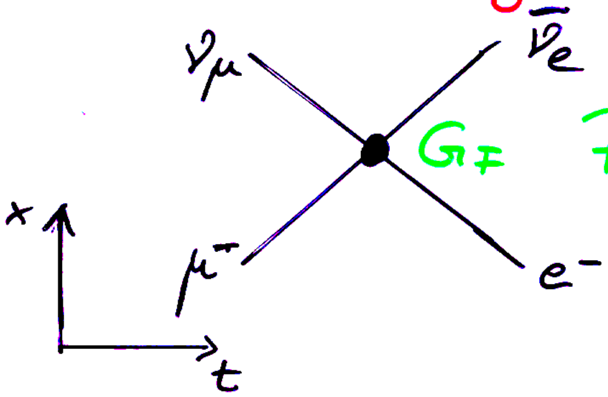
3. Standardmodell der Teilchen u. Kräfte:
Elektroschwache Wechselwirkung

- schwache Wechselwirkung
  - ▷ Myon-Lebensdauer
  - ▷ Paritätsverletzung & Helizität
  - ▷ Probleme der Fermi-Theorie → Z^0 Bosonen
- Grundzüge der Eichtheorien
  - ▷ Struktur der elektroschwachen Wechselw.
- Experimente zur elektroschwachen Theorie
  - ▷ Physik des Z^0-Bosons
  - ▷ Physik der $W^\pm$-Bosonen
  - ▷ Konsistenz der elektroschwachen Theorie?

Myon-Zerfall

1933 Fermi: Theorie zum β-Zerfall

Kontaktwechselwirkung



G_F Fermi-Konstante $\hat{=}$ Kopplungsstärke

$\Rightarrow$ Lebensdauer des Myons:

$$\tau_\mu = \hbar \cdot \frac{192\,\pi^3}{(m_\mu \cdot c^2)^5} \cdot \left(\frac{(\hbar c)^3}{G_\mu}\right)^2$$

Messung von τ_μ und m_μ

$$\Rightarrow G_\mu = (1.16637 \pm 0.00002) \cdot 10^{-5} \frac{(\hbar c)^3}{\mathrm{GeV}^2}$$

Beachte: G_μ ist dimensionsbehaftet

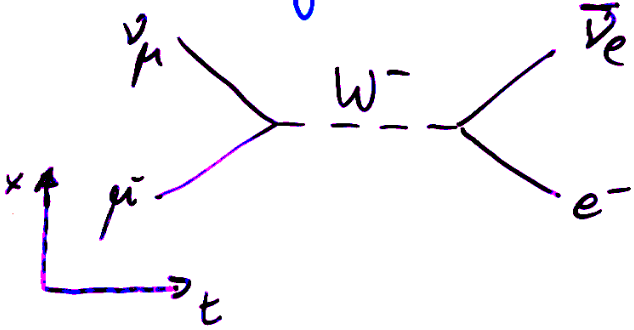
$\rightarrow$ Fermi-Theorie versagt bei hohen Wechselwirkungsenergien, z.B.

$$\sigma_{tot}(\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e) = \frac{G_F^2}{\pi (\hbar c)^4} \cdot s$$

($s \equiv$ [Energie im Schwerpunktsystem]^2)

Myon-Zerfall

Lösung: Fermi-Theorie ist Näherung im Niederenergiebereich für



$m_W > 0$

$$\Rightarrow \quad \frac{G_F}{(\hbar c)^3} = \frac{\sqrt{2}}{8} \left(\frac{g_W}{m_W c^2} \right)^2$$

$g_W \ \hat{\approx}$ schwache Ladung

$\rightarrow$ "schwache Feinstrukturkonstante"

$$\alpha_W = \frac{g_W^2}{4\pi} \approx \frac{1}{29} \quad \text{für } m_W \approx 80\ \mathrm{GeV}/c^2$$

vgl. $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar c}$ $\left(\hat{=} \frac{e^2}{4\pi}\right.$ in natürlichen Einheiten $\hbar = 1, c = 1$ und Gauß-Heavyside $\varepsilon_0 = 1 \left.\right)$

$\approx 1/137$

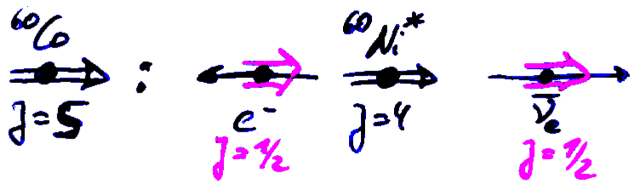
$\Rightarrow$ intrinsische schwache Kopplung ist stärker als elmagn. Kopplung!

Schwache Kopplung ist schwach, weil Überträgerteilchen (W-Bosonen) sehr massiv

Paritätsverletzung & Helizität

1957 Wu et al.: $\;{}^{60}Co\uparrow \;\to\; {}^{60}Ni^{*}\uparrow + e^- + \bar{\nu}_e$

e^- bevorzugt entgegen ${}^{60}Co$-Polarisation



$\longrightarrow$ **Helizität:** $\quad h \equiv \alpha \cdot \dfrac{\vec{\sigma}\cdot\vec{p}}{E} = \alpha \cdot \dfrac{v}{c}$

$\vec{\sigma}$: Spinvektor

$\vec{p}$: Impulsvektor

$\alpha = \pm 1$

(beachte: für $m=0 \rightsquigarrow c=1 \to h = \pm 1$)

$\longrightarrow$ **Paritätsverletzung:**

$\triangleright$ Parität P: $(\vec{x}, t) \longmapsto (-\vec{x}, t)$ „Spiegelung"

konkret: $\;P\,|E, \vec{p}, \underbrace{\vec{J}}_{\vec{r}\times\vec{p}}, \vec{\sigma}, q, \ldots\rangle = |E, -\vec{p}, +\underbrace{\vec{J}, +\vec{\sigma}}_{-\vec{r}\times-\vec{p}}, \ldots\rangle$

allg.:

Skalar	$P(s) = +s$
Pseudoskalar	$P(p) = -p$
Vektor	$P(\vec{v}) = -\vec{v}$
Pseudo-/Axialvektor	$P(\vec{a}) = +\vec{a}$

Paritätsverletzung & Helizität

- schwache Wechselwirkung verletzt Parität:

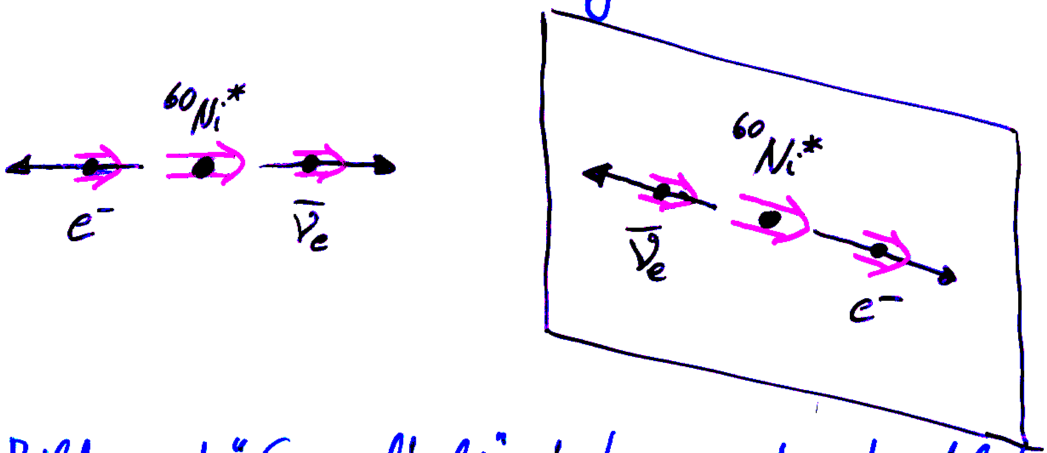
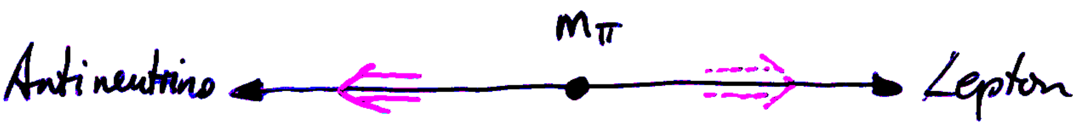


Bild und "Spiegelbild" haben unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten (Bild häufig, Spiegelbild nie)

$\Rightarrow$ e^- aus β-Zerfall (schwacher Ww.) ist linkshändig
$\bar{\nu}_e$ " " " " rechtshändig
($\hat{=}$ Linksschraube / Rechts-)

- weiteres Beispiel: π^--Zerfall



da π keinen Spin hat — Lepton hat falsche Händigkeit (Helizität +1 statt −1)

$\Rightarrow$ Zerfall ist unterdrückt mit $(1+h) = (1-\frac{v}{c})$

$$\Rightarrow \frac{\pi^- \to e^- \bar{\nu}_e}{\pi^- \to \mu^- \bar{\nu}_\mu} \simeq \begin{cases} 1.3 \cdot 10^{-4} & (1-\frac{v}{c}) \\ 5.5 & (1+\frac{v}{c}) \end{cases} \text{Unterdrückung}$$

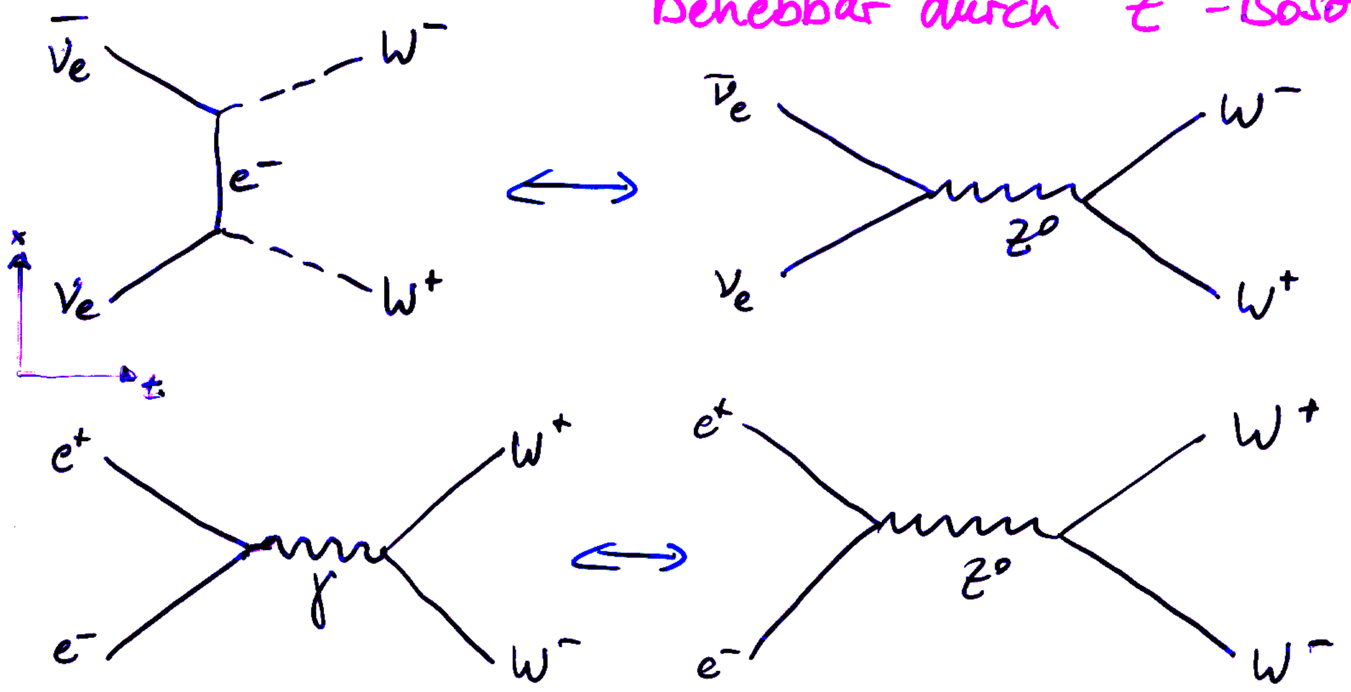
Experiment: $\simeq 1.27 \cdot 10^{-4}$

Probleme der Fermi-Theorie

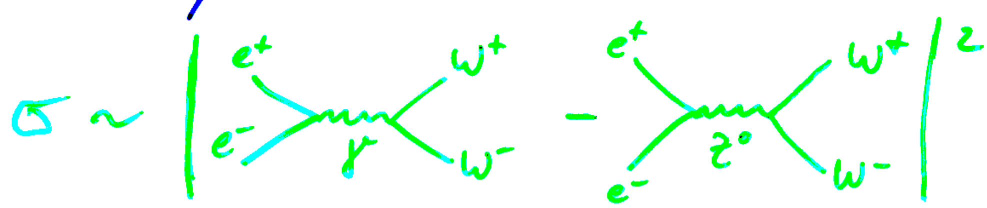
abgesehen von der bereits behandelten Divergenz des Wirkungsquerschnitts $\sigma_{tot}(\nu_e + e^- \to e^- + \nu_e) \sim s$

$\longrightarrow$ $W^\pm$-Boson als intermediäres Teilchen

weitere quadratische Divergenzen in den Prozessen:
behebbar durch Z^0-Boson:



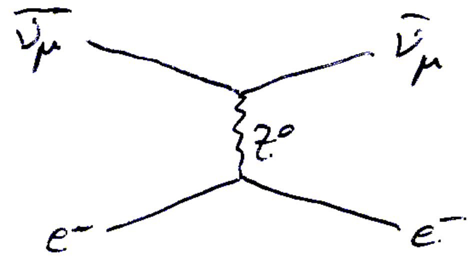
Grund: Anfangs- und Endzustand besitzen jeweils die gleichen Teilchen, dadurch können die Zwischenzustände zu Interferenzen führen, die destruktiv wirken und die quadratische Divergenz des Wirkungsquerschnittes verhindern. Symbolisch:

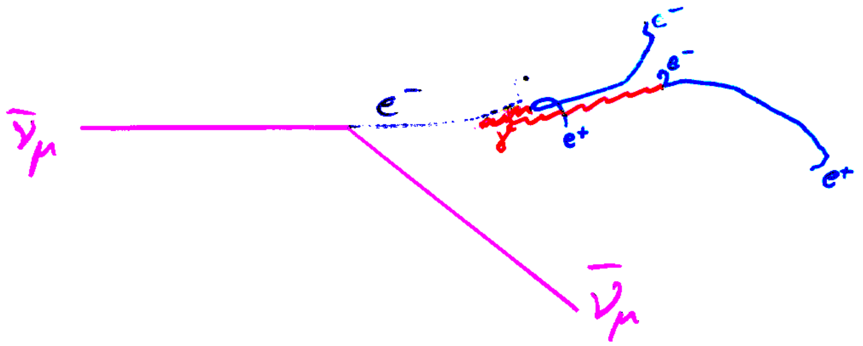


Entdeckung neutraler schwacher Wechselw.

1973 : neutraler schwacher Strom in

$$\bar{\nu}_\mu + e^- \longrightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$$





$\bar{\nu}_\mu \longrightarrow$

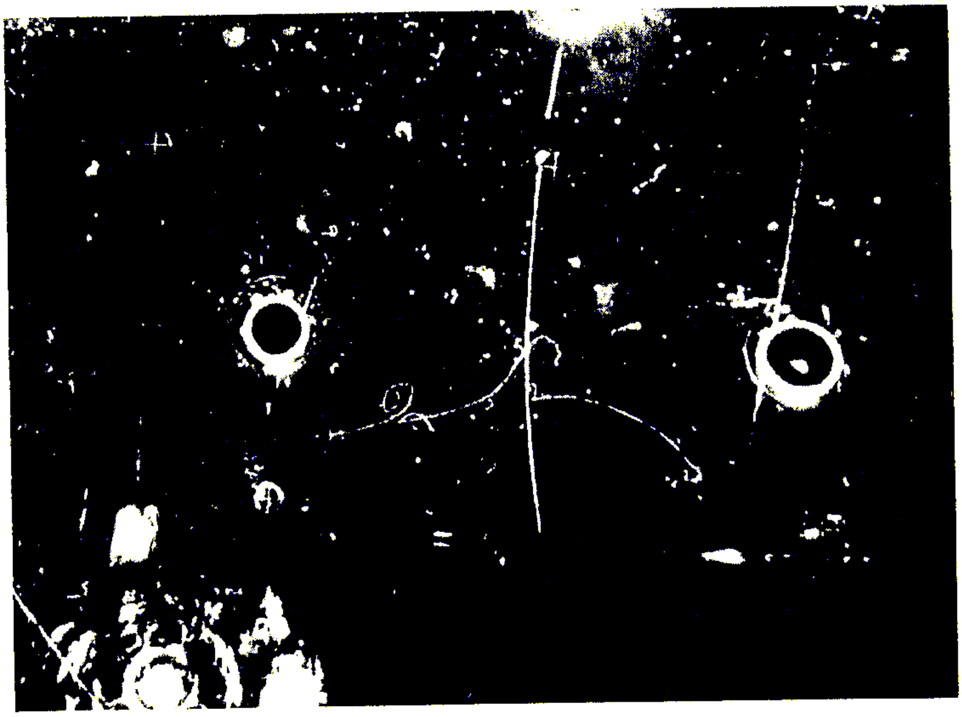


Figure 10.6 The first picture of a neutral weak process ($\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$). The neutrino enters from the left (leaving no track), and strikes an electron, which moves off horizontally to the right, emitting two photons (which show up in the picture only when they subsequently produce electron-positron pairs) as it slows down and spirals inward in the superimposed magnetic field. (Photo courtesy CERN.)

Grundzüge der Eichtheorien

Erinnerung: **Eichtransformation in E-Dynamik**

$$\left.\begin{aligned} &\text{Potential} \quad \phi \rightarrow \phi + \frac{\partial \chi(\vec{r},t)}{\partial t} \\ &\text{Vektorfeld} \quad \vec{A} \rightarrow \vec{A} - \vec{\nabla}\chi(\vec{r},t) \end{aligned}\right]$$ ohne Einfluß auf Lösung der Maxwell-Gleichungen

$\rightarrow$ Eichinvarianz der E-Dynamik, weil

$\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ und $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ sich nicht ändern

Potential ϕ und Vektorfeld $\vec{A}$ haben direkte physikal. Bedeutung: $e\phi$ $\hat{=}$ potentielle Energie des Teilchens

$e\vec{A}$ beeinflußt die de-Broglie-Wellenlänge

(siehe Aharanov-Bohm-Effekt) $\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$; $\vec{p} = m\vec{v} + e\vec{A}$

$\Rightarrow$ Eichtransformation beeinflußt die Phase der Wellenfkt. $\longrightarrow$ $H\Psi = E\Psi$ und $H = T + V$

$\longrightarrow$ $\Psi'(\vec{r},t) = \exp\left[ie\,\chi(\vec{r},t)\right] \cdot \Psi(\vec{r},t)$

Ψ' erfüllt Schrödinger-Gl. nach der Transformation $\phi' = \phi + \frac{\partial \chi}{\partial t}$; $\vec{A}' = \vec{A} - \vec{\nabla}\chi$

Eichprinzip

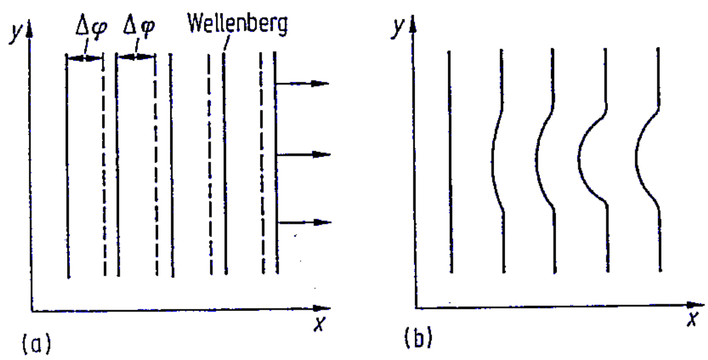
Wenn man die Phase der Wellenfkt. eines Teilchens lokal (ortsabhängig) beliebig abändert ($\psi' = \exp(ie\chi(\vec{r},t)) \cdot \psi$), so muß man notgedrungen die Existenz eines äußeren Feldes fordern, damit das Teilchen weiterhin die Schrödinger-Gleichung erfüllt.

b. Forderung der lokale Phaseninvarianz $\longrightarrow \exists$ elmagn. Feld

Verallgemeinerung bei Eichtheorie der el. schwachen Ww
$\longrightarrow \exists$ $W^{\pm}$- und Z°- Bosonen

Veranschaulichung des Prinzips an Wasserwellen

globale ($\chi = \text{const.}$)



lokale Phasentransf. ($\chi = \chi(\vec{r},t)$)

Abb. 3.76 (a) In einem flachen Behälter breitet sich eine ebene Wasserwelle in positiver x-Richtung aus. Die Wellenberge sind als durchgezogene Linien angedeutet. Eine *globale* Phasentransformation besteht darin, daß man an jeden Ort (x, y) die Phase um den gleichen Betrag $\Delta\varphi$ abändert. Dadurch wandern die Wellenberge zu den gestrichelten Linien. Es bleibt eine ebene Welle, und im zeitlichen Mittel hat die globale Phasentransformation keinen Effekt. (b) Bei einer *lokalen* Phasentransformation ist die Phasenänderung an jedem Ort verschieden: $\Delta\varphi = f(x, y)$. Die transformierte Welle ist keine ebene Welle mehr. Man könnte eine solche Veränderung durch ein Hindernis im Wasserbehälter erreichen. Lokale Phasentransformationen erfordern also die Existenz äußerer Kräfte.

Struktur der elektroschwachen Wechselwirkung

- in Quantenelektrodynamik QED:

$$\Psi \longrightarrow e^{ie\chi(\vec{r},t)} \cdot \Psi \equiv U \cdot \Psi \qquad (U^{+}U = \mathbb{1})$$

U ist eine unitäre 1x1 Matrix aus der Gruppe U(1)

- in der elektroschw. Ww (Quantenflavourdynamik QFD):

$$U \equiv e^{iH} \qquad \text{und} \qquad U \in \underline{U(1) \otimes SU(2)}$$

konkret $H = \theta \cdot \mathbb{1} + \vec{\tau} \cdot \vec{a}$

(Pauli-Matrizen $\vec{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \tau_3)$)

θ, a_1, a_2, a_3 reelle Fkt.; $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3)$

in QED war U(1) der elektr. Ladung zugeordnet

in QFD ist: U(1) ~~einer~~ schwachen Hyperladung $Y = 2 \cdot (Q - I_3)$

SU(2) einem schwachen Isospin I mit dritter Komponente I_3 zugeordnet

SU(2) sorgt für Einteilung der Teilchen in Dubletts

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L \quad I = \tfrac{1}{2};\; I_3 = \begin{matrix} +1/2; \\ -1/2; \end{matrix} \qquad Y = \begin{matrix} -1 \\ -1 \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L \qquad \begin{matrix} +1/2; \\ -1/2; \end{matrix} \qquad \begin{matrix} = +1/3 \\ = +1/3 \end{matrix}$$

für linkshändige Teilchen; rechtshändige haben $I = 0$ und $I_3 = 0$
aber Hyperladung $Y \neq 0$!

Felder der $U(1)_Y \otimes SU(2)_L$-Theorie

Eichprinzip: lokale Phasenänderung → ∃ äußere Felder

$U(1)_Y$: B^μ koppelt an Hyperladung

$SU(2)_L$: $W_1^\mu, W_2^\mu, W_3^\mu$ .. an schwachen Isospin

daraus folgen die Bosonen der elektroschwachen WW.:

$$W^{\pm\mu} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(W_1^\mu \mp i W_2^\mu\right) \quad \text{geladene } W\text{'s}$$

$$Z^\mu = -B^\mu \sin\theta_W + W_3^\mu \cos\theta_W \quad \text{neutr. } Z$$

$$A^\mu = B^\mu \cos\theta_W + W_3^\mu \sin\theta_W \quad \text{neutr. Photon}$$

- die Mischung von B^μ und W_3^μ sorgt dafür, daß das Photon masselos bleibt, während das Z massiv wird.
- θ_W ist der schwache Mischungswinkel (exp. zu messen)
- $W^\pm$ koppeln nur an linkshändige Teilchen
- Z^0, γ koppeln (durch B^μ Feld) auch an rechtshändige
- Kopplung des Photons: $g_e = e = \sqrt{4\pi\alpha_{em}}$

  ~ der $W^\pm$: $\boxed{g_W = e/\sin\theta_W}$ und:

  ~ des Z^0 : $\boxed{g_Z = e/\sin\theta_W \cdot \cos\theta_W}$ $\quad \frac{M_W}{M_Z} = \cos\theta_W$

elmagn. und schwache Kopplung vereint!

Experimente zur elektroschwachen Theorie

hier nur: Präzisionsexperimente am LEP Beschleuniger

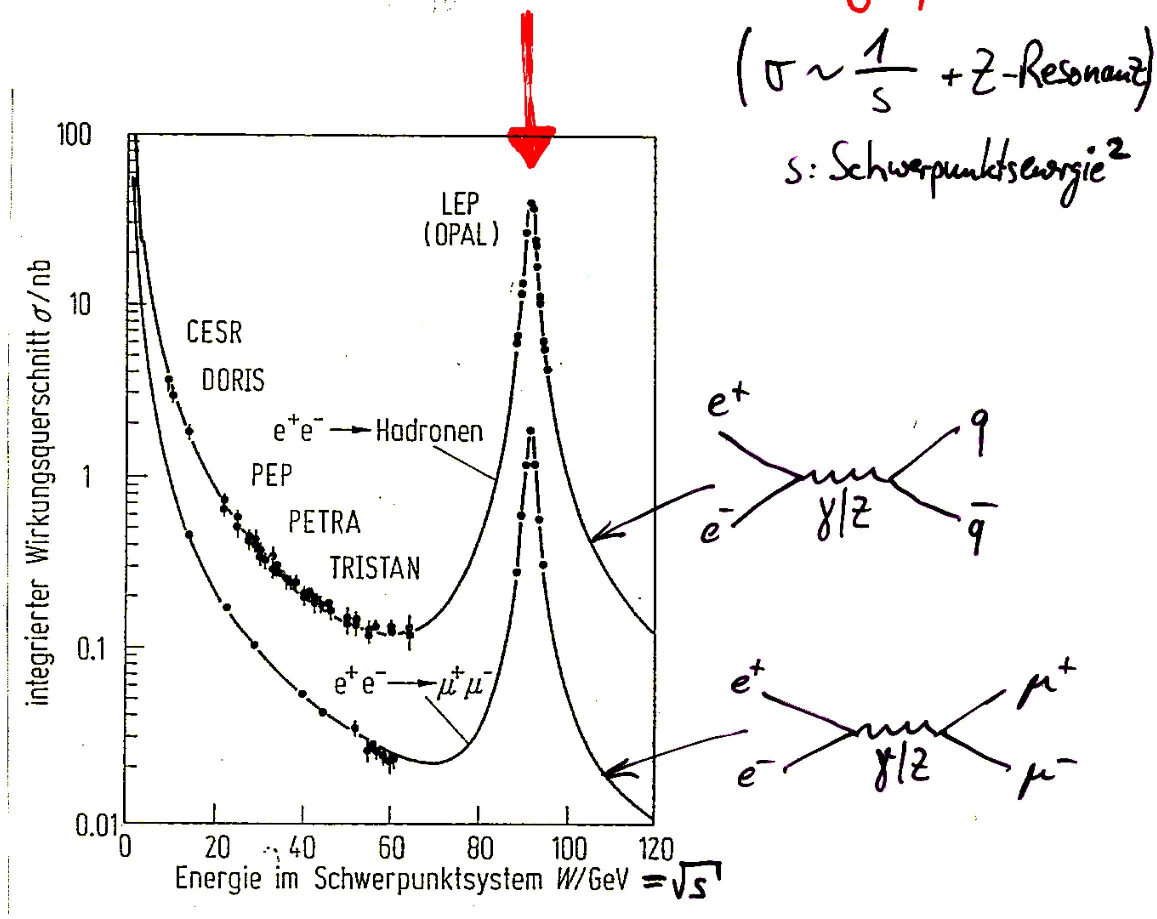
- e^+e^--Vernichtung $\rightarrow$ Z^0-Erzeugung und -Zerfall
- Schwerpunktsenergie $\approx$ Masse des Z^0

$\Downarrow$

Resonanz im Wirkungsquerschnitt

$\left(\sigma \sim \frac{1}{s} + Z\text{-Resonanz}\right)$

s: Schwerpunktsenergie^2



- Lage der Resonanzmaximums $\longrightarrow$ Masse des Z^0
- Breite der Resonanzkurve $\longrightarrow$ Zerfallsbreite des Z^0 ($\hat{=}$ 1/Lebensdauer)

Physik des Z^0-Bosons

Vermessung der Resonanzkurve $\hat{=}$ Zählexperiment

$$\underbrace{N}_{\text{Zahl der Reaktionen}} = \underbrace{\sigma}_{\text{Wirkungsquerschnitt}} \cdot \underbrace{\int \mathcal{L}\, dt}_{\text{integrierte Luminosität}}$$

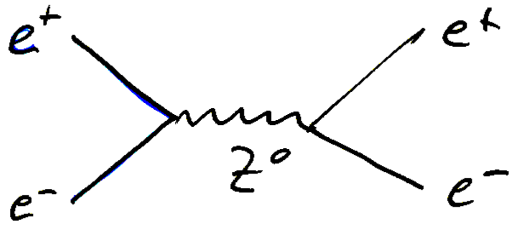
(aus Beschleunigerparametern oder Referenzprozeß mit wohlbekanntem Wirkungsquerschnitt)

- Klassifikation der Reaktionen (Z^0-Zerfälle)

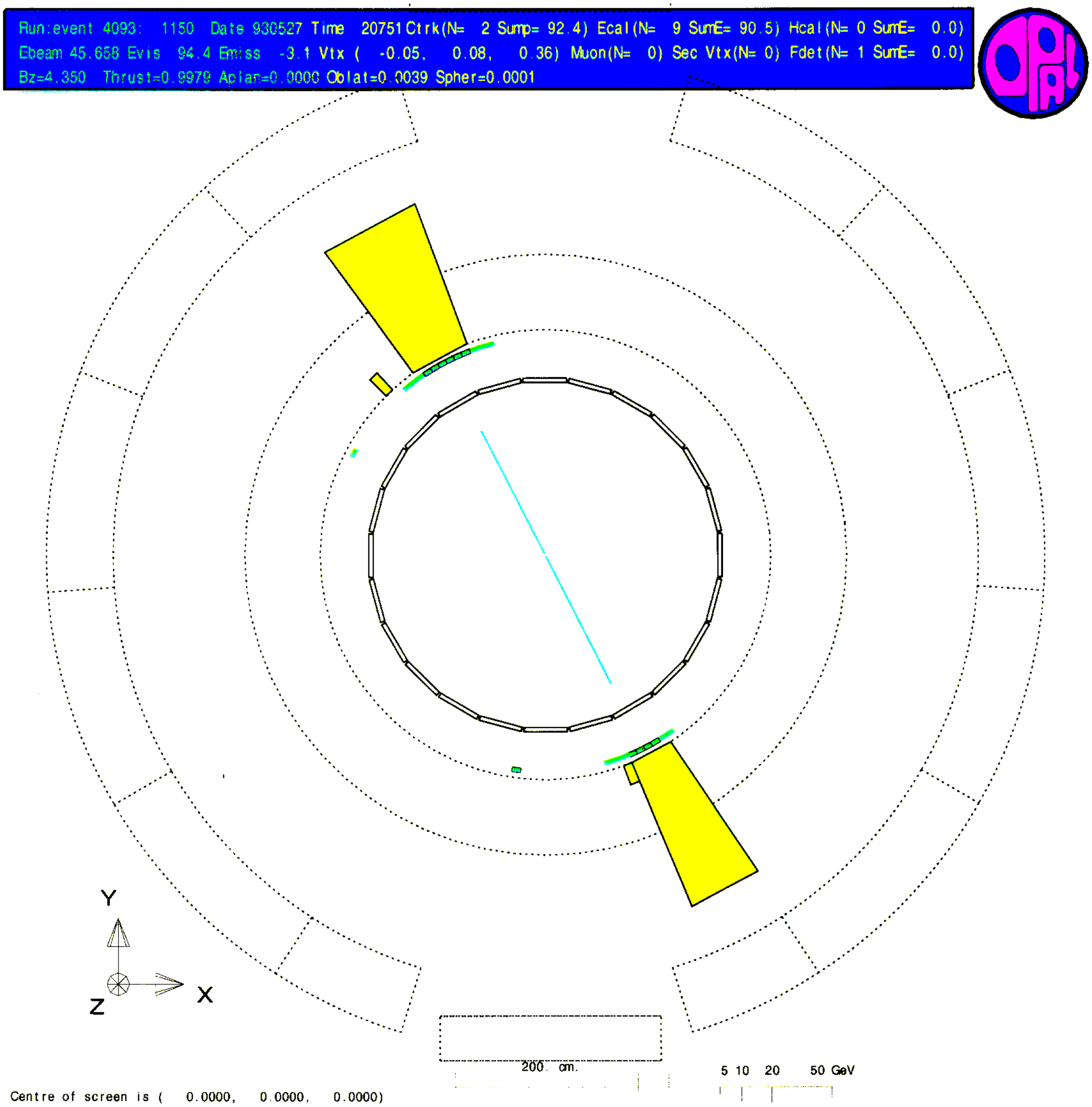
  $Z^0 \to e^+e^-,\ \mu^+\mu^-,\ \tau^+\tau^-,\ \nu\bar{\nu},\ q\bar{q}$

- Vermessung der Resonanzkurve:
  - Masse: $m_{Z^0} = 91\,187.1 \pm 2.1\ \mathrm{MeV}/c^2$
  - Breite: $\Gamma_Z = 2494.4 \pm 2.4\ \mathrm{MeV}$

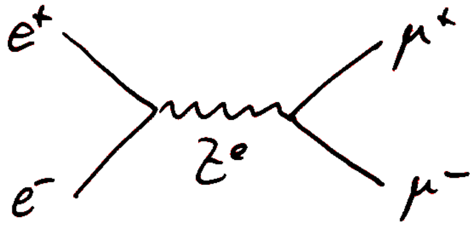
- Unterscheidung der Endprodukte des Z^0-Zerfalls läßt auch die Bestimmung der Zerfallshäufigkeiten (Verzweigungsverhältnisse) und ihre Komposition zur Gesamtbreite (unsichtbare Z^0-Zerfälle?!) zu



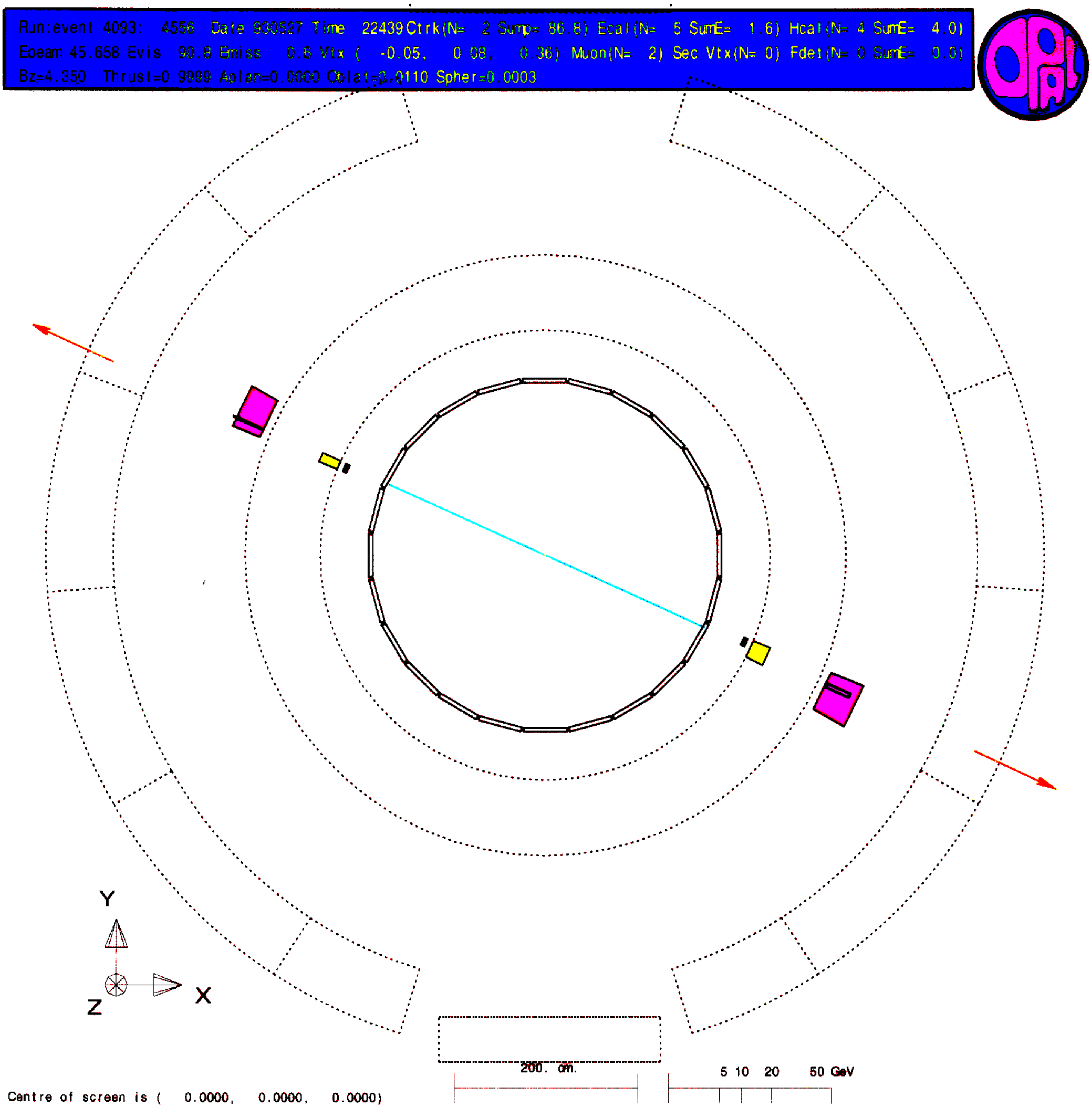
e+
e-
Z0
e+
e-



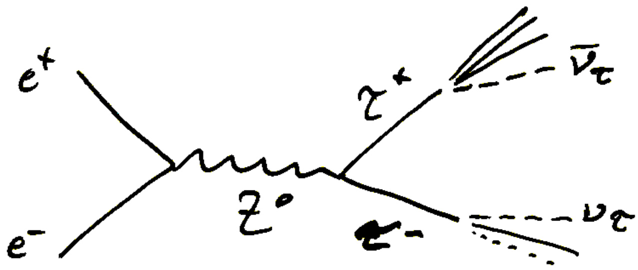
Run:event 4093: 1150 Date 930527 Time 20751 Ctrk(N= 2 Sump= 92.4) Ecal(N= 9 SumE= 90.5) Hcal(N= 0 SumE= 0.0)
Ebeam 45.658 Evis 94.4 Emiss -3.1 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 1 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9979 Aplan=0.0000 Oblat=0.0039 Spher=0.0001
Y
X
Z
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



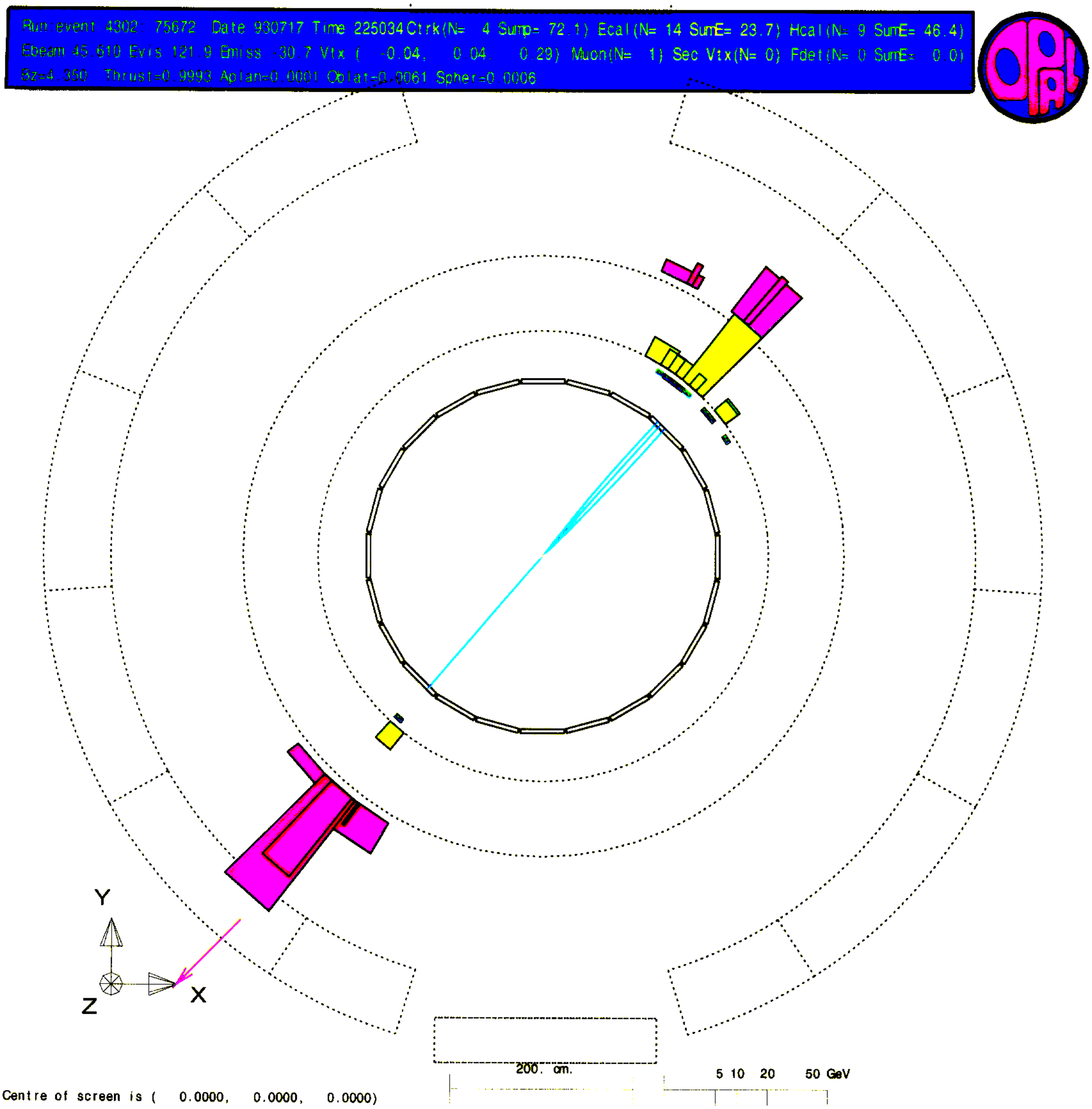
e^+
e^-
Z^0
μ^+
μ^-

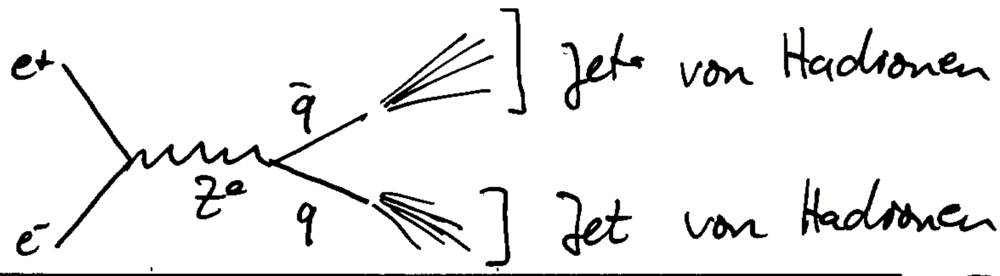


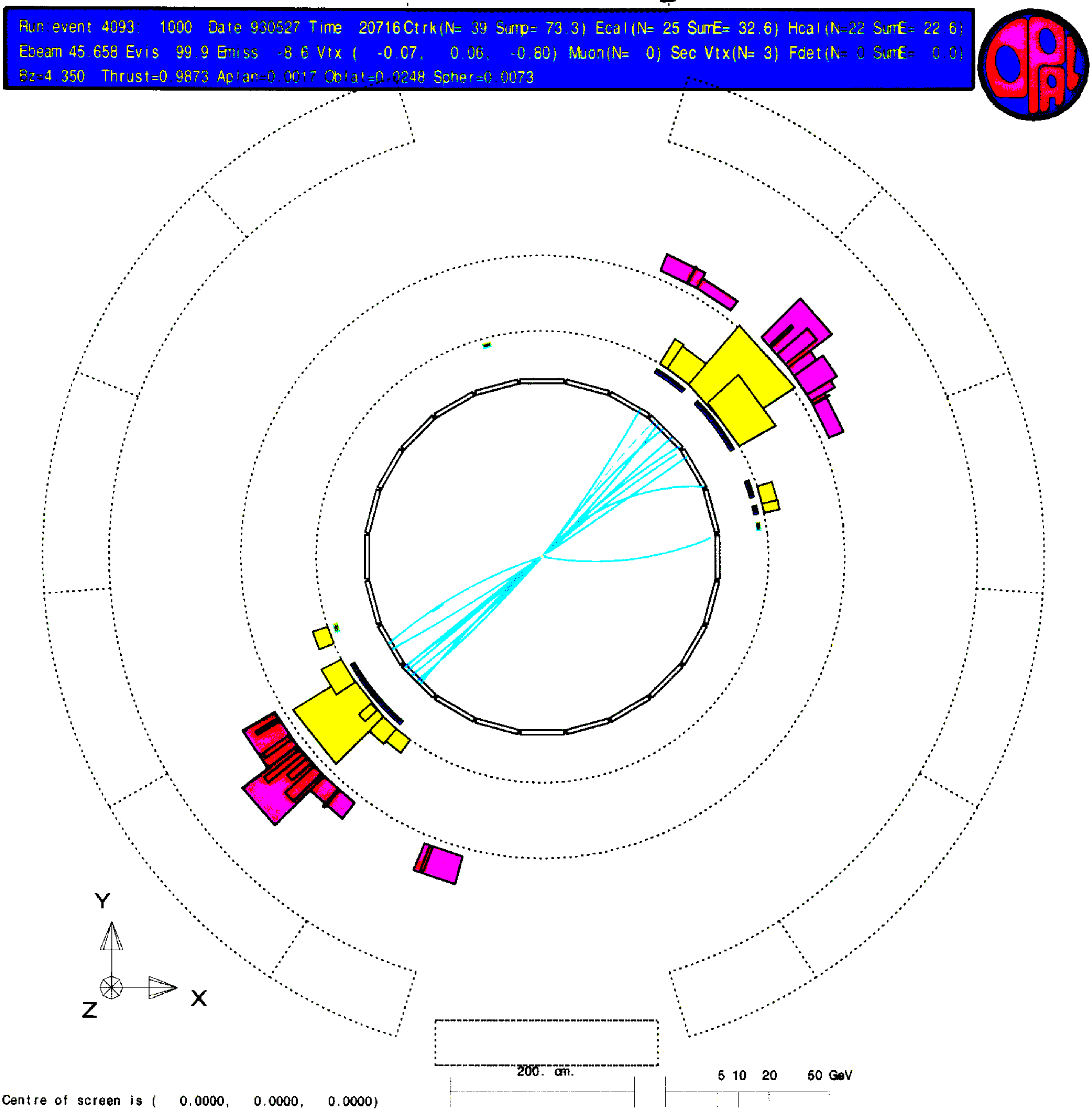
Run:event 4093: 4556 Date 930527 Time 22439 Ctrk(N= 2 Sump= 86.8) Ecal(N= 5 SumE= 1.6) Hcal(N= 4 SumE= 4.0)
Ebeam 45.658 Evis 90.8 Emiss 0.6 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9999 Aplan=0.0000 Oblat=0.0110 Spher=0.0003
Y
X
Z
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

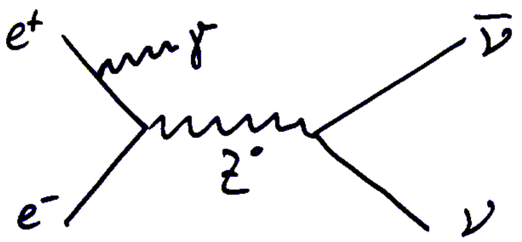


Lebensdauer des τ:
$\tau_\tau \approx 290\ fs$

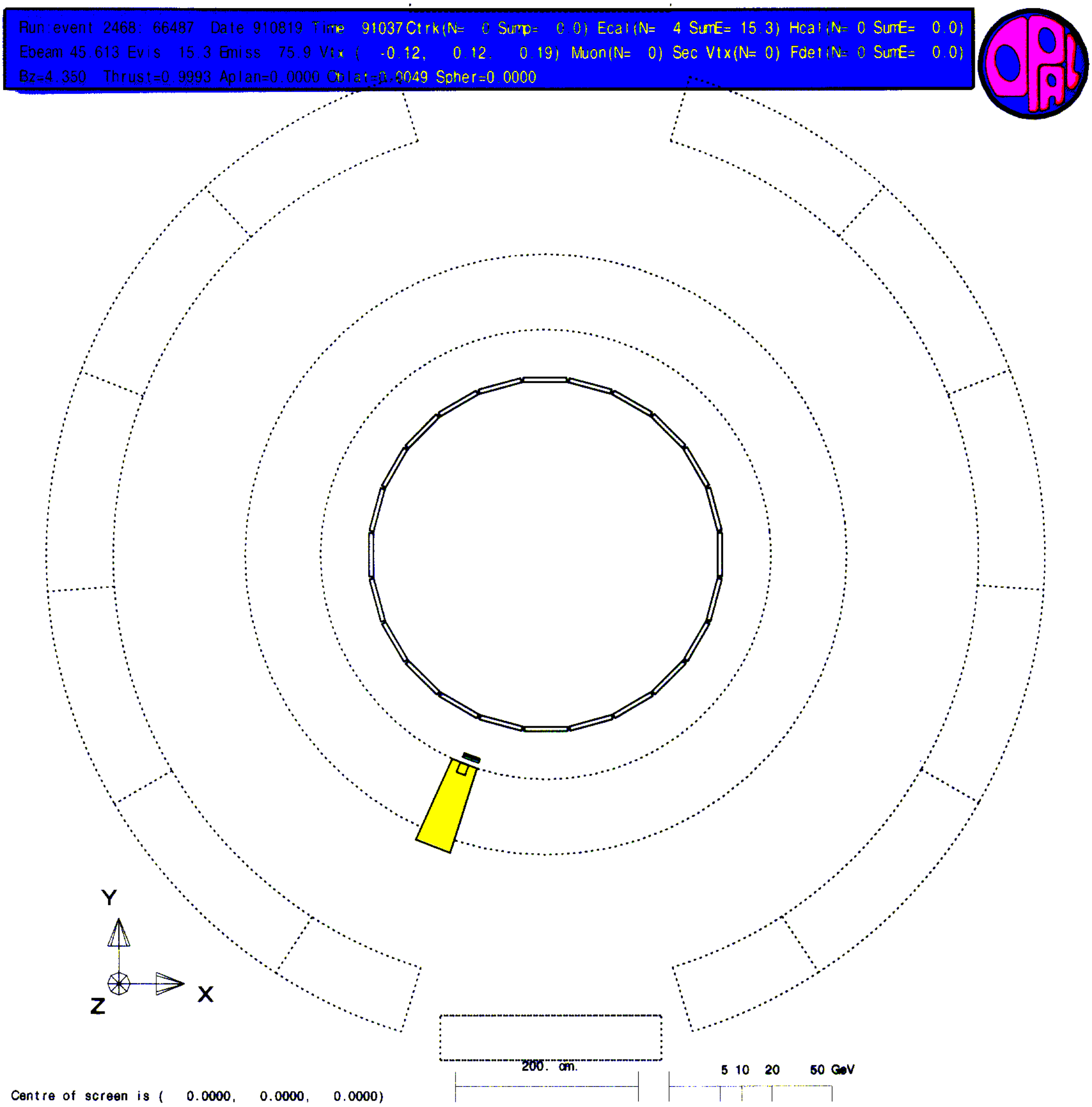



e+
e-
q̄
q
Z⁰
Jets von Hadronen
Jet von Hadronen


Run:event 4093: 1000 Date 930527 Time 20716 Ctrk(N= 39 Sump= 73.3) Ecal(N= 25 SumE= 32.6) Hcal(N=22 SumE= 22.6)
Ebeam 45.658 Evis 99.9 Emiss -8.6 Vtx (-0.07, 0.06, -0.80) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9873 Aplan=0.0017 Oblat=0.0248 Spher=0.0073
Y
X
Z
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)



e+
γ
Z°
e−
ν̄
ν



Run:event 2468: 66487 Date 910819 Time 91037 Ctrk(N= 0 Sump= 0.0) Ecal(N= 4 SumE= 15.3) Hcal(N= 0 SumE= 0.0)
Ebeam 45.613 Evis 15.3 Emiss 75.9 Vtx (-0.12, 0.12, 0.19) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9993 Aplan=0.0000 Oblat=0.0049 Spher=0.0000
Y
Z
X
200. cm.
5 10 20 50 GeV
Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

Z^0 – Resonanzkurve

- relevant: Kopplung des Z^0 an $e^\pm, \mu^\pm, \tau^\pm, \overset{(-)}{\nu}, \overset{(-)}{q}$
- hat zwei Anteile:

Fermion f	Ladung Q_f	axial-vektorielle $g_{Af} = \underbrace{I_{3f}}_{\text{links-}}$	vektorielle Kopplg. $g_{Vf} = \underbrace{I_{3f} - 2Q_f \sin^2\Theta_w}_{\text{links-/ rechtshändig}}$
ν_e, ν_μ, ν_τ	0	$+1/2$	$+\frac{1}{2} = +0.50$
e^-, μ^-, τ^-	-1	$-1/2$	$-\frac{1}{2} + 2\sin^2\Theta_w \approx -0.05$
u, c, t	$+2/3$	$+1/2$	$+\frac{1}{2} - \frac{4}{3}\sin^2\Theta_w \approx +0.20$
d, s, b	$-1/3$	$-1/2$	$-\frac{1}{2} + \frac{2}{3}\sin^2\Theta_w \approx -0.35$

mit $\sin^2\Theta_w \approx 0.223$

- partielle Zerfallsbreite (⇝ Verzweigungsverhältnis)

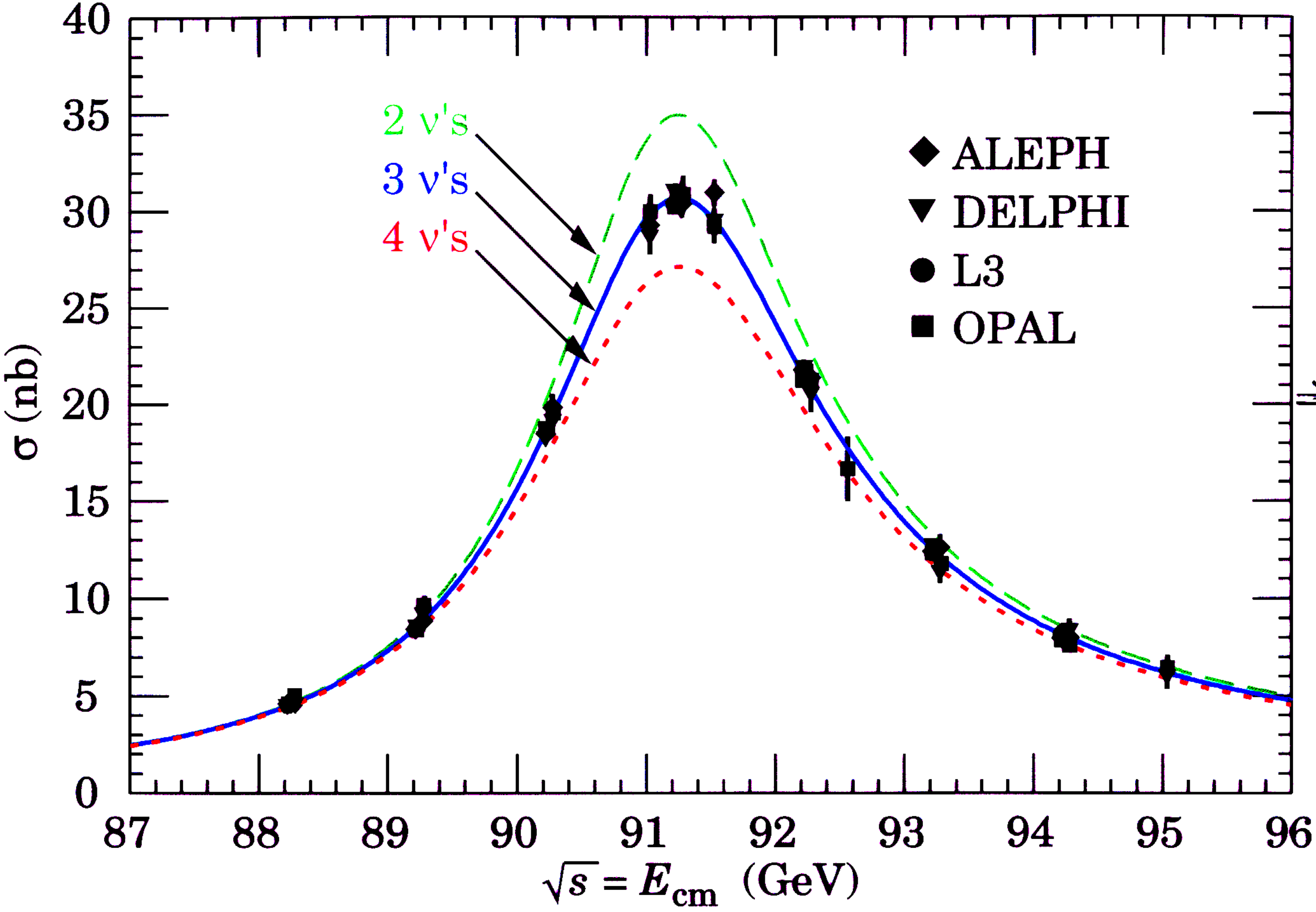
$$\Gamma_f = \underbrace{\frac{G_F m_Z^3}{6\pi\sqrt{2}}}_{\approx 332\,\text{MeV}} \left(g_{Vf}^2 + g_{Af}^2\right) \cdot \underbrace{N_c}_{\text{Farbfaktor}} \quad \begin{cases} = 1 & \text{Leptonen} \\ = 3 & \text{Quarks} \end{cases}$$

- Wirkungsquerschnitt (ohne Interferenz mit )

$$\sigma(s) \approx \sum_{\substack{\text{Fermion} \\ f}} 12\pi \cdot \Gamma_e \cdot \Gamma_f \cdot \underbrace{\frac{s}{\left((s-m_Z^2)^2 + m_Z^2 \Gamma_Z^2\right)}}_{\text{Resonanznenner}}$$

$s = (\text{Schwerpunktsenergie})^2$

Z^0-Resonanzkurve für 2,3 oder 4 Sorten von Neutrinos



$\Rightarrow$ Es gibt nur $\boxed{3}$ leichte Neutrino-Generationen!

Z^0 Eigenschaften

aus partiellen Zerfallsbreiten

→ Verzweigungsverhältnisse

$$Z \to \nu\bar{\nu} : l^+l^- : q\bar{q} \simeq 20\% : 10\% : 70\%$$

dabei ist $Z \to q\bar{q}$

$$Z \to d\bar{d} : u\bar{u} : s\bar{s} : c\bar{c} : b\bar{b} \simeq 22\% : 17\% : 22\% : 17\% : 22\%$$

und keine Mischung zwischen verschiedenen Quarks

$$\cancel{Z \to u\bar{c},\ s\bar{d}}$$

(keine sog. flavour ändernden neutralen Ströme FCNC)

weiterhin: Leptonuniversalität in $Z \to \nu\bar{\nu}, l^+l^-$:

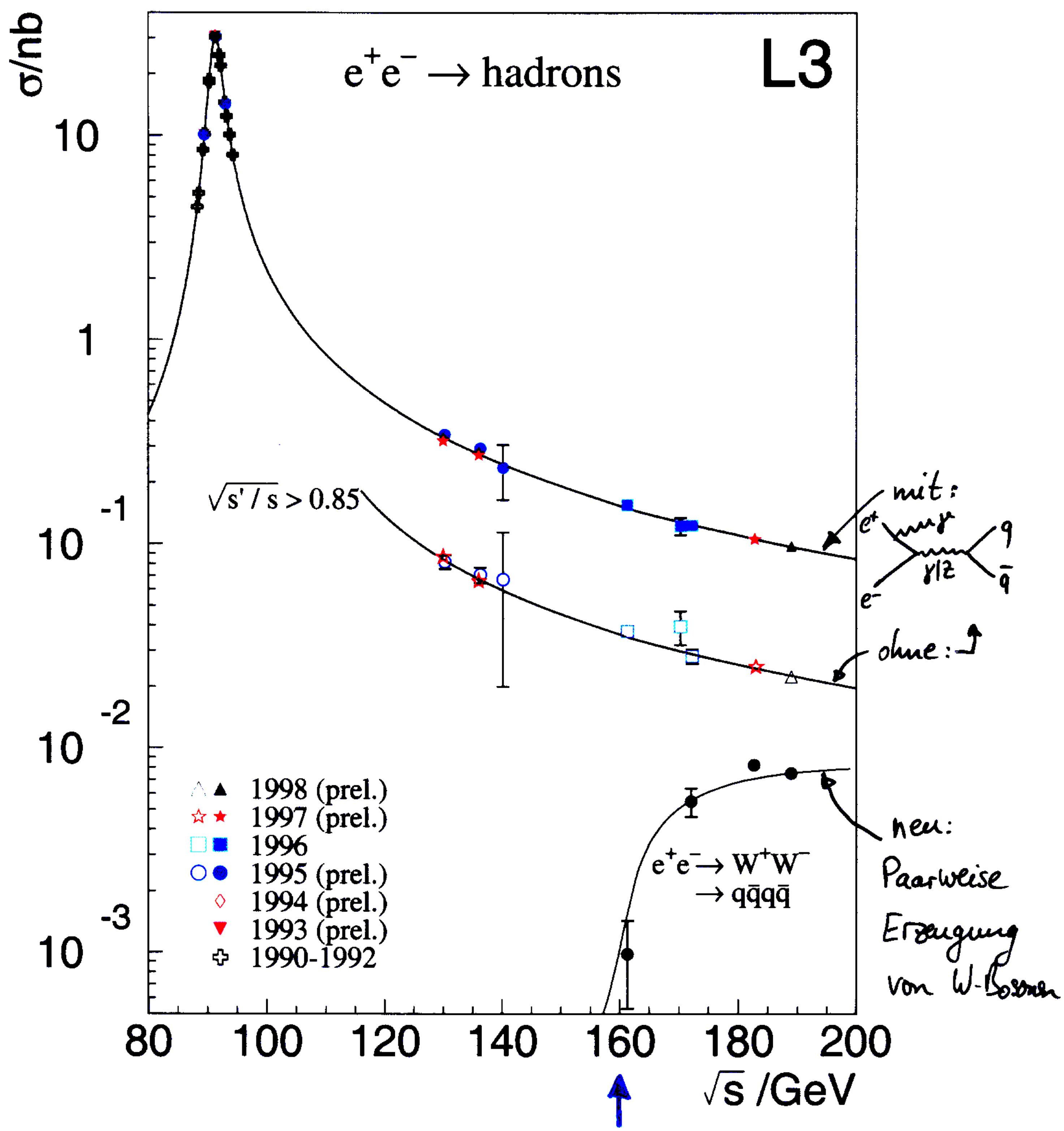
$$Z \to \nu_e\bar{\nu}_e : \nu_\mu\bar{\nu}_\mu : \nu_\tau\bar{\nu}_\tau = \tfrac{1}{3} : \tfrac{1}{3} : \tfrac{1}{3}$$

$$Z \to e^+e^- : \mu^+\mu^- : \tau^+\tau^- = \tfrac{1}{3} : \tfrac{1}{3} : \tfrac{1}{3}$$

Masse von $m_\tau = 1.776\,\mathrm{GeV}/c^2$ ergibt Korrekturen

Alle diese Erwartungen wurden von den LEP-Experimenten mit höchster Präzision (teilweise < 1‰) bestätigt gefunden (natürlich bis auf $Z \to \nu_e\bar{\nu}_e : \nu_\mu\bar{\nu}_\mu : \nu_\tau\bar{\nu}_\tau$)

Wirkungsquerschnitt zu höheren Schwerpunktsenergien



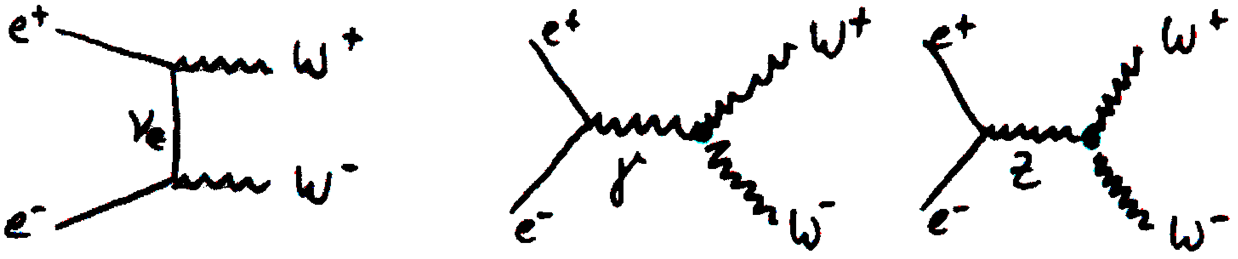
Ab etwa 2 * Masse des W-Bosons setzt

W-Paarproduktion ein!

→ Präzise Untersuchung der W-Boson-Eigenschaften

W-Paarproduktion an LEP II

Bei Schwerpunktsenergien oberhalb $\sqrt{s} \gtrsim 2 \cdot m_W$ tritt bei e^+e^--Vernichtung W-Paarproduktion auf



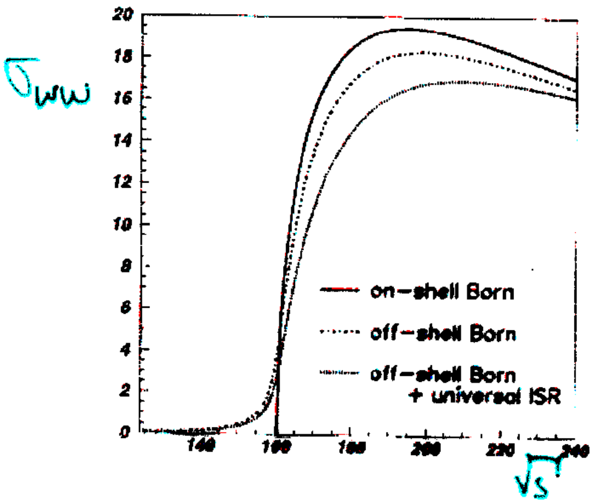
Konversion (t-Kanal) Annihilation (s-Kanal)

(sog. CC3 Graphen: „Charged Current", 3 Graphen)

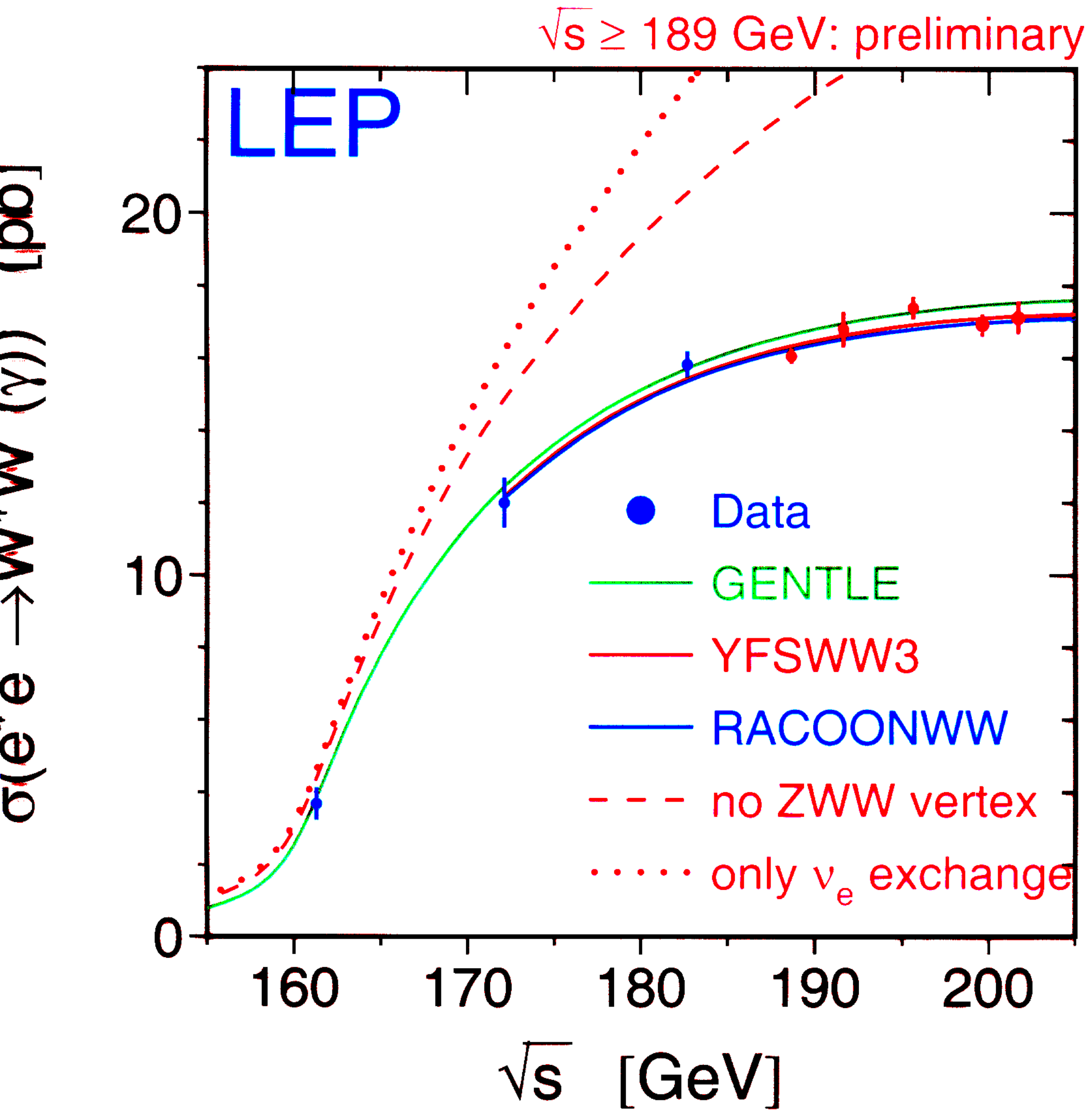
Nahe der Schwelle wird Produktions-WQ durch t-Kanal gegenüber s-Kanal ($\sim \beta^3$) dominiert. In niedrigster Ordnung (Born-Term) für on-shell W-Bosonen:

$$\sigma_{WW}^{Born} \approx \frac{\pi \alpha^2}{s} \frac{1}{\left(1 - m_W^2/m_Z^2\right)} \cdot \beta$$

mit $\beta = \frac{v}{c} = \sqrt{1 - 4 m_W^2/s}$



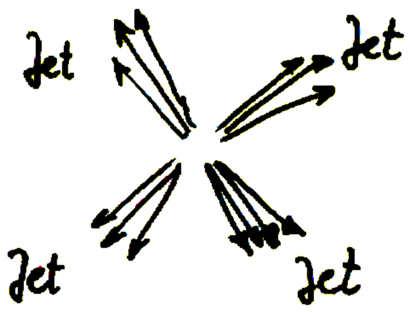
Endliche W-Breite Γ_W ($\rightarrow$ off-shell W-Produktion) und ISR schmieren scharfe Produktionsschwelle aus



√s ≥ 189 GeV: preliminary
LEP
Data
GENTLE
YFSWW3
RACOONWW
no ZWW vertex
only ν_e exchange
0
10
20
160
170
180
190
200
√s [GeV]
σ(e⁺e⁻→W⁺W⁻(γ)) [pb]

W-Physik: Topologien bei W-Paarerzeugung

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



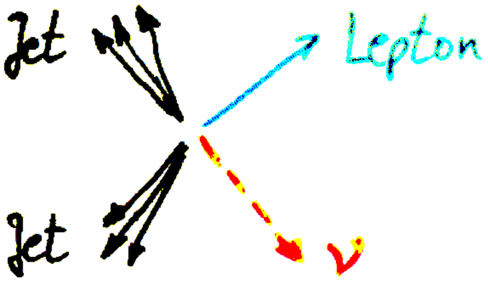
etwa 45% aller WW-Endzustände

4 Jets

Gesamtimpuls gut balanciert

Energiesumme $\sum E \simeq \sqrt{s}$

- $WW \to q\bar{q}\ell\nu$



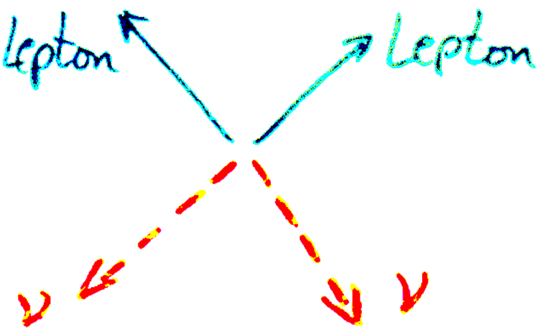
etwa 44% aller WW-Endzustände

2 Jets

1 energiereiches Lepton (wohl separiert von Jets)

fehlender Transversalimpuls & Energie

- $WW \to \ell\nu\ell\nu$

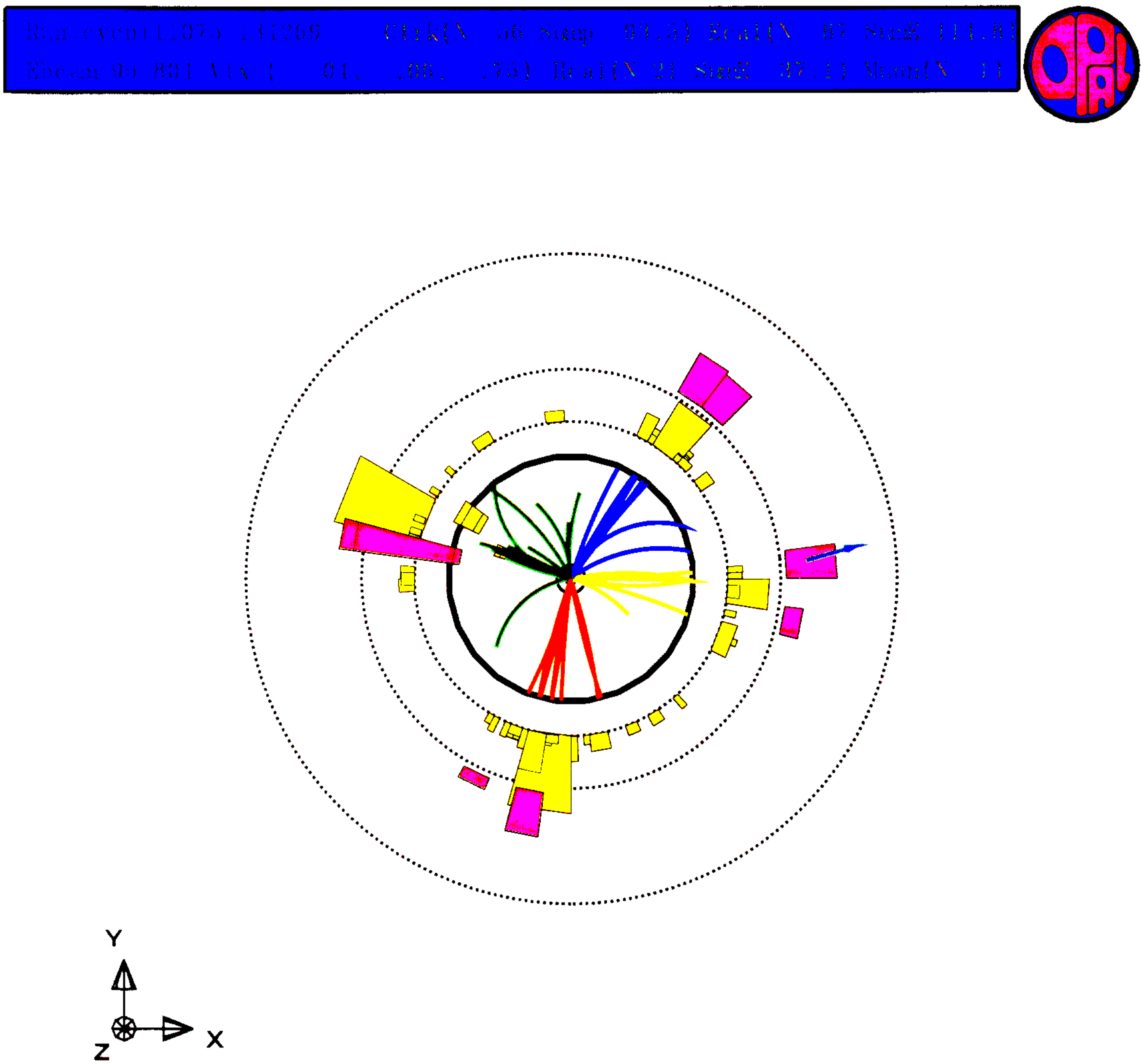


etwa 11% aller WW-Endzustände

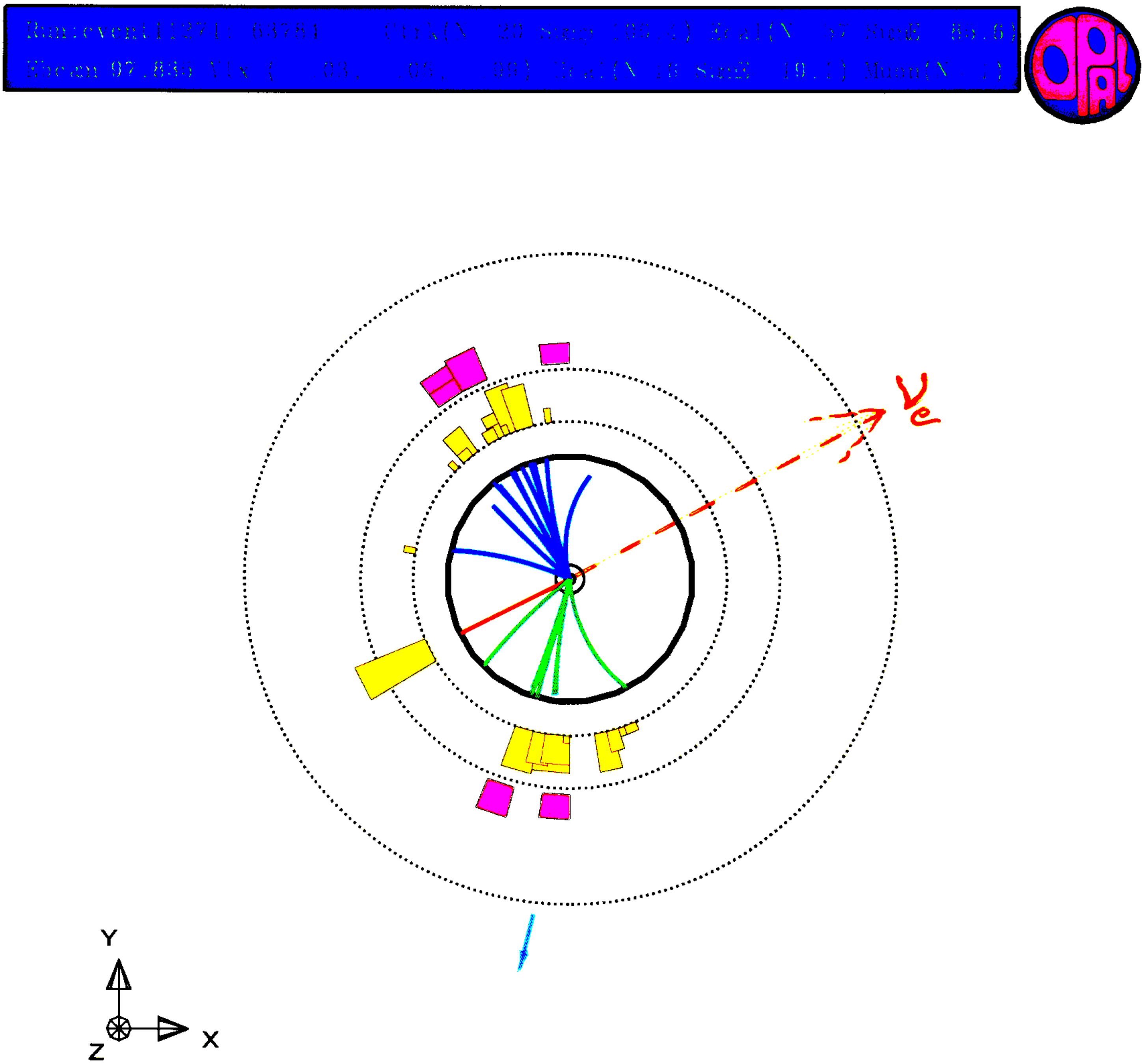
2 energiereiche Leptonen (i.a. akoplanar)

fehlender Transversalimpuls & Energie

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



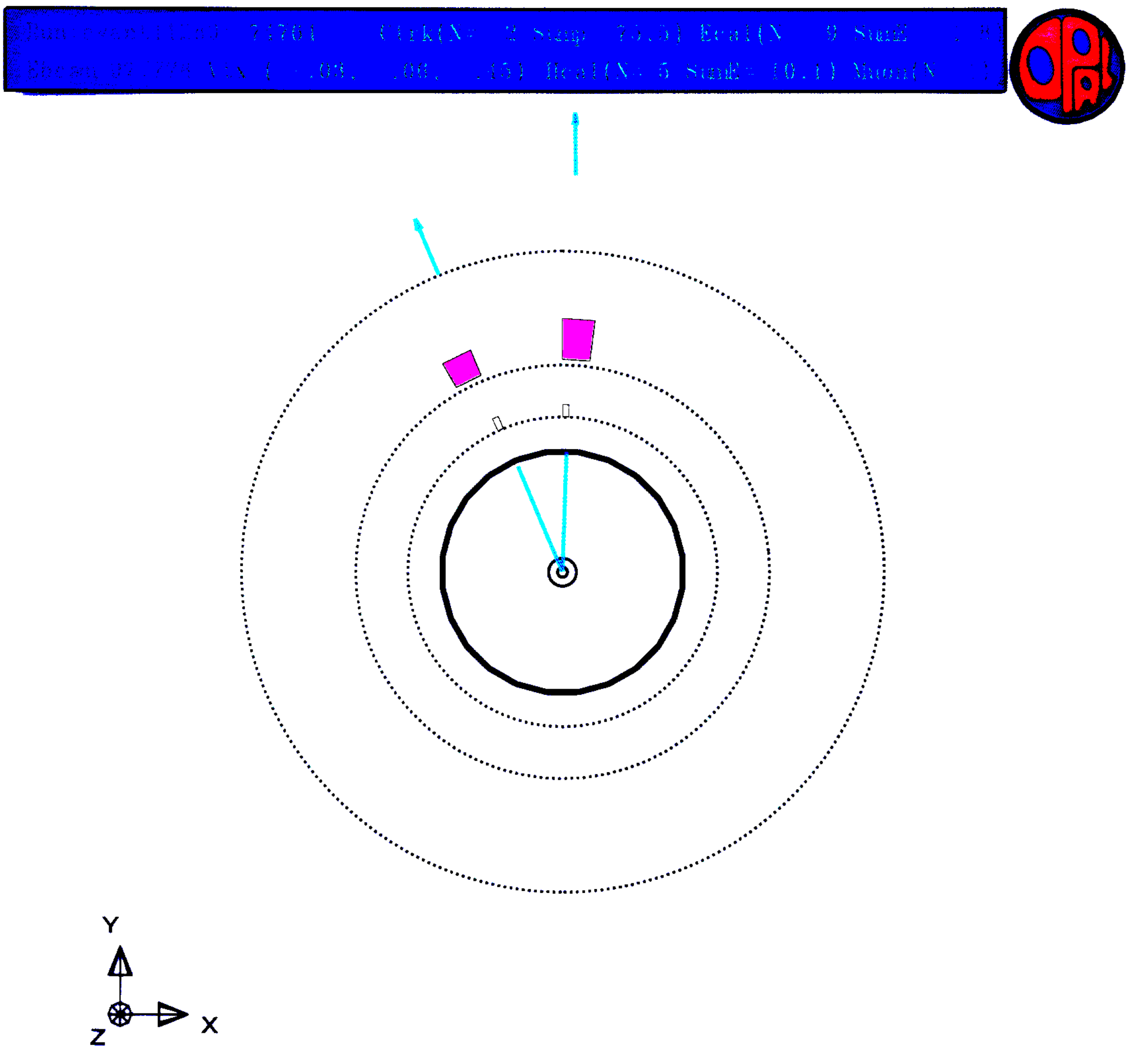
$$e^+e^- \longrightarrow W^+W^-, \quad W^- \to q\bar{q}', \quad W^+ \to e^+\nu_e$$



$$e^+e^- \longrightarrow W^+W^-$$

$$W^- \longrightarrow \mu^-\bar{\nu}_\mu$$

$$W^+ \longrightarrow \mu^+\nu_\mu$$



$W^\pm$ Eigenschaften

- relevant: Kopplung der $W^\pm$ an e, μ, τ, ν, q

→ • partielle Zerfallsbreite

$$\Gamma_{f_i \bar{f}_j} = \underbrace{\frac{G_F\, m_W^3}{6\pi\sqrt{2}}}_{\approx 227\,\mathrm{MeV}} \cdot \underbrace{|V_{ij}|^2}_{\text{Mischungs= matrix für Quarks}} \cdot \underbrace{N_c}_{\text{Farbfaktor}} \begin{cases} = 1 & \text{Leptonen} \\ = 3 & \text{Quarks} \end{cases}$$

⇒ Verzweigungsverhältnisse:

$$W \to l\bar{\nu} : q\bar{q}' \simeq 32\% : 68\%$$

dabei ist $W \to q\bar{q}'$ $\left(\sum_{i,j = u,d,s,c,b} |V_{ij}|^2 \simeq 2 \right)$

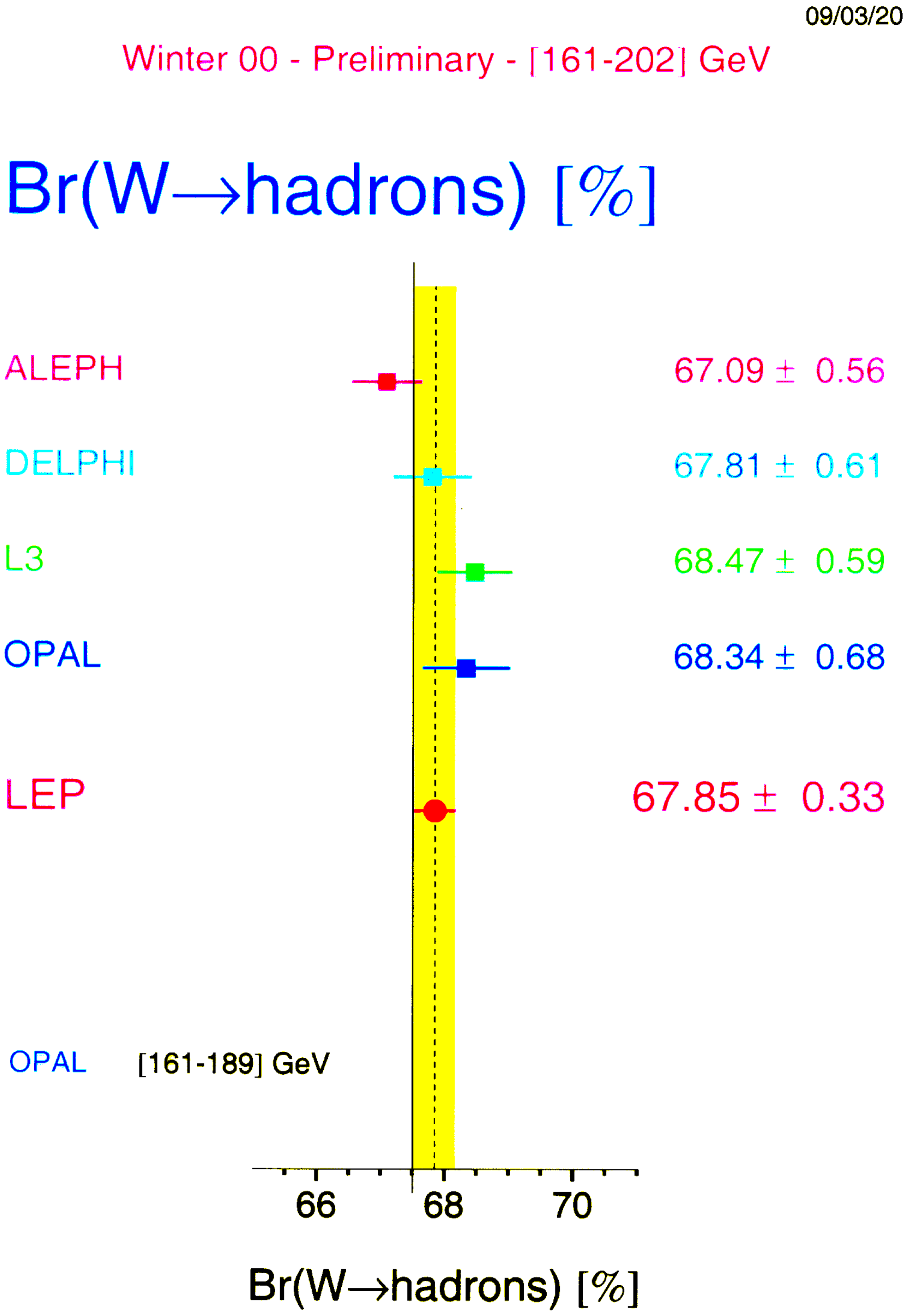
$$W^+ \to u\bar{d} : c\bar{s} : u\bar{s} : c\bar{d} : c\bar{b} : u\bar{b} = 47.5\% : 47.5\% : 2.4\% : 2.4\% : 0.3\% : 10^{-5}$$

und Leptonuniversalität in $W \to l\nu$

$$W^+ \to e^+\nu_e : \mu^+\nu_\mu : \tau^+\nu_\tau = \frac{1}{3} : \frac{1}{3} : \frac{1}{3}$$

Masse $m_\tau \simeq 1.77\,\mathrm{GeV}/c^2$ ergibt Korrekturen

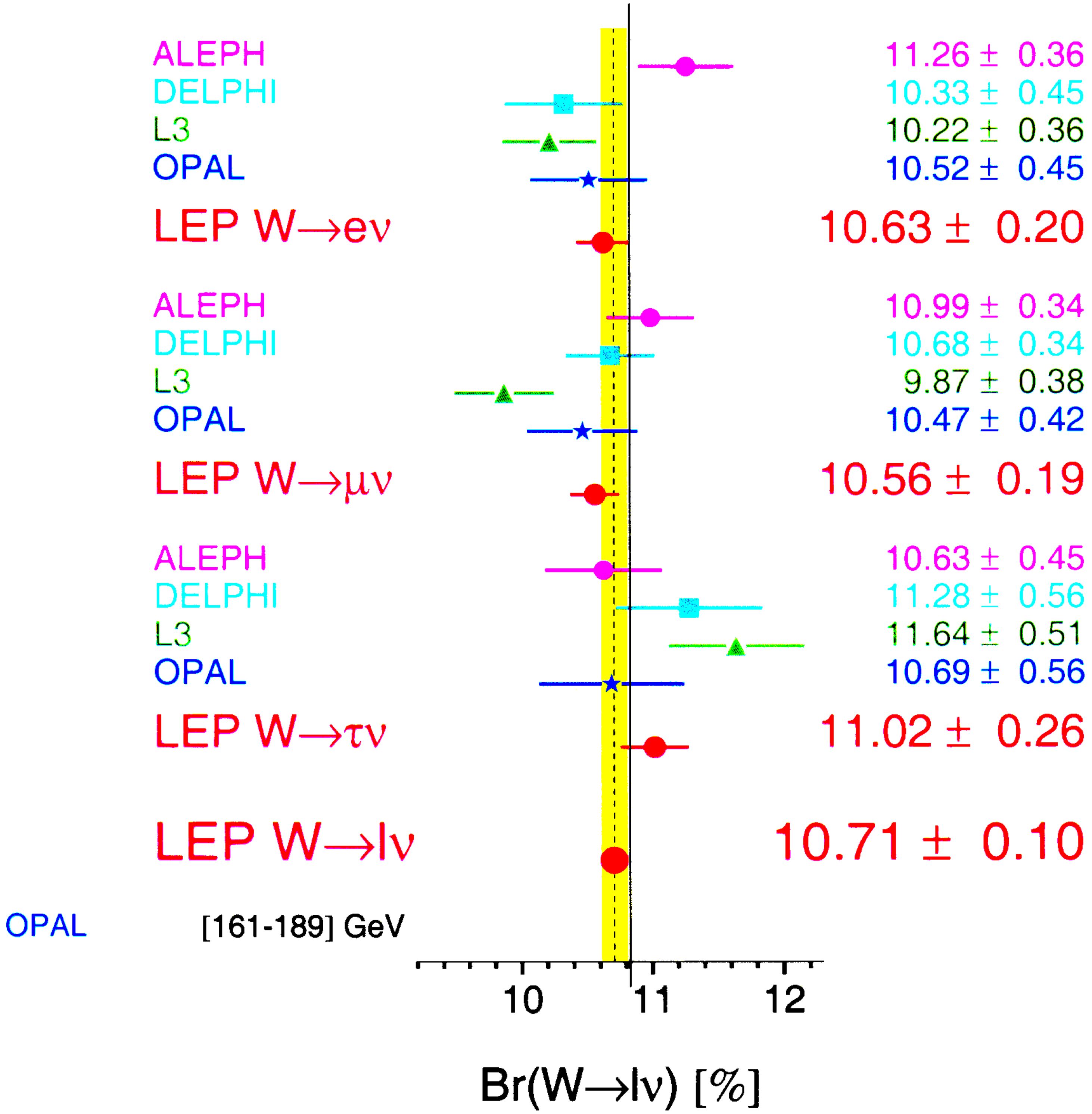
Alle diese Erwartungen wurden von den LEP-Ex= perimenten mit höchster Präzision (typisch $< 1\%$) bestätigt gefunden (Ausnahme: Quark-Mischungsmatrix)


09/03/20
Winter 00 - Preliminary - [161-202] GeV
Br(W→hadrons) [%]
ALEPH
67.09 ± 0.56
DELPHI
67.81 ± 0.61
L3
68.47 ± 0.59
OPAL
68.34 ± 0.68
LEP
67.85 ± 0.33
OPAL
[161-189] GeV
66
68
70
Br(W→hadrons) [%]

09/03/2000

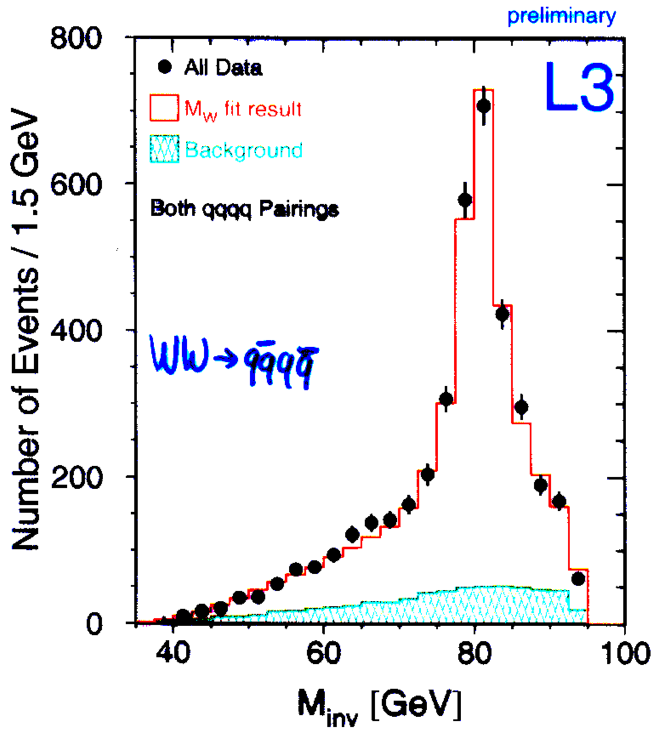
Winter 00 - Preliminary - [161-202] GeV

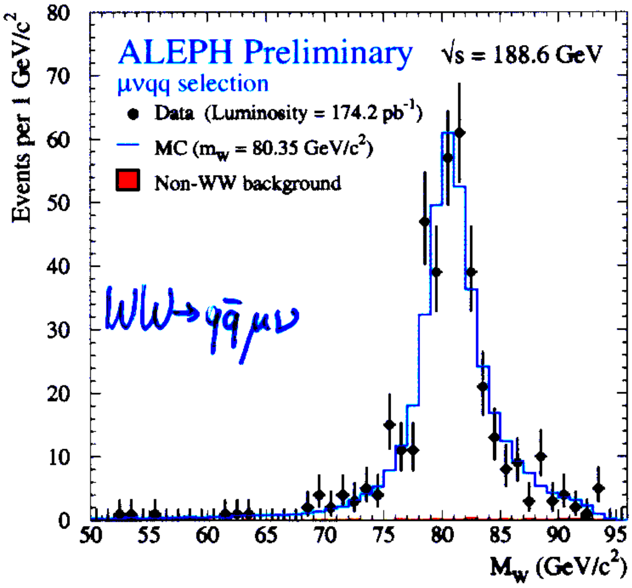
W Leptonic Branching Ratios

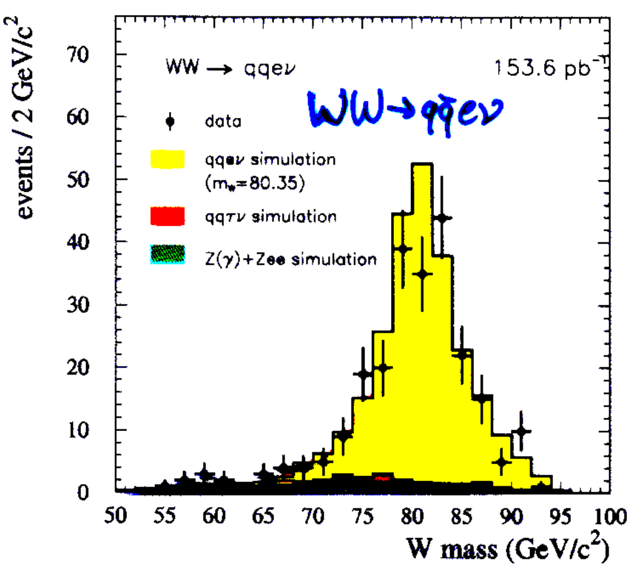


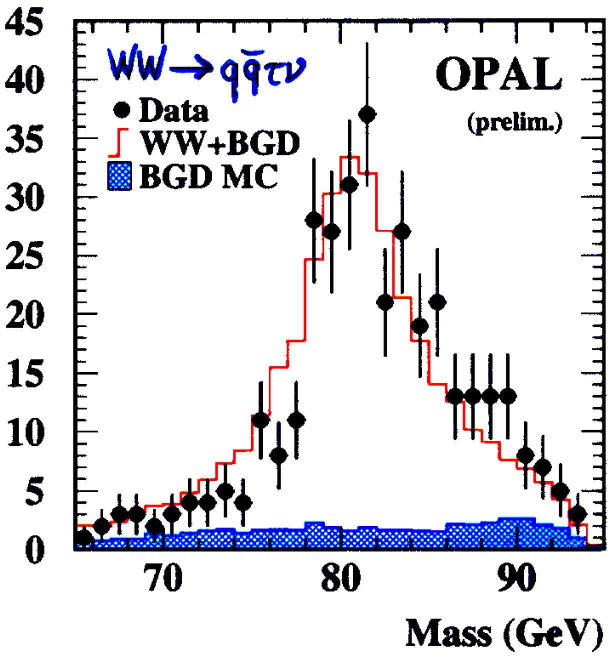
$\Rightarrow$ Leptonuniversalität

$W^\pm$ - Masse und Zerfallsbreite

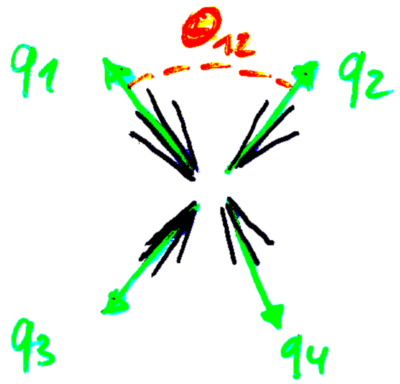






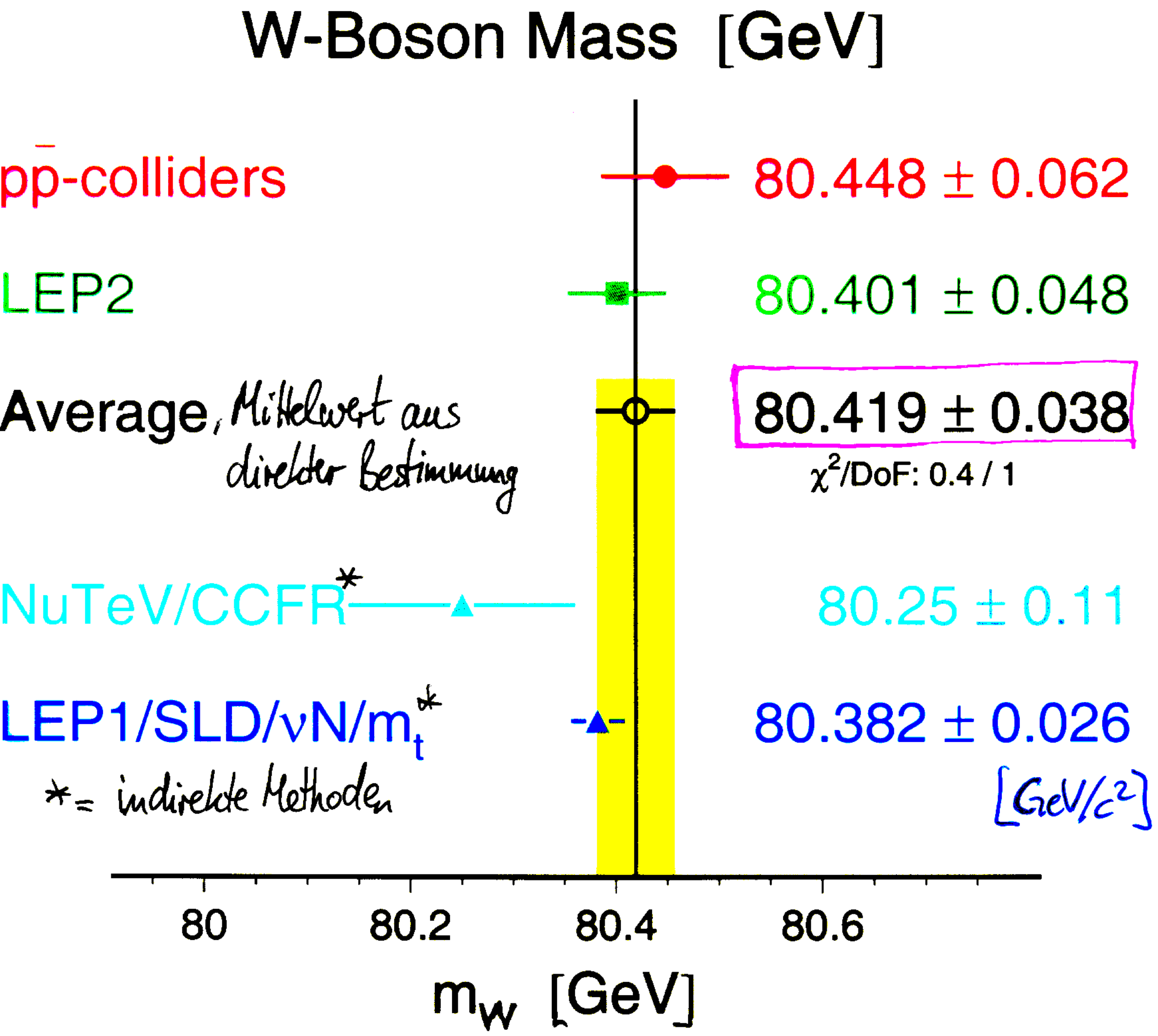


Rekonstruiere Impuls & Energie der Zerfallsteilchen / Jets



$$\Rightarrow m_{12}\cdot c^2 = \sqrt{2E_1E_2\cdot(1-\cos\theta_{12})} \text{ ; dito } m_{34}$$

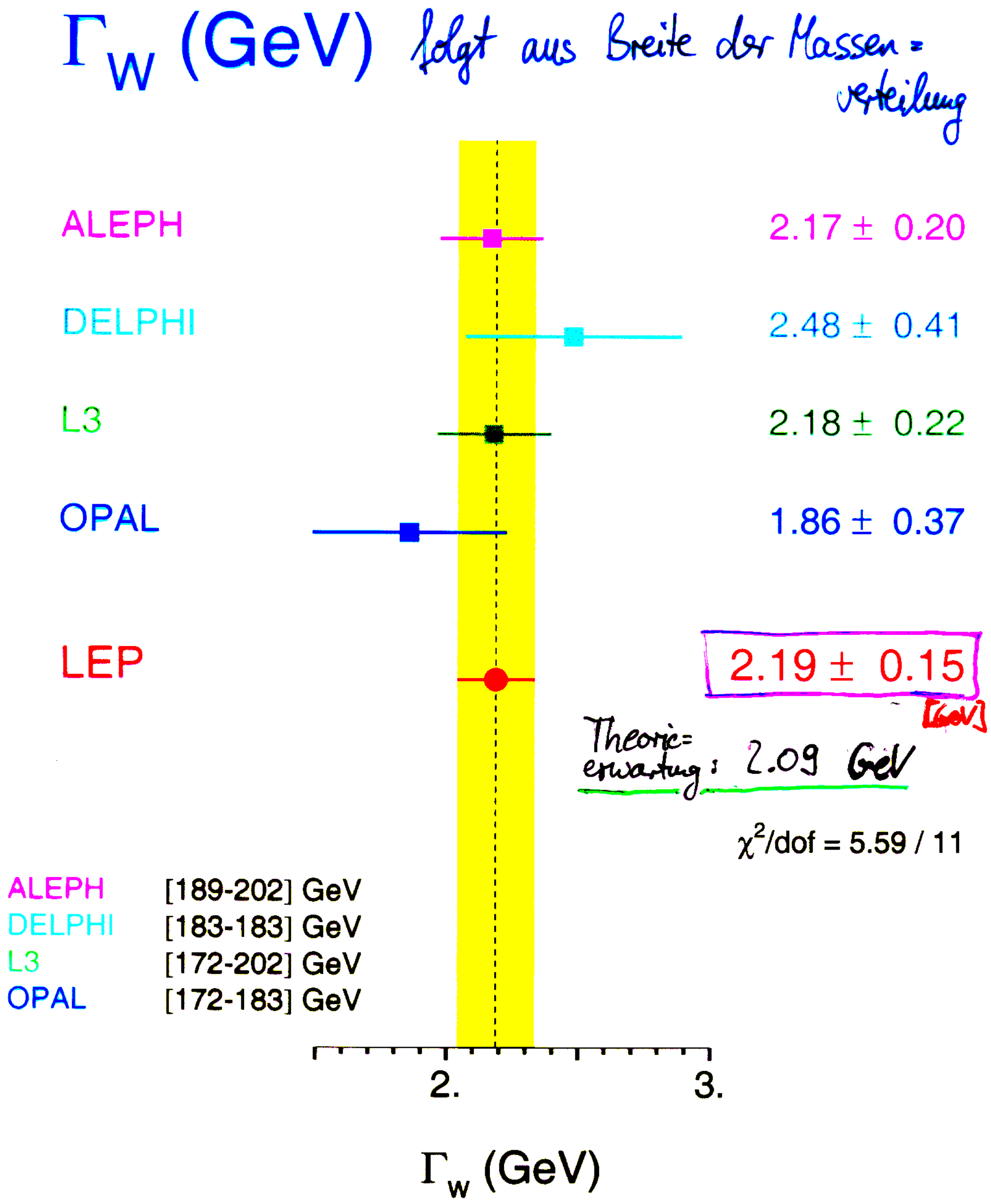
Nutze Energie- & Impulserhaltung aus! Insbesondere, falls ein ν im Endzustand vorliegt


W-Boson Mass [GeV]
p$\bar{p}$-colliders
80.448 ± 0.062
LEP2
80.401 ± 0.048
Average, Mittelwert aus direkter Bestimmung
80.419 ± 0.038
χ^2/DoF: 0.4 / 1
NuTeV/CCFR*
80.25 ± 0.11
LEP1/SLD/νN/m_t*
80.382 ± 0.026
* = indirekte Methoden
[GeV/c^2]
80
80.2
80.4
80.6
m_W [GeV]

W-Zerfallsbreite

09/03/2000

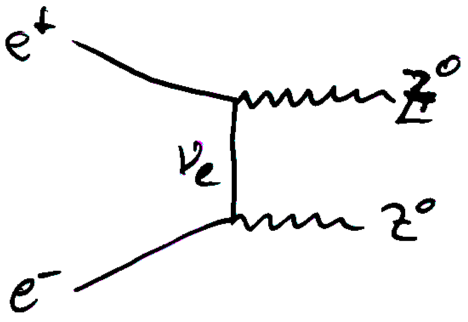
Winter 00 - Preliminary

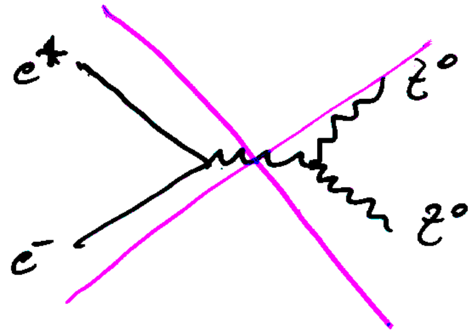


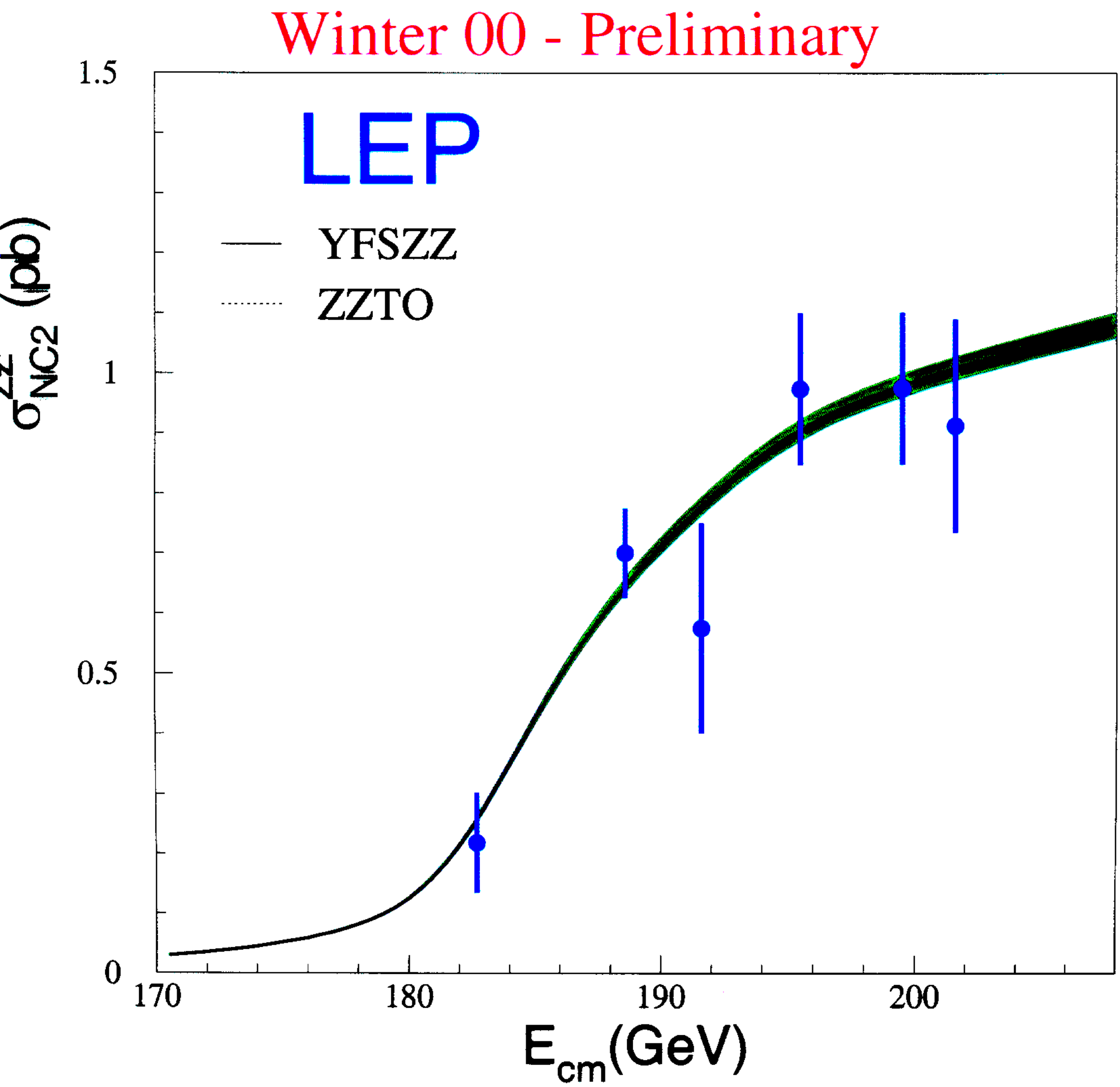
folgt aus Breite der Massenverteilung

Theorie-erwartung: 2.09 GeV

$e^+e^- \to Z^0Z^0$ Produktion







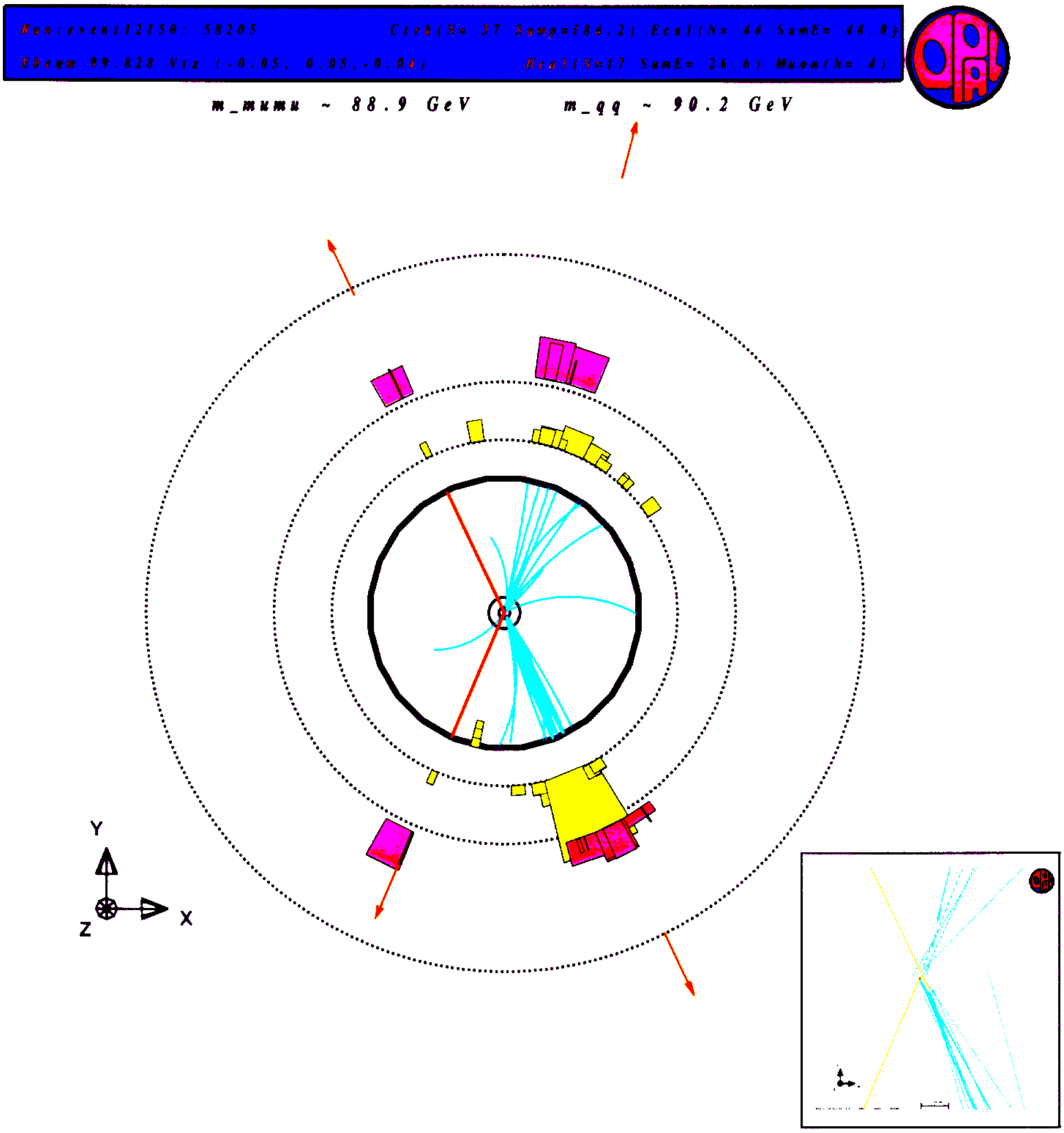


Figure 13: A candidate $e^+e^- \to ZZ \to b\bar{b}\mu^+\mu^-$ event observed in the 200 GeV data sample. The vertex view shows tracks with momentum of 1 GeV or more.

Konsistenz der elektroschwachen Theorie?

$$G_F = \frac{\sqrt{2}}{8}\left(\frac{g_W}{m_W}\right)^2 \longrightarrow m_W^2 = \frac{\sqrt{2}}{8G_F}\cdot g_W^2 = \frac{\sqrt{2}}{8G_F}\cdot\frac{e^2}{\sin^2\theta_W} = \frac{\sqrt{2}}{8G_F}\,\frac{e^2}{\left(1-\left(m_W/m_Z\right)^2\right)}$$

elektroschw. Theorie:

$$\underbrace{m_W^2}_{\text{direkte } m_W\text{-Bestimmung}} = \underbrace{\frac{\pi\,\alpha_{em}}{\sqrt{2}\,G_F}\cdot\frac{1}{1-m_W^2/m_Z^2}}_{\text{indirekte } m_W\text{-Bestimmung aus Präzisionsmeßgrößen } \alpha_{em},\,G_F,\,m_Z}\cdot \text{Korrekturfkt}(m_{top},\dots)$$

$\Downarrow$

$\boxed{\text{Theorie ist konsistent!}}$

$\Uparrow$