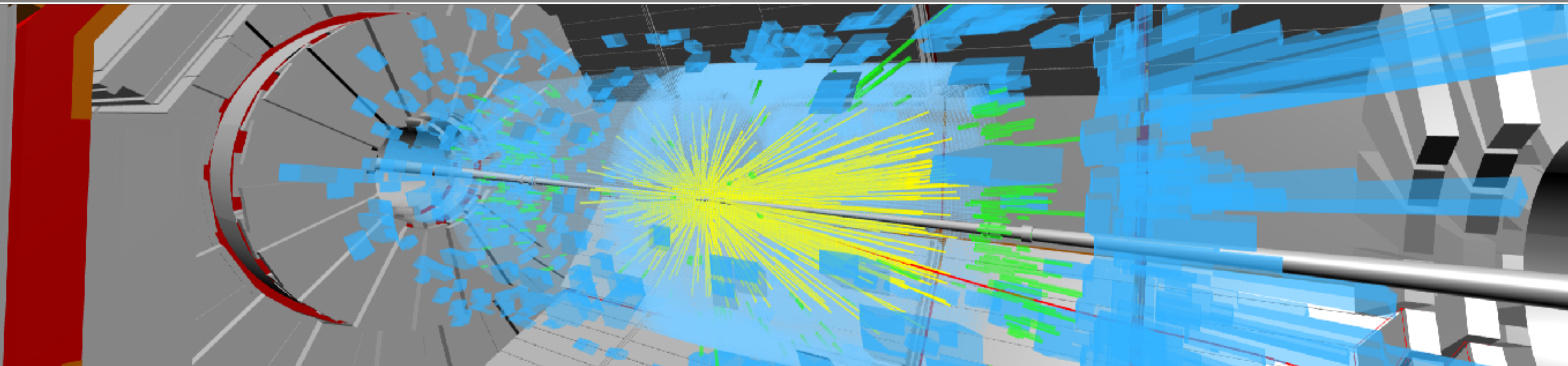


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2019 – 16. Vorlesung (Teil 1)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



Auflösung Aufgabe 27b

- Welche Aussagen über die Quarkmischung sind korrekt?
 - A. Nur der relative Mischungswinkel zwischen Massen- und Flavoreigenzuständen der Quarks ist relevant.
 - B. Aufgrund der Unitarität der CKM-Matrix bilden bestimmte Kombinationen ihrer Elemente ein Dreieck in der komplexen Ebene.
 - C. Es gibt drei unabhängige Unitaritätsdreiecke, nur eines davon ist experimentell gut zugänglich.
 - D. Die Elemente der CKM-Matrix können mit dem GIM-Mechanismus vorhergesagt werden.
 - E. Die CKM-Matrix ist hierarchisch aufgebaut: Übergänge innerhalb einer Familie sind viel wahrscheinlicher als Übergänge zwischen Familien.

Kurze Wiederholung

- **Elektroschwache Theorie:** vereinheitlichte Theorie der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkungen (Glashow, Salam, Weinberg)
 - **Eichgruppe $SU(2)_L \times U(1)_Y$** $\rightarrow$ vier masselose Eichfelder $W^\pm, W^0, B$
 - **Weinberg-Drehung (θ_W) und spontane Symmetriebrechung**
 $\rightarrow$ physikalische Eichbosonen $W^\pm, Z$ (massiv) und γ (masselos)
 - Vorhersagen: „Stärke“ der schwachen WW; Verhältnis $m_W = m_Z \cos \theta_W$; Existenz neutraler Ströme, Kopplungen und Massen der Fermionen, ...
- **Schlüsselexperimente** zur elektroschwachen Theorie:
 - Nachweis der **neutralen Ströme** in Neutrino-Streuung (1973)
 - Direkter Nachweis der **massiven Eichbosonen W und Z** am Sp $\bar{p}$ S (1983)
 - Direkter Nachweis des **Higgs-Bosons** am LHC (2012)

Kurze Wiederholung

- Cabibbo 1963: **Universalität** geladener Ströme für Leptonen und Hadronen
→ Quarkmischung
- **GIM-Mechanismus** (Glashow, Iliopoulos, Maiani, 1970):
 - Unterdrückung flavorändernder neutraler Ströme durch destruktive Interferenz von Streuamplituden mit u- und c-Quarks → Vorhersage des **Charm-Quarks**
 - Beschreibung durch **Quarkmischung** (= Drehung im Flavorraum) innerhalb von zwei Quarkfamilien mit **Cabibbo-Winkel θ_c**
- **CKM-Matrix** (Kobayashi, Maskawa 1973):
 - CP-Verletzung für Quarks nur mit mindestens **drei Quarkfamilien**
 - Quarkmischung: CKM-Matrix = **unitäre** 3×3-Matrix mit **vier** Freiheitsgraden (3 Beträge, 1 Phase)
 - Experimentell: **starke Hierarchie der Matrixelemente** → kleine Mischung
 - Grafische Darstellung: **Unitaritätsdreieck** → Fläche ~ CP-Verletzung

Kapitel 8

Moderne Teilchenphysik

- **Erster Einblick** in moderne Teilchenphysik:
 - Physikalische Ideen
 - Experimentiertechniken
 - Ausgewählte Resultate
- Drei Themenkomplexe:
 - Präzisionsphysik an **e^+e^- -Collidern**: Beispiele von LEP und B-Fabriken
 - Physik an **Hadron-Collidern**: Beispiele vom LHC
 - **Neutrino**physik mit und ohne Beschleuniger
- Nur **ausgewählte Beispiele**, weitere Details: **vertiefende Vorlesungen** zur Teilchenphysik im Masterstudium (Teilchenphysik I/II)

Vergleich der Ansätze (stark vereinfacht)

	e^+e^--Collider	Hadron-Collider	Neutrinos
Verfügbare Energie	maßgeschneidert auf Fragestellung, begrenzt durch Beschleuniger	sehr hoch (Protonen beschleunigt)	maßgeschneidert auf Fragestellung
Ereignisrate	mittel bis hoch (abhängig von Fragestellung)	sehr hoch (hohe Kollisionsrate)	gering (geringer Wirkungsquerschnitt)
Präzision	sehr hoch (Kollision von Elementarteilchen)	mäßig bis hoch (Kollision von Hadronen)	oft gering (geringe Ereignisrate)
Entdeckungspotenzial	indirekt, hoch (Abweichungen in Präzisionsmessungen)	direkt, sehr hoch (erster Vorstoß in neue Energiebereiche)	hoch

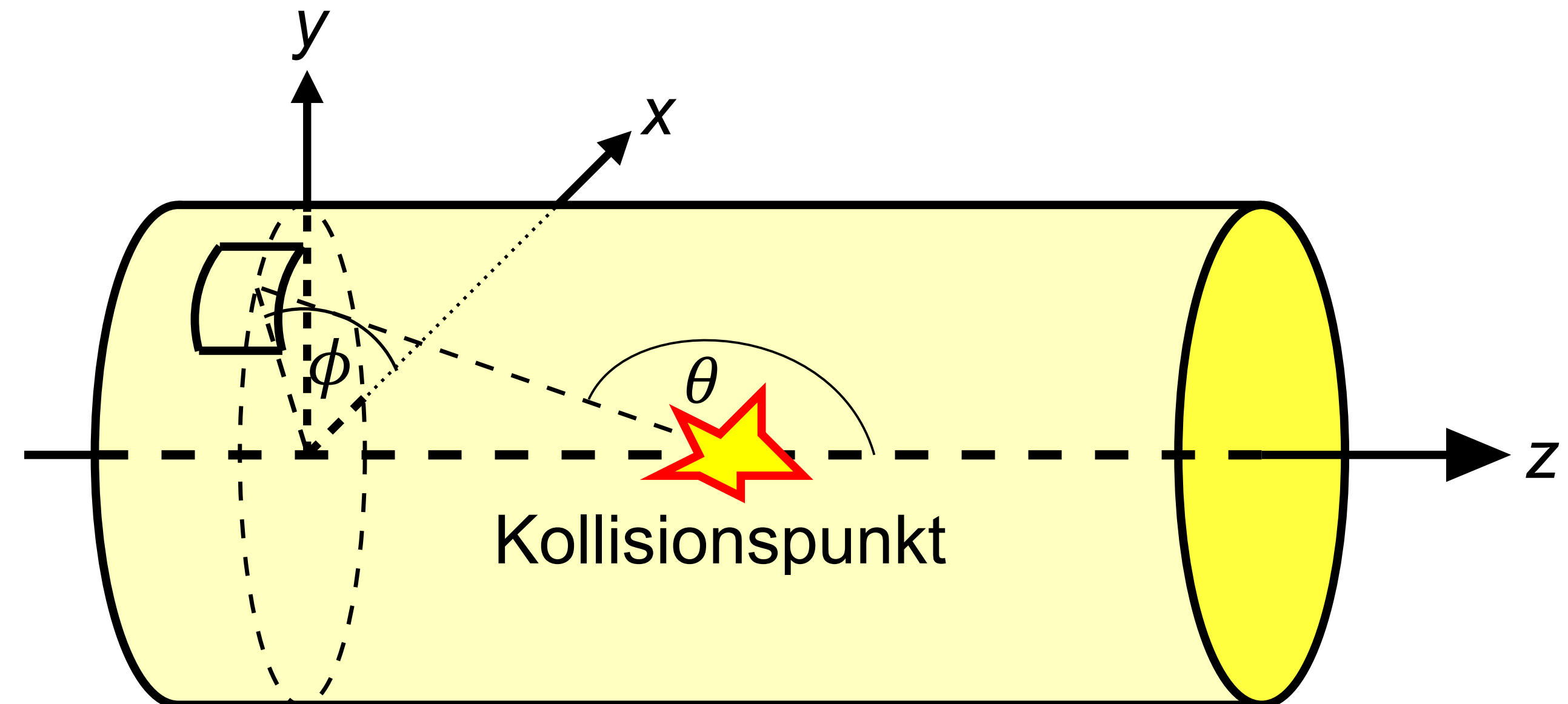
Kapitel 8.1

Präzisionsphysik an e^+e^- -Collidern

- Historisch erste Kollisionsexperimente: **Elektron-Positron-Kollisionen**
 - Erster Collider: ADA (INFN Frascati, 1961)
 - Kollision von e^+ und e^- einfacher zu realisieren als Kollision von Hadronen
- Höchste erreichbare **Energie und Luminosität limitiert**:
 - Bauform **Speicherring**: Radius des Beschleunigers, Energieverlust durch Synchrotronstrahlung (Verlustleistung proportional zu m_e^{-4})
 - Bauform **LINAC**: Länge des Beschleunigers, Strahl nur einmal verwendet
- e^+e^- -Collider oft **maßgeschneidert** für Fragestellung, z. B.:
 - LEP 1 (1989–1995): **Z-Resonanz** ($e^+e^- \rightarrow Z$) $\rightarrow$ elektroschwache Physik
 - B-Fabriken: **$\Upsilon(4S)$ -Resonanz** ($e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$) $\rightarrow$ Flavorphysik
 - Hohe Luminosität und „saubere“ Experimentierumgebung $\rightarrow$ hohe **Präzision**

Kinematik am e^+e^- -Collider

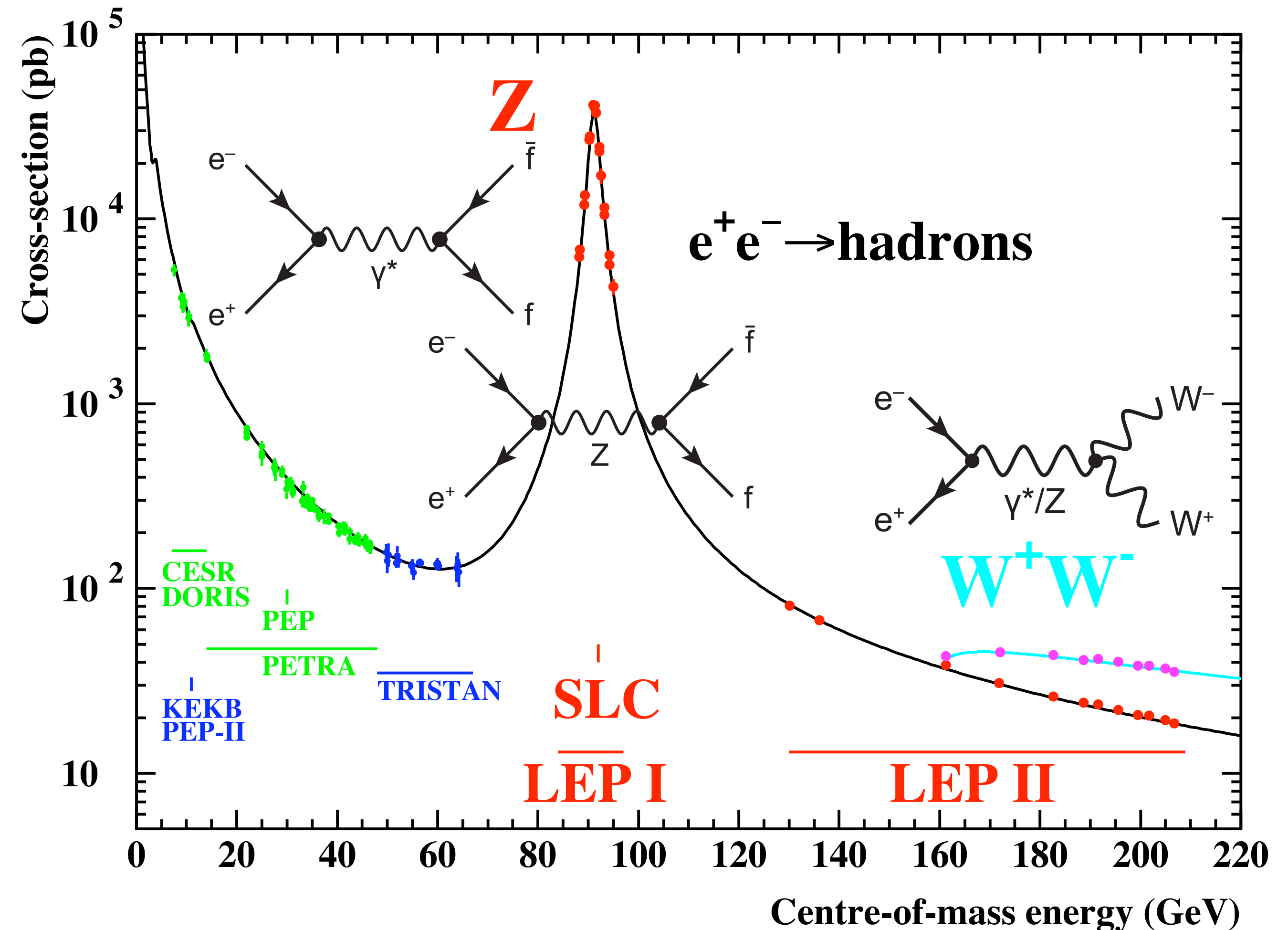
- Schwerpunktsenergie $\sqrt{s}$ der Wechselwirkung:
 - Elektronen/Positronen: **Elementarteilchen** → Schwerpunktsenergie **genau bekannt**, gegeben durch Strahlenergien E_1, E_2
 - Für $E_1 = E_2 \equiv E_b$: $\sqrt{s} = \sqrt{(p_1 + p_2)^2} = 2E_b$
- Typische Messgrößen für nachgewiesene Teilchen:
 - Impuls $\mathbf{p}$ (→ Spurdetektor) und Energie E (→ Kalorimeter)
 - Polarwinkel θ zur Strahlachse und Azimutwinkel ϕ



x: Ringmittelpunkt, y: oben, z: Strahlachse

e^+e^- -Collider: Wirkungsquerschnitt

- Prozess $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ (f: Fermion):
 - Niedrige Energien: reiner **QED-Prozess** (Photonenaustausch)
 - $\sqrt{s} \geq 25$ GeV: **Interferenz** von Photonen- und Z-Bosonen
 - $\sqrt{s} \approx m_Z$: starke **Überhöhung** des Wirkungsquerschnitts $\rightarrow$ **Z-Resonanz**
 - $\sqrt{s} \approx 2m_W$: Schwelle für **W^+W^- -Paarerzeugung**



Phys. Rep. 427 (2006) 257

Zerfallskanäle des Z-Bosons

Fermion f (Zerfall in $f\bar{f}$)	Verzweigungs- verhältnis (PDG 2019)	Nachweis am Collider
Linkshändige Neutrinos	insgesamt 20,000(055)%	kein direkter Nachweis
Links- und rechtshändige geladene Leptonen	je 3,3658(23)%	e, μ „einfach“ nachweisbar τ : abhängig von Zerfall
Links- und rechtshändige up-artige Quarks (u, c) in drei Farben	je 11,6(6)%	Jets = Bündel von Hadronen
Links- und rechtshändige down-artige Quarks (d, s, b) in drei Farben	je 15,6(4)%	Jets = Bündel von Hadronen

Z-Wirkungsquerschnitt

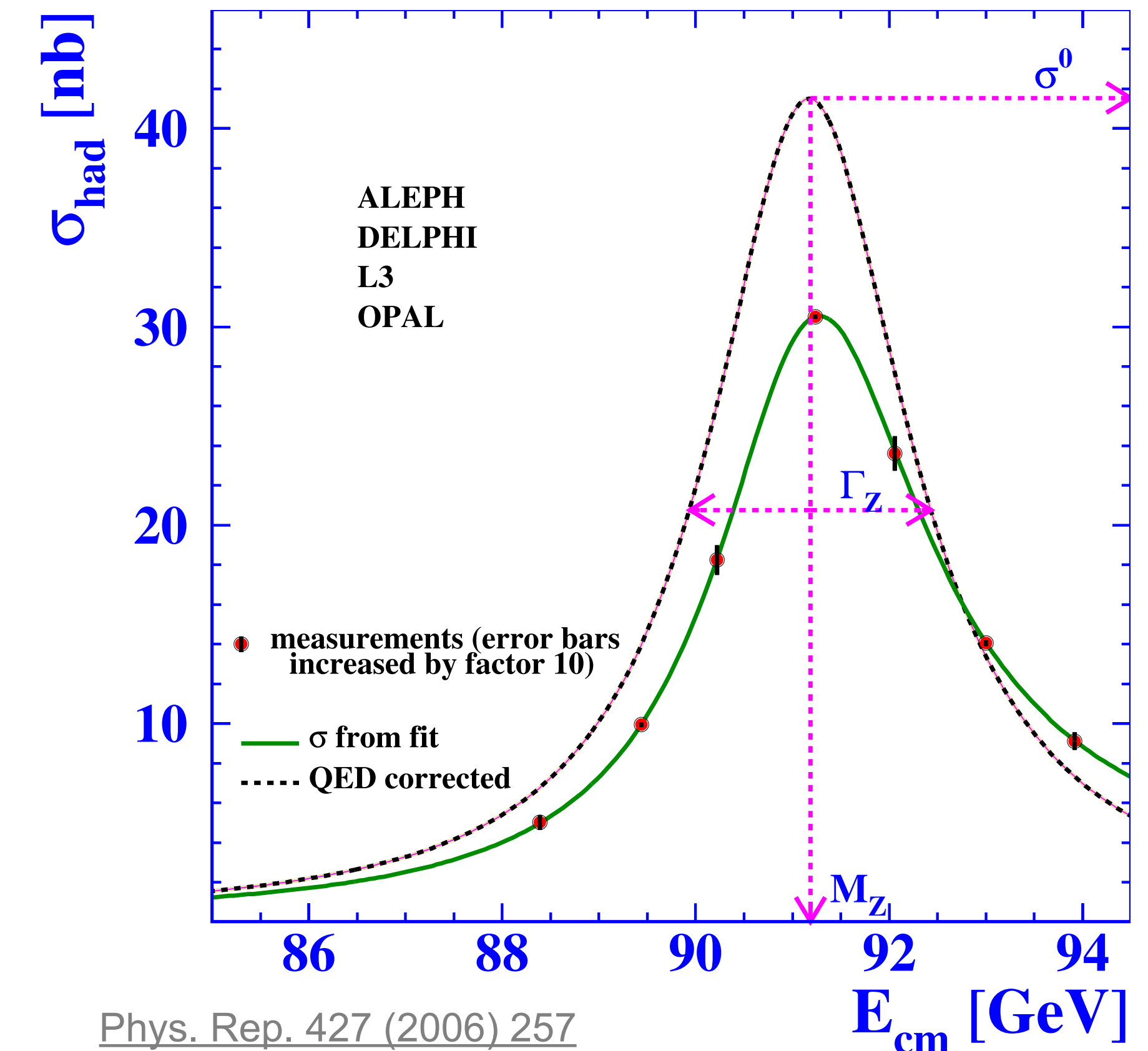
- Wirkungsquerschnitt $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow f\bar{f}$:

$$\sigma_f = \underbrace{\frac{12\pi(\hbar c)^2}{(m_Z c^2)^2} \frac{\Gamma_e \Gamma_f}{\Gamma_Z^2}}_{\text{Höhe } \sigma^0} \cdot \underbrace{\frac{s \Gamma_Z^2}{(s - (m_Z c^2)^2)^2 + s^2 \frac{\Gamma_Z^2}{(m_Z c^2)^2}}}_{\text{Breit-Wigner-Kurve}}$$

- (Schwerpunktenergie)² s
- Masse m_Z und totale Breite Γ_Z des Z-Bosons (= Summe Partialbreiten)
- Partialbreite Γ_e für Erzeugung $e^+e^- \rightarrow Z$
- Partialbreite Γ_f für Zerfall $Z \rightarrow f\bar{f}$
- Korrektur auf QED-Effekte

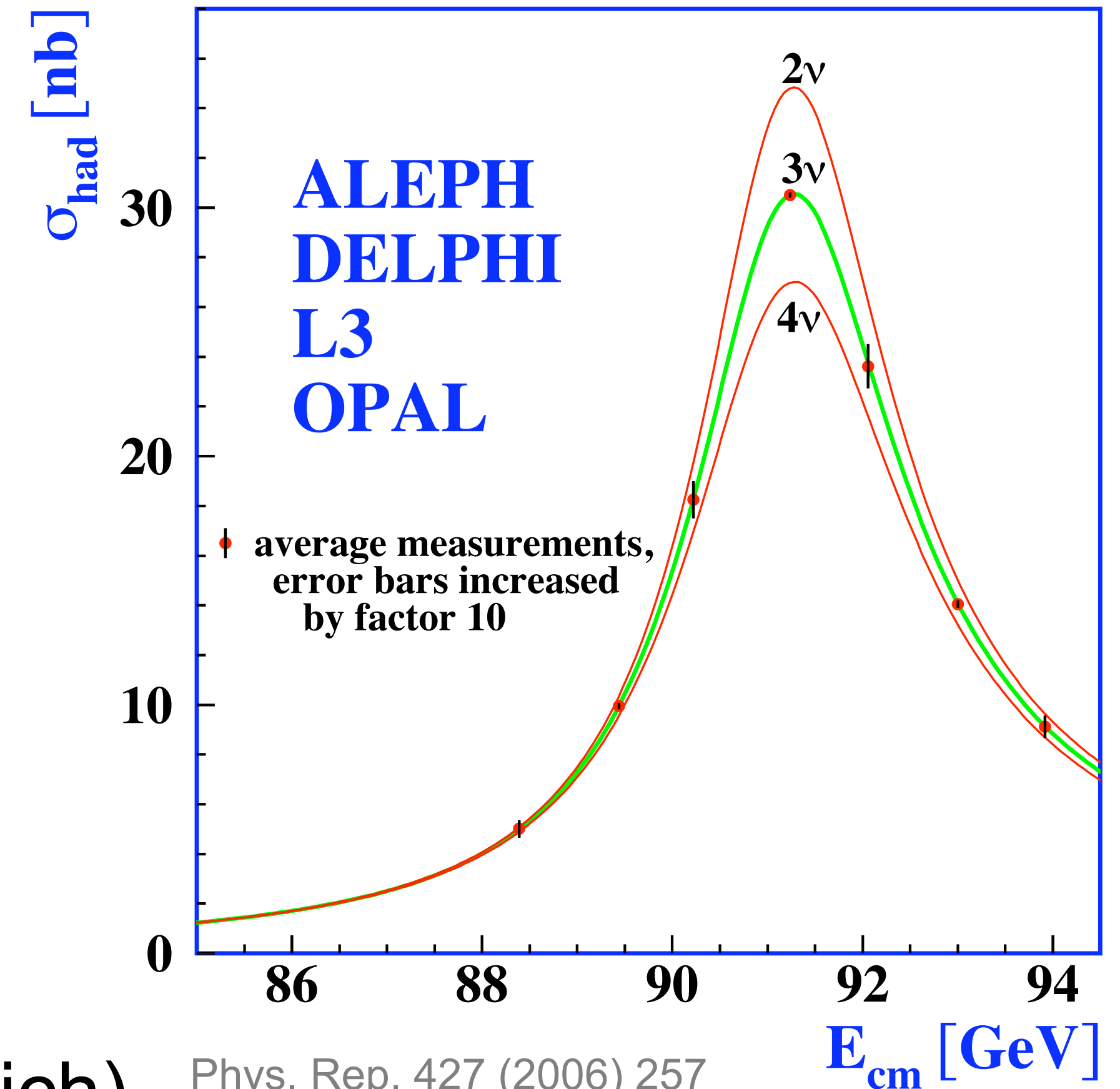
- Genaue Interpretation: **Anpassung** an elektroschwache Rechnungen

Hadronischer Z-Wirkungsquerschnitt



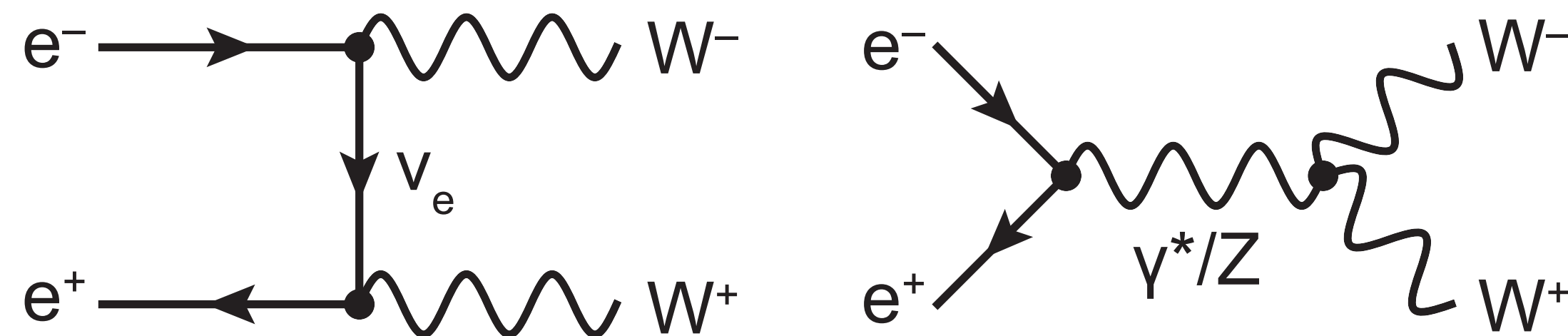
Z-Resonanz: wichtige Resultate

- Bislang genaueste Messung von m_Z :
 - LEP-Mittelwert: $m_Z = 91,1875(21) \text{ GeV}/c^2$
 - Relative Unsicherheit: $2,3 \cdot 10^{-5}$ (2,1 MeV)
- Anzahl leichter Neutrino flavors ($m_\nu < m_Z/2$):
 - Totale Z-Breite: $\Gamma_Z = \Gamma_{\text{inv}} + 3\Gamma_{\text{lep}} + \Gamma_{\text{had}}$
 - Unsichtbare Z-Breite im SM: $\Gamma_{\text{inv}} = 3\Gamma_\nu$
 - Messidee: falls **mehr** Neutrino flavors
 - größerer Beitrag von Γ_{inv} zu Γ_Z
 - kleinerer **beobachtbare Breite**, z. B. Γ_{had}
 - geringere **Höhe** der Z-Resonanz (Breite gleich)
 - LEP: $N_\nu = 2,9840(82) \rightarrow$ verträglich mit $N_\nu = 3$ (2 Standardabweichungen)

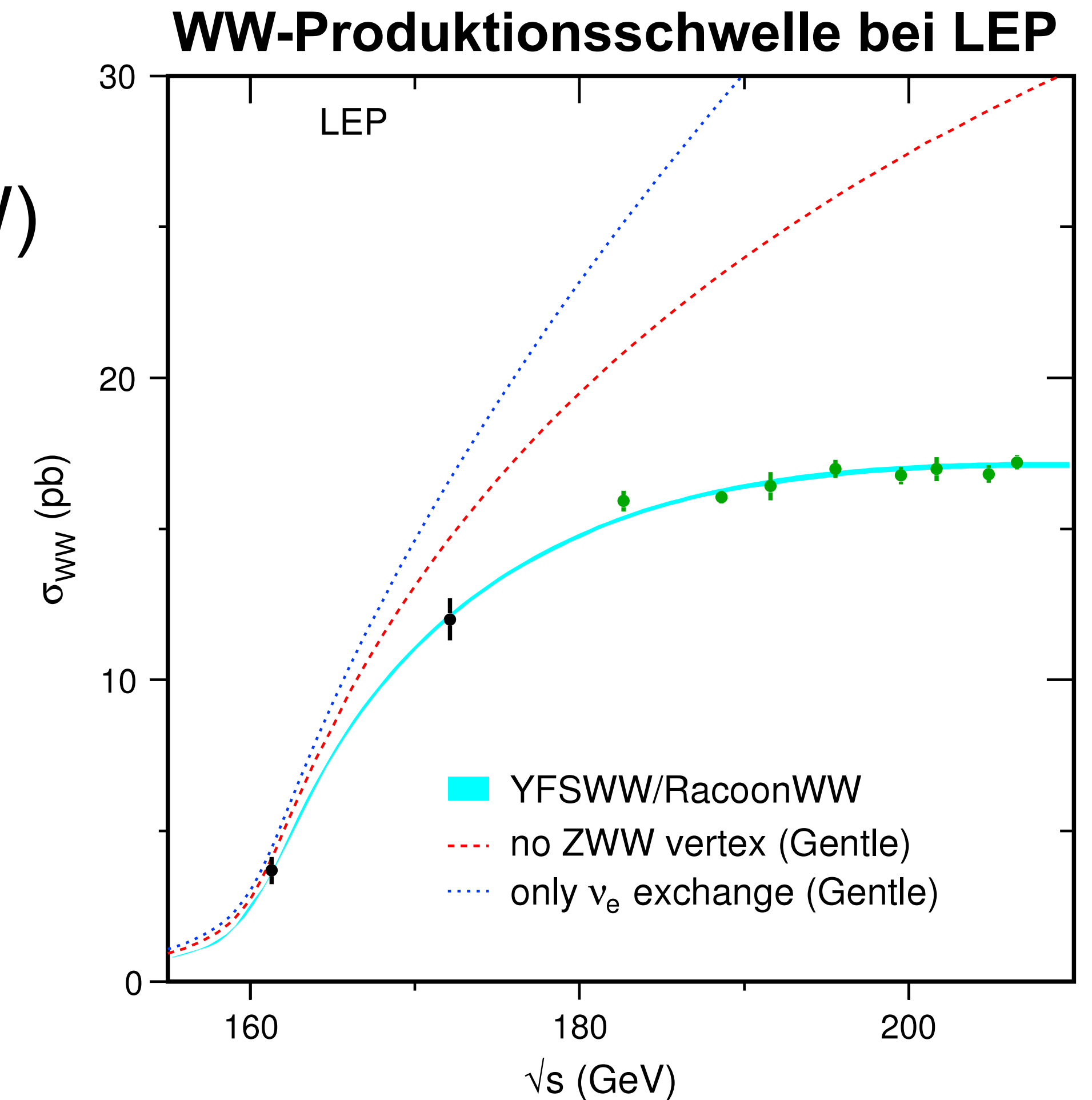


W-Bosonen am e^+e^- -Collider

- W-Bosonen nur in **Paaren** erzeugt
(Ladungserhaltung): Neutrinoaustausch oder
Kopplung von drei Eichbosonen (γWW , ZWW)



- Minimale Schwerpunktsenergie
(„Produktionsschwelle“, keine Resonanz):
 $\sqrt{s} \geq 2 m_W$
- Einzigiger e^+e^- -Collider bei diesen Schwer-
punktsenergien bisher: **LEP 2** (1996–2000)



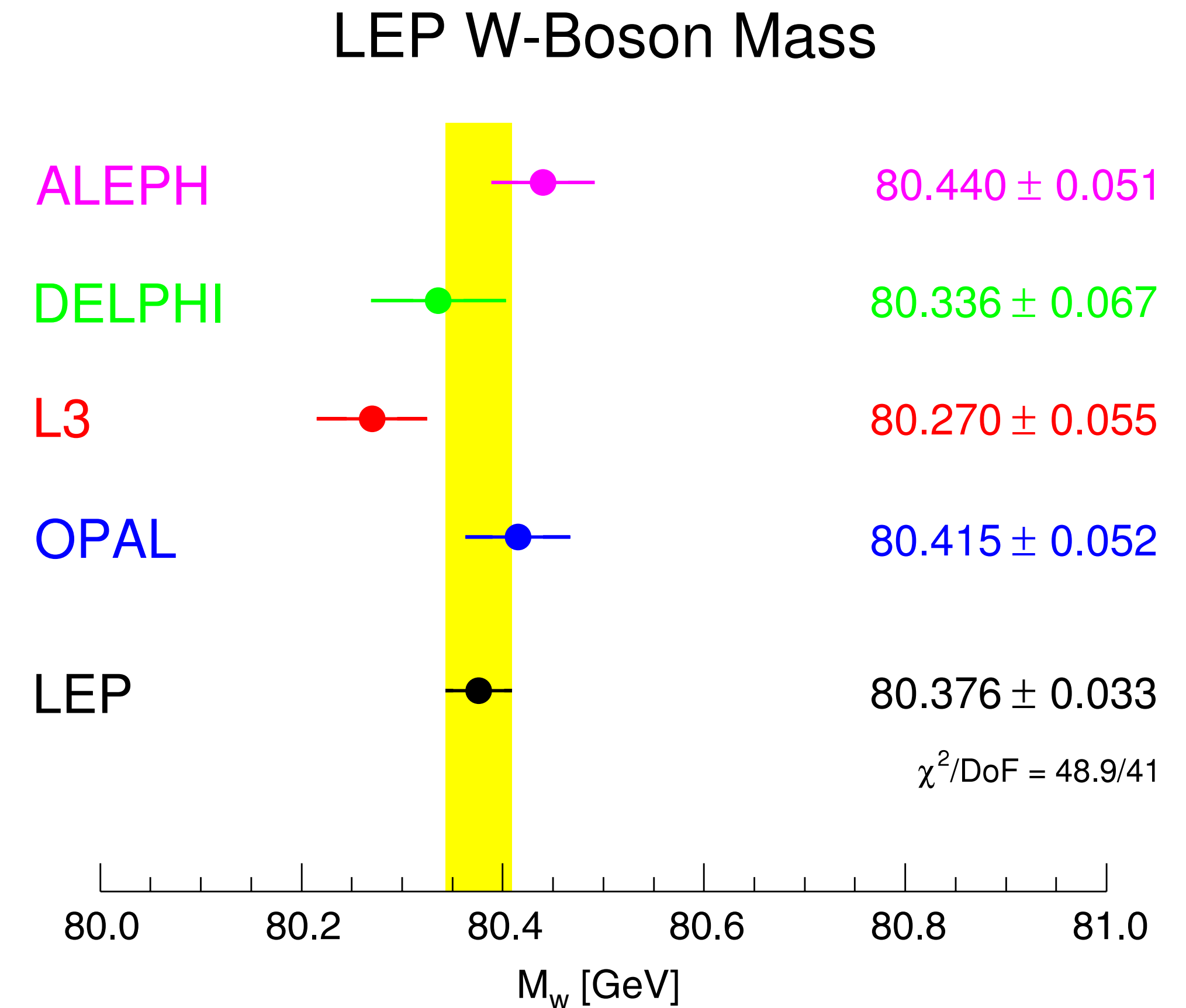
Phys. Rep. 532 (2013) 119

W-Boson-Masse bei LEP 2

- Methode 1: **Schwellenscan**
 - Masse aus Anstieg des Wirkungsquerschnitts an Produktionsschwelle
- Methode 2: **direkte Rekonstruktion**
 - Invariante Masse aus Zerfallsprodukten der W-Bosonen
 - Zerfallskanäle: $W^+W^- \rightarrow q\bar{q}' q''\bar{q}'''$ und $W^+W^- \rightarrow q\bar{q}' \ell \nu$
- Kombiniertes Resultat:

$m_W = 80,376(25)(22) \text{ GeV}$

→ relative Unsicherheit: $4 \cdot 10^{-4}$ (33 MeV)



Phys. Rep. 532 (2013) 119

Aufgabe 28

- Welche Aussagen zur W- und Z-Physik an e^+e^- -Collidern sind korrekt?
 - A. Da Elementarteilchen zur Kollision gebracht werden, ist der Anfangszustand komplett bekannt.
 - B. Die Massen von Elementarteilchen können über Scans der Kollisionsenergie bestimmt werden.
 - C. Sowohl W- als auch Z-Bosonen koppeln gleich stark („demokratisch“) an alle Fermionen.
 - D. Die Masse des Z-Bosons ist auf etwa 20 MeV genau bekannt.
 - E. Der Anteil der unsichtbaren Breite an der Gesamtbreite des Z-Bosons sinkt mit steigender Anzahl leichter Neutrino flavors.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS:
https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold_1080516&client_id=produktiv

Kurze Zusammenfassung

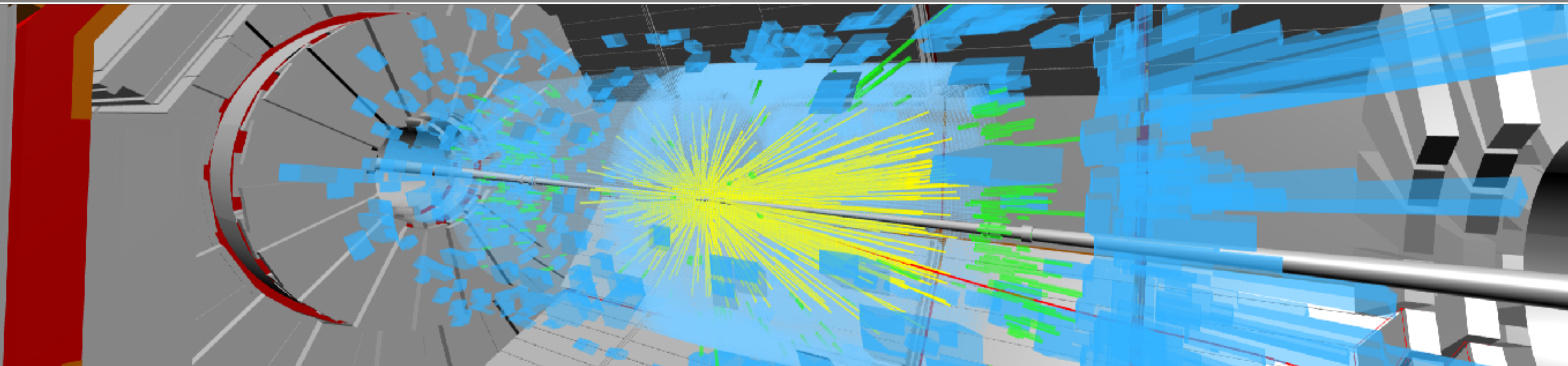
- Experimente an e^+e^- -Collidern bei höchsten Energien:
Präzisionsmessungen zum Test der elektroschwachen Theorie
- **LEP 1:** Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} \approx 91 \text{ GeV} \rightarrow \text{Z-Resonanz}$
 - Prozess: $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow f\bar{f}$
 - Zentrale Resultate: (bis heute) weltbeste Z-Boson-Masse und Breite
 - Zahl der leichten Neutrino flavors aus Resonanzkurve: kompatibel mit $N_\nu = 3$
- **LEP 2:** Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} \geq 160 \text{ GeV}$
 - Beispiel: Masse des W-Bosons aus Scan der Produktionsschwelle
 - Suche nach dem Higgs-Boson ($\rightarrow$ später)

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2019 – 16. Vorlesung (Teil 2)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



Auflösung Aufgabe 28

- Welche Aussagen zur W- und Z-Physik an e^+e^- -Collidern sind korrekt?
- A. Da Elementarteilchen zur Kollision gebracht werden, ist der Anfangszustand komplett bekannt.
 - B. Die Massen von Elementarteilchen können über Scans der Kollisionsenergie bestimmt werden.
 - C. Sowohl W- als auch Z-Bosonen koppeln gleich stark („demokratisch“) an alle Fermionen.
 - D. Die Masse des Z-Bosons ist auf etwa 20 MeV genau bekannt.
 - E. Der Anteil der unsichtbaren Breite an der Gesamtbreite des Z-Bosons sinkt mit steigender Anzahl leichter Neutrino flavors.

Kurze Wiederholung

- Experimente an e^+e^- -Collidern bei höchsten Energien:
Präzisionsmessungen zum Test der elektroschwachen Theorie
- **LEP 1:** Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} \approx 91 \text{ GeV} \rightarrow \text{Z-Resonanz}$
 - Prozess: $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow f\bar{f}$
 - Zentrale Resultate: (bis heute) weltbeste Z-Boson-Masse und Breite
 - Zahl der leichten Neutrino flavors aus Resonanzkurve: kompatibel mit $N_\nu = 3$
- **LEP 2:** Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} \geq 160 \text{ GeV}$
 - Beispiel: Masse des W-Bosons aus Scan der Produktionsschwelle
 - Suche nach dem Higgs-Boson ($\rightarrow$ später)

Kapitel 8.1

Präzisionsphysik an e^+e^- -Collidern

Massen von W, Z, Top und Higgs

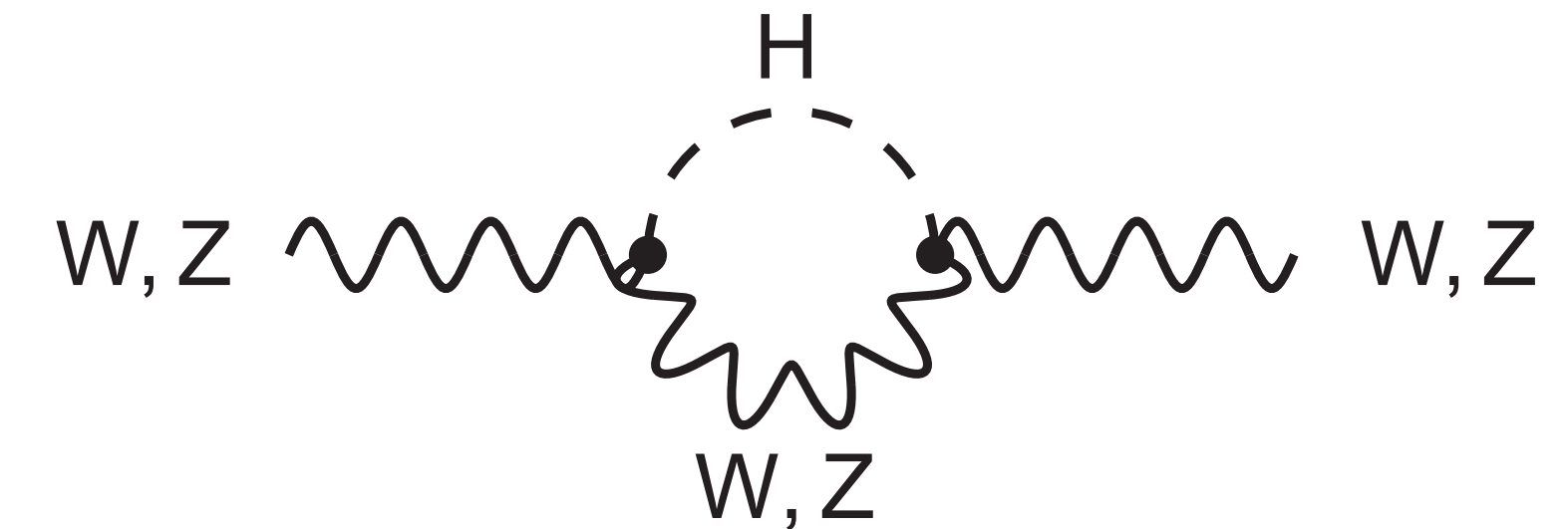
■ Elektroschwache Theorie:

- Verknüpfung von W- und Z-Masse über **schwachen Mischungswinkel**

$$m_W^2 = \frac{g^2 v^2}{4}, \quad m_Z^2 = \frac{v^2}{4} (g^2 + g'^2)$$

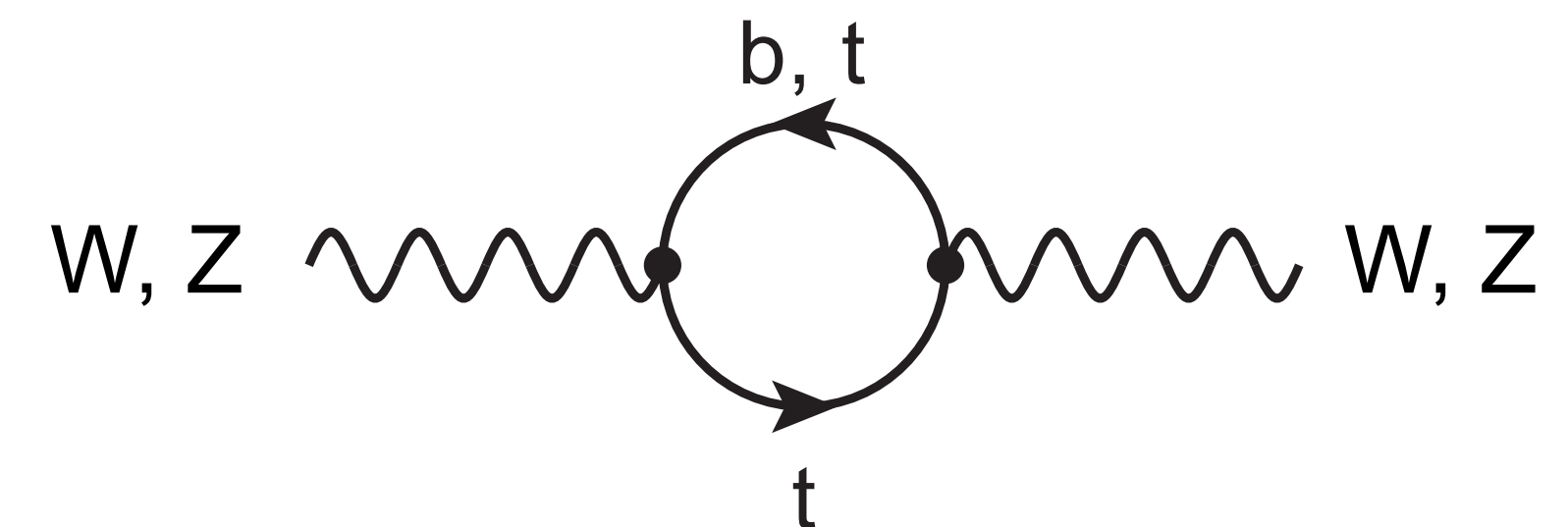
$$\rightarrow m_W = m_Z \cos \theta_W$$

- Quantenkorrekturen zu Propagatoren für W- und Z-Bosonen („Schleifendiagramme“): Verknüpfung von W- und Z-Massen mit Massen von **Higgs-Boson** und **Top-Quark**
- Heute: präzise **Messungen** der Massen von W, Z, Top und Higgs → Test der elektroschwachen Theorie auf Niveau von **Quantenkorrekturen**



$$g' \ln(m_H / m_W)$$

schwache Abhängigkeit
(logarithmisch)

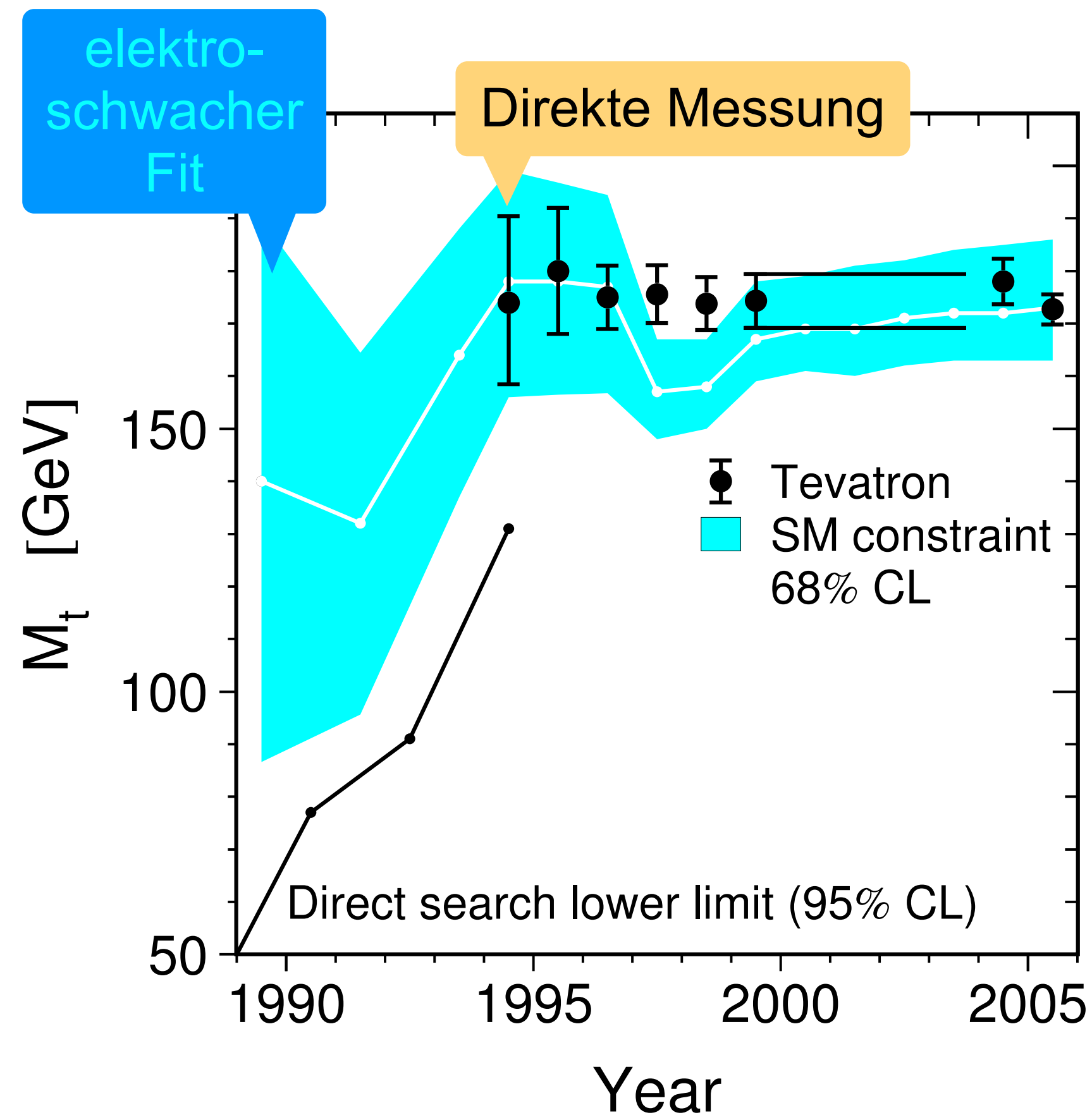


$$\sim G_F m_t^2$$

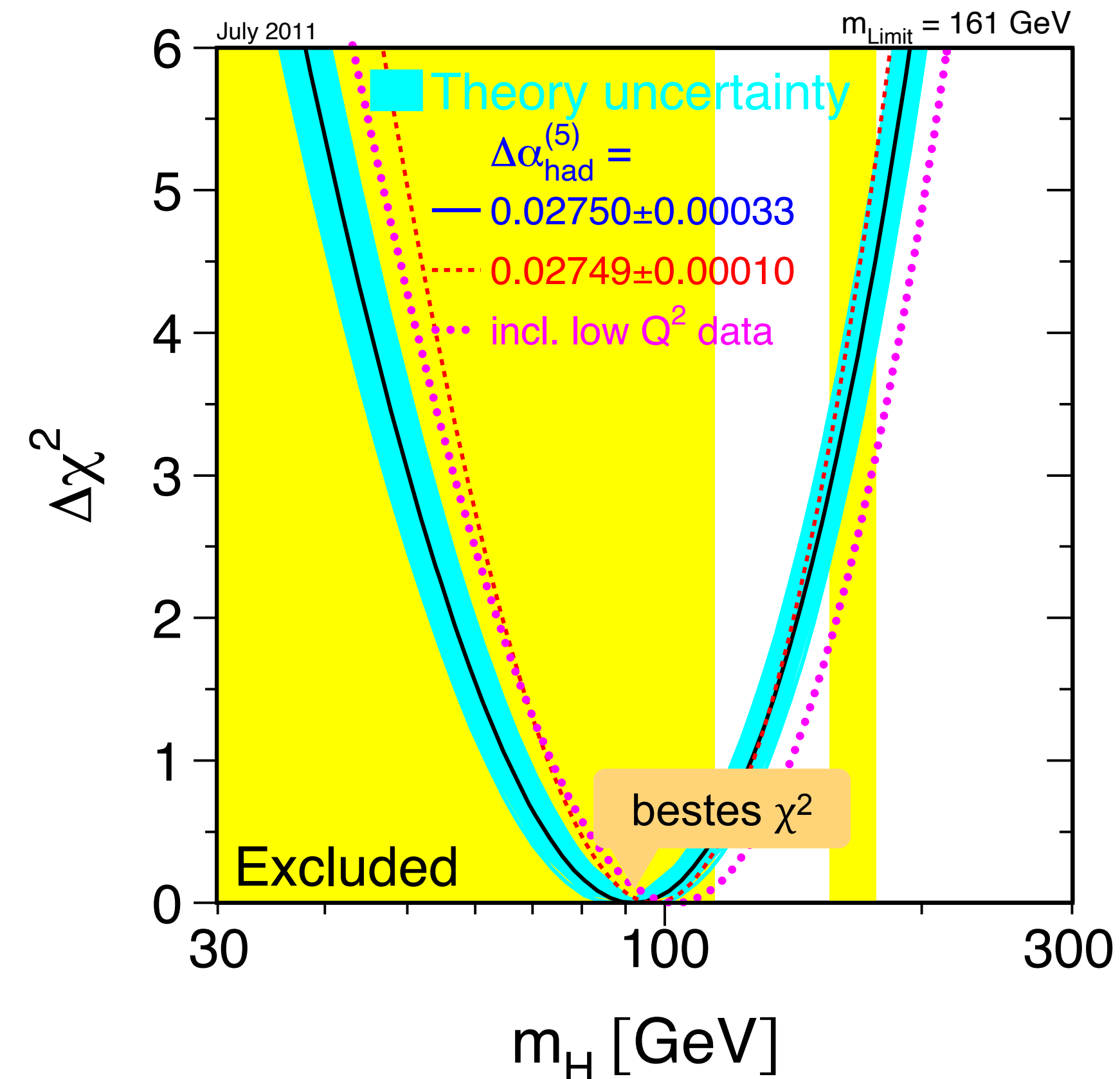
starke Abhängigkeit
(quadratisch)

Elektroschwacher Fit

■ Historisch: Vorhersage der Top- und Higgs-Masse **vor** Entdeckung



[Phys. Rep. 427 \(2006\) 257](#)



<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>

Elektroschwacher Fit

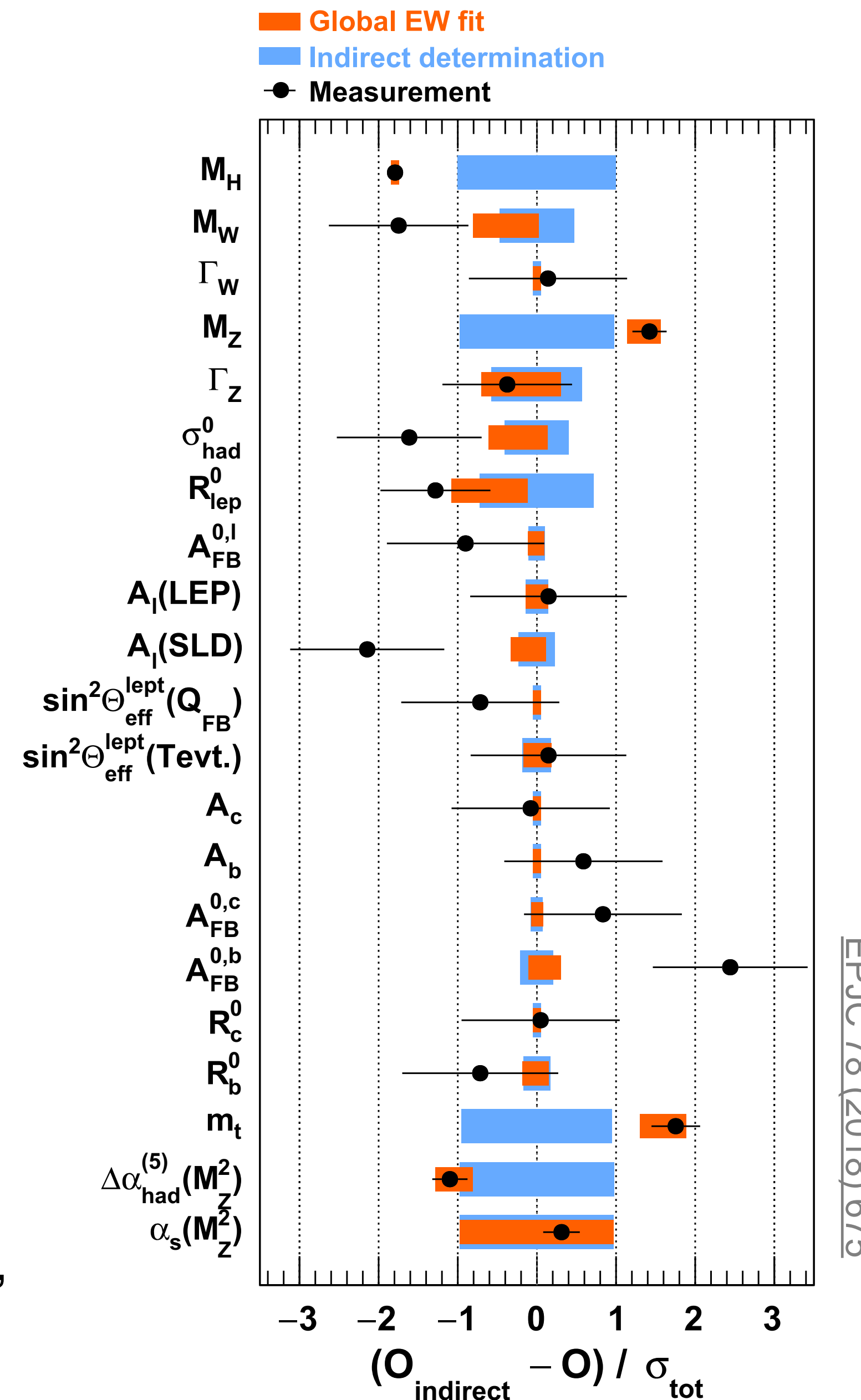
- **Globale Anpassung** aller freien Parameter der elektroschwachen Theorie (21):

- Viele Präzisionsmessungen (z. B. LEP, SLC, Tevatron, LHC)

- Resultat dargestellt als **Pull** (Abweichung $O_{\text{indirekt}} - O$ normiert auf Unsicherheit σ_{tot})

- Standardmodell **konsistent**:
 $\chi^2/n_{\text{dof}} = 18,6/15 \rightarrow \text{p-Wert}^*: 0,23$

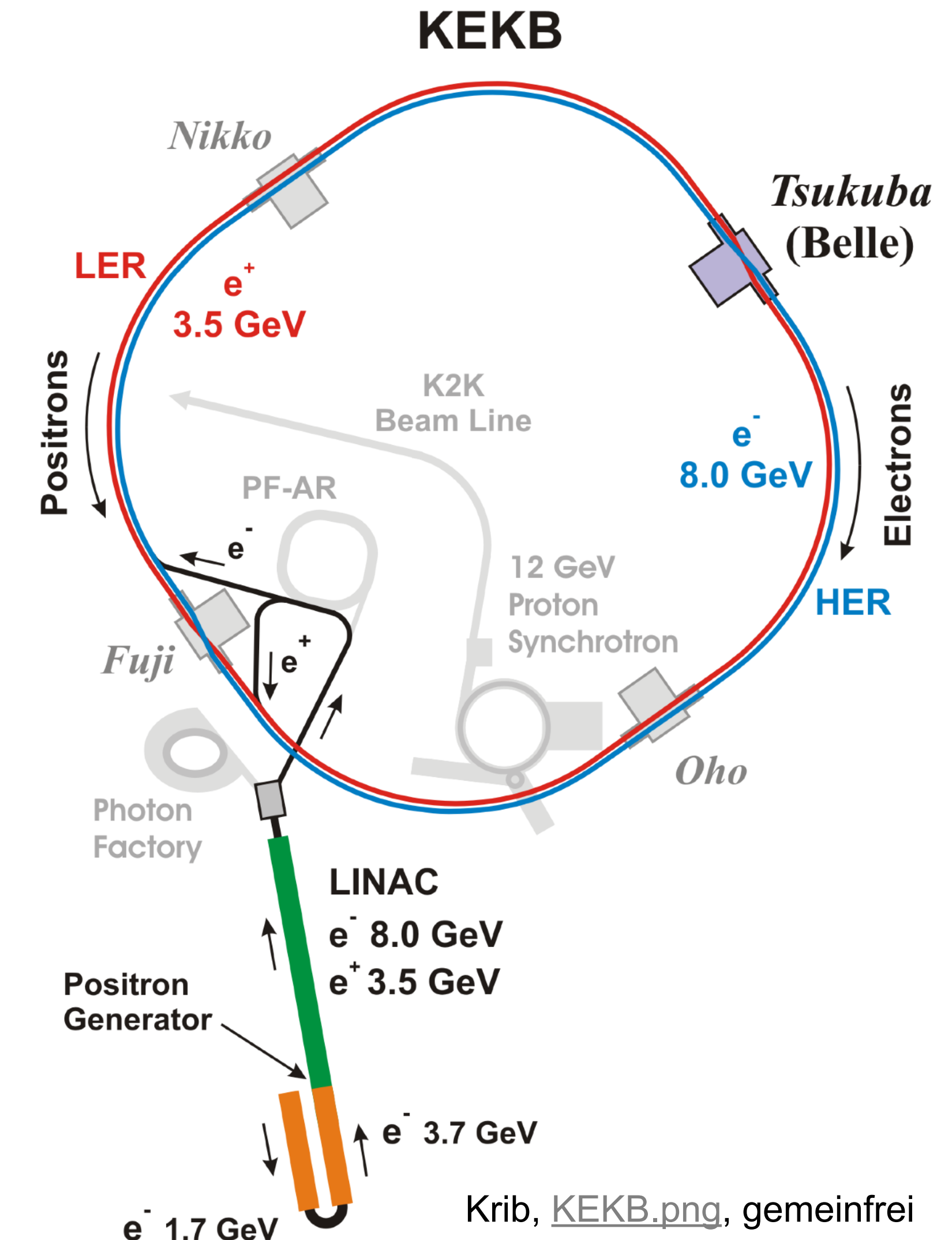
*p-Wert = Wahrscheinlichkeit, beobachtete Übereinstimmung mit Daten oder schlechter zu finden, wenn Nullhypothese (Standardmodell) korrekt



Asymmetrische e^+e^- -Collider

- **B-Fabriken** auf $\Upsilon(4S)$ -Resonanz: $B\bar{B}$ -Paar im e^+e^- -Schwerpunktsystem praktisch **in Ruhe** erzeugt
- **Asymmetrischen Strahlenergien:**
 - Bewegtes Schwerpunktsystem $\rightarrow$ **Zerfallslängen** im Laborsystem einfacher rekonstruierbar
 - **SuperKEKB-Beschleuniger** (seit 2018):
 $E_1 = 7 \text{ GeV}$, $E_2 = 4 \text{ GeV} \rightarrow$ **Lorentz-Boost** des Schwerpunktsystems

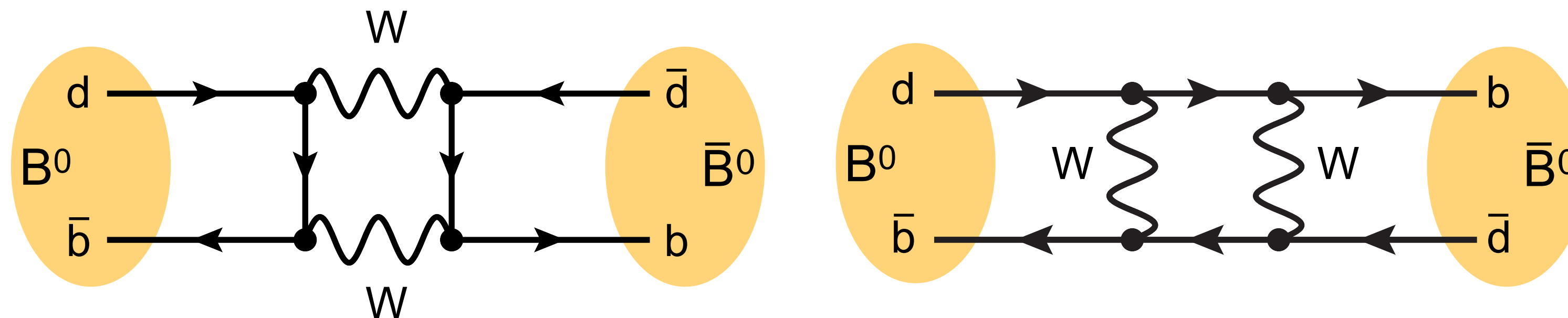
$$\beta\gamma = \left(\frac{pc}{mc^2} \right)_{\Upsilon(4S)} = \frac{E_1 - E_2}{\sqrt{s}} \approx 0,28$$



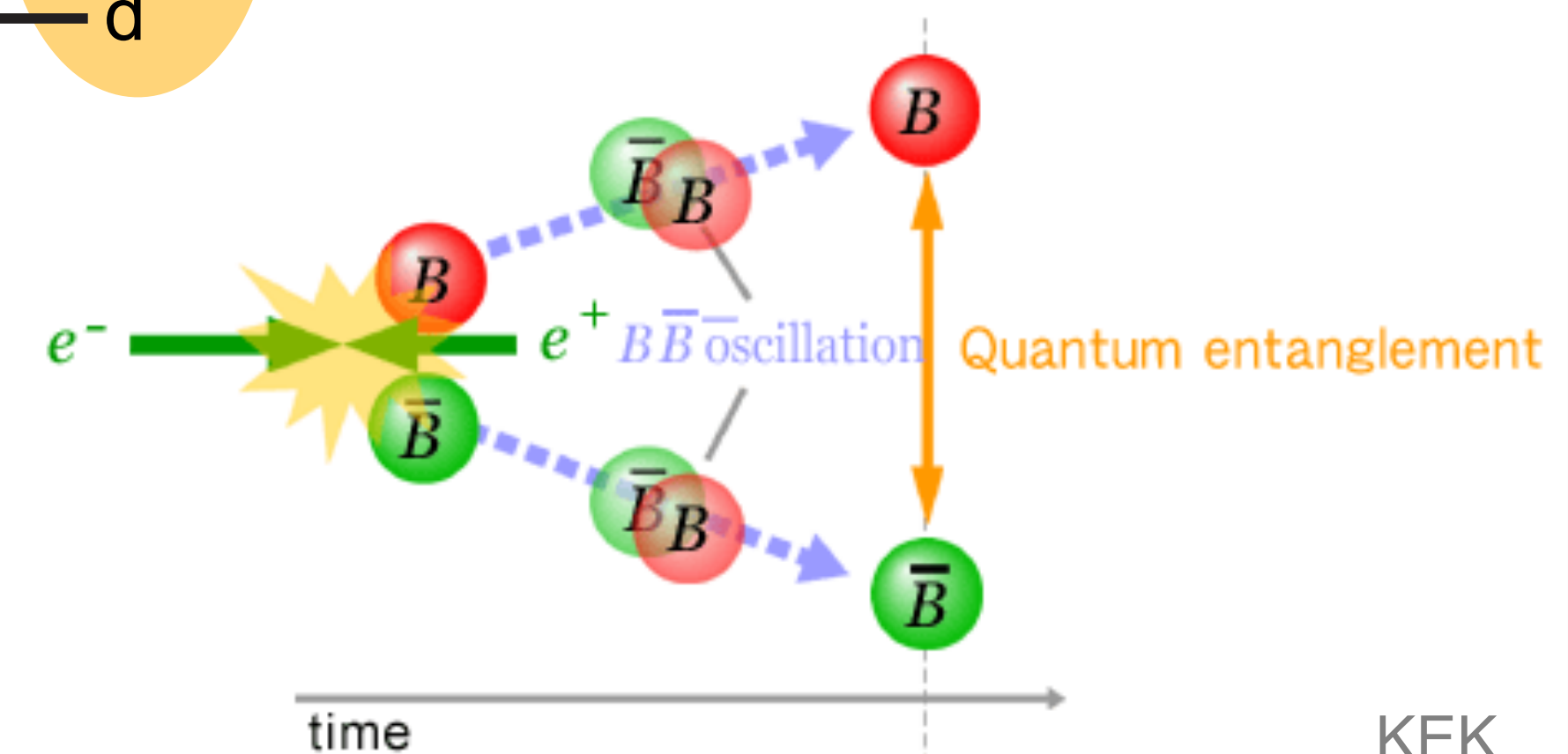
Krib, [KEKB.png](#), gemeinfrei

$B\bar{B}$ -System

- **Zerfallskanäle:** ca. 50% $\Upsilon(4S) \rightarrow B^0\bar{B}^0$ und 50% $\Upsilon(4S) \rightarrow B^+B^-$
- **System neutraler B-Mesonen:**
 - Starke Eigenzustände B^0 und $\bar{B}^0$ **mischen** durch elektroschwache Wechselwirkung (analog zu neutralen Kaonen)

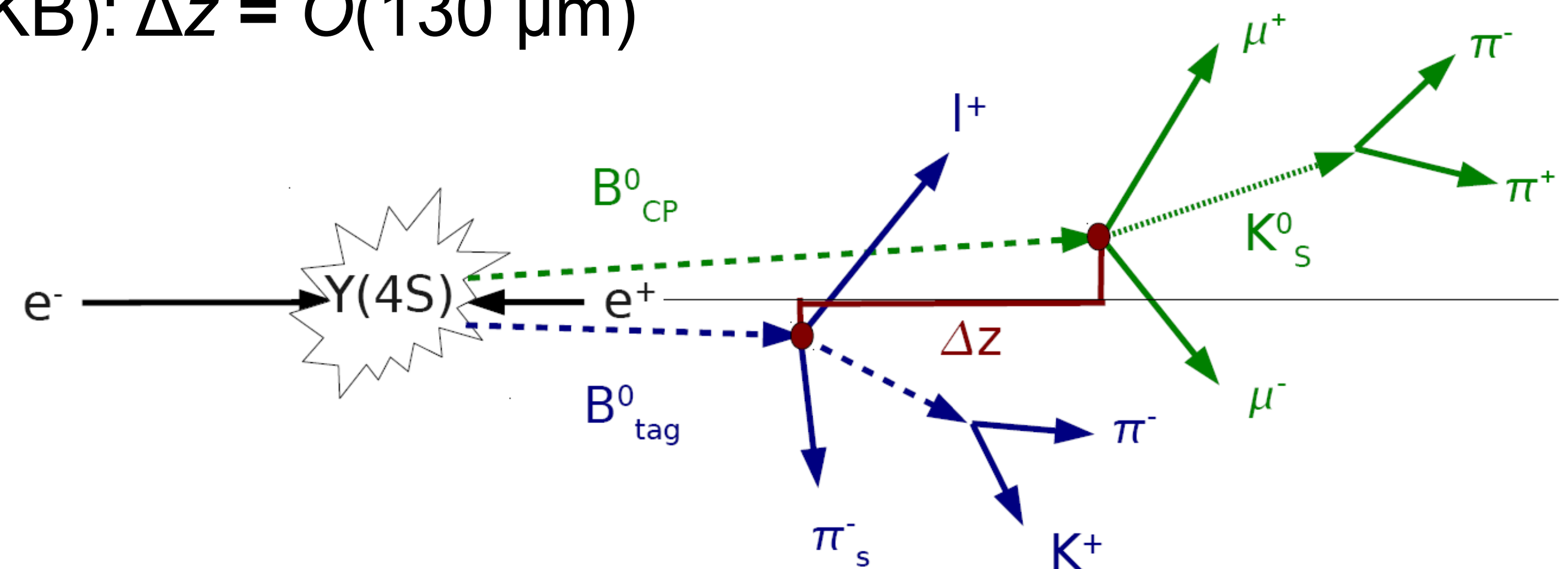
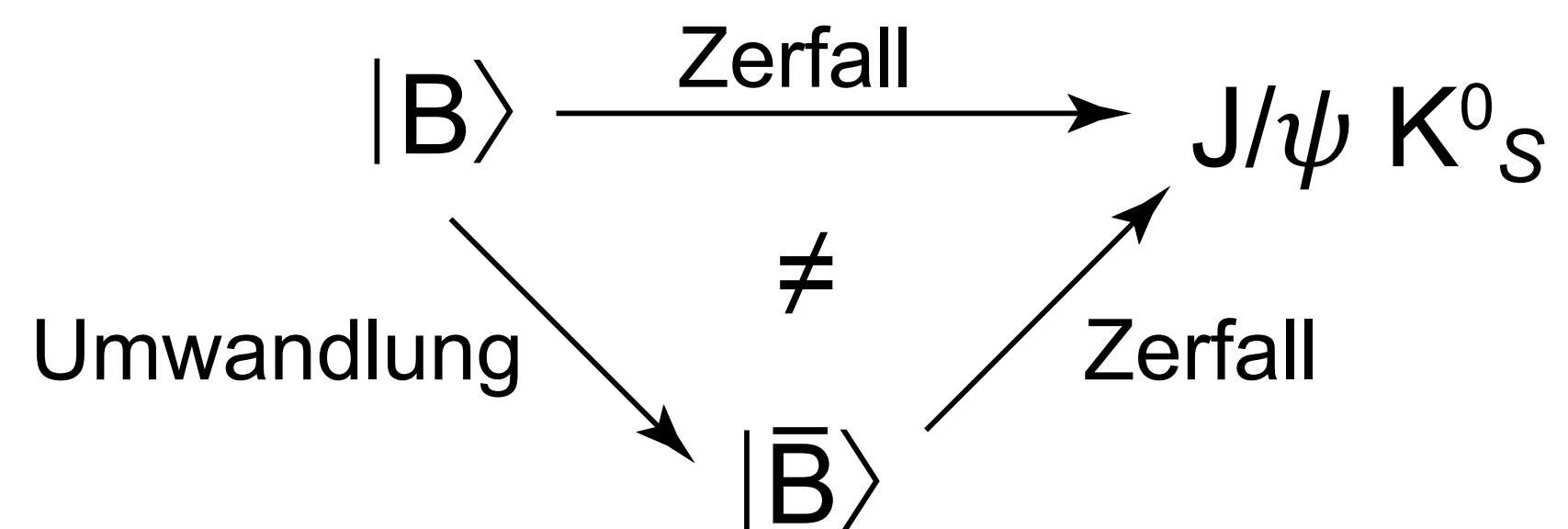


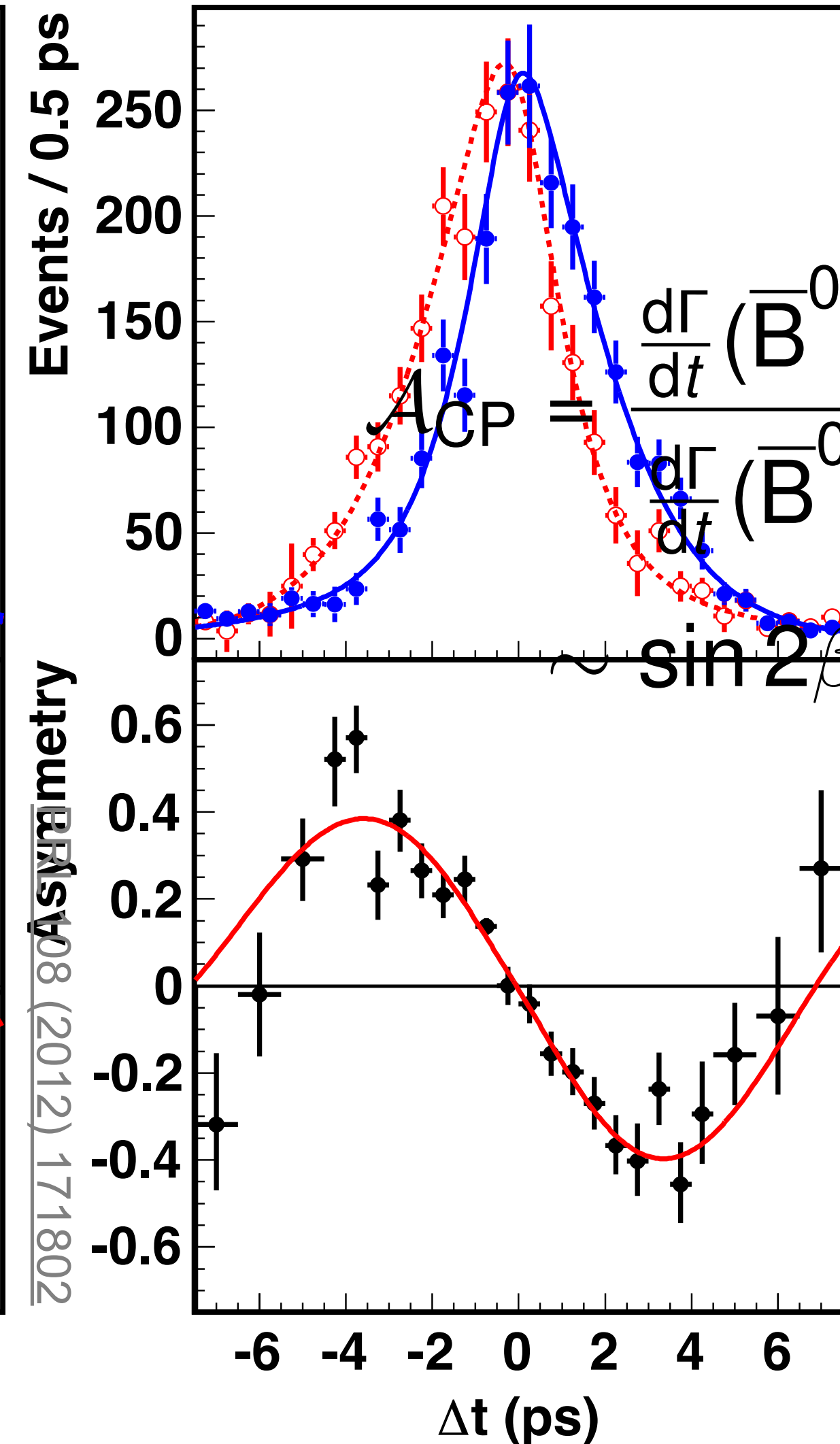
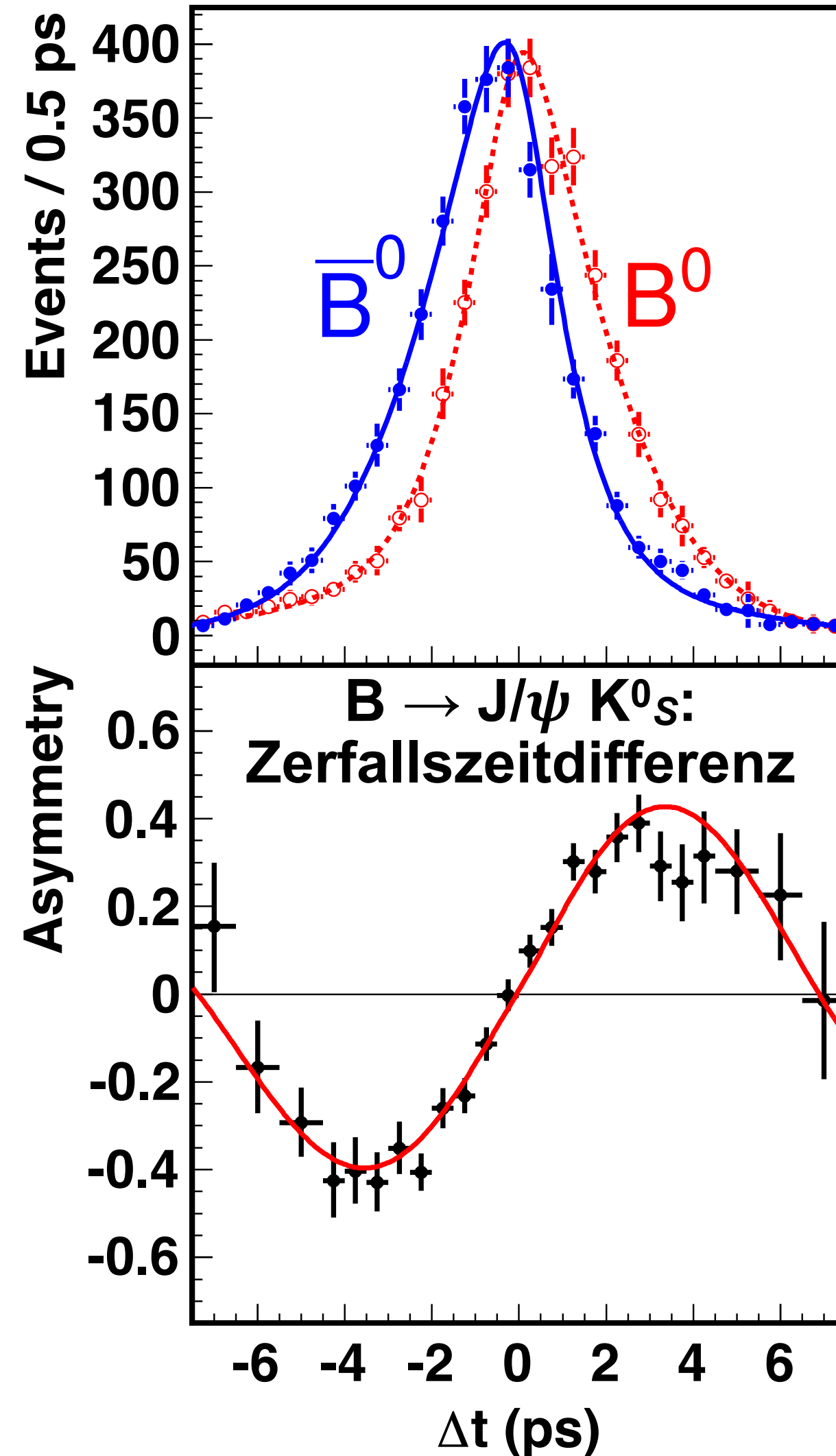
- e^+e^- -Kollisionen: $B^0\bar{B}^0$ -Paar erzeugt als **verschränkter Quantenzustand**
→ Zerfall eines der B-Mesonen
legt Flavor des anderen fest (vgl. EPR-Effekt)



CP-Verletzung im B-System

- Messidee: betrachte Prozess, in dem B und $\bar{B}$ in **denselben CP-Eigenzustand zerfallen** → „goldener“ Kanal: $B^0 \rightarrow J/\psi K^0_S$
- Unterschiedliche Rate für direkten Zerfall und Umwandlung + Zerfall?
→ dritte Art der CP-Verletzung (neben direkt und in Mischung): **CP-Verletzung in der Interferenz** aus Mischung und Zerfall (vgl. Doppelspaltexperiment)
- Experimentell: Messung der **Differenz Δz der Zerfallslängen** von B und $\bar{B}$
→ im Laborsystem (SuperKEKB): $\Delta z = O(130 \text{ } \mu\text{m})$





zeitabhängige CP-Asymmetrie
Differenz der Zerfallszeiten Δt :

$$\rightarrow \frac{d\Gamma}{dt}(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) - \frac{d\Gamma}{dt}(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)$$

$$\rightarrow \frac{d\Gamma}{dt}(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) + \frac{d\Gamma}{dt}(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)$$

$$\sim \sin 2\beta \sin(\Delta m \Delta t)$$

Winkel β (ϕ_1) im Unitaritätsdreieck

Ergebnisse der B-Fabriken

$$\sin 2\beta = \sin 2\phi_1 = 0,667(26)$$

Annahme (CKMfitter, Sommer 2019):

$$2\phi_1 = 0,7083^{+0,0127}_{-0,0098}$$

Aufgabe 29

- Welche Aussagen zur Physik an B-Fabriken sind korrekt?
 - A. Werden B^+B^- -Paare erzeugt, so bilden diese bis zum Zerfall eines der B-Mesonen ein verschränktes Quantensystem.
 - B. Werden $B^0\bar{B}^0$ -Paare erzeugt, so bilden diese bis zum Zerfall eines der B-Mesonen ein verschränktes Quantensystem.
 - C. In asymmetrischen e^+e^- -Collidern lassen sich Zerfallslängen besser bestimmen als in symmetrischen.
 - D. CP-Verletzung in der Interferenz lässt sich beobachten, wenn B^0 und $\bar{B}^0$ in unterschiedliche CP-Eigenzustände zerfallen.
 - E. Die $\Upsilon(4S)$ -Resonanz liegt unterhalb der $B\bar{B}$ -Produktionsschwelle.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS:
https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold_1080516&client_id=produktiv

Kurze Zusammenfassung

■ Präzisionsmessungen bei LEP:

- $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow f\bar{f}$ (Z-Resonanz): Messung von Z-Boson-Masse und Breite, Zahl der leichten Neutrino flavors u.v.m.
- $e^+e^- \rightarrow \gamma^*/Z \rightarrow W^+W^-$: Messung der W-Boson-Masse
- Messungen der Standardmodellparameter $\rightarrow$ elektroschwacher Fit

■ Experimente an **B-Fabriken**: $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$

- **Asymmetrische** e^+e^- -Collider $\rightarrow$ **Boost** des $B\bar{B}$ -Systems $\rightarrow$ bessere Rekonstruktion von **Zerfallslängen**(differenzen)
- Neutrale B-Mesonen: **Mischung** der starken Eigenzustände durch schwache Wechselwirkung $\rightarrow B^0\text{-}\bar{B}^0\text{-Oszillationen}$
- $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$: **CP-Verletzung** in Interferenz aus Mischung und Zerfall