson	1	0	1	–	91.2 GeV
	$W^{\pm}$ Bosonen	1	$\pm e$	1	–	80.4 GeV
Starke	Gluonen g	1	0	0	8 Komb.	0

Materie besteht aus Fermionen $s = 1/2$
Wechselwirkungen werden durch Bosonen vermittelt $s = 1$

Theorie der fundamentalen Wechselwirkungen beruht auf lokalen Eichsymmetrien

Invarianz der Lagrange-Funktion unter Transformationen der Wellenfunktion

Beispiel QED : $$\Psi' = \Psi \exp\left(-\frac{i\,\alpha(\vec{r},t)}{\hbar}\,q\right)$$

erfordert Existenz des elektromagnetischen Feldes A^μ:

$$\partial^\mu \longrightarrow D^\mu = \partial^\mu + iqA^\mu$$
$$V = \frac{\partial\alpha}{\partial t}$$
$$\vec{A} = -\vec{\nabla}\alpha$$

Gruppe	Wechselwirkung
$U(1)_\gamma$	elektromagnetische (QED)
$SU(2)_\mathrm{L}$	schwache
$SU(3)_\mathrm{C}$	starke (QCD)

Vereinheitlichung der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung (Glashow-Salam-Weinberg)

$U(1)_\mathrm{Y} \times SU(2)_\mathrm{L}$ Hyperladung Y $(Q = T_3 - Y/2)$

Relation zwischen den Kopplungskonstanten g und g'

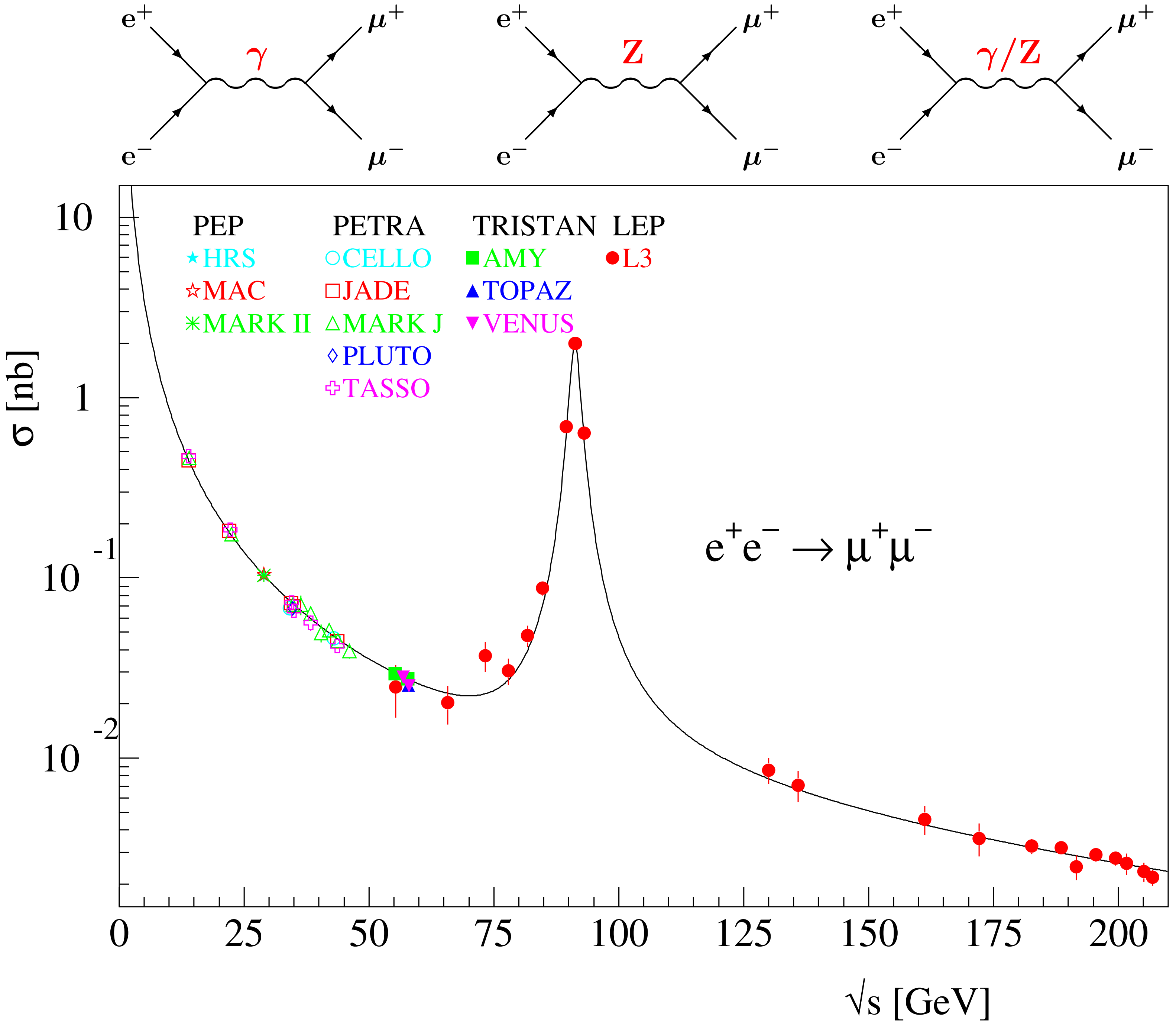
$$g \sin\vartheta_\mathrm{W} = g' \cos\vartheta_\mathrm{W} \quad (= \sqrt{4\pi\alpha})$$

und Massen der schweren Eichbosonen

$$\cos\vartheta_\mathrm{W} = \frac{m_\mathrm{W}}{m_\mathrm{Z}}$$

ϑ_W schwacher Mischungswinkel

Der Myonpaarwirkungsquerschitt



LEP:
Large Electron-Positron Collider beim CERN in Genf

- e^+e^--Speicherring, 27 km Umfang
- 4 Detektoren: ALEPH, DELPHI, L3, OPAL
- maximale Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 208$ GeV
- Betrieb 1989 - 2000

Zweistufiges Experimentierprogramm:

LEP I 1989-1995 $\sqrt{s} \approx m_Z = 91$ GeV

- Massenproduktion von Z Bosonen
  ($\approx$ 17 Million beobachtete Ereignisse)
  - präzise Bestimmung der Eigenschaften des Z Bosons: Masse, Breite, Zahl der Neutrinofamilien
  - genaue Überprüfung vieler SM Voraussagen
- viele andere Themen:
  b- und c-Quark Physik, Eigenschaften des Tau-Leptons, QCD, Messung von α_s, Suche nach neuen Teilchen, ...

LEP II 1995-2000 $2\,m_W \leq \sqrt{s} \leq 208$ GeV

- Produktion von W Bosonen $e^+e^- \to W^+W^-$
  Messung der W Masse und Kopplungen
- Überprüfung des SM bei $\sqrt{s} > m_Z$
- Suche nach dem Higgs Boson bis $m_H \approx 115$ GeV
- Suche nach anderen neuen Teilchen, 2-Photon, ...

Die Zerfälle des Z-Bosons $\mathrm{Z} \longrightarrow \mathrm{f\bar{f}}$:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \mathrm{e} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \qquad \text{Leptonen}$$

$$\begin{pmatrix} \mathrm{u} \\ \mathrm{d} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mathrm{c} \\ \mathrm{s} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mathrm{(t)} \\ \mathrm{b} \end{pmatrix} \qquad \text{Quarks}$$

Hadronische Zerfälle $\mathrm{Z} \longrightarrow \mathrm{q\bar{q}} \longrightarrow$ Hadronen

$$\text{Totale Breite} \quad \Gamma_\mathrm{Z} = \sum_f \Gamma_f \qquad (\mathrm{m_f} < \mathrm{m_Z}/2)$$

$$\text{Partielle Breiten} \quad \Gamma_f = N_c^f \frac{\alpha\, m_\mathrm{Z}}{12 \sin^2\vartheta_\mathrm{W} \cos^2\vartheta_\mathrm{W}} \left[(g_\mathrm{A}^f)^2 + (g_\mathrm{V}^f)^2 \right]$$

$$N_c^f = \begin{cases} 1 & \text{Leptonen} \\ 3 & \text{Quarks} \end{cases} \qquad \sin^2\vartheta_\mathrm{W} = 1 - m_\mathrm{W}^2/m_\mathrm{Z}^2 \approx 0.23$$

Paritätsverletzung: unterschiedliche Kopplungen an links- und rechtshändige Fermionen

$$g_L^f = g_V^f + g_A^f \qquad g_R^f = g_V^f - g_A^f$$

Axialvektor- und Vektorkopplungskonstanten:

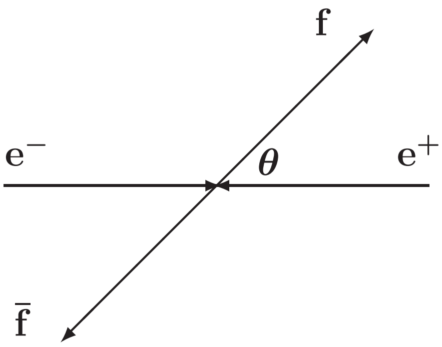
$$\begin{aligned} g_A^f &= T_3^f \\ g_V^f &= T_3^f - 2\, Q_f \sin^2\vartheta_\mathrm{W} \end{aligned}$$

Totaler Wirkungsquerschnitt bei $\sqrt{s} = m_\mathrm{Z}$:

$$\sigma_\mathrm{f}^0(m_\mathrm{Z}^2) = \frac{12\,\pi}{m_\mathrm{Z}^2} \cdot \frac{\Gamma_\mathrm{e}\,\Gamma_\mathrm{f}}{\Gamma_\mathrm{Z}^2} \qquad \text{(1. Ordnung)}$$

$$= \frac{12\,\pi}{m_\mathrm{Z}^2} \cdot BR(\mathrm{Z} \to \mathrm{e}^+\mathrm{e}^-) \cdot BR(\mathrm{Z} \to \mathrm{f\bar{f}})$$

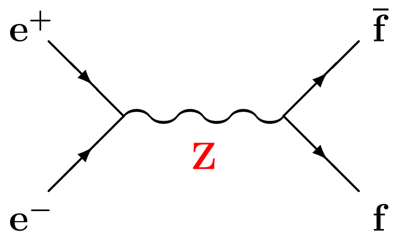
Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie A_FB:



$$A_\mathrm{FB} = \frac{\sigma(\theta < 90^\circ) - \sigma(\theta > 90^\circ)}{\sigma(\theta < 90^\circ) + \sigma(\theta > 90^\circ)}$$

Für $\sqrt{s} = m_\mathrm{Z}$:

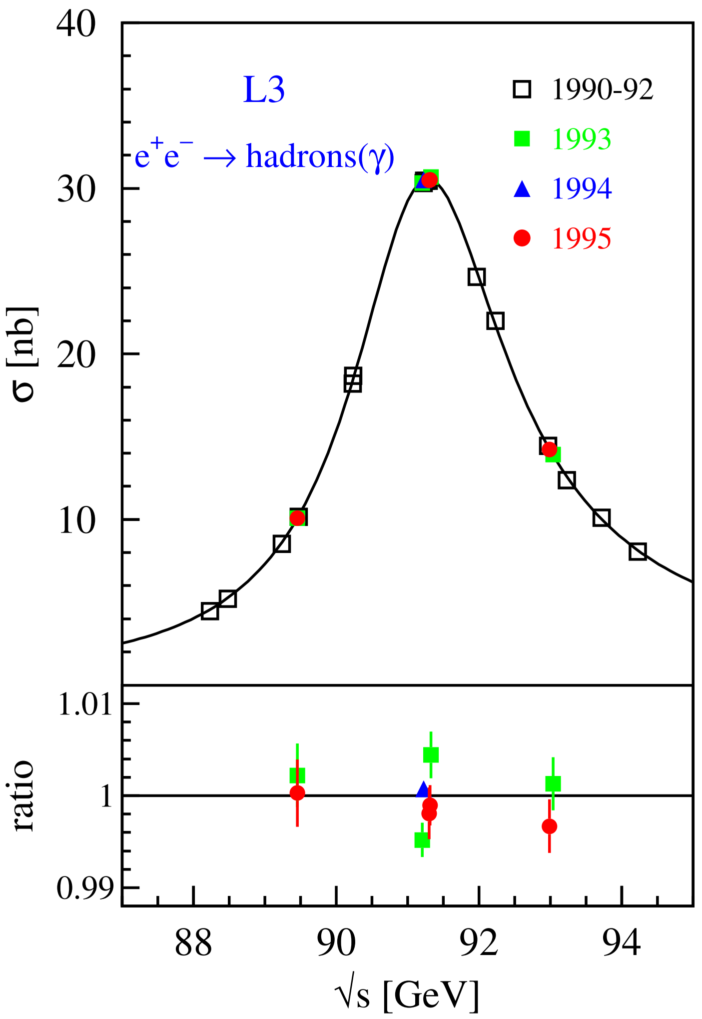
$$A_\mathrm{FB} = 3 \cdot \frac{\bar{g}_\mathrm{A}^e\,\bar{g}_\mathrm{V}^e}{(\bar{g}_\mathrm{A}^e)^2 + (\bar{g}_\mathrm{V}^e)^2} \cdot \frac{\bar{g}_\mathrm{A}^f\,\bar{g}_\mathrm{V}^f}{\left(\bar{g}_\mathrm{A}^f\right)^2 + \left(\bar{g}_\mathrm{V}^f\right)^2}$$

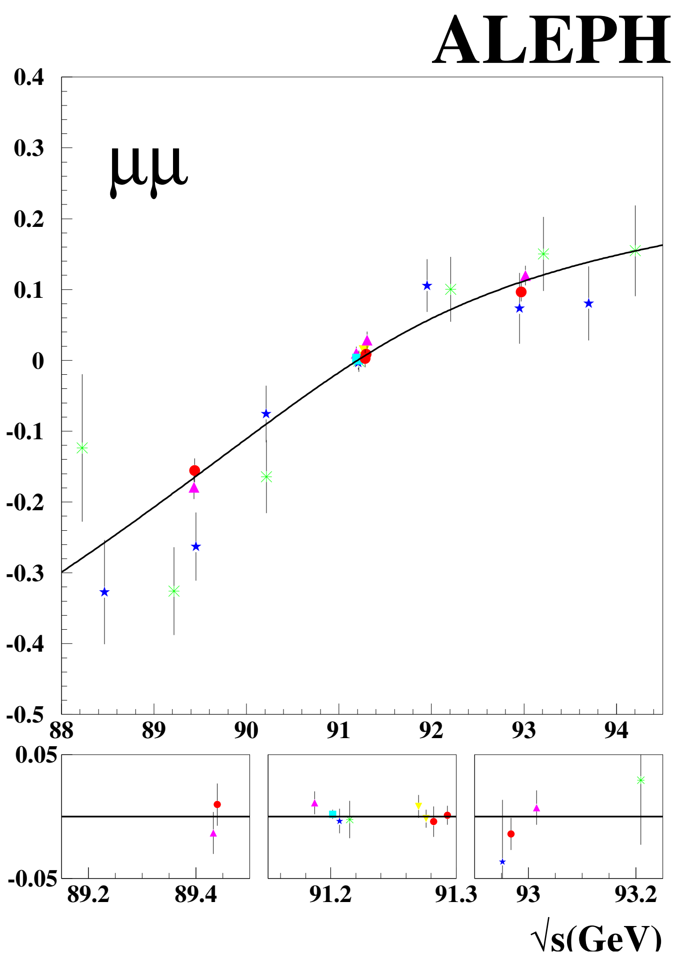


$e^+e^- \longrightarrow$ Hadronen $\quad e^+e^- \longrightarrow e^+e^-$

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

- **Präzisionsmessungen der totalen Wirkungsquerschnitte und leptonischen Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrien:**

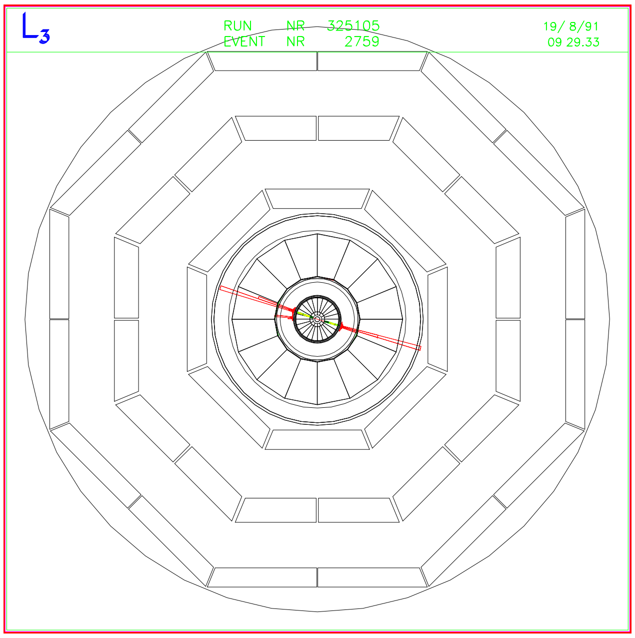




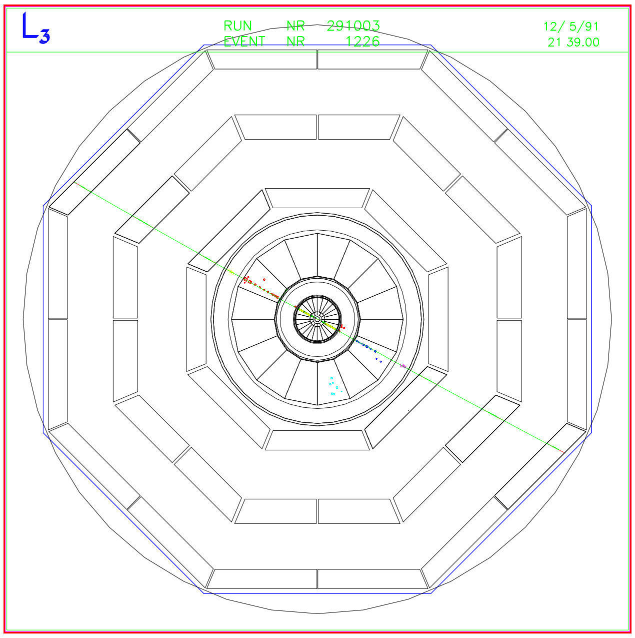
- **17 Millionen beobachtete Zerfälle des Z bei LEP (1989 – 1995)**
- **Endgültige Analysen der Experimente (2000)**
- **Genaue Bestimmung der Eigenschaften des Z Bosons**

Beispiele für $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow f\bar{f}$ Ereignisse

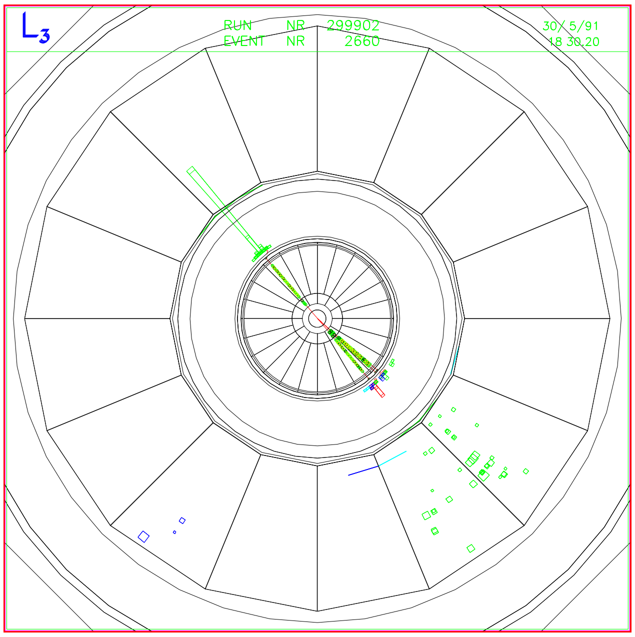
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$



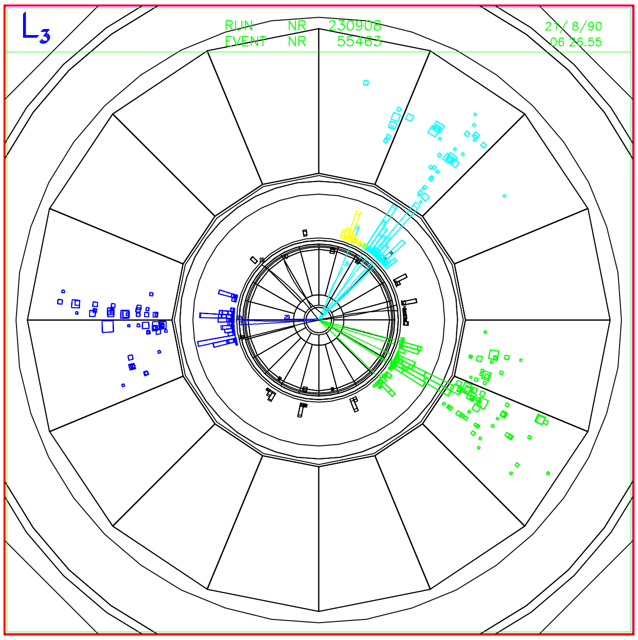
$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$



$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$



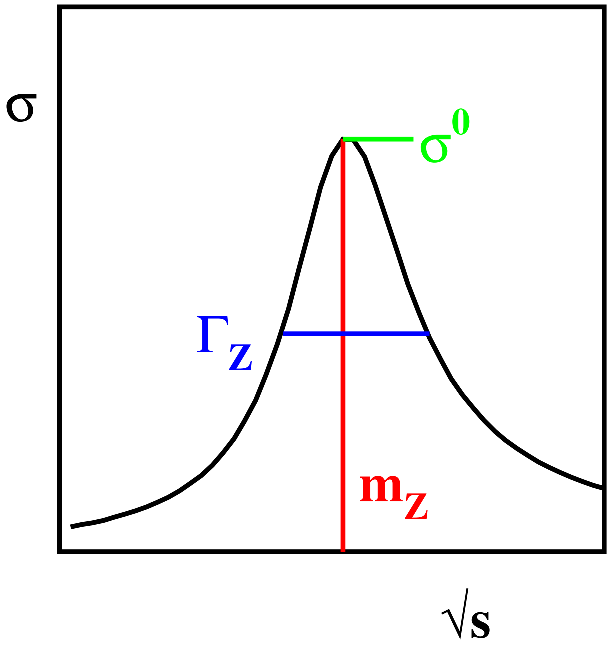
$e^+e^- \rightarrow$ Hadronen



Messungen der totalen Wirkungsquerschnitte bei $\sqrt{s} \approx m_Z$ bestimmen:

- Masse des Z Bosons m_Z
- Totale Breite Γ_Z
- Partielle Breiten Γ_f:

$$\sigma_f^0(m_Z^2) = \frac{12\,\pi}{m_Z^2} \cdot \frac{\Gamma_e\,\Gamma_f}{\Gamma_Z^2} \qquad \text{(1. Ordnung)}$$



Präzisionsmessungen der Eigenschaften des Z Bosons:

$$\begin{aligned}
m_Z &= 91\,187.6 \pm 2.1 \text{ MeV} \\
\Gamma_Z &= \;\;2\,495.2 \pm 2.3 \text{ MeV} \\
\Gamma_{had} &= 1744.4 \pm 2.0 \text{ MeV} \\
\Gamma_e &= 83.92 \pm 0.12 \text{ MeV} \\
\Gamma_\mu &= 83.99 \pm 0.18 \text{ MeV} \\
\Gamma_\tau &= 84.08 \pm 0.22 \text{ MeV}
\end{aligned}$$

$$\Gamma_e = \Gamma_\mu = \Gamma_\tau$$

Z-Zerfälle in unsichtbare Teilchen:

$$\Gamma_{\mathrm{inv}} = \Gamma_{\mathrm{Z}} - \Gamma_{\mathrm{had}} - \Gamma_{\mathrm{e}} - \Gamma_{\mu} - \Gamma_{\tau}$$

$$= 499.2 \pm 3.5 \text{ MeV} \qquad \text{(Messung)}$$

Standardmodell: Zerfallsbreite des Z in eine Neutrino-Sorte:

$$\Gamma_{\nu}^{\mathrm{SM}} = 166.6 \text{ MeV}$$

$\Longrightarrow$ **Zahl der Neutrino-Sorten:**

$$N_{\nu} = \frac{\Gamma_{\mathrm{inv}}}{\Gamma_{\nu}^{\mathrm{SM}}}$$

$$= 2.9841 \pm 0.0083$$

$\Longrightarrow$ **Es gibt 3 Generationen der fundamentalen Fermionen**

Zerfallsbreite in andere unsichtbare Teilchen:

$$\Gamma(\mathrm{Z} \to X_{\mathrm{inv}}) < 2.0 \text{ MeV} \qquad \text{(95\% C.L.)}$$

Vergleich der Vektor- und Axialvektor-Kopplungen der geladenen Leptonen an das Z ($\bar{g}_{\mathrm{V}}^{\ell}$ und $\bar{g}_{\mathrm{A}}^{\ell}$)

- **Partielle Zerfallsbreiten:**

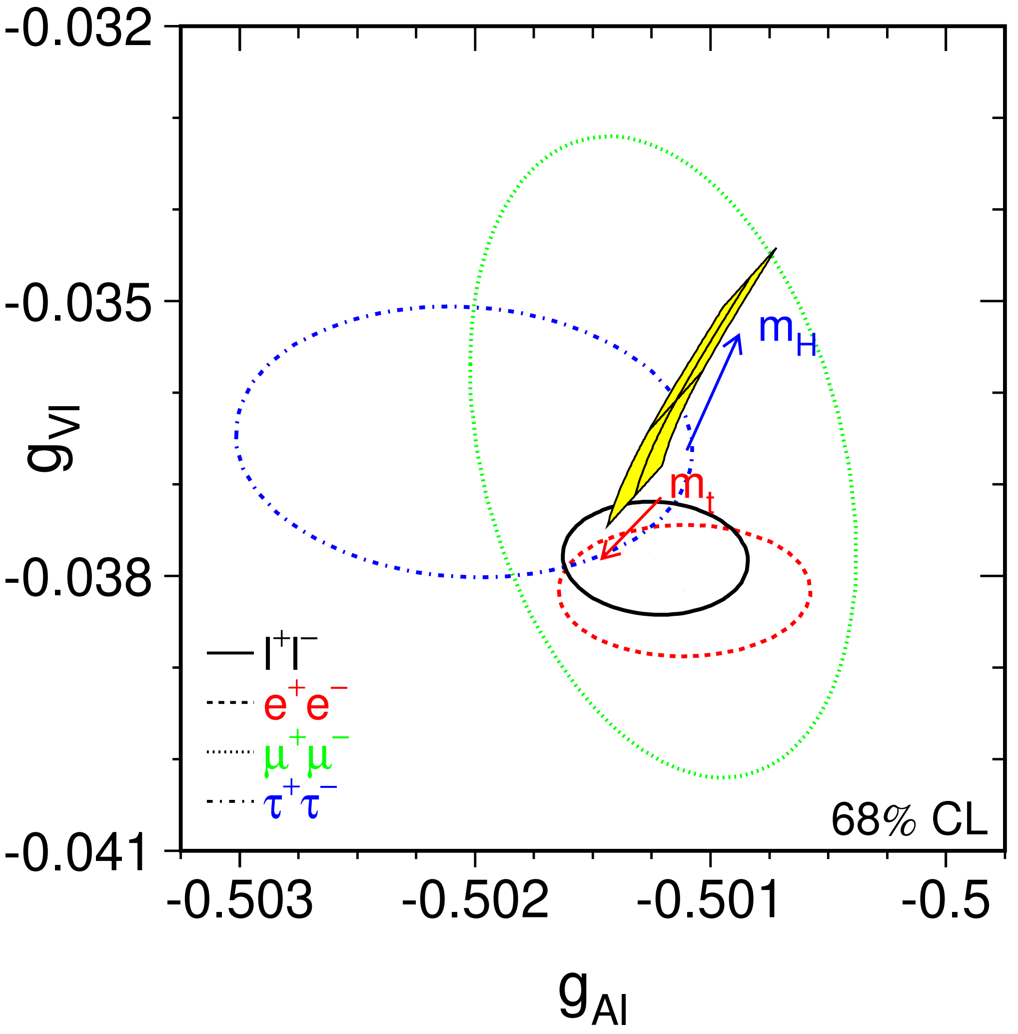
$$\Gamma_{\ell} \propto (\bar{g}_{\mathrm{A}}^{\ell})^2 + (\bar{g}_{\mathrm{V}}^{\ell})^2 \qquad (\ell = \mathrm{e},\, \mu,\, \tau)$$

- **Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrien ($\sqrt{s} = m_{\mathrm{Z}}$):**

$$A_{\mathrm{FB}}^{\ell} = 3\, \frac{\bar{g}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{e}} \bar{g}_{\mathrm{V}}^{\mathrm{e}}}{(\bar{g}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{e}})^2 + (\bar{g}_{\mathrm{V}}^{\mathrm{e}})^2} \cdot \frac{\bar{g}_{\mathrm{A}}^{\ell} \bar{g}_{\mathrm{V}}^{\ell}}{(\bar{g}_{\mathrm{A}}^{\ell})^2 + (\bar{g}_{\mathrm{V}}^{\ell})^2}$$

$A_{\mathrm{FB}}(\sqrt{s} \neq m_{\mathrm{Z}})$ löst Ambiguität in $\bar{g}_{\mathrm{V}}$ und $\bar{g}_{\mathrm{A}}$

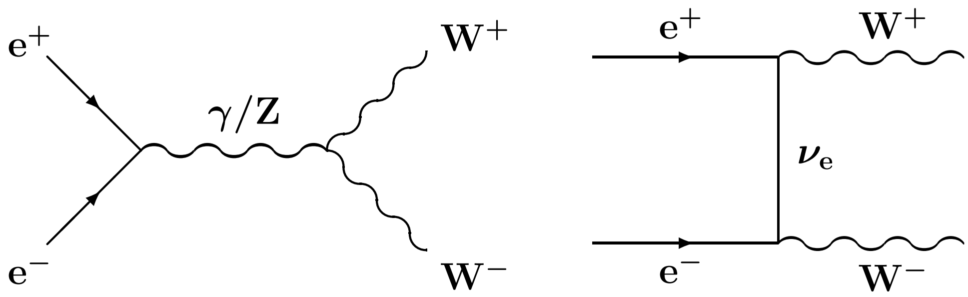
(plus Tau-Polariation und Links-Rechts-Asymmetrie)



$\Longrightarrow$ Z Boson koppelt identisch an Elektron, Myon und Tau

Produktion von W-Paaren $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ bei LEP

In niedrigster Ordnung tragen 3 Feynman Diagramme bei:



Die Einzelbeiträge von Neutrino-, Photon- und Z-Austausch divergieren!

z.B. Austausch eines Elektron-Neutrinos:

$$\sigma_\nu = \frac{\pi\alpha^2\, s}{96\ \sin^4\vartheta_W m_W^4} \rightarrow s \qquad (s \gg m_W^2)$$

Im SM heben sich diese Divergenzen auf:

$$\sigma_{SM} = \frac{\pi\alpha^2}{2\sin^4\vartheta_W}\,\frac{1}{s}\ln\frac{s}{m_W^2} \qquad (s \gg m_W^2)$$

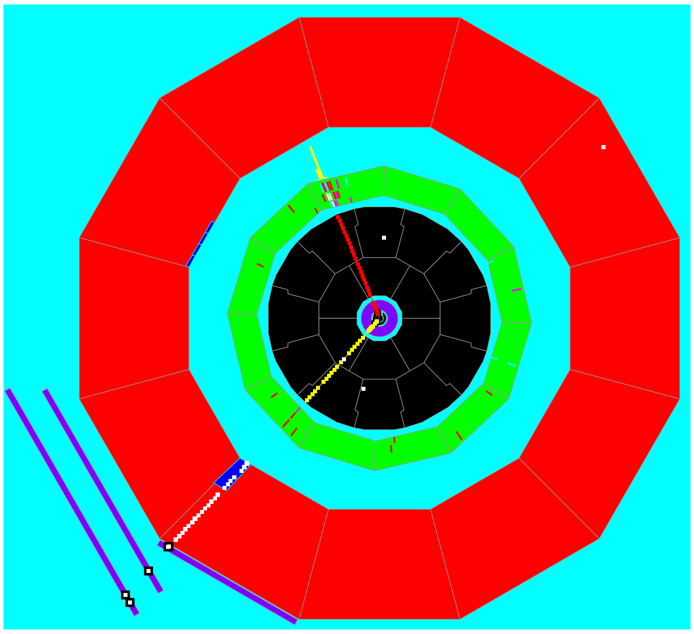
Erfordert die Existenz der Kopplungen γWW and ZWW!

W-Zerfälle:

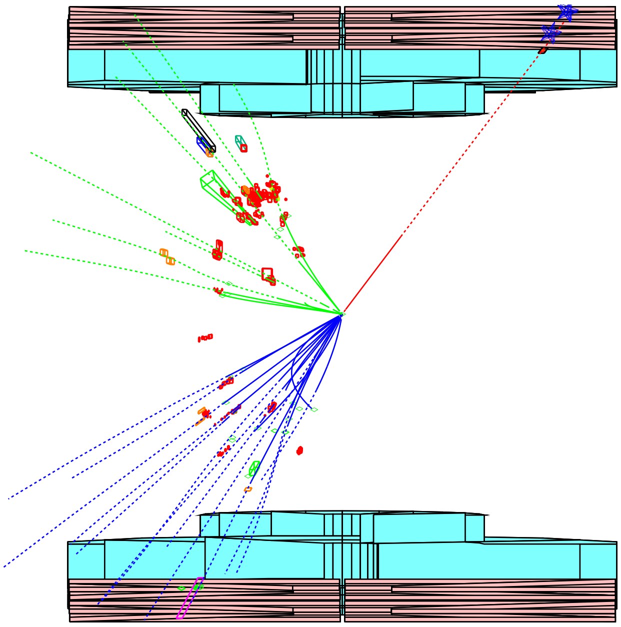
$$W^+ \rightarrow e^+\nu_e,\ \mu^+\nu_\mu,\ \tau^+\nu_\tau$$
$$u\bar{d},\ c\bar{s}\ \text{(Hadronen)}$$

Beispiele für $e^+e^- \to W^+W^-$ Ereignisse

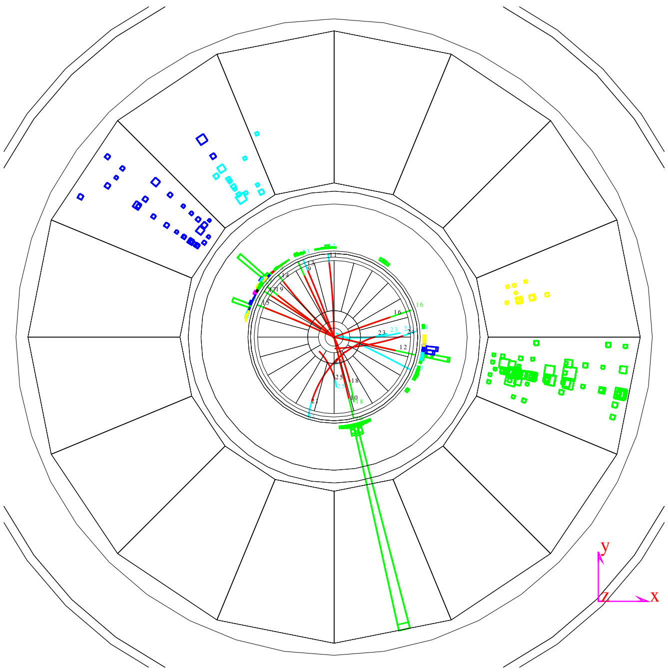
$e^+e^- \to \ell\nu\ell\nu$



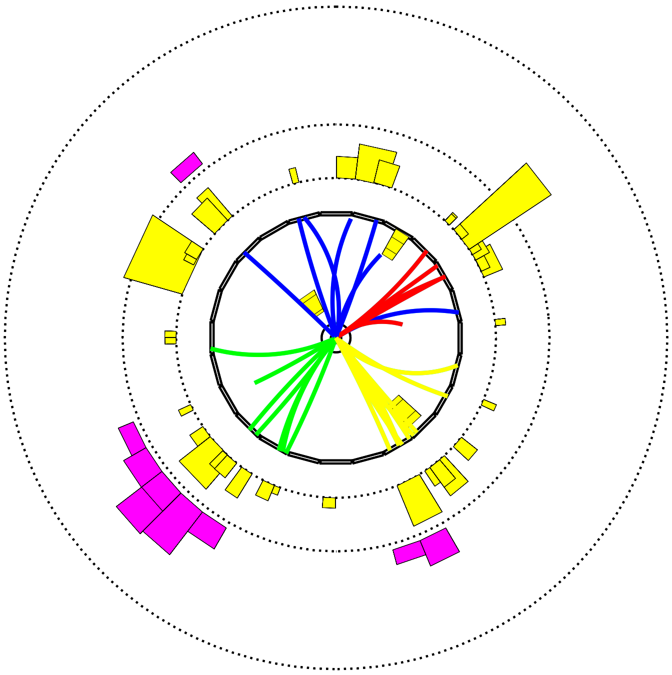
$e^+e^- \to q\bar{q}\mu\nu$

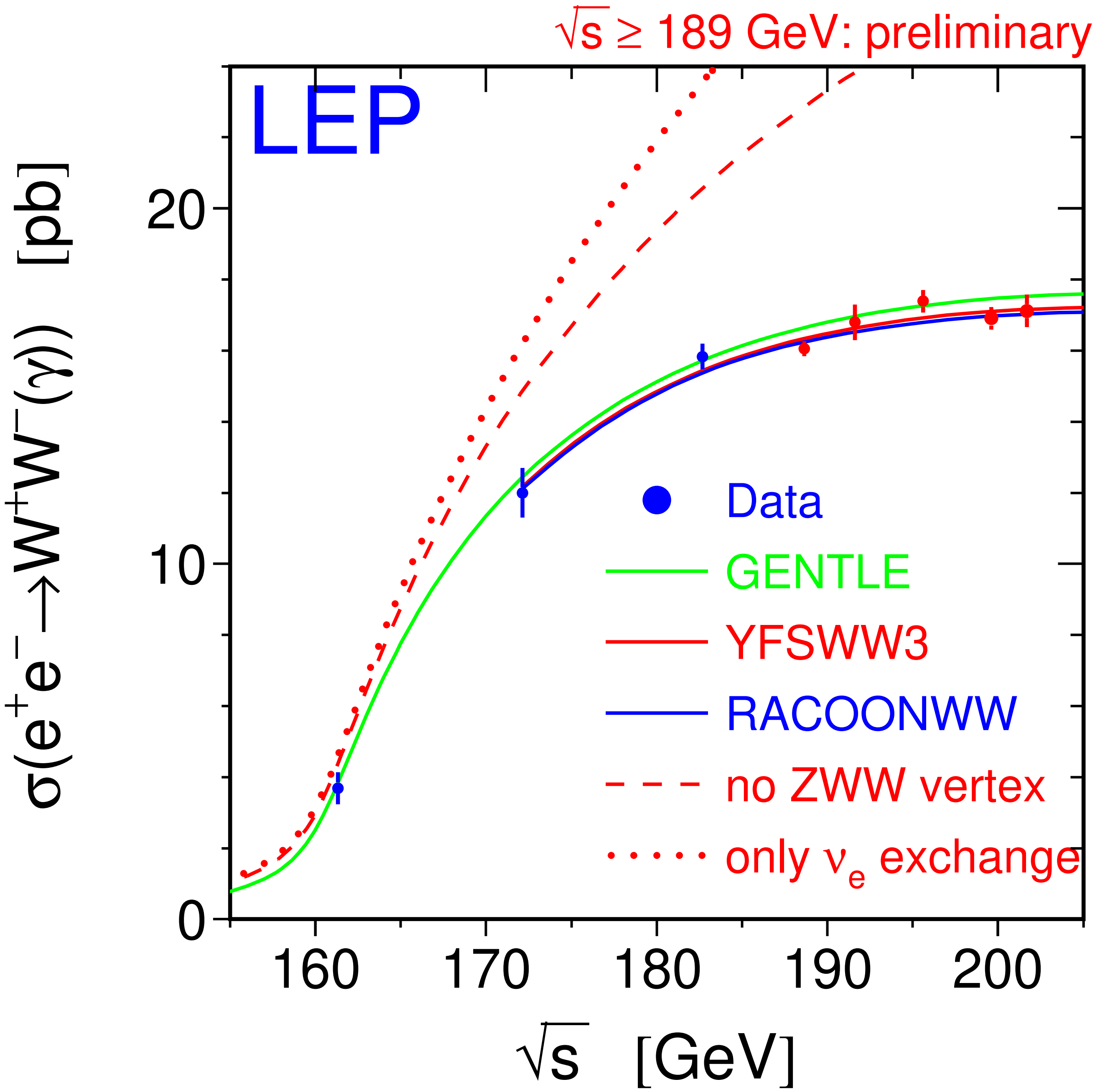


$e^+e^- \to q\bar{q}e\nu$



$e^+e^- \to q\bar{q}q\bar{q}$



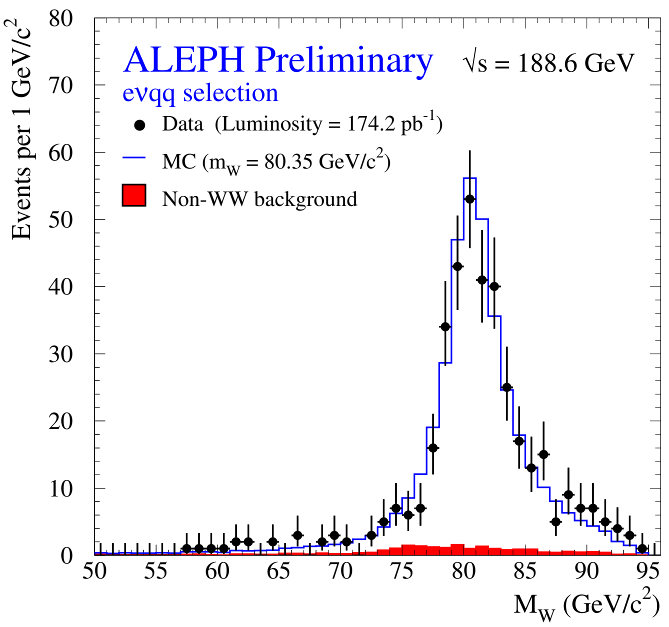


- Sehr gute Übereinstimmung mit dem SM
- Der Vertex ZWW existiert

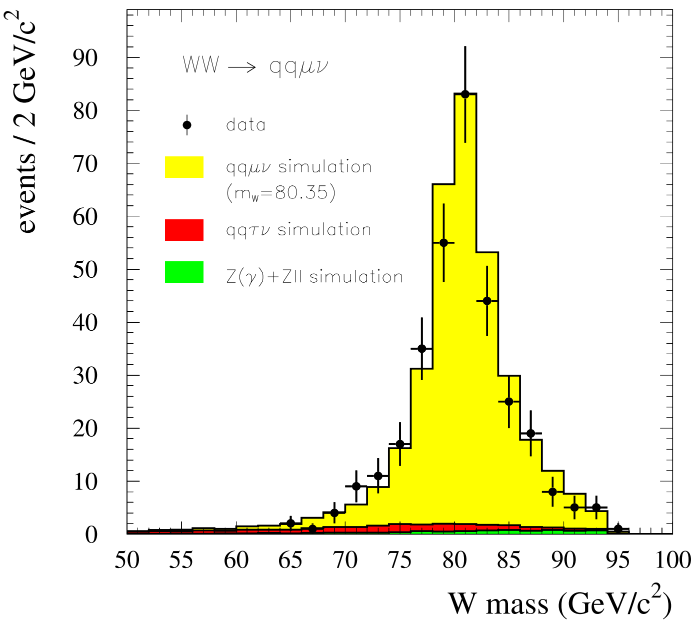
Die W-Kopplungen sind mit ±3% Genauigkeit gemessen
(Totaler und differentielle Wirkungsquerschitte)

Rekonstruierte invariante Masse:

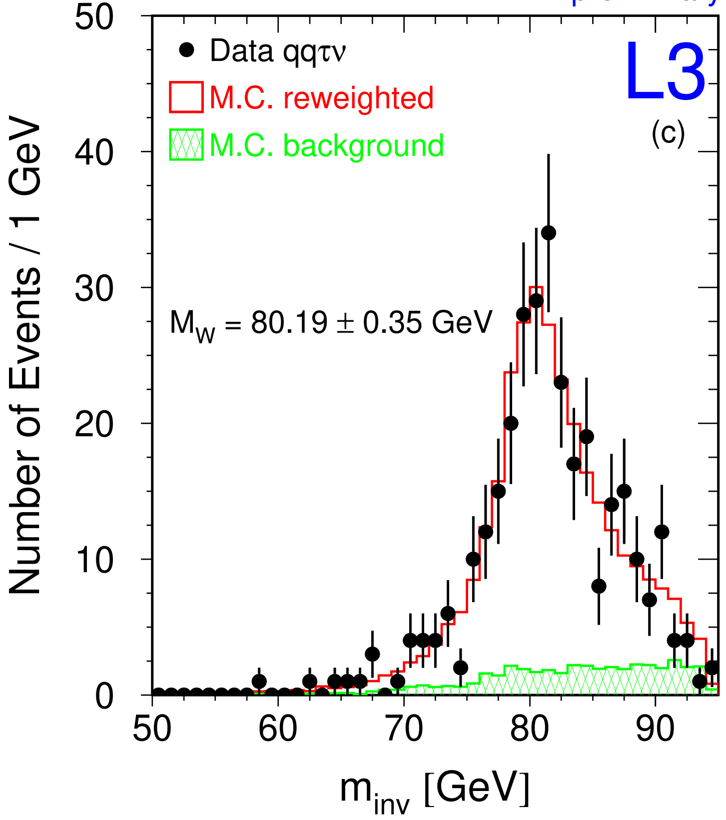
$WW \to q\bar{q}\, e\nu$



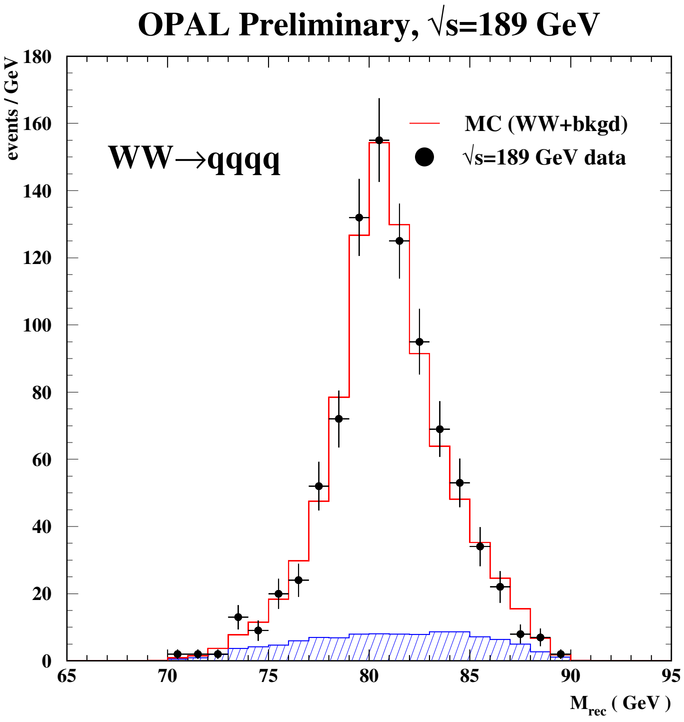
$WW \to q\bar{q}\, \mu\nu$



$WW \to q\bar{q}\, \tau\nu$



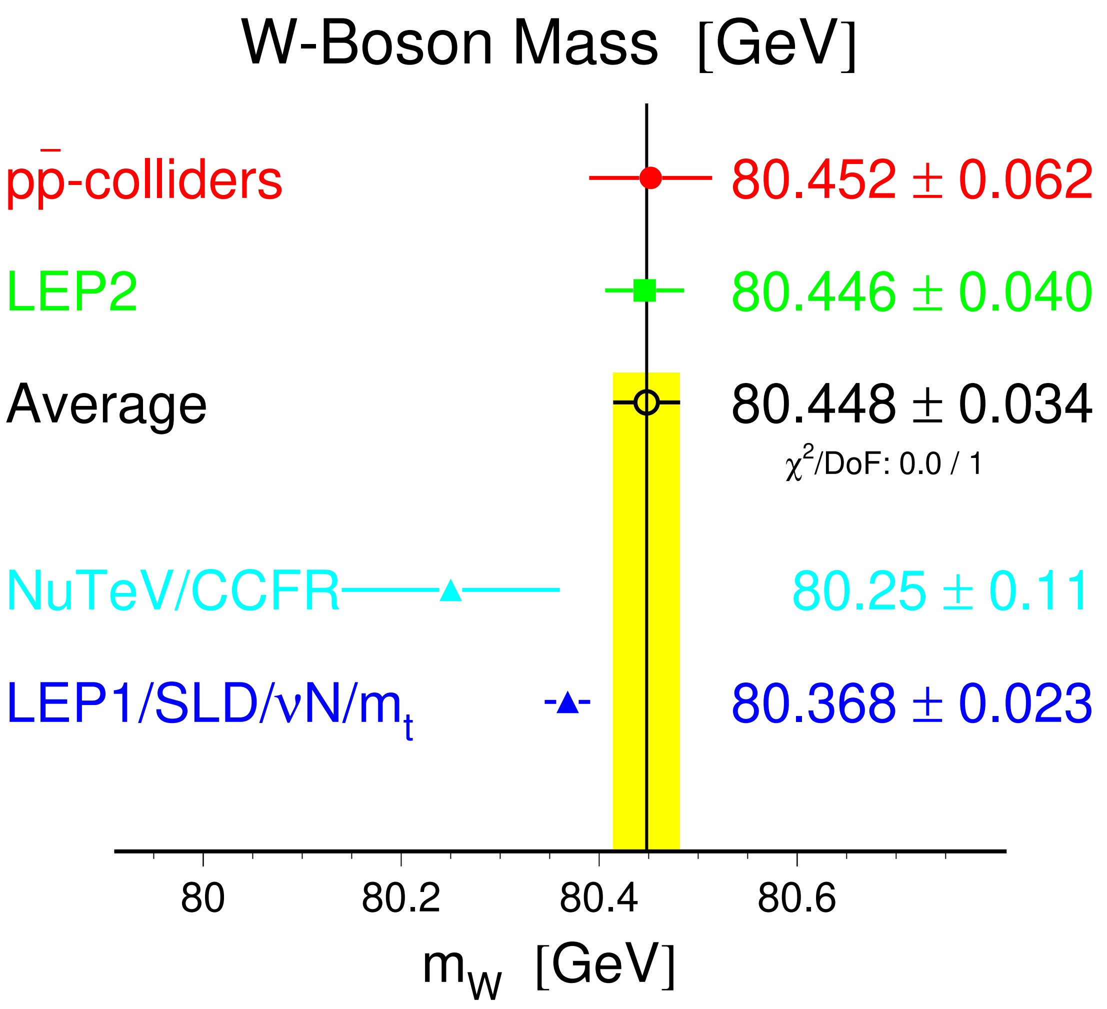
$WW \to q\bar{q}\, q\bar{q}$



I. m_W aus Rekonstruktion der invarianten Masse der Zerfallsprodukte
LEP II und $p\bar{p}$-Experimente

II. Im SM bestimmen die Massen der Eichbosonen die elektroschwachen Kopplungen: $\cos\vartheta_W = m_W/m_Z$
$\Rightarrow$ m_W kann am Z-Pol gemessen werden, z.B.

$$\Gamma_\ell = \frac{\alpha\, m_Z}{12\,\sin^2\vartheta_W \cos^2\vartheta_W}\left[(g_A^\ell)^2 + (g_V^\ell)^2\right]$$



Bestätigung der SM Vorhersage

(Einfachstes Modell $\rho = 1$ plus Strahlungskorrekturen)

Massive Austauschteilchen (Z und $W^{\pm}$) sind inkompatibel mit lokaler Eichsymmetrie

Mathematische Lösung im Standardmodell:
Spontane Symmetriebrechung

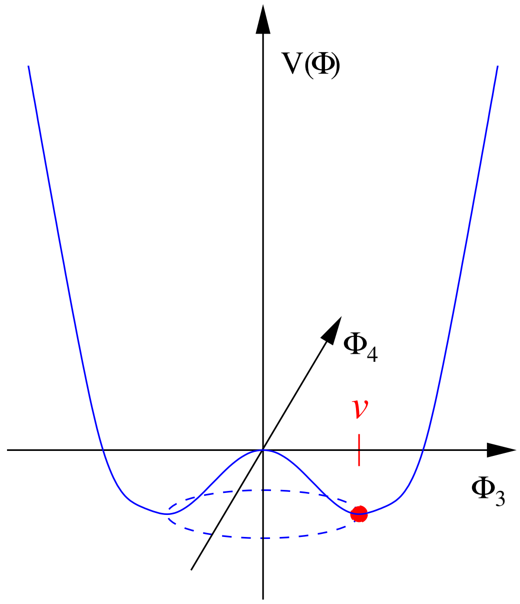
Einführung eines komplexen, skalaren Feldes

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \Phi_1 + i\Phi_2 \\ \Phi_3 + i\Phi_4 \end{pmatrix}$$

mit Potential

$$V(\Phi) = \mu^2\, \Phi^\dagger \Phi + \lambda \left(\Phi^\dagger \Phi\right)^2$$

$$\mu^2 < 0 \qquad \lambda > 0$$



$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + \eta(x) \end{pmatrix}$$

Vakuumerwartungswert $\quad v = \sqrt{-\mu^2/\lambda}$

Forderung nach lokaler $SU(2) \times U(1)$ Eichinvarianz führt zu Massentermen in der Lagrange-Funktion:

$$m_\mathrm{W} = \frac{1}{2}\, g\, v \qquad m_\mathrm{Z} = \frac{1}{2}\sqrt{g^2 + g'^2}\, v \qquad m_\gamma = 0$$

$SU(2)_\mathrm{L} \times U(1)_\mathrm{Y}$ Kopplungskonstanten:

$$g \sin\vartheta_\mathrm{W} = g' \cos\vartheta_\mathrm{W}$$

$$\Longrightarrow \cos\vartheta_\mathrm{W} = m_\mathrm{W}/m_\mathrm{Z}$$

- **Higgs-Mechanismus erlaubt auch Fermionmassen, ohne diese zu erklären**
- **Kopplung des Higgs an Fermionen ist proportional zu deren Masse**

$$m_\mathrm{f} = g_\mathrm{f}\, \frac{v}{\sqrt{2}}$$

- **Massen der Fermionen sind freie Parameter Yukawa-Kopplungen g_f**

Higgs-Mechanismus postuliert Existenz eines beobachtbaren Teilchens

Das Higgs-Boson H

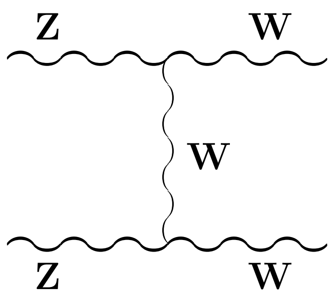
Higgs-Boson ist neutral und hat Spin 0
Einziges nicht nachgewiesene Teilchen des Standardmodells!

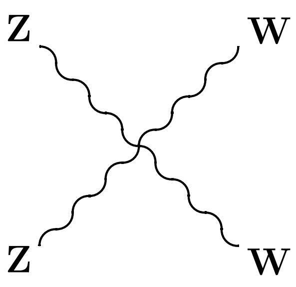
(Hier: minimales Standardmodell mit einem Higgs-Dublett)

Higgs-Masse ist freier Parameter:

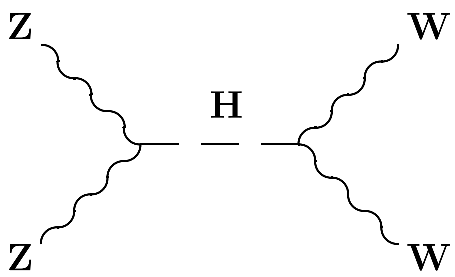
$$m_{\mathrm{H}} = \sqrt{2\lambda}\, v$$

Obere Grenze für m_{H} aus Unitarität der Streuung von schweren Eichbosonen, z.B.





Divergenter Wirkungsquerschnitt $\sigma \propto \dfrac{s}{m_{\mathrm{W}}^4}$



$$\mathcal{M}_{\mathrm{H}} = -i \frac{e^2}{4 m_{\mathrm{W}}^2 \sin^2\vartheta_{\mathrm{W}}} \frac{s^2}{s - m_{\mathrm{H}}^2}$$

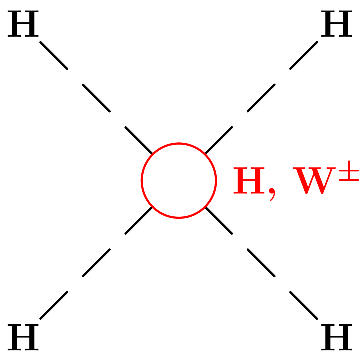
Gesamter Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_{\mathrm{ZZ}\to\mathrm{WW}} = \frac{\pi\alpha^2}{16 \sin^4\vartheta_{\mathrm{W}}} \left(\frac{m_{\mathrm{H}}}{m_{\mathrm{W}}}\right)^4 \frac{s}{(s - m_{\mathrm{H}}^2)^2}$$

Unitariät: $\sigma \leq \dfrac{16\pi}{s}$ für $s \to \infty$

$$m_{\mathrm{H}} \leq \frac{4 \sin\vartheta_{\mathrm{W}}}{\sqrt{\alpha}} m_{\mathrm{W}} \approx 1 \text{ TeV}$$

Beiträge zum Higgs-Potential durch höhere Ordnungen:



- Obere Grenze für m_H aus Laufen der Kopplung λ (Energieskala Λ)

$$\lambda(\Lambda) = \frac{\lambda}{1 - \frac{3}{2\pi^2}\lambda \ln(\sqrt{2}\Lambda/v)} \qquad \text{(nur Higgs–Schleifen, } \Lambda \gg m_H\text{)}$$

Analogie zum Landau-Pol in der QED

- Untere Grenze aus Vakuumstabilität
  effektives Potential:

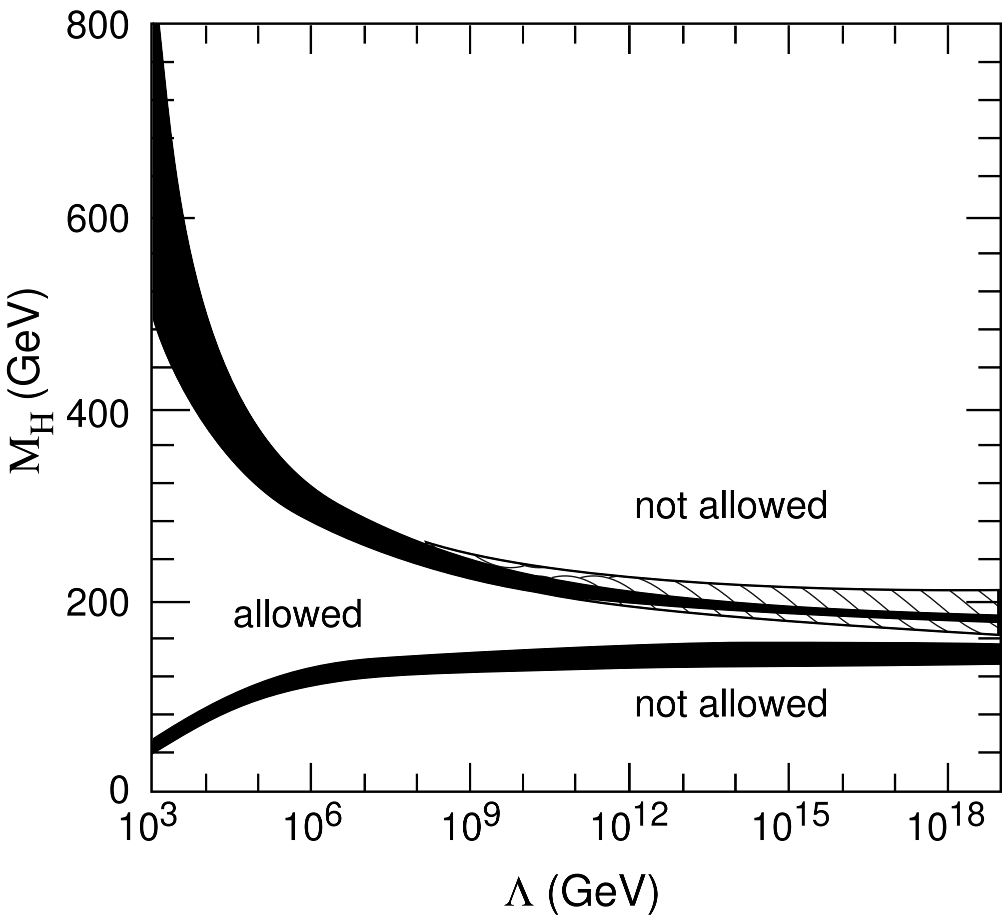
$$\begin{aligned} V(\Phi) &= \mu^2\,\Phi^\dagger\Phi + \lambda\,\left(\Phi^\dagger\Phi\right)^2 \\ &+ \gamma\,\left(\Phi^\dagger\Phi\right)^2\left(\ln\left(\Phi^\dagger\Phi\right)^2/v^2 - 1/2\right) \\ \gamma &= \frac{1}{16\pi^2 v^4}\left(m_H^4 + 3m_Z^4 + 6m_W^4 - 12m_t^4\right) \end{aligned}$$

a) $V(v) < 0$ (Minimum des Potentials)
$\Rightarrow m_H^2 > \gamma\,v^2$ oder $m_H > 7$ GeV (für $m_t = 0$)

(Linde-Weinberg Grenze)

b) $V(\Phi) \to +\infty$ für $|\Phi| \to \infty$
$\Rightarrow m_H$ muß mit m_t wachsen

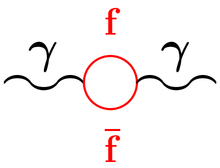
T. Hambye, K. Riesselmann, Phys. Rev. D 55 (1997) 7255



- **Leichtes Higgs (100 GeV $\leq m_{\mathrm{H}} \leq$ 200 GeV)**
  Standardmodell gültig bis zu großen Energien Λ ?
- **Schweres Higgs ($m_{\mathrm{H}} \geq$ 500 GeV)**
  Neue Physik bei 1 TeV

In Modellen mit mehreren Higgs-Dubletts
Grenzen gültig für mittlere Higgs-Masse

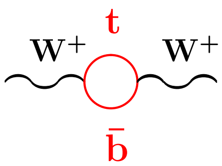
Energieabhängigkeit der Kopplungskonstanten
Vakuumpolarisation
a) QED Kopplungskonstante:

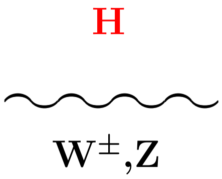


$$\alpha(Q^2{=}0)^{-1} = 137.035\,989\,5(61)$$
$$\alpha(m_Z)^{-1} = 128.936 \pm 0.046$$

$\Longleftrightarrow$ **Elektronladung** $e \rightarrow \infty$ **für** $r \rightarrow 0$

b) Schwache Strahlungskorrekturen





- **Brechung des schwachen Isospins** $m_t \gg m_b$
  Korrekturen $\propto m_t^2 - m_b^2 \approx m_t^2$
- **Korrekturen der W- und Z-Propagatoren durch virtuelle Higgs-Beiträge**

$$\propto \log m_H$$

Anpassungsrechnung an LEP (und andere Messungen)

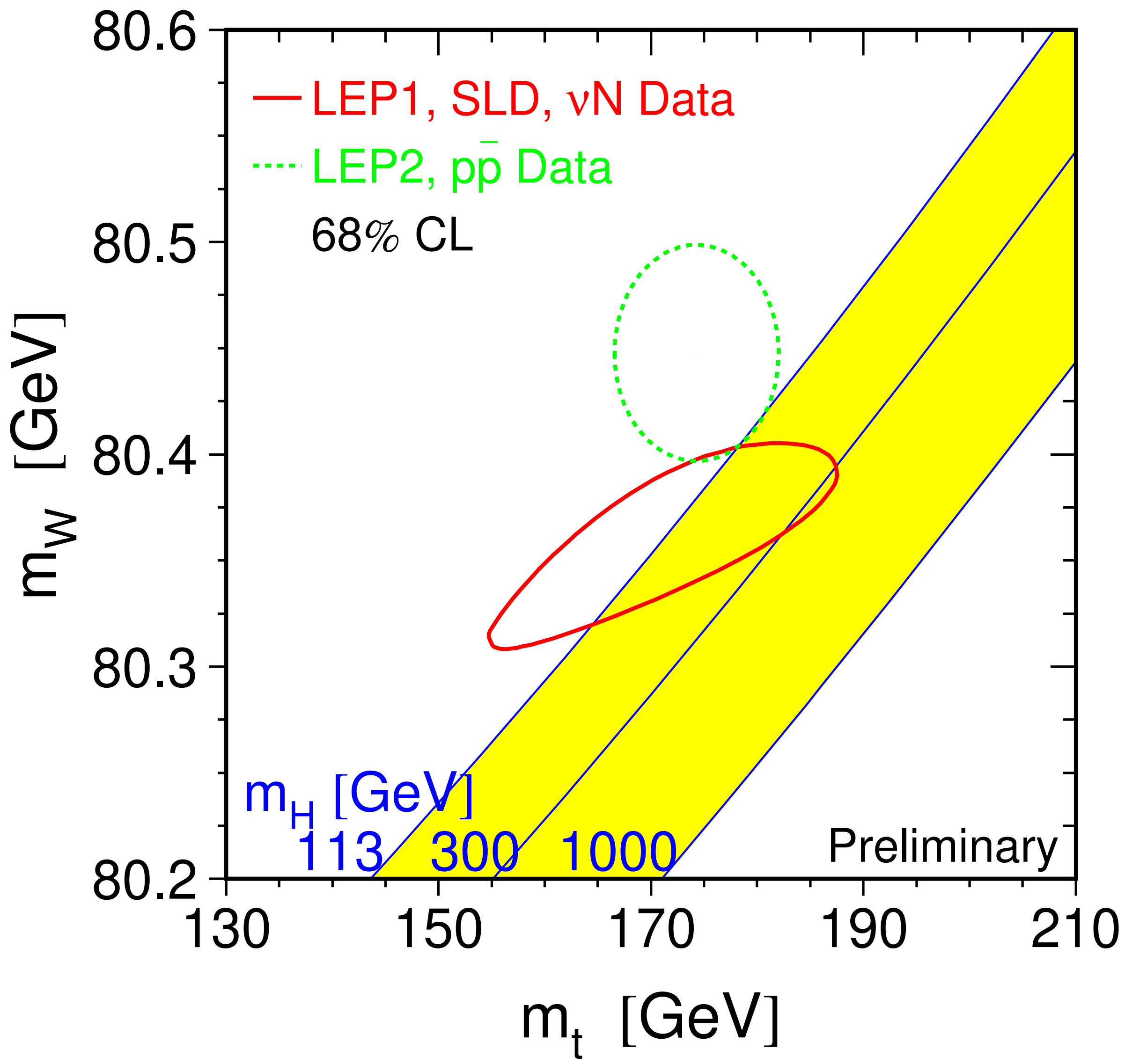
⇒ Masse des Top Quarks

$$m_t = 167\,^{+10}_{-8}\ \text{GeV}$$

Vergleich mit direkter Messung (p$\bar{\text{p}}$-Experimente)

$$m_t = 174.3 \pm 5.1\ \text{GeV}$$

NB: Einschränkung der Masse durch LEP bereits vor der Entdeckung des Top-Quarks 1995

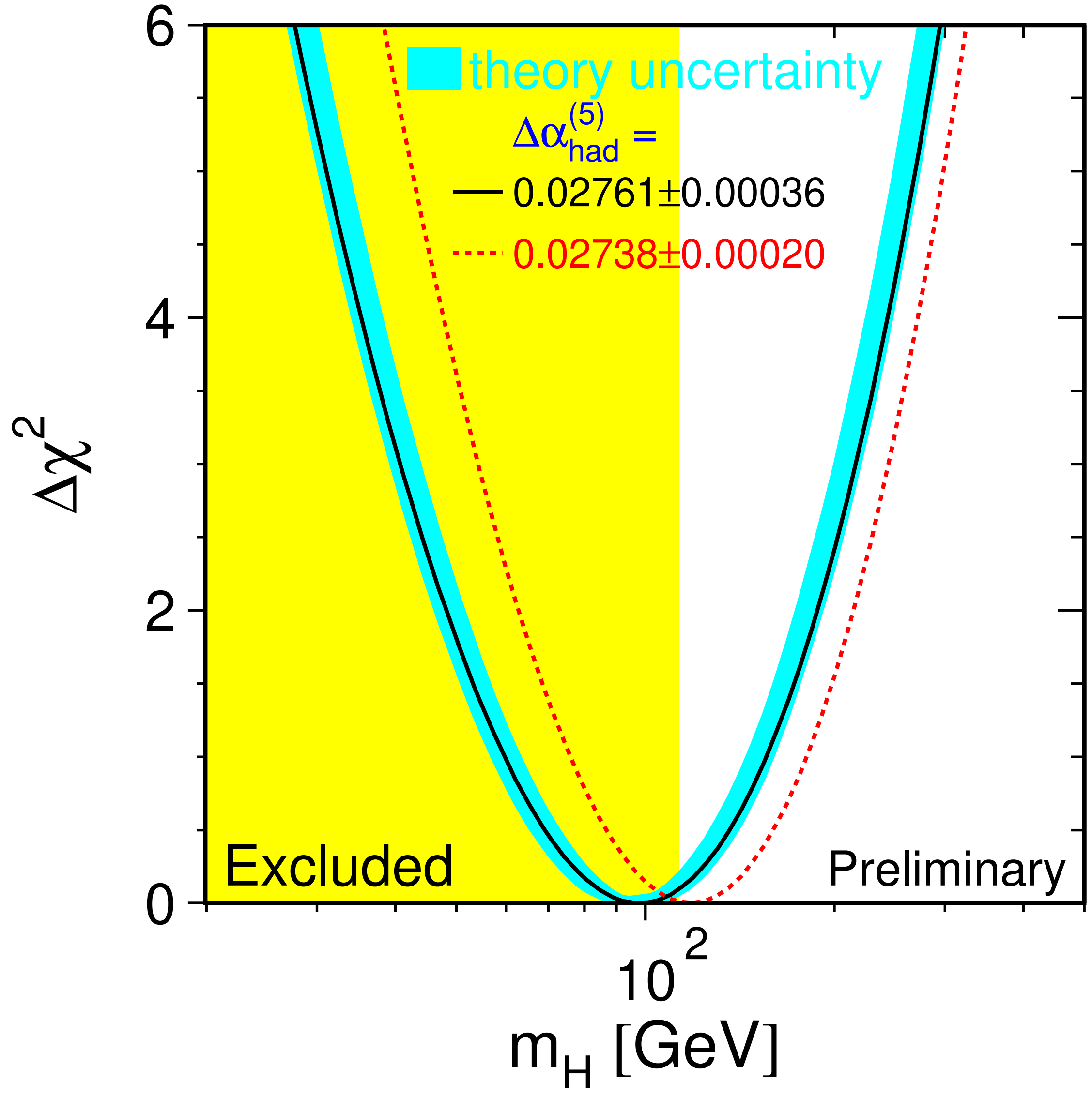


- **SM korrekt '1-Loop'**
- **Leichtes Higgs Boson?**

Bestimmung von m_{H} durch Messungen von Strahlungskorrekturen

Annahme:
schwache Strahlungskorrekturen wie vom SM vorausgesagt
keine virtuellen Beiträge von nicht-SM Teilchen

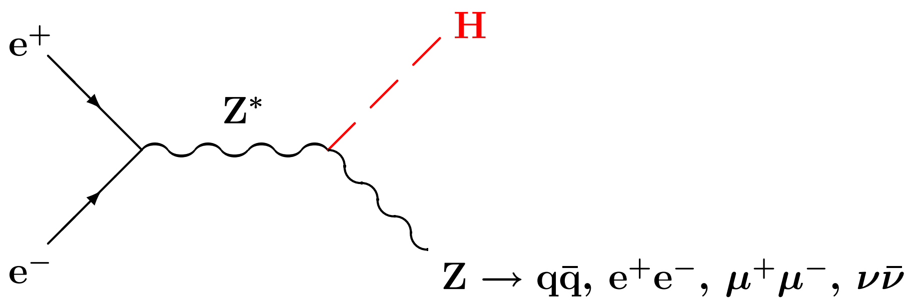
$$\log_{10} m_{\mathrm{H}}/\mathrm{GeV} = 1.99 \pm 0.21$$
$$\text{oder } m_{\mathrm{H}} = 98\,^{+58}_{-38}\ \mathrm{GeV}$$



Experimentelle obere Grenze für die Higgs-Masse:

$$m_{\mathrm{H}} < 212\ \mathrm{GeV} \qquad 95\%\ \mathrm{CL}$$

LEP: Produktion von Higgs-Bosonen möglich durch Higgs-Strahlung

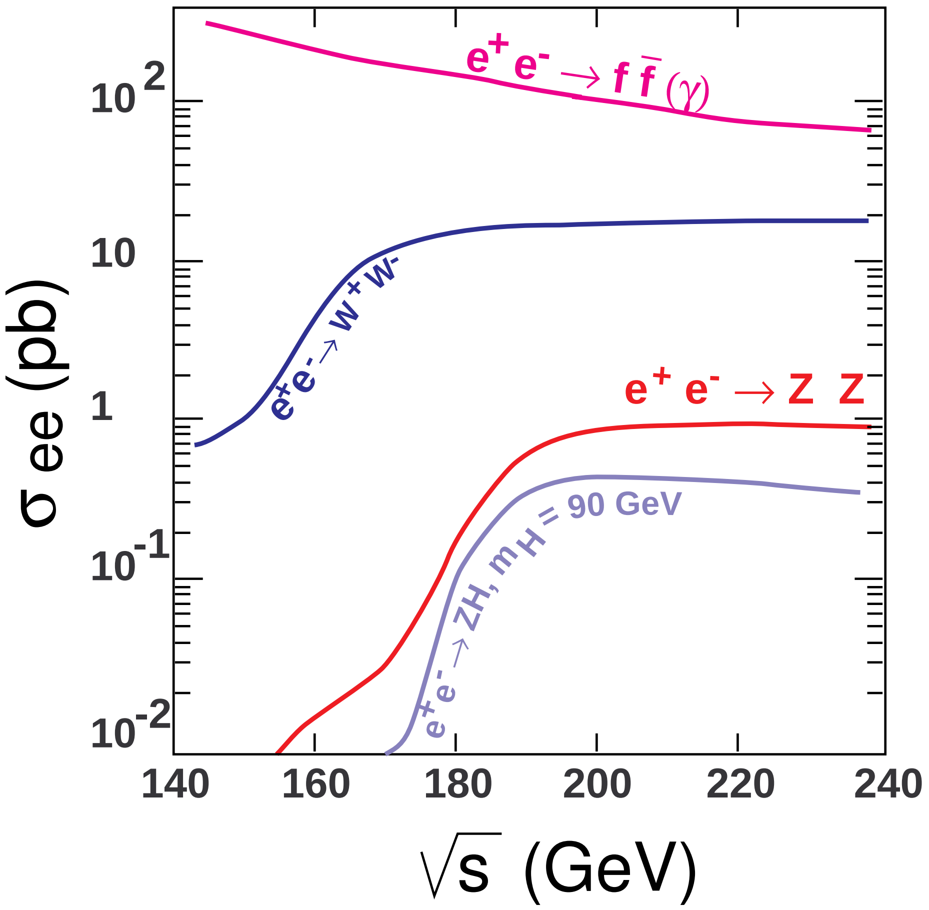


Erzeugung eines Higgs- und eines reellen Z-Bosons:

+ Signatur: Masseninformation $m_{\mathrm{f\bar{f}}} \approx m_{\mathrm{Z}}$ (Auflösung, Γ_{Z})

− Suche möglich bis maximal $m_{\mathrm{H}} \approx \sqrt{s} - m_{\mathrm{Z}}$

Vergleich von Wirkungsquerschnitten:



LEP im Jahr 2000:

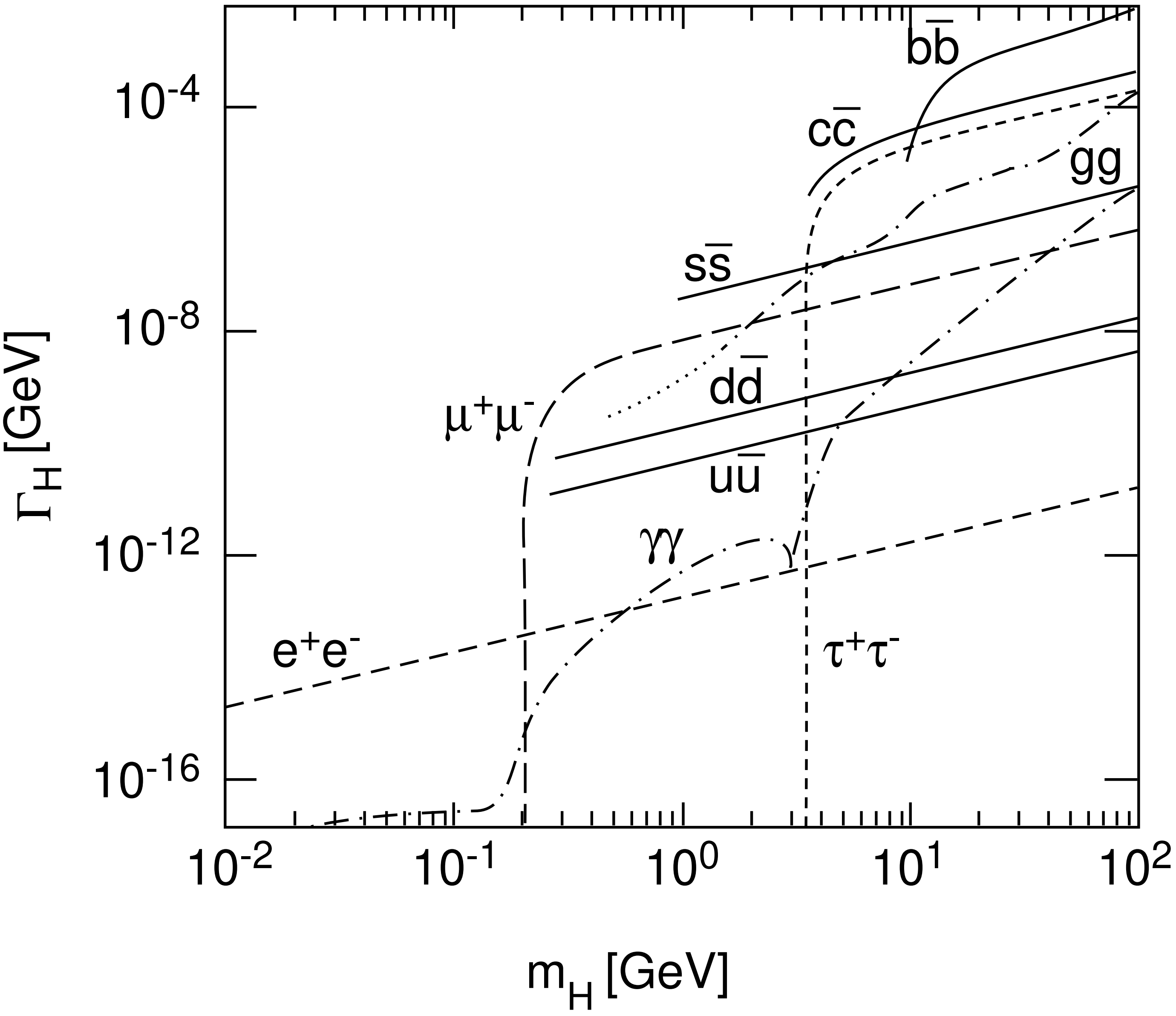
- Schwerpunktsenergie 202 GeV $\leq \sqrt{s} \leq$ 208 GeV
- Luminosität: $\mathcal{L} \approx 220\ \mathrm{pb}^{-1}$ pro Experiment

$$N_{\mathrm{Higgs}} = \sigma \cdot \mathcal{L} \cdot \mathrm{Effizienz}$$

$\Longrightarrow$ Suche nach wenigen Higgs-Ereignissen!

Zerfallsbreite des Higgs Boson:

$$\Gamma(\mathrm{H} \to \mathrm{f\bar{f}}) = \frac{N_c\, g^2}{32\,\pi}\, \frac{m_\mathrm{H}}{m_\mathrm{W}^2}\, m_\mathrm{f}^2\, \beta_\mathrm{f}^3 \qquad \beta_\mathrm{f} = \sqrt{1 - 4\, m_\mathrm{f}^2 / m_\mathrm{H}^2}$$



Für Massen $m_\mathrm{H} \gtrsim 160$ GeV werden Higgs-Zerfälle in Eichbosonen $\mathrm{H} \to \mathrm{W^+W^-}$, ZZ dominant

Signal $e^+e^- \to HZ$:

- 4 Topologien des Endzustandes

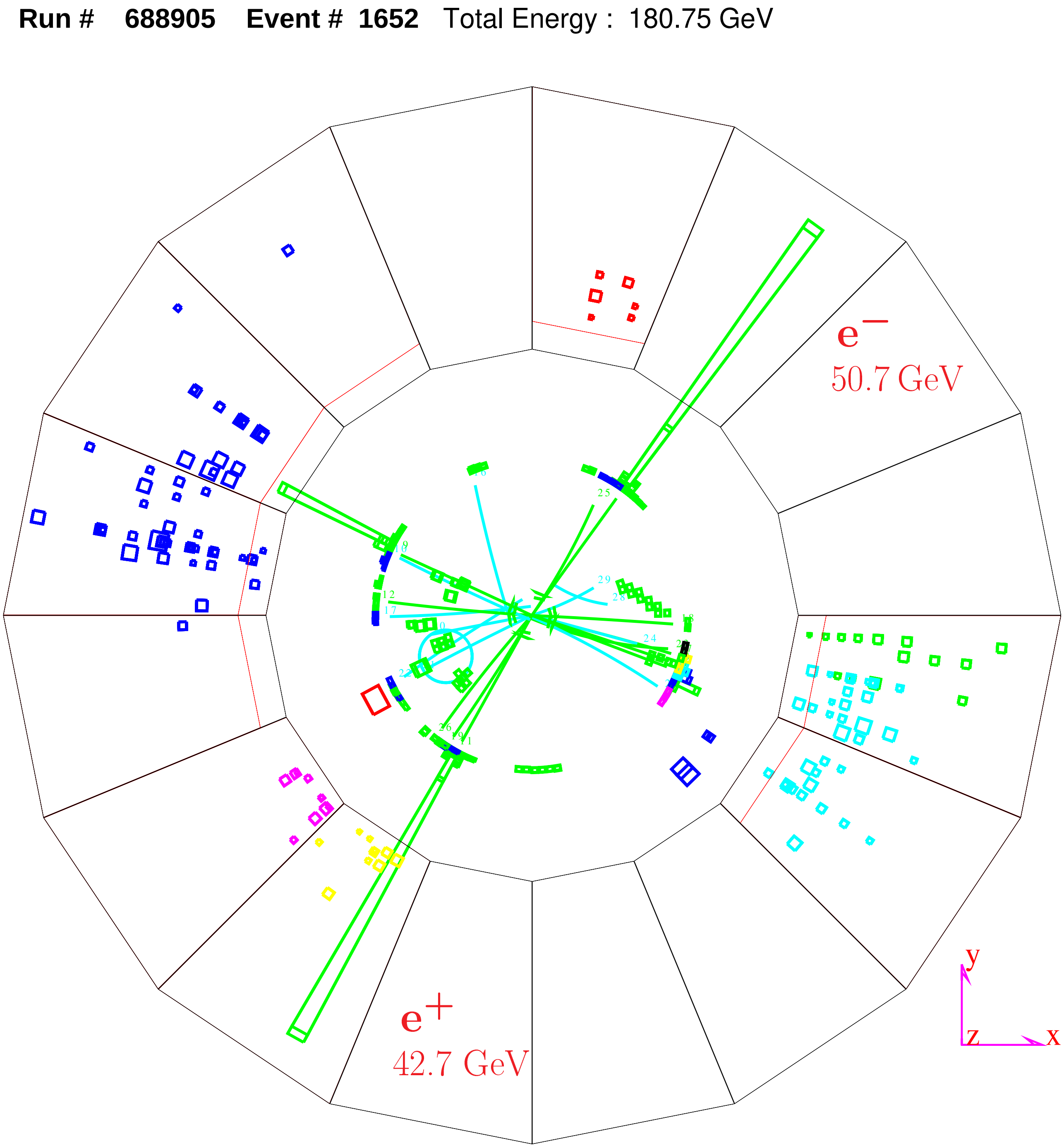
$b\bar{b}\,q\bar{q}$	- 4 Jets
$b\bar{b}\,\nu\bar{\nu}$	- 2 akoplanare Jets
$b\bar{b}\,e^+e^-$, $b\bar{b}\,\mu^+\mu^-$	- 2 Jets, 2 Leptonen
$\tau^+\tau^- q\bar{q}$	- 2 Tau-Leptonen, 2 Jets

- $H \to b\bar{b}$ dominant
  Lange Lebensdauer von B-Hadronen $\mathcal{O}(10^{-12}\ \mathrm{s})$
  Erkennung von b-Quarks durch Sekundärvertices
  $(<d>= \gamma c\tau \approx 5\ \mathrm{mm})$
- Masseninformation
  $m_{f\bar{f}} \approx m_Z$ (experimentelle Auflösung, Breite des Z)

Untergrund:

- Fermionpaare, besonders $e^+e^- \to Z/\gamma \to q\bar{q}(\gamma)$
- Einzel W-Produktion $e^+e^- \to W\,e\nu$ (für $H\nu\bar{\nu}$)
- Boson-Paare $e^+e^- \to W^+W^-$
  und besonders $e^+e^- \to ZZ$:
  $\Gamma(Z \to b\bar{b})/\Gamma(Z \to \mathrm{Hadronen}) = 0.22$

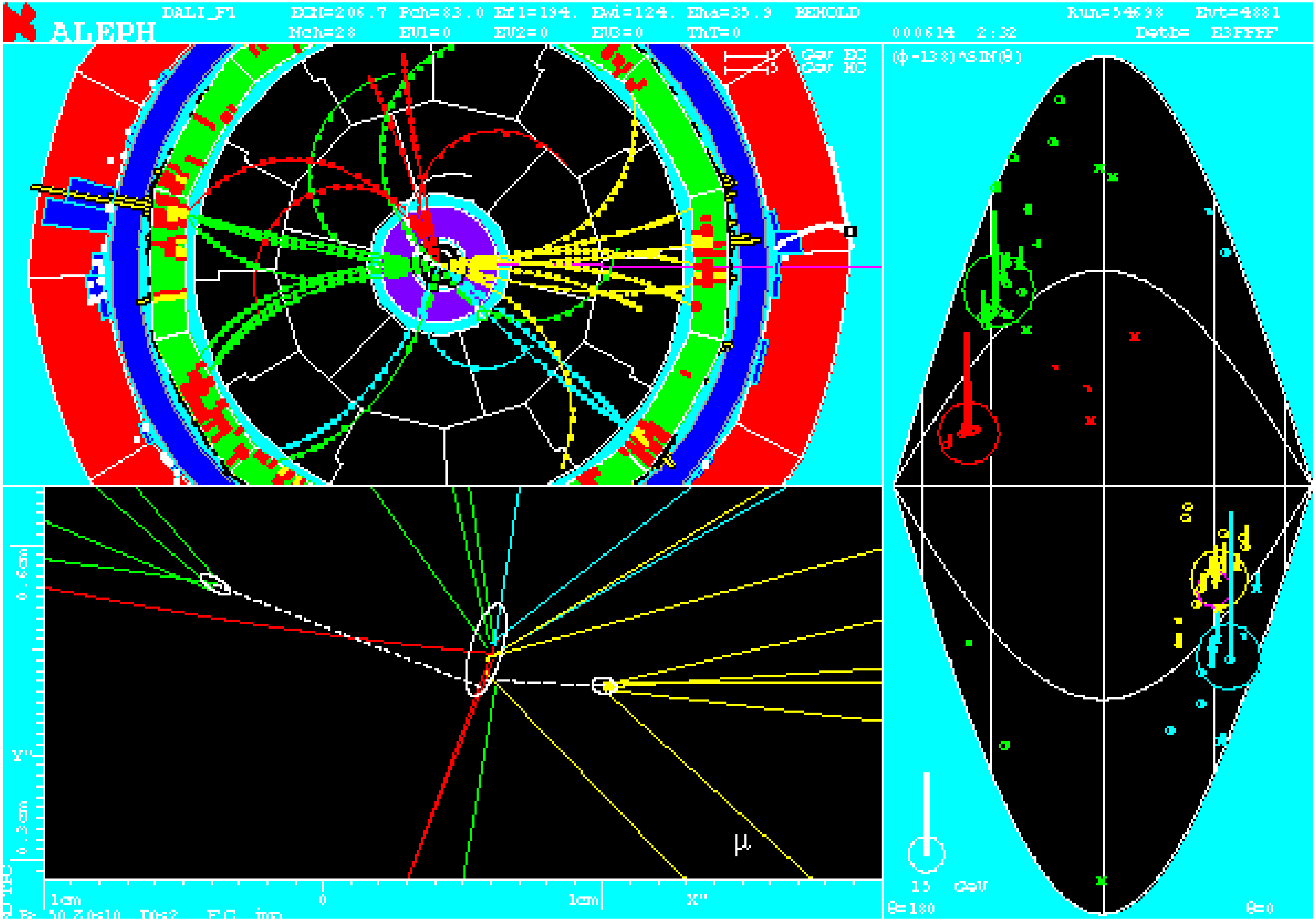
Kandidat für $e^+e^- \to HZ \to b\bar{b}\, e^+e^-$



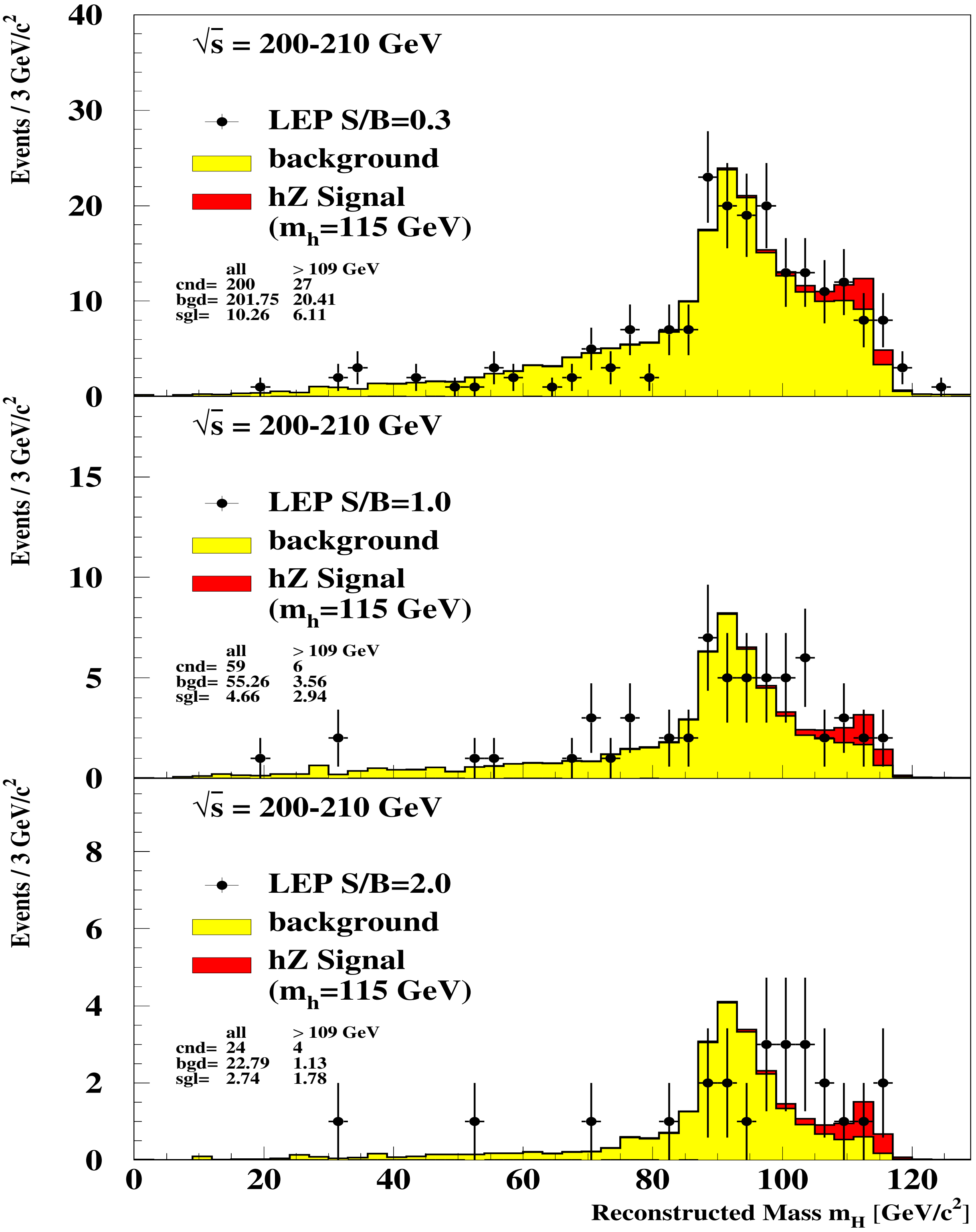
$$m_{ee} = 92.8\ \text{GeV} \qquad m_{jj} = 88.8\ \text{GeV}$$

Wahrscheinliche Erklärung: $e^+e^- \to ZZ \to b\bar{b}\, e^+e^-$

Higgs Kandidat $e^+e^- \rightarrow HZ \rightarrow 4$ Jets bei $\sqrt{s} = 207$ GeV



Massenspektrum der besten Higgs-Kandidaten in 2000 (Verschärfung der Selektionskriterien)



Überschuss bei $m_{\mathrm{H}} = 115$ GeV ?

- Massenauflösung
- Signal- und Untergrundwahrscheinlichkeit

der einzelnen Kandidaten

Konfidenzgrenzen für

- Untergrund (b)
- Signal plus Untergrund (s+b)

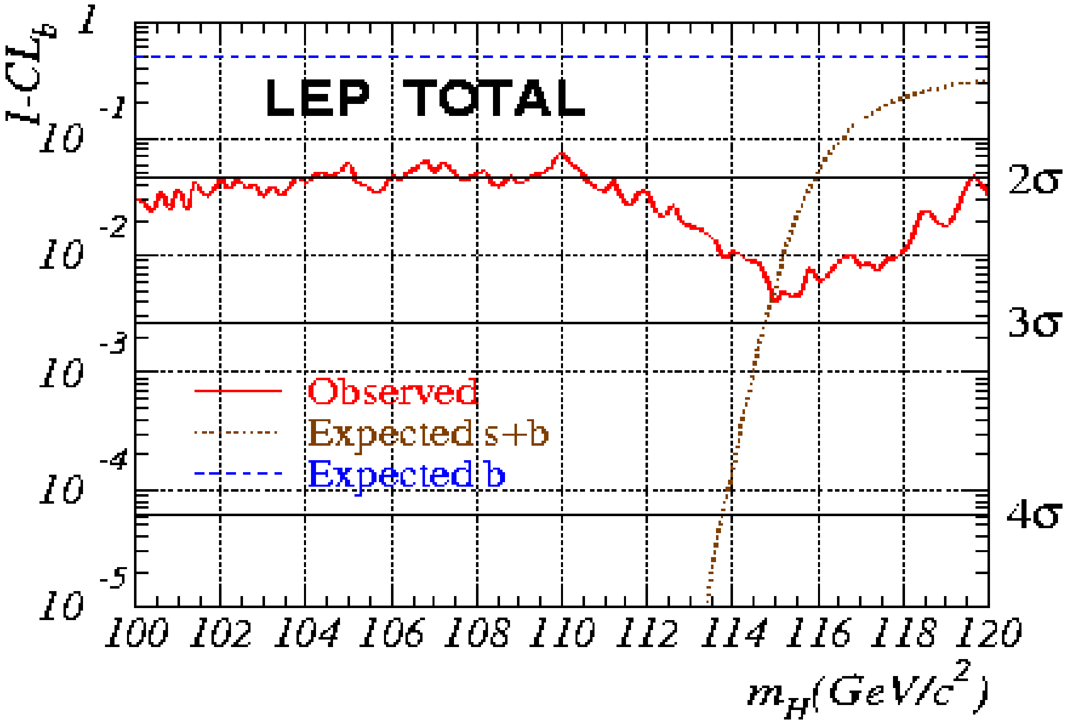
Erwartungswerte aus vielen simulierten Experimenten

Kombination der LEP Experimente

- Signifikanz für Higgs-Produktion mit $m_{\mathrm{H}} = 115$ GeV
  Entspricht 2.9 Standardabweichung Überfluktuation des Untergrundes
- Messung in Übereinstimmung mit erwartetem Wirkungsquerschitt des Standardmodells

- Untere, experimentelle Schranke für die Higgs-Masse:

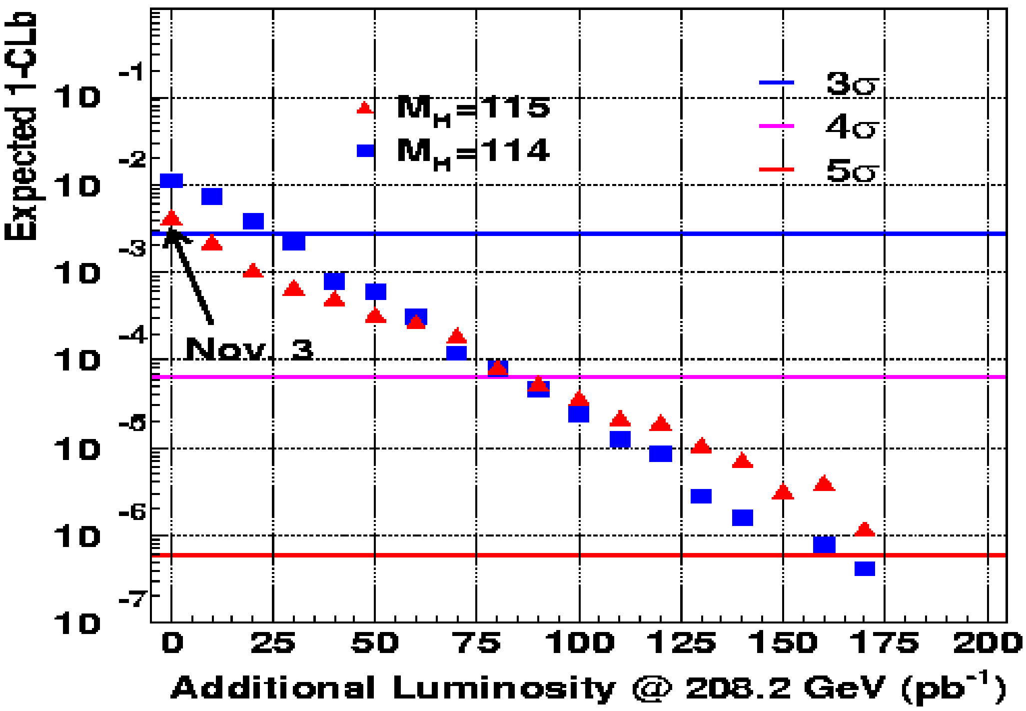
$$m_{\mathrm{H}} > 113.5 \text{ GeV}$$



$1 - CL_{\mathrm{b}} = 5.7 \cdot 10^{-7}$ entpricht 5σ Entdeckung

Verlängerung des LEP-Betriebs im Jahr 2001?

Entwicklung der Signifikanz im Falle eines Higgs-Signals:



LEP wurde am 2.11.2000 endgültig abgeschaltet (→ LHC)

Das Standardmodell beschreibt bis heute alle untersuchten Phänomene bis zu den höchsten Energien

Aber es läßt viele Fragen offen:

- **Warum drei Generationen?**
  CP-Verletzung, Asymmetrie Materie-Antimaterie
- **Warum $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$**
- **Warum sind die Energieskalen der elektroschwachen Wechselwirkung (10^2 GeV) und der Gravitation (10^{19} GeV) so verschieden?**
  Supersymmetrie, Extra-Dimensionen?
- **Warum diese Fermionmassen?**
  Neutrinos: $m_\nu = 0$ oder $\mathcal{O}(10^{-3}$ eV$)$
  Top-quark: $m_{\mathrm{t}} = 175$ GeV
  Higgs-Mechanismus liefert keine Erklärung!
- **Viele freie Parameter:**
  3 Kopplungskonstanten
  1 Masse des Higgs Bosons
  9 Fermion-Massen (+ 3 Neutrinomassen?)
  4 Parameter in CKM-Matrix (+ Neutrino-Mischungsmatrix?)

LEP Experimente sind abgeschlossen:

- **Messung schwacher Strahlungskorrekturen**

$$m_{\mathrm{H}} < 212 \text{ GeV}$$

- **Experimentelle, untere Schranke**

$$m_{\mathrm{H}} > 113.5 \text{ GeV}$$

- **Anzeichen (2.9σ) für Higgs-Produktion mit**

$$m_{\mathrm{H}} = 115 \text{ GeV}$$

Ausblick für die direkte Higgs-Suche nach LEP:

- **TEVATRON-Beschleuniger am Fermilab (USA)**
  30 fb^{-1} bis zum Jahr 2007
  $m_{\mathrm{H}} \leq 180$ **GeV**
- **ab 2006 LHC-Beschleuniger am CERN**
  Abdeckung des gesamten Massenbereiches
  100 GeV $\leq m_{\mathrm{H}} \leq 1$ **TeV**