

Experimentelle Elementarteilchenphysik

- Folien zur Vorlesung -

Ulrich Husemann
Humboldt-Universität zu Berlin
Sommersemester 2009

U. Husemann, Experimentelle Elementarteilchenphysik

1. Vorlesung

Vorstellung

- Vorlesung: Dr. Ulrich Husemann
 - Seit April 2008 „Nachwuchsgruppenleiter“ (DESY, Zeuthen)
 - Forschungsgebiet: exp. Teilchenphysik am LHC (ATLAS)
 - E-Mail: ulrich.husemann@desy.de
 - Zeuthen: Raum 3L/27, Tel.: 033762-7-7392
 - Büro Berlin: 2'412
- Übung: Dipl.-Phys. Clemens Lange
 - E-Mail: clemens.lange@desy.de
 - Zeuthen: Raum 3P/10, Tel.: 033762-7-7194

Inhalte und Ziele der VL

- Grundlagen der experimentellen Elementarteilchenphysik (EEP): Tests des Standardmodells (SM) und Suche nach Neuer Physik
- Grobe Inhaltsangabe:
 - Theoretische Grundlagen des SM
 - Elektroschwacher Sektor: Kopplungen der W-/Z-Bosonen, Quarks und Quarkmischung, Neutrinos
 - QCD: Gluonen, Struktur des Protons
 - Higgs-Physik
 - Suche nach neuer Physik: Supersymmetrie?

Nicht in dieser Vorlesung

- Diese VL: allgemeine experimentelle Grundlagen der Elementarteilchenphysik
- Weitere experimentelle Spezialisierung (P23.1.2b):
 - Teilchendetektoren oder Beschleunigerphysik
 - Spezialvorlesungen, z. B.
 - Flavorphysik
 - Physik am Large Hadron Collider
 - Statistische Methoden der Datenauswertung

Vorwissen

- Keine formalen Voraussetzungen
- VL greift auf Wissen aus folgenden Vorlesungen zurück:
 - Einführung in die Kern- und Elementarteilchenphysik (Bachelorstudium, Modul P10c)
 - Theoretische Einführung in das Standardmodell (Masterstudium, weiterer Teil des Moduls P23.1.1)
- VL ergänzt sich mit VL Kern- und Elementarteilchenphysik (Teil des Moduls P20)

Einordnung der Vorlesung

- Teil des Moduls P23.1.1. „Grundlagen der Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik“ im Spezialisierungsfach „Elementarteilchenphysik“
- Zielgruppe:
 - Studierende im Masterstudiengang Physik (2. Semester)
 - Obligatorisch für alle Studierenden, die Masterarbeit in Elementarteilchenphysik anfertigen wollen

Termine und Arbeitsleistungen

- Termine: 2 VL + 1 Ü
 - Vorlesung: Montags, 9:00–11:00 Uhr, NEW 14 1'11
 - Übung: Mittwochs, 9:00–11:00 Uhr, NEW 14 1'12 (jede zweite Woche)
- 5 Studienpunkte durch „regelmäßige aktive Teilnahme an den Übungen“:
 - Präsenz in Übungen: mindestens 4 der 7 Veranstaltungen
 - Bearbeitung von Übungsaufgaben: mindestens 50% der erreichbaren Punkte
 - Vorrechnen an Tafel: mindestens einmal

Übungen: Termine und Ablauf

- Übungsgruppenleiter: Clemens Lange
- Übungstermine:
 - 14-tägig: 7 Termine
 - Erster Termin: Mittwoch, 22.04.09, 9:00–11:00 Uhr, NEW 14 1'12
- Ablauf:
 - Eigenes Vorrechnen der Übungsaufgaben
 - Fragen zur Vorlesung
- Ausgabe und Abgabe der Übungszettel:
Montags in/nach der Vorlesung

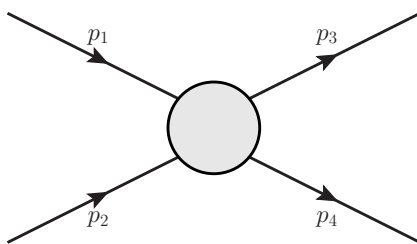
Literatur

- Webseite zur Vorlesung: http://www-zeuthen.desy.de/~husemann/teaching/2009_ss/exp_teilchenphysik/
- Nachschlagewerk: „The Review of Particle Physics“
 - Particle Physics Booklet
 - Langversion: C. Amsler et al., Physics Letters B667 (2008),
 - Webversion: <http://pdg.lbl.gov>
- Allgemeine Elementarteilchenphysik
 - D. H. Perkins: Introduction to High Energy Physics (Cambridge University Press, 2000)
 - C. Berger: Elementarteilchenphysik (Springer, 2006)

Literatur

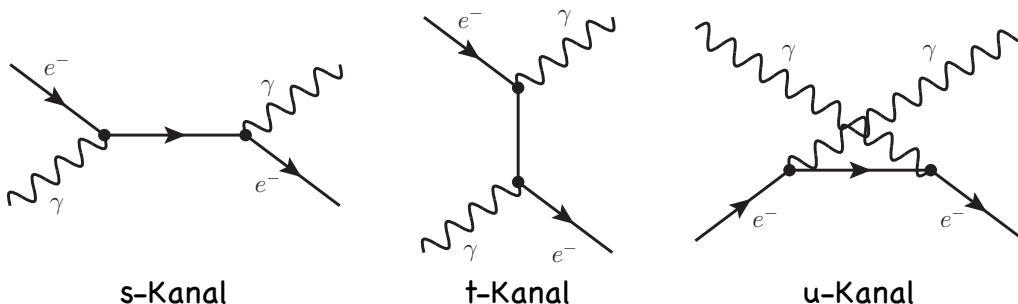
- Theoretische Grundlagen:
 - F. Halzen, A. D. Martin: Quarks & Leptons (Wiley, 1984)
 - O. Nachtmann: Phänomene und Konzepte der Elementarteilchenphysik (Vieweg, 1986)
 - W. N. Cottingham, D. A. Greenwood: An Introduction to the Standard Model of Particle Physics (Cambridge UP, 2007)
 - M. E. Peskin, D. V. Schroeder: An Introduction to Quantum Field Theory (Westview, 1995)
- Weitere Literaturhinweise später...

Mandelstam-Variablen



$$\begin{aligned}
 s &= (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2 \\
 t &= (p_1 - p_3)^2 = (p_2 - p_4)^2 \\
 u &= (p_1 - p_4)^2 = (p_3 - p_2)^2
 \end{aligned}$$

Beispiel: Compton-Streuung



V^0 s und Strangeness

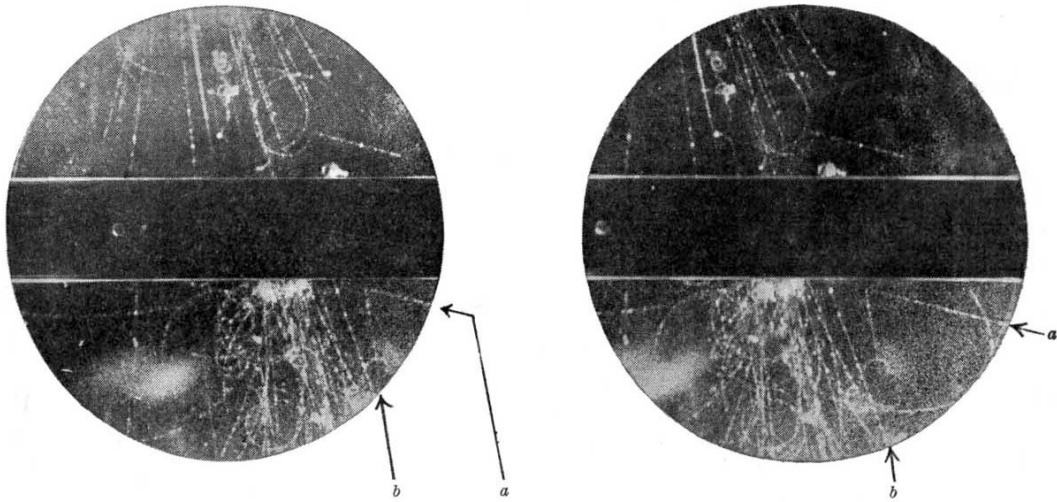


Fig. 1. STEREOSCOPIC PHOTOGRAPHS SHOWING AN UNUSUAL FORK (a b) IN THE GAS. THE DIRECTION OF THE MAGNETIC FIELD IS SUCH THAT A POSITIVE PARTICLE COMING DOWNWARDS IS DEVIATED IN AN ANTICLOCKWISE DIRECTION

[G.D. Rochester, C.C. Butler, Nature **160** (1947), 855]

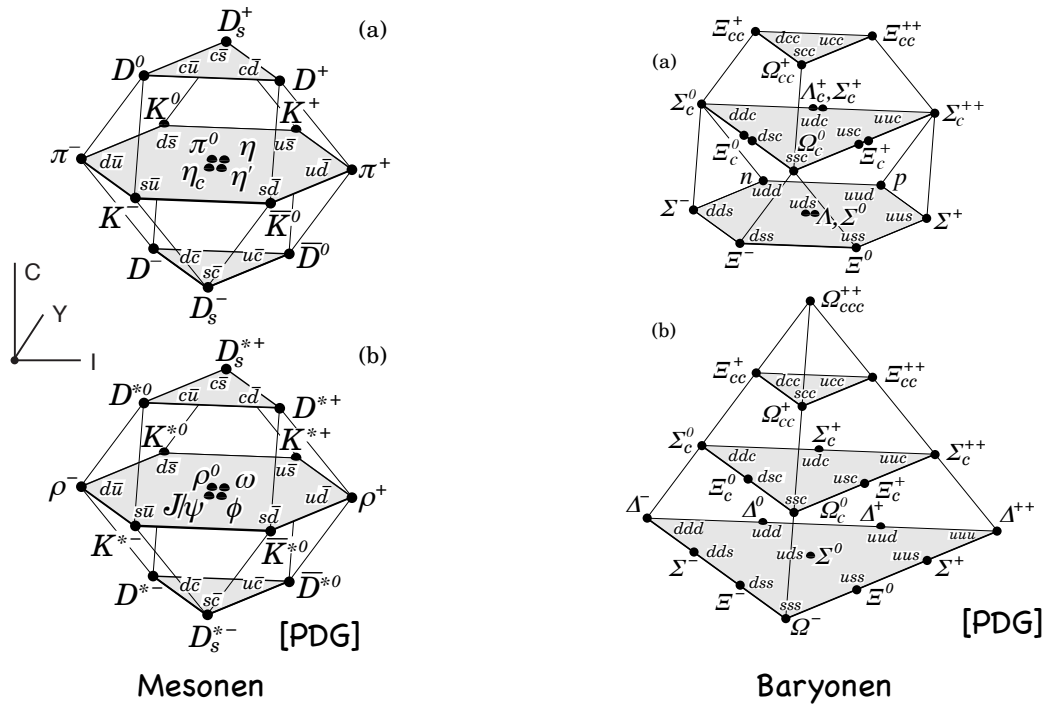
Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

13

U. Husemann, Experimentelle Elementarteilchenphysik

2. Vorlesung

Flavor-SU(4)-Multipletts



Tiefinelastische Streuung

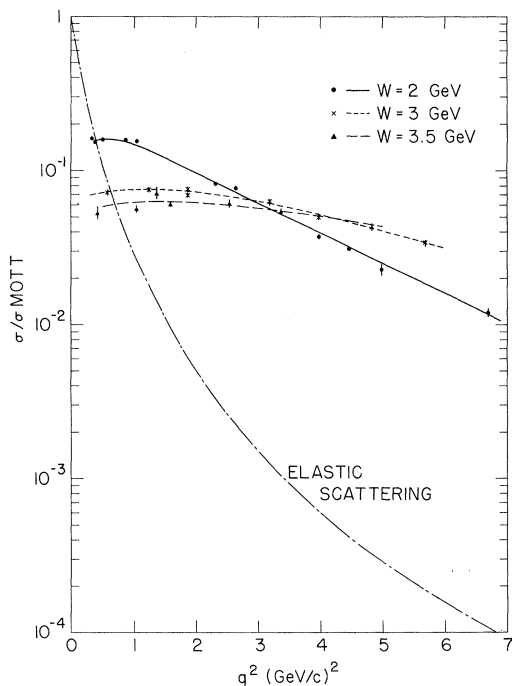


FIG. 1. $(d^2\sigma/d\Omega dE')/\sigma_{\text{Mott}}$, in GeV^{-1} , vs q^2 for $W = 2, 3$, and 3.5 GeV. The lines drawn through the data are meant to guide the eye. Also shown is the cross section for elastic $e-p$ scattering divided by σ_{Mott} , $(d\sigma/d\Omega)/\sigma_{\text{Mott}}$, calculated for $\theta = 10^\circ$, using the dipole form factor. The relatively slow variation with q^2 of the inelastic cross section compared with the elastic cross section is clearly shown.

[M. Breidenbach et al.,
Phys. Rev. Lett **23** (1969) 935]

Brief an die „Radioaktiven“

original - Photocopy of PLC 0393
Abschrift/15.12.95

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst
ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
Jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, dazwischen, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente
verlängen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons
nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann
 μ wohl nicht grösser sein als $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee
zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe
Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis
eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa
10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein
gamma-Strahl.

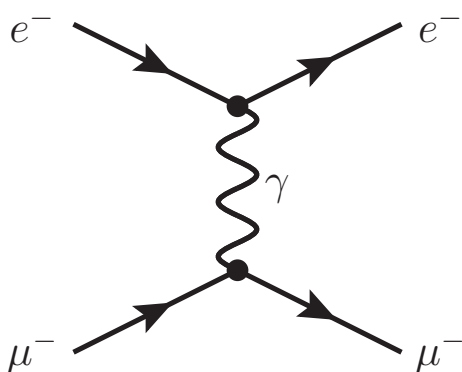
Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein
wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn
sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt,
gemusst und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum
wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt,
Herrn Debys, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat:
"O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen
Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.
Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. - Leider kann ich nicht
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht
vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich
bin. - Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Baek, Euer
untertänigster Diener

ges. W. Pauli

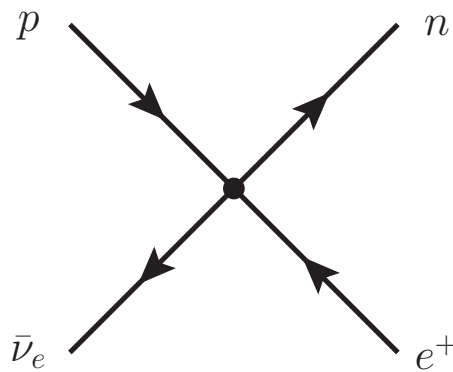
Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

17

Kontaktwechselwirkung



QED: $e\mu$ -Streuung



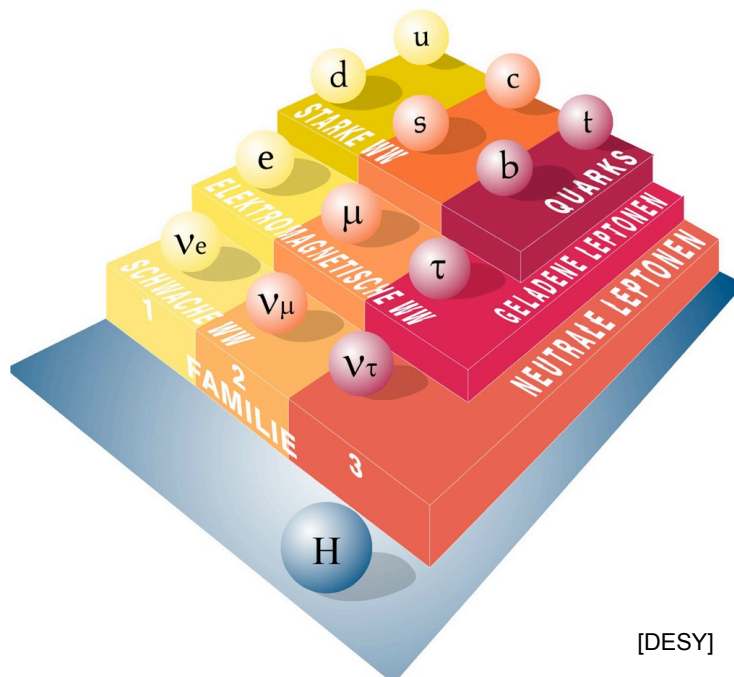
Schwache Wechselwirkung:
inverser Betazerfall

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

18

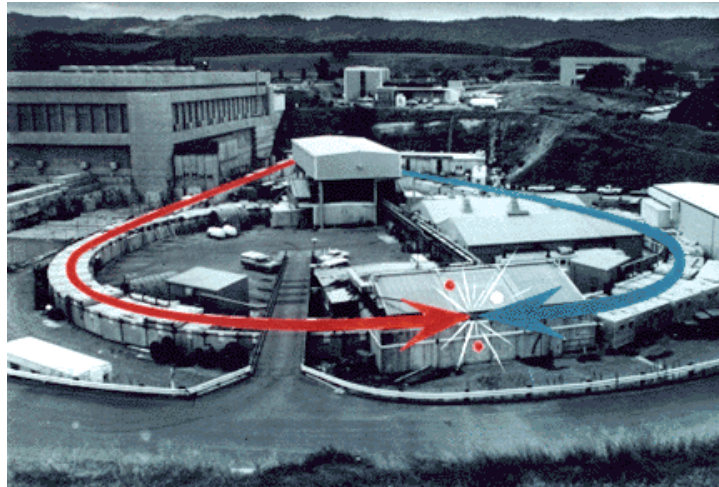
3. Vorlesung

Standardmodell



[DESY]

SPEAR



- e^+e^- -Ringbeschleuniger bei SLAC, 0,234 km Umfang
- 1972–1990, $\sqrt{s} < 8$ GeV
- Detektoren: Mark I/II/III
- Entdeckung des J/ψ und des τ -Leptons

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

21

PETRA

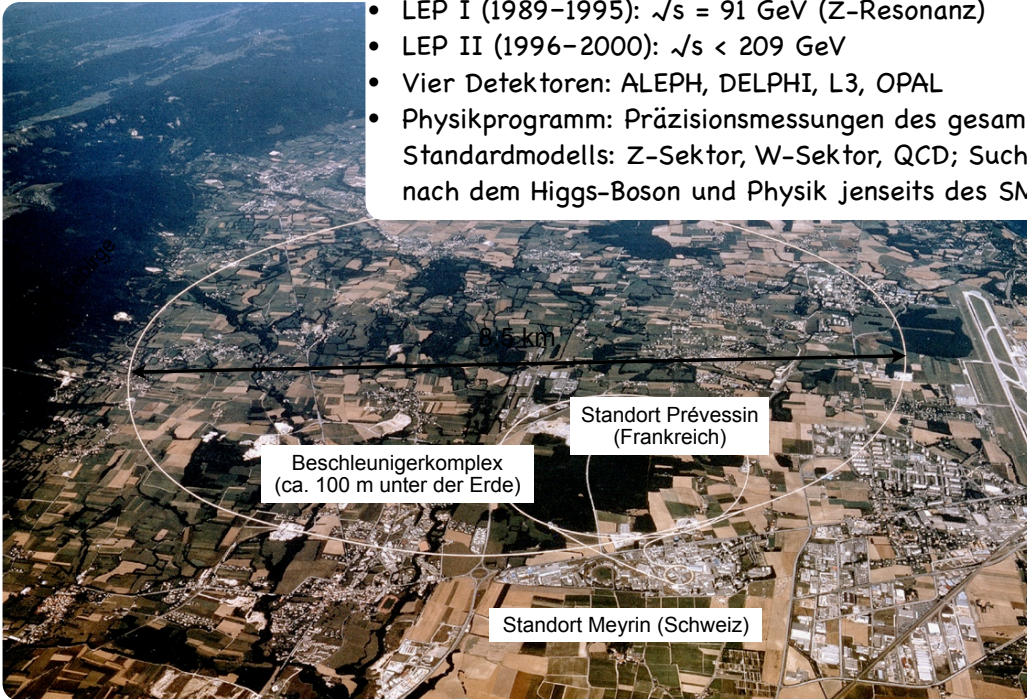


- e^+e^- -Ringbeschleuniger bei DESY, 2,304 km Umfang
- 1978–1986, $\sqrt{s} < 23,4$ GeV
- Detektoren: TASSO, MARK-J, JADE, PLUTO (CELLO)
- Entdeckung des Gluons in 3-Jet-Ereignissen; Suche nach dem Top-Quark

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

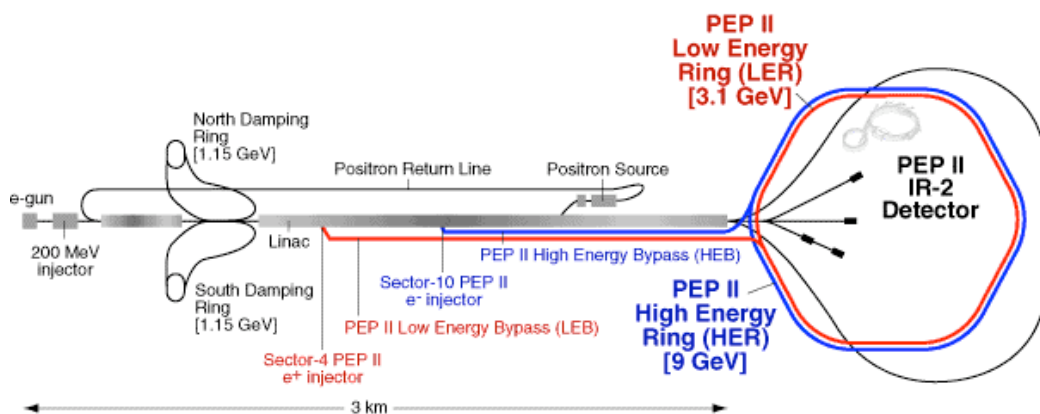
22

LEP



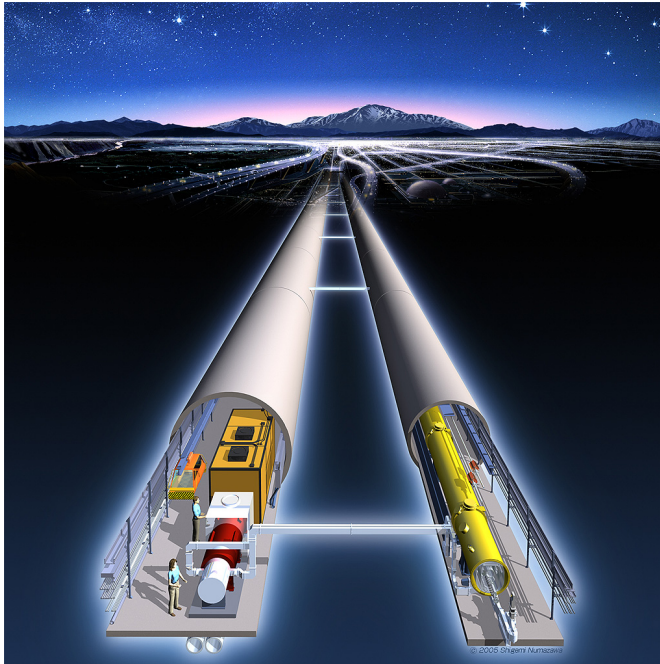
- „Large Electron-Positron Collider“ e^+e^- -Ringbeschleuniger bei CERN, 26,659 km Umfang
- LEP I (1989–1995): $\sqrt{s} = 91$ GeV (Z-Resonanz)
- LEP II (1996–2000): $\sqrt{s} < 209$ GeV
- Vier Detektoren: ALEPH, DELPHI, L3, OPAL
- Physikprogramm: Präzisionsmessungen des gesamten Standardmodells: Z-Sektor, W-Sektor, QCD; Suche nach dem Higgs-Boson und Physik jenseits des SM

B-Fabriken: PEP-II & KEK-B



- Spezialisierte e^+e^- -Ringbeschleuniger mit asymmetrischen Strahlenergien
- Prinzip: Erzeugung der $\Upsilon(4S)$ -Resonanz (gebundener $b\bar{b}$ -Zustand) bei $\sqrt{s} = 10,6$ GeV \rightarrow bewegt sich im Laborsystem
- PEP-II (SLAC, 1999–2008): e^- mit 9,0 GeV, e^+ mit 3,1 GeV, Experiment: BaBar
- KEKB (KEK, seit 1999): e^- mit 8,0 GeV, e^+ mit 3,5 GeV, Experiment: Belle
- Physikprogramm: genaue Vermessung von Bottom-Quarks, CP-Verletzung

International Linear Collider



- 33 km Länge, geplant nach 2020(?)
- $\sqrt{s} = 300 \dots 500 \text{ GeV}(\?)$
- Zwei Detektoren abwechselnd im Strahl ("push-pull")
- Präzisionsmessungen an der „Teraskala“: Higgs-Boson, Top-Quark, Physik jenseits des SM

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

25

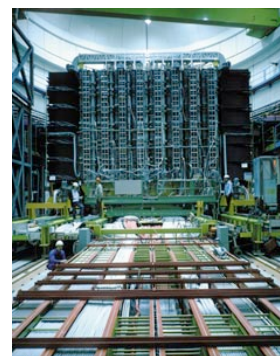
SppbarS



Carlo Rubbia



Simon van der Meer



UA1-Detektor

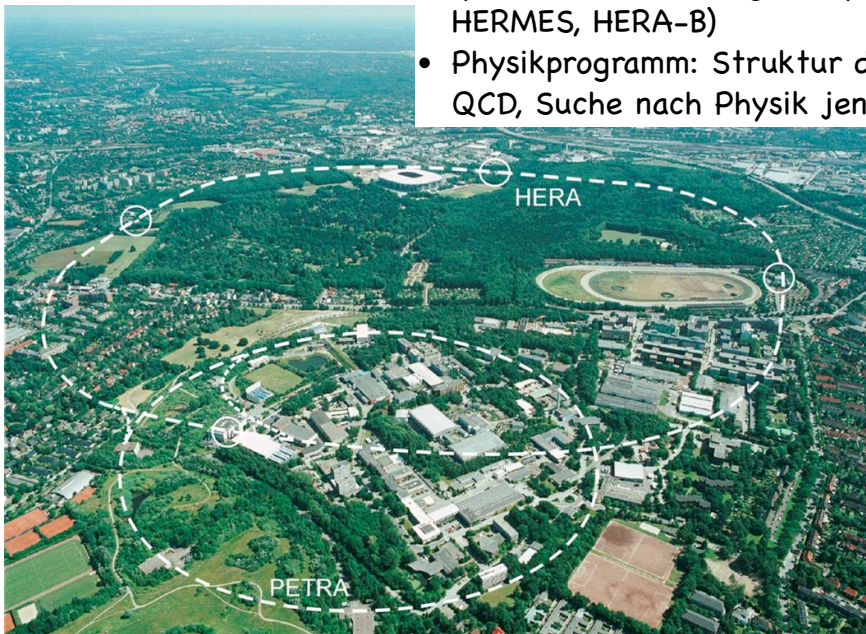
- Proton-Antiproton-Collider am CERN (Umbau des Super Proton Synchrotron, SPS), 6,91 km Umfang
- 1981–1990, $\sqrt{s} = 630 \text{ GeV}$
- Detektoren: UA1, UA2
- Entdeckung der W - und Z-Bosonen, Suche nach Top-Quark und Physik jenseits des SM

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

26

HERA

- $e^\pm p$ -Collider bei DESY, 6,34 km Umfang
- 1992–2007, e^\pm mit $E = 27,5$ GeV, p mit $E = 820$ – 920 GeV. Detektoren: H1, ZEUS (plus zwei Fixed-Target-Experimente: HERMES, HERA-B)
- Physikprogramm: Struktur des Protons, QCD, Suche nach Physik jenseits des SM

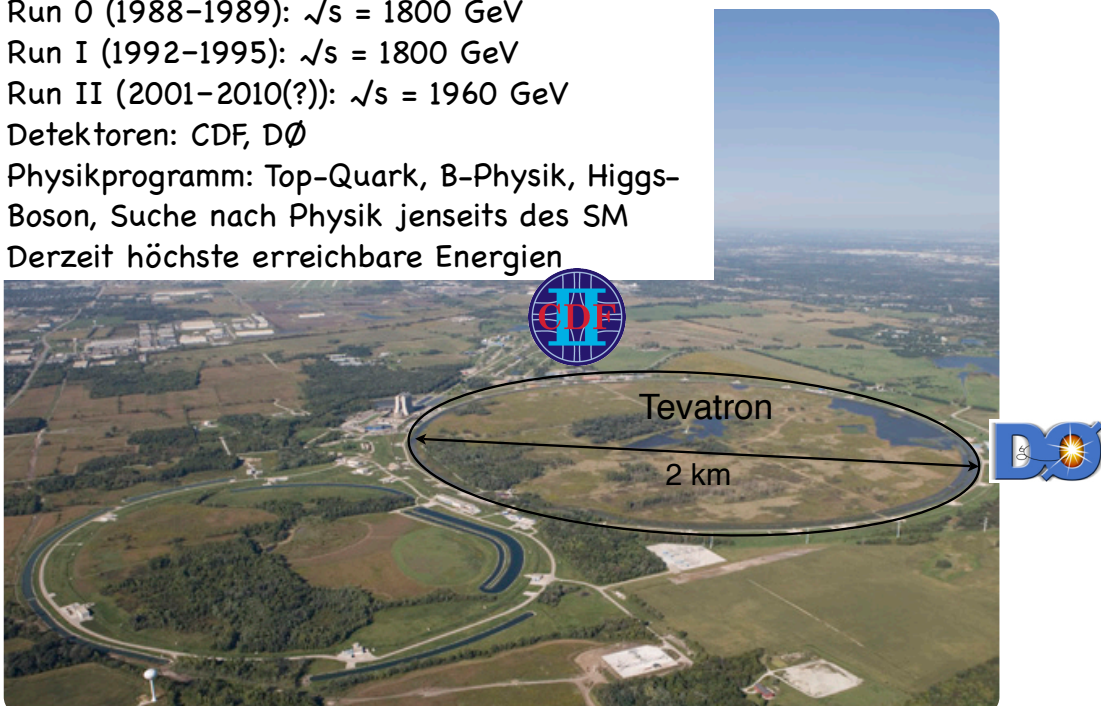


Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

27

- Proton-Antiproton-Collider bei Fermilab, 6,28 km Umfang
- Run 0 (1988–1989): $\sqrt{s} = 1800$ GeV
- Run I (1992–1995): $\sqrt{s} = 1800$ GeV
- Run II (2001–2010(?)): $\sqrt{s} = 1960$ GeV
- Detektoren: CDF, $D\bar{0}$
- Physikprogramm: Top-Quark, B-Physik, Higgs-Boson, Suche nach Physik jenseits des SM
- Derzeit höchste erreichbare Energien

Tevatron

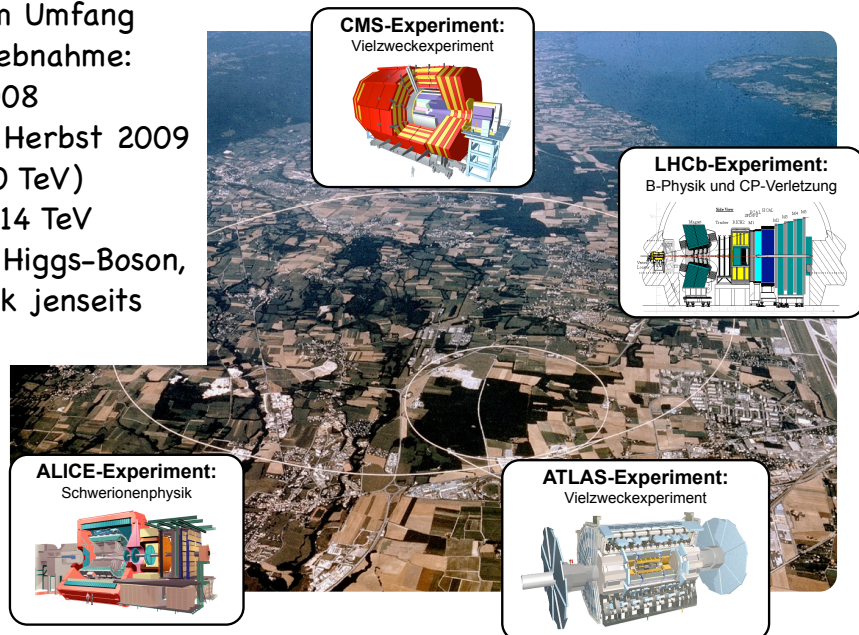


Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

28

Large Hadron Collider

- Proton-Proton-Collider im LEP-Tunnel, 26,659 km Umfang
- Offizielle Inbetriebnahme: 10. September 2008
- Erste Kollisionen: Herbst 2009 ($\sqrt{s} = 900 \text{ GeV}$, 10 TeV)
- Endausbau: $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$
- Physikprogramm: Higgs-Boson, Suche nach Physik jenseits des SM

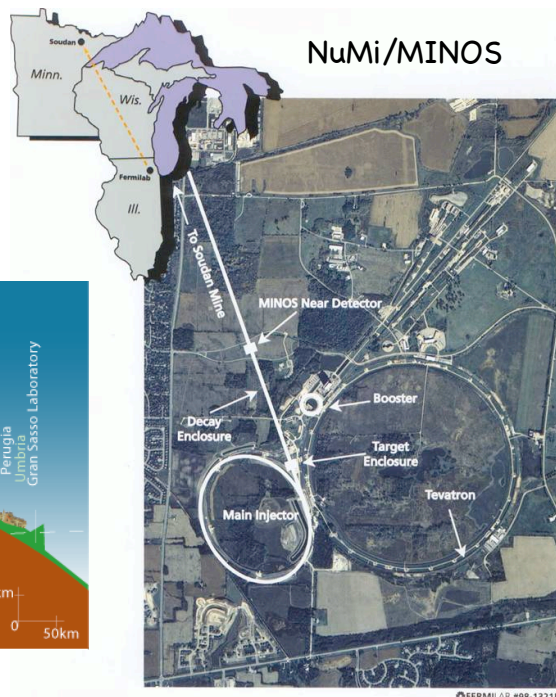
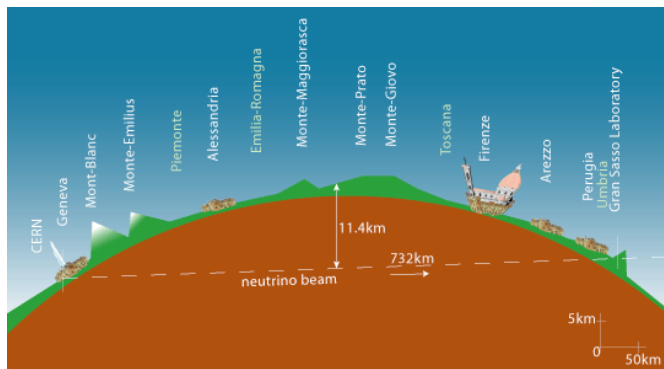


Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

29

Neutrinostrahlen

CERN Neutrinos to Gran Sasso



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

30

4. Vorlesung

SU(3)

- Strukturkonstanten: alle $f^{abc} = 0$ außer:

$$f^{123} = 1, \quad f^{147} = f^{246} = f^{257} = f^{345} = f^{516} = f^{637} = \frac{1}{2}, \quad f^{458} = f^{678} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

- Gell-Mann-Matrizen: $T^a = 1/2 \lambda^a$

$$\lambda^1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda^2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda^4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda^5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda^6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

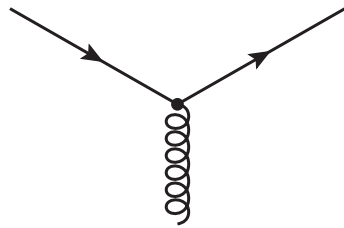
$$\lambda^7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda^8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

QCD-Wechselwirkungen

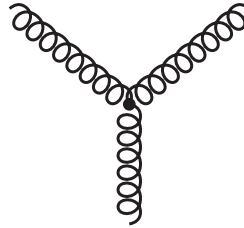
- Lagrangedichte:

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{\psi}(i\partial - m)\psi - g\bar{\psi}\gamma^\mu T^a \psi A_\mu^a - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a,\mu\nu}$$

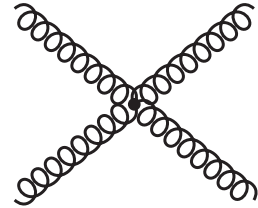
→ Wechselwirkungen:



$$\sim \bar{\psi}\gamma^\mu T^a \psi A_\mu^a$$



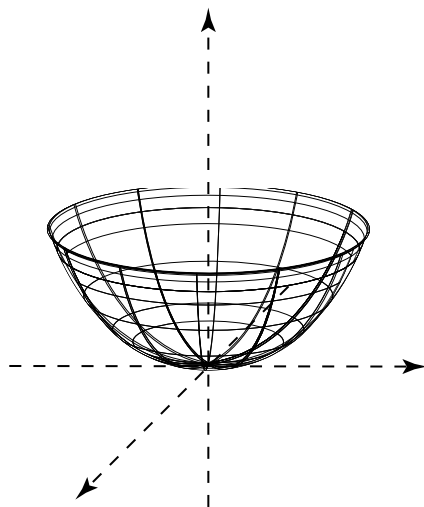
$$\sim A^3$$



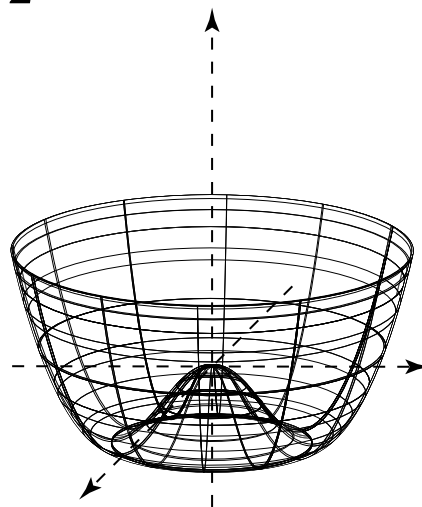
$$\sim A^4$$

ϕ^4 -Potenzial

$$V = \mu^2 \phi\phi^* + \frac{\lambda}{2}(\phi\phi^*)^2$$



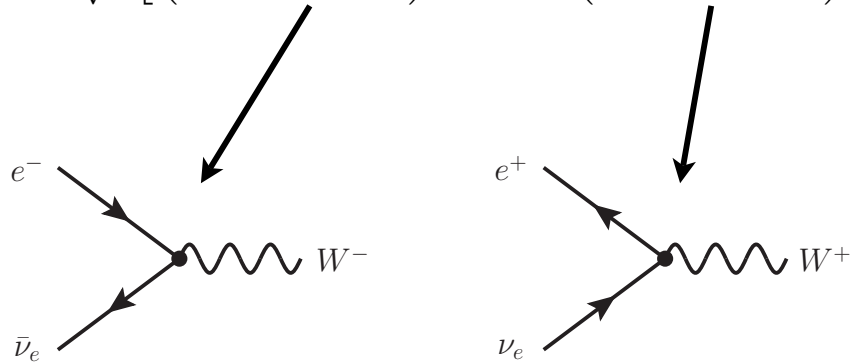
$$\mu^2 > 0$$



$$\mu^2 < 0$$

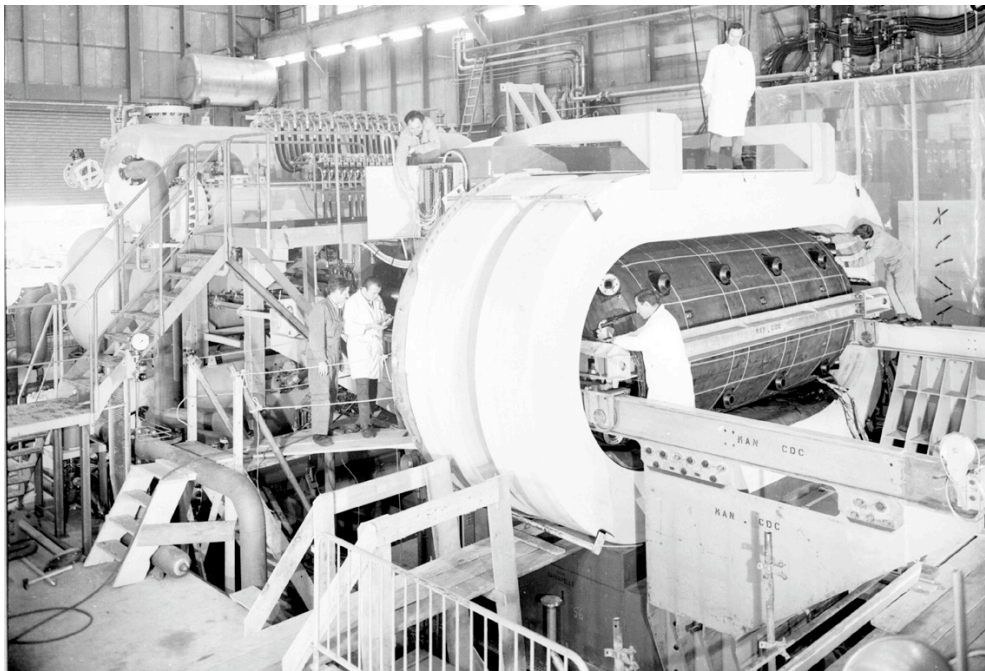
Geladene Ströme

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{CC} &= -\frac{g}{\sqrt{2}} [J_{\mu}^{+CC} W^{\mu,-} + J_{\mu}^{-CC} W^{\mu,+}] \\ &= -\frac{g}{\sqrt{2}} \left[\left(\bar{\nu}_e \gamma_{\mu} \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) e \right) W^{\mu,-} + \left(\bar{e} \gamma_{\mu} \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) \nu_e \right) W^{\mu,+} \right]\end{aligned}$$



5. Vorlesung

Die Gargamelle-Blasenkammer

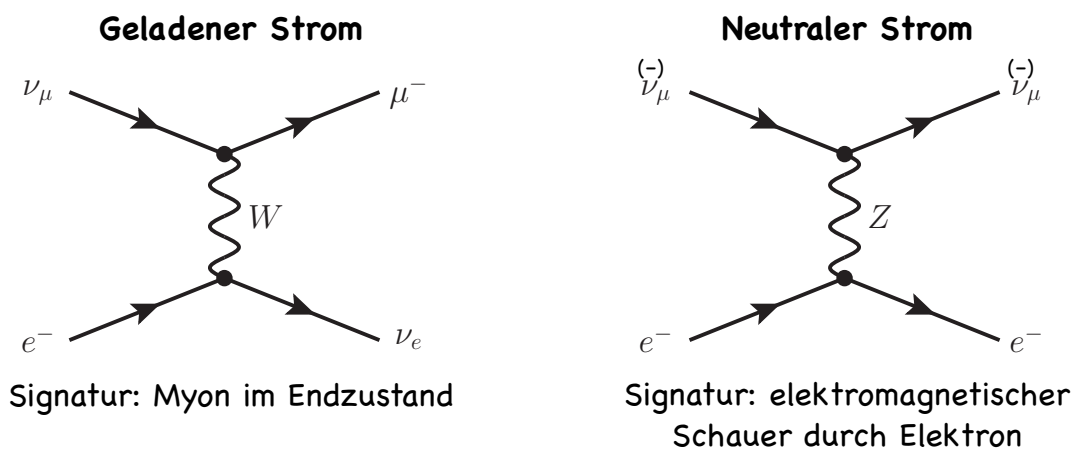


[CERN]

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

37

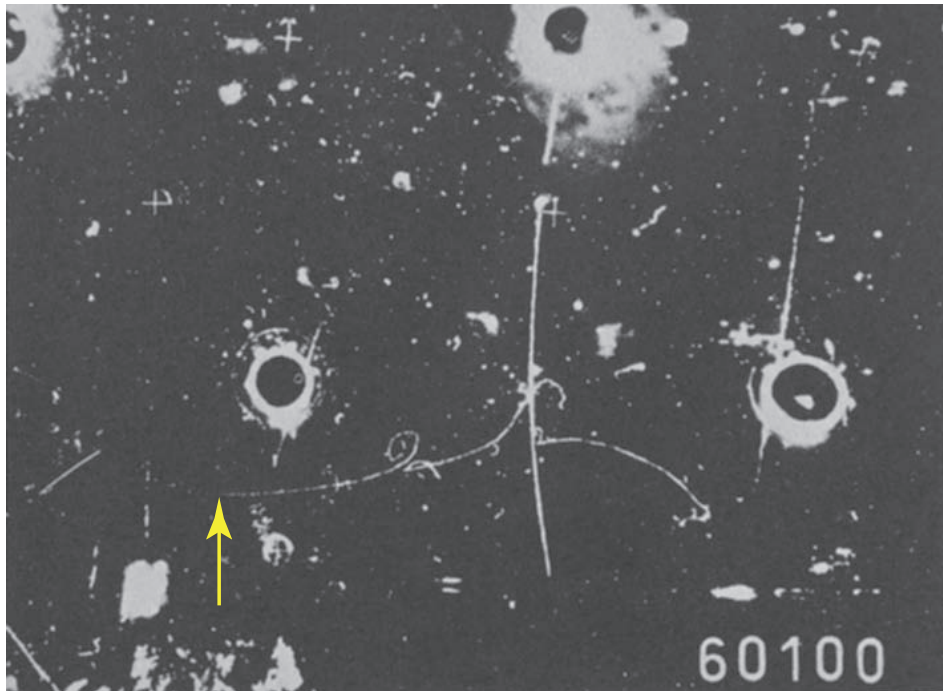
Neutrino-Elektron-Streuung



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

38

Neutraler Strom in Gargamelle

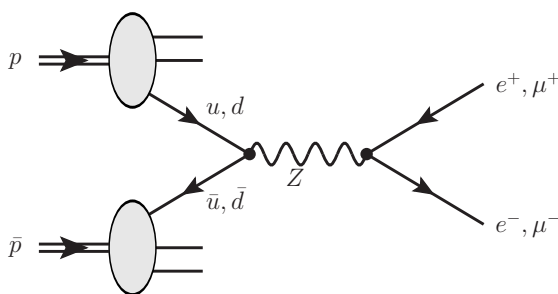


[F. J. Hasert et al., Phys. Lett. **B46** (1973), 121]

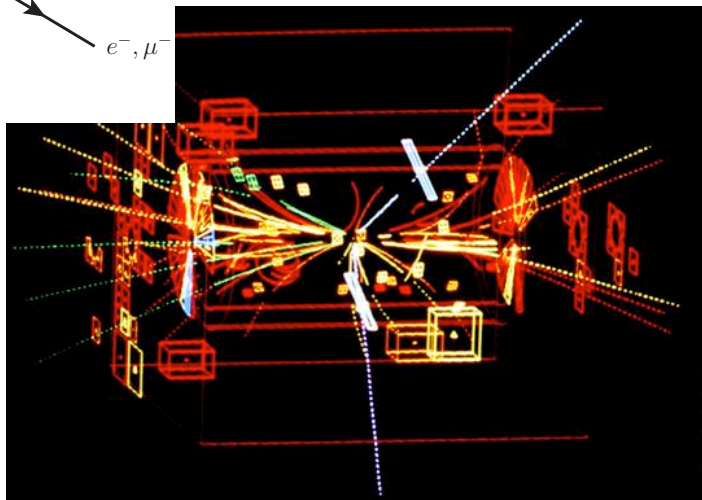
Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

39

Z-Entdeckung bei UA1 und UA2



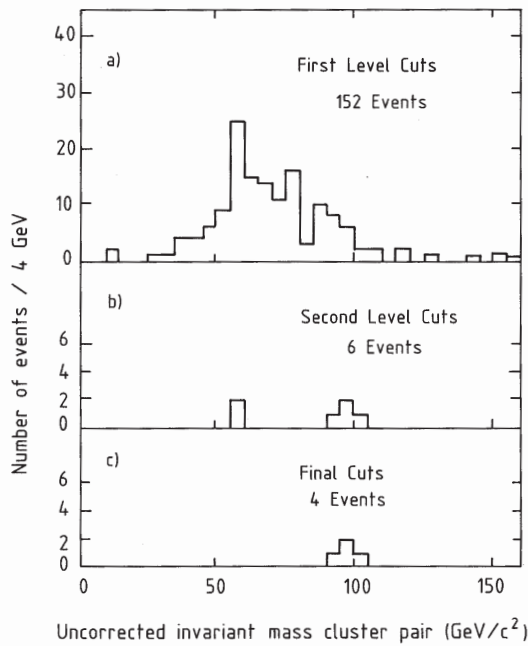
[<http://cdsweb.cern.ch>]



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

40

Z-Entdeckung bei UA1 und UA2

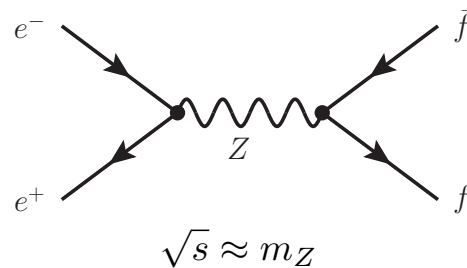
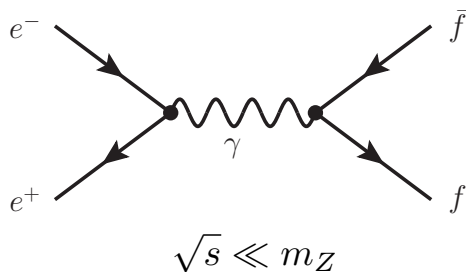


Identifikation über
invariante Masse
eines Leptonpaares:

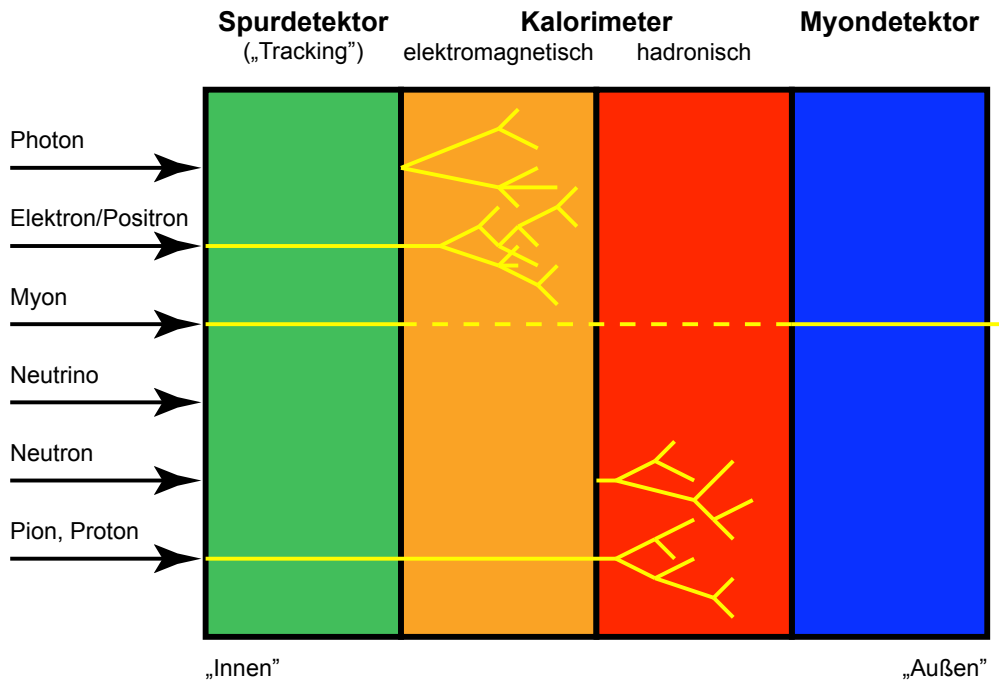
$$m_Z^2 = m_{\ell^+\ell^-}^2 = (p_{\ell^+} + p_{\ell^-})^2$$

[G. Arnison et al., Phys.
Lett. **B126** (1983), 398]

e⁺e⁻-Streuung



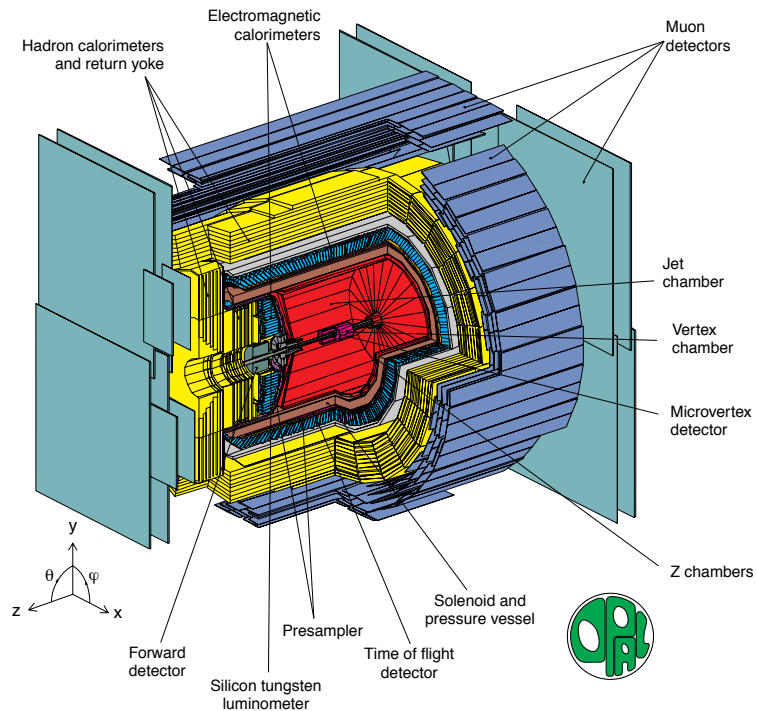
Teilchendetektor (schematisch)



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

43

Der OPAL-Detektor bei LEP

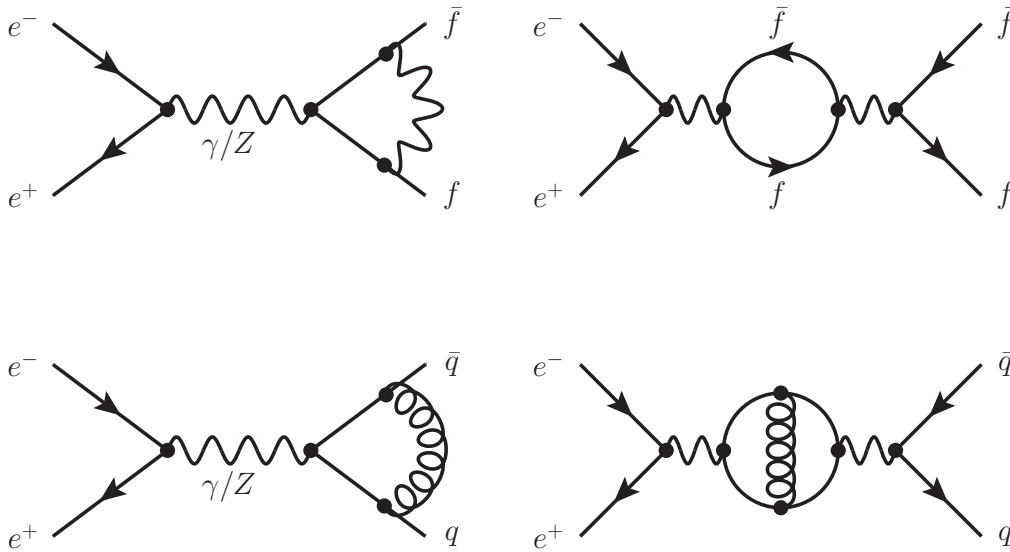


[<http://opal.web.cern.ch/Opal/>]

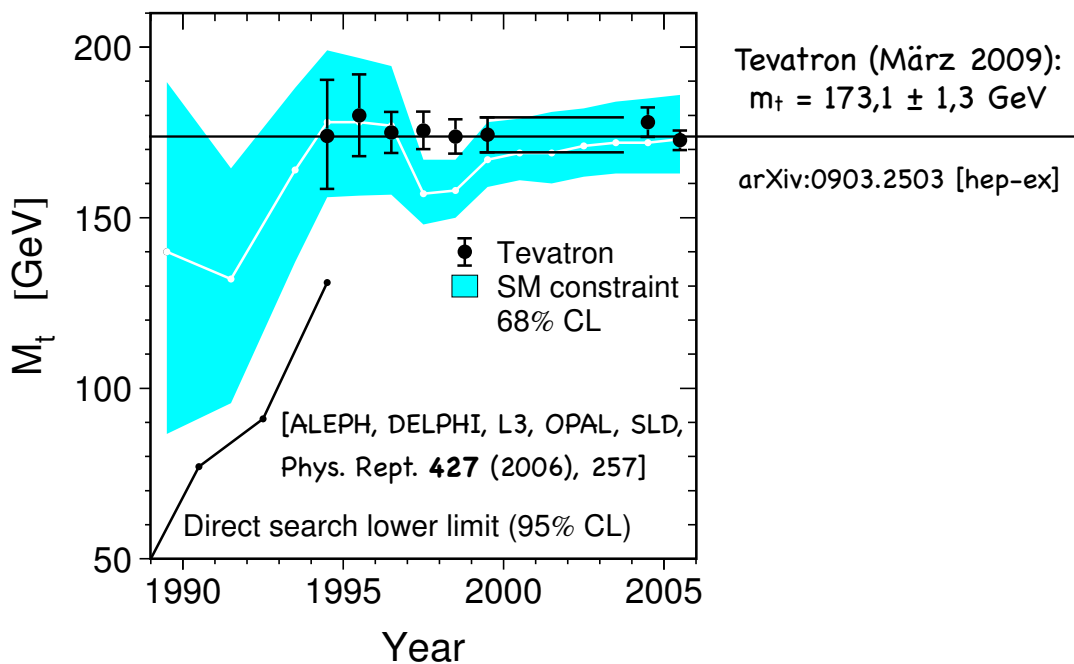
Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

44

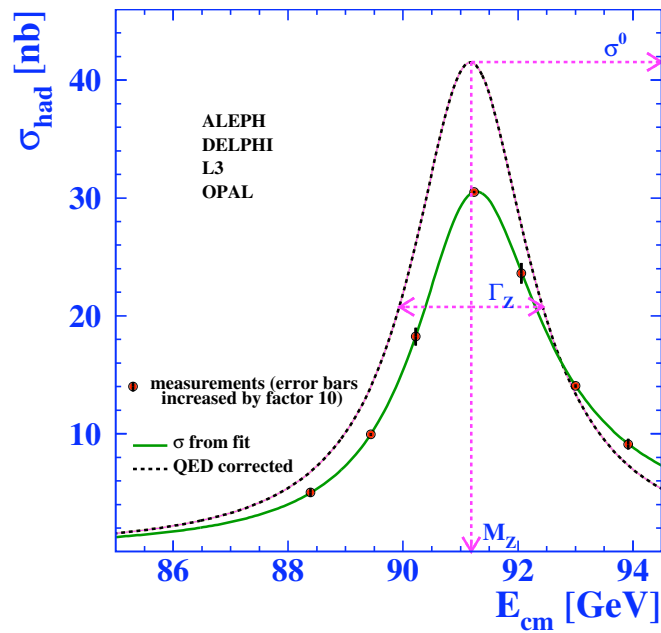
Beispiele Strahlungskorrekturen



Vorhersage Top-Quark-Masse



Z-Resonanz: σ_{had}

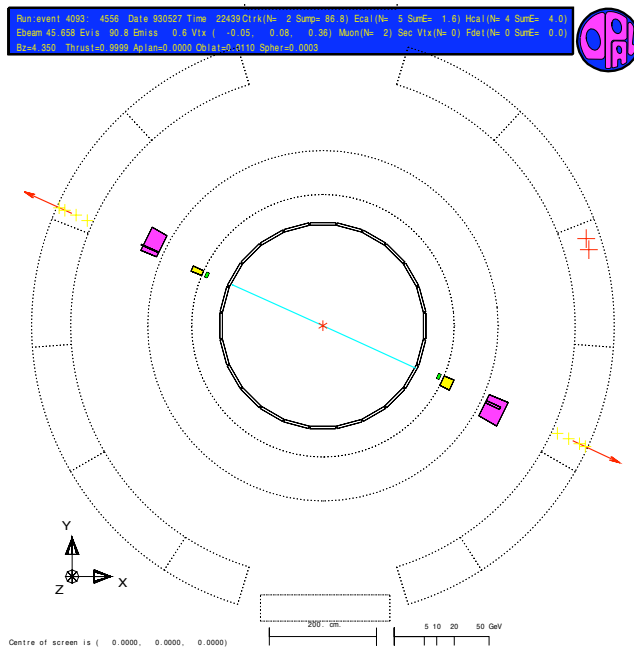


[ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, SLD, Phys. Rept. **427** (2006), 257]

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

47

LEP-I: $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

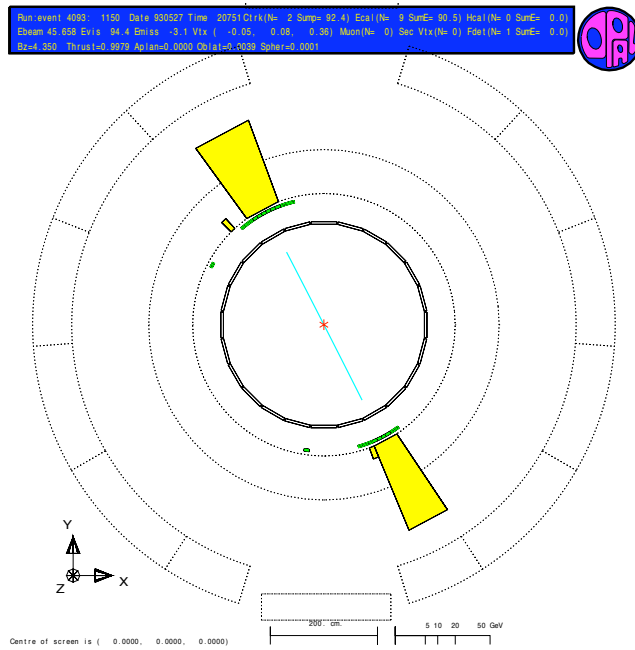


[<http://opal.web.cern.ch/Opal/events/opalpics.html>]

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

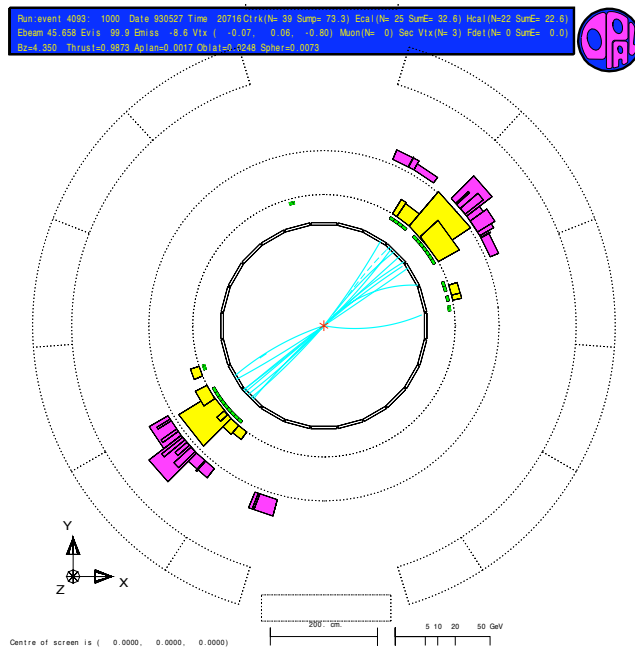
48

LEP-I: $Z \rightarrow e^+ e^-$



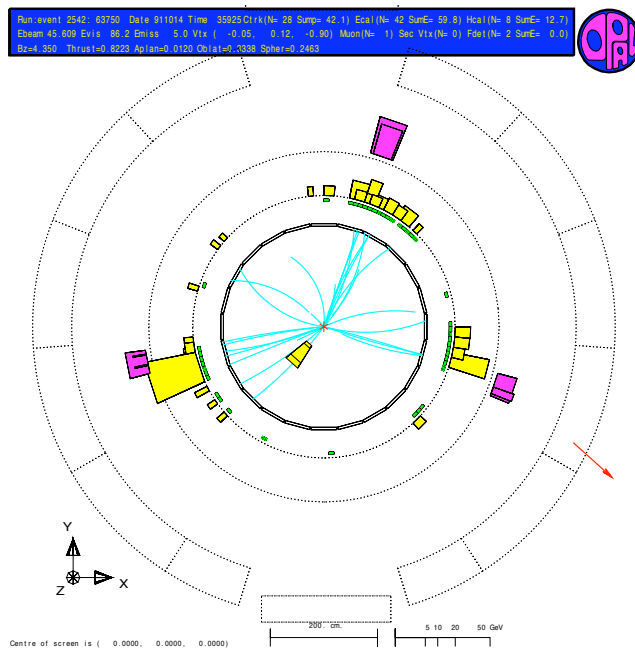
[<http://opal.web.cern.ch/Opal/events/opalpics.html>]

LEP-I: $Z \rightarrow qq$



[<http://opal.web.cern.ch/Opal/events/opalpics.html>]

LEP-I: $Z \rightarrow q\bar{q}g$



[<http://opal.web.cern.ch/Opal/events/opalpics.html>]

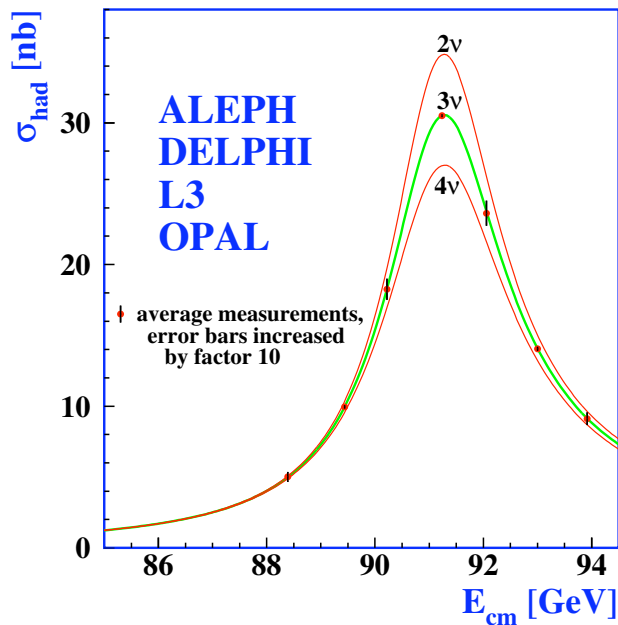
Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

51

U. Husemann, Experimentelle Elementarteilchenphysik

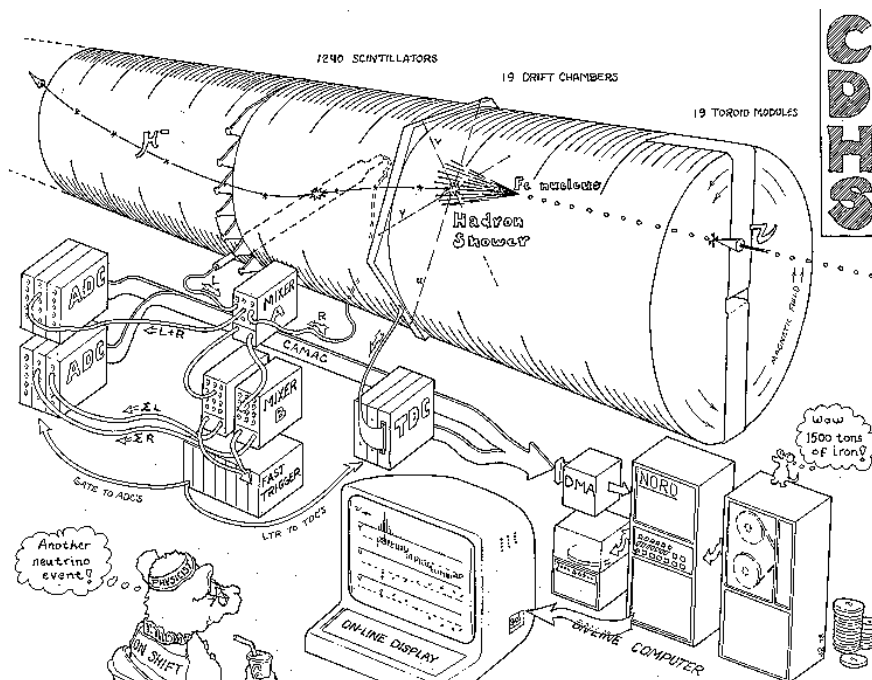
6. Vorlesung

Zahl der leichten Neutrinos



[ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, SLD, Phys. Rept. 427 (2006), 257]

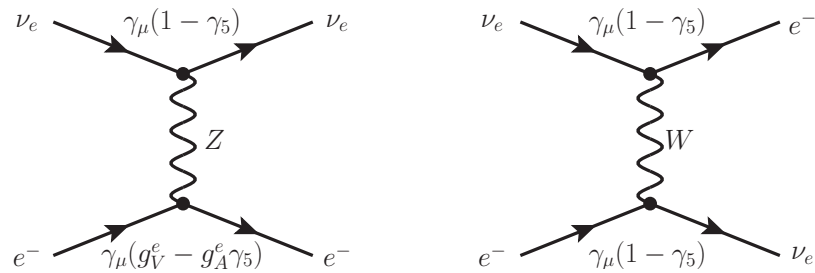
Neutrino-Elektron-Streuung



Neutrino-Elektron-Streuung

$$\begin{aligned} \nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^- : \quad \sigma &= \frac{G_F^2 s}{3\pi} [(g_V^e)^2 + g_V^e g_A^e + (g_A^e)^2] \\ \bar{\nu}_\mu e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^- : \quad \sigma &= \frac{G_F^2 s}{3\pi} [(g_V^e)^2 - g_V^e g_A^e + (g_A^e)^2] \\ \nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^- : \quad \sigma &= \frac{G_F^2 s}{3\pi} [(g_V^e + 1)^2 + (g_V^e + 1)(g_A^e + 1) + (g_A^e + 1)^2] \\ \bar{\nu}_e e^- \rightarrow \bar{\nu}_e e^- : \quad \sigma &= \frac{G_F^2 s}{3\pi} [(g_V^e + 1)^2 - (g_V^e + 1)(g_A^e + 1) + (g_A^e + 1)^2] \end{aligned}$$

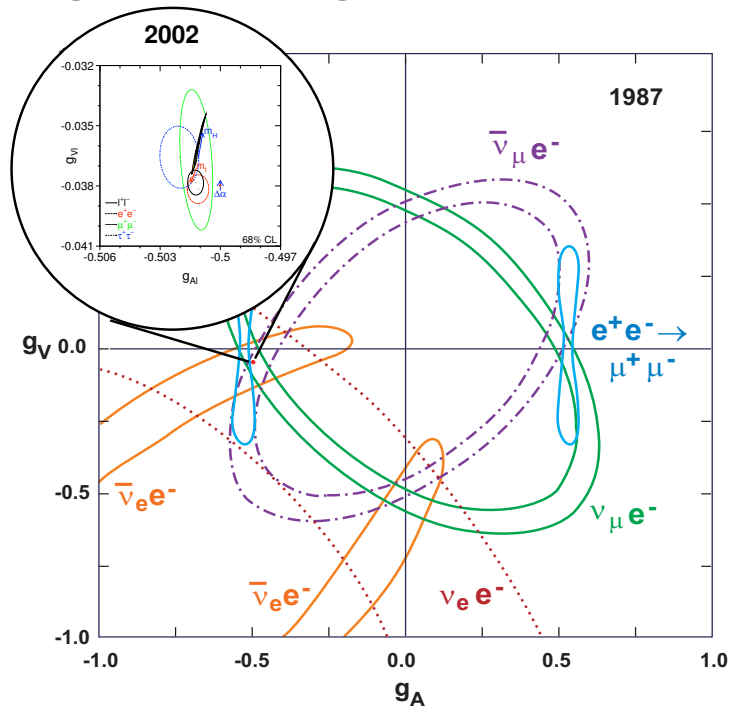
● Beispiel: $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

55

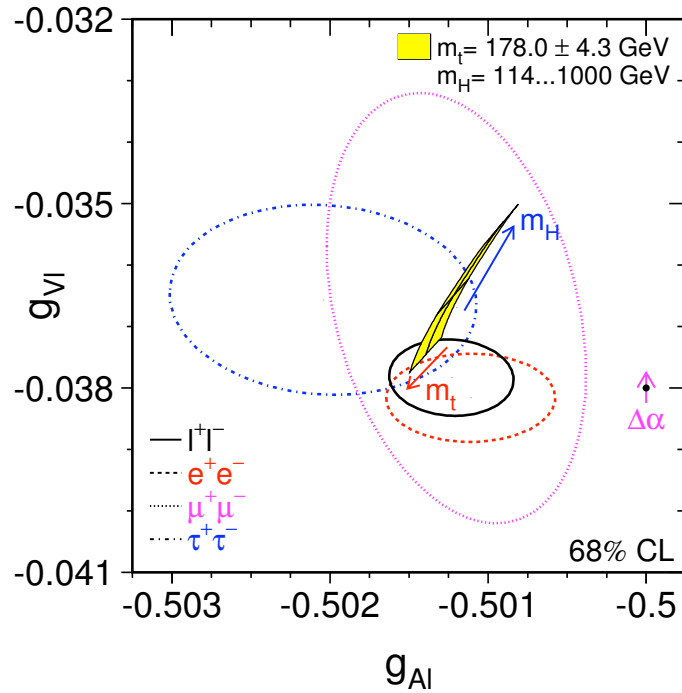
g_V und g_A vor LEP



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

56

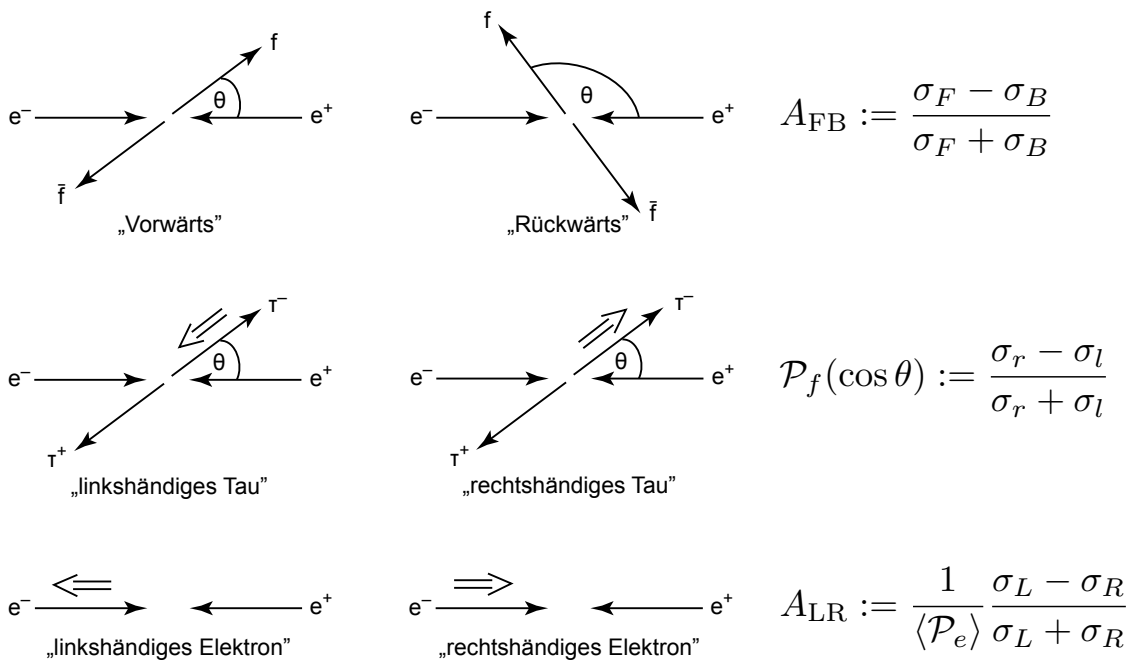
g_V und g_A nach LEP



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

57

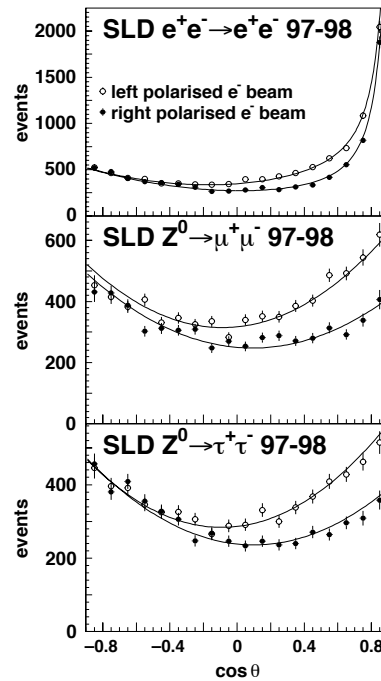
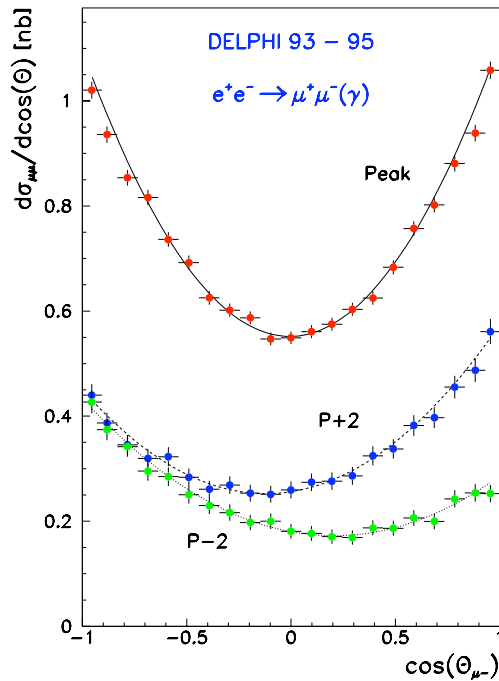
Übersicht: Asymmetrien



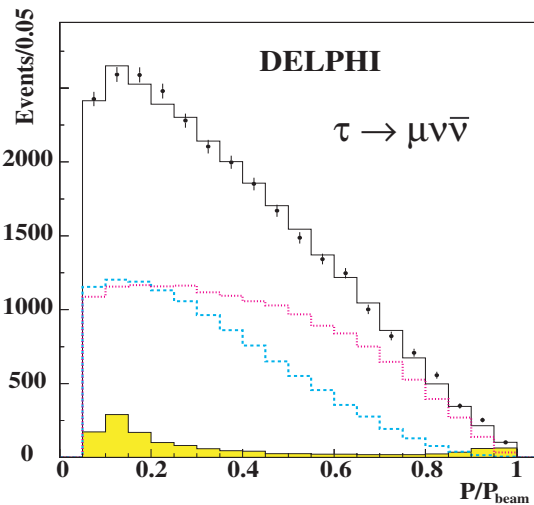
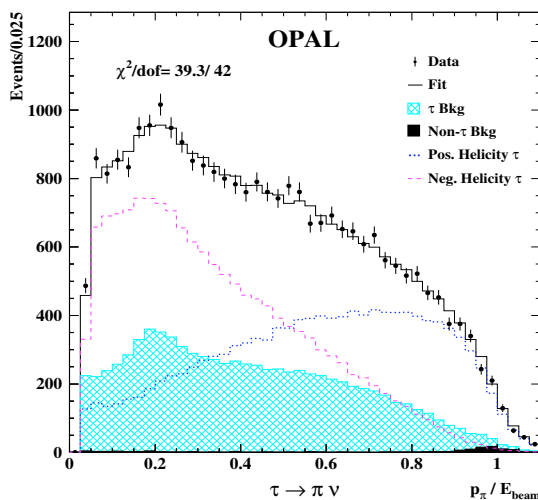
Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

58

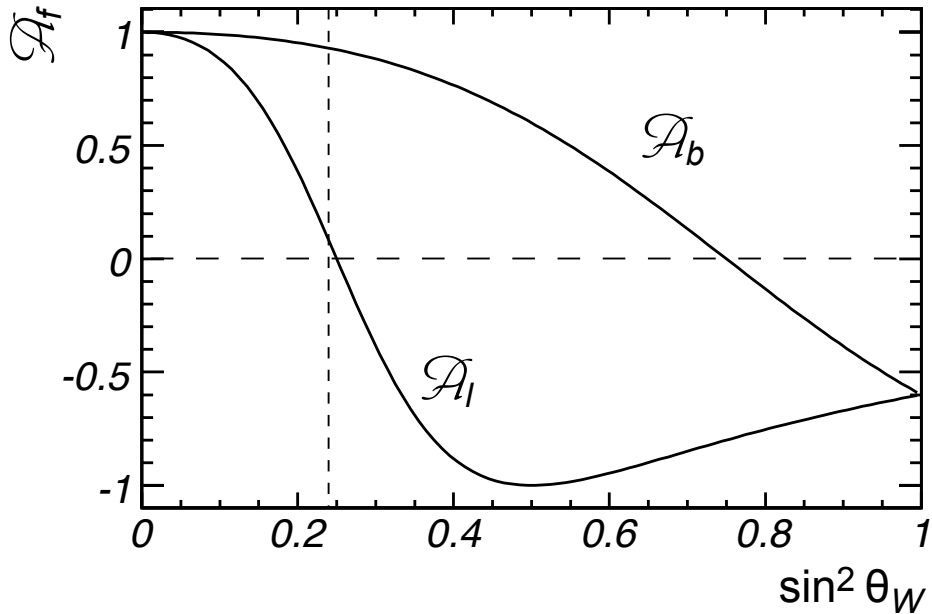
Winkelverteilungen: LEP & SLC



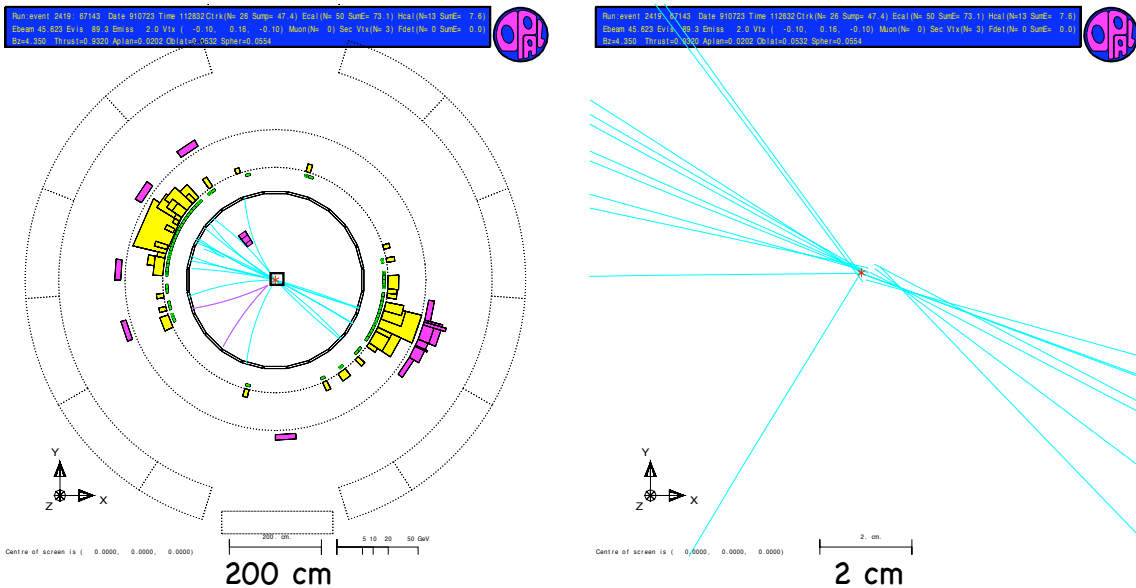
Tau-Polarisation in $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$

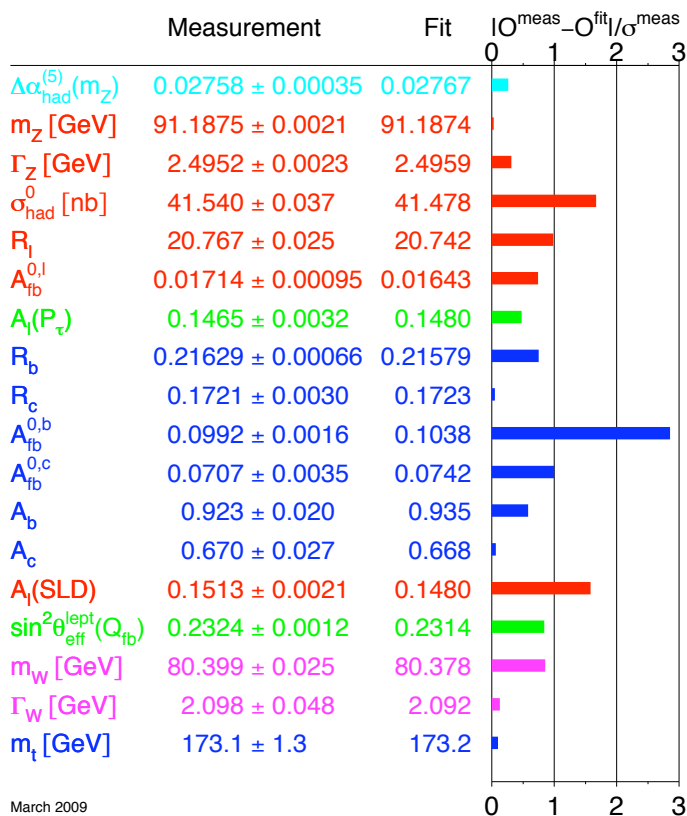
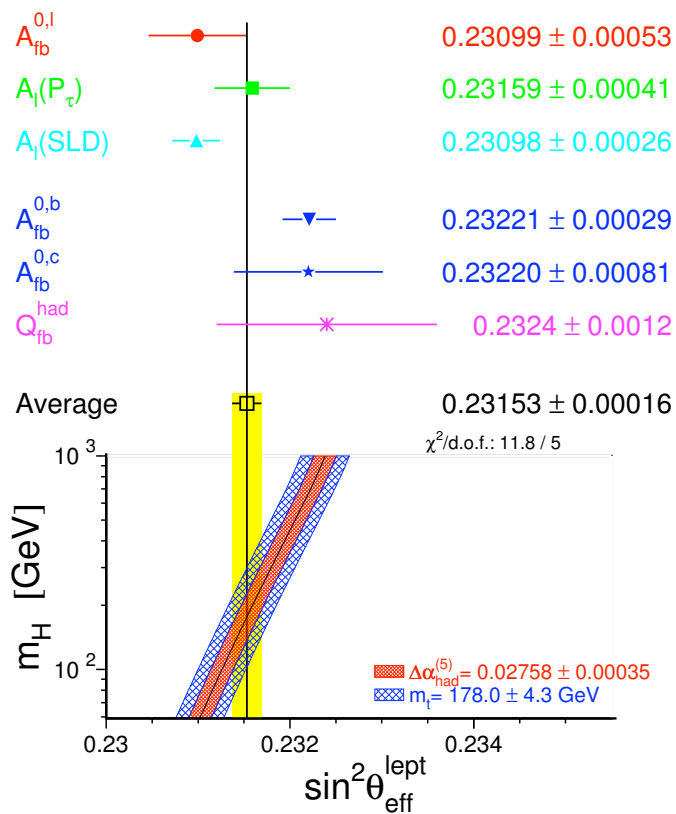


Schwacher Mischungswinkel



B-Tagging mit Sekundärvertex



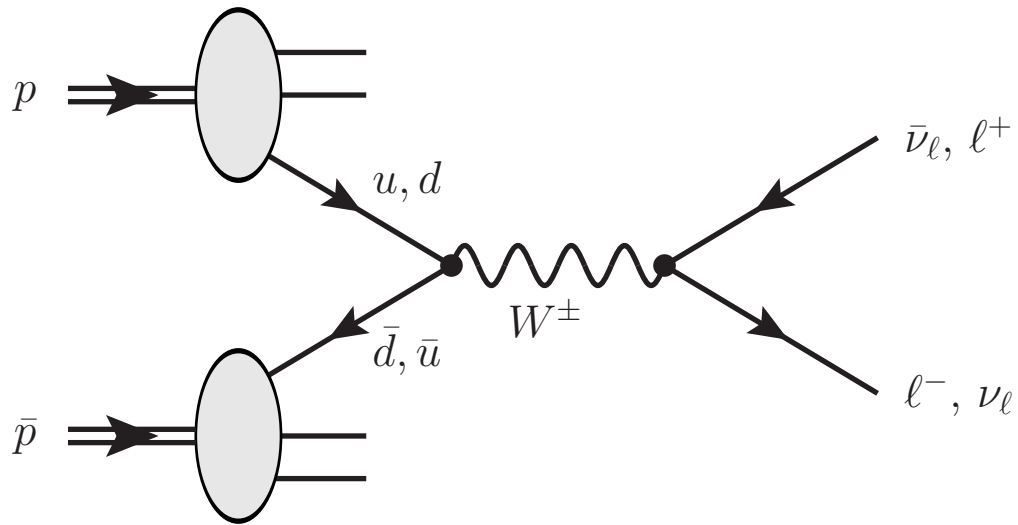


7. Vorlesung

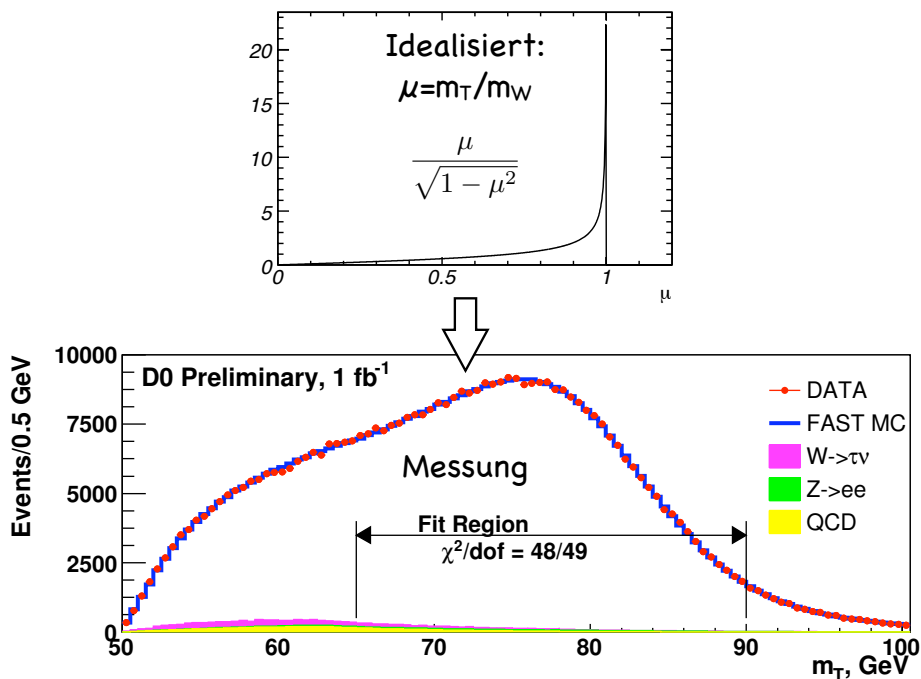
Aktuelle Termine

- 29. Mai 2009: Abgabe des 4. Übungsblatts
 - Bis 15 Uhr
 - Entweder Postfach U. Husemann (NEW 15 2'413) oder...
 - ... Kasten vor Sekretariat EEP (NEW 15 2'415)
- 1. Juni 2009: keine Vorlesung (Pfingsten)
- 3. Juni 2009: Ausgabe des 5. Übungsblatts in Übung

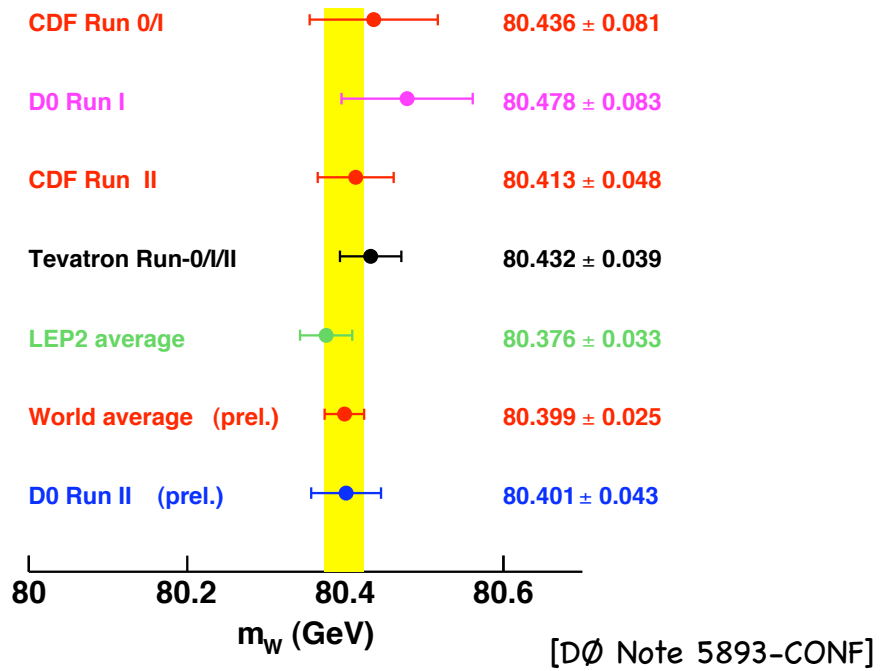
W-Produktion in p-pbar-Kollisionen



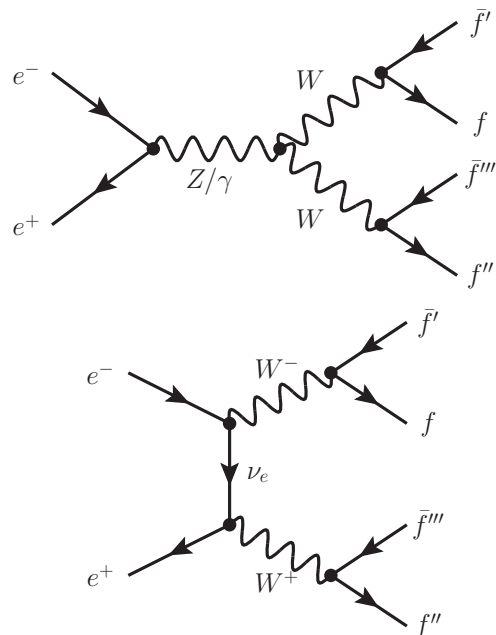
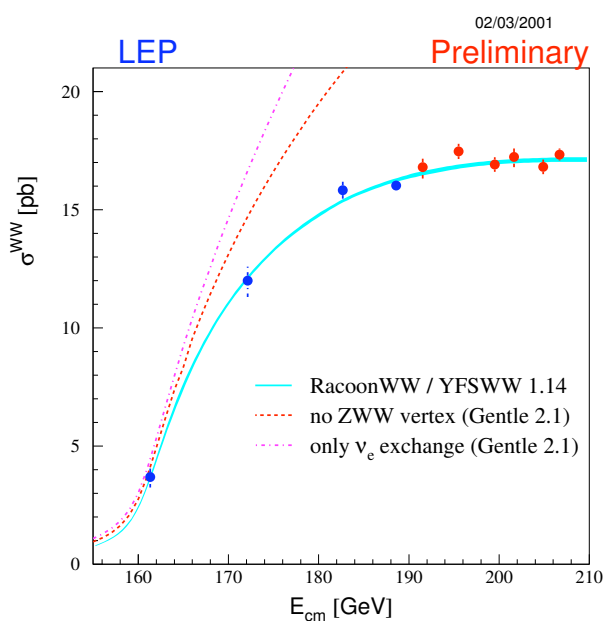
Jacobi-Kante in m_T



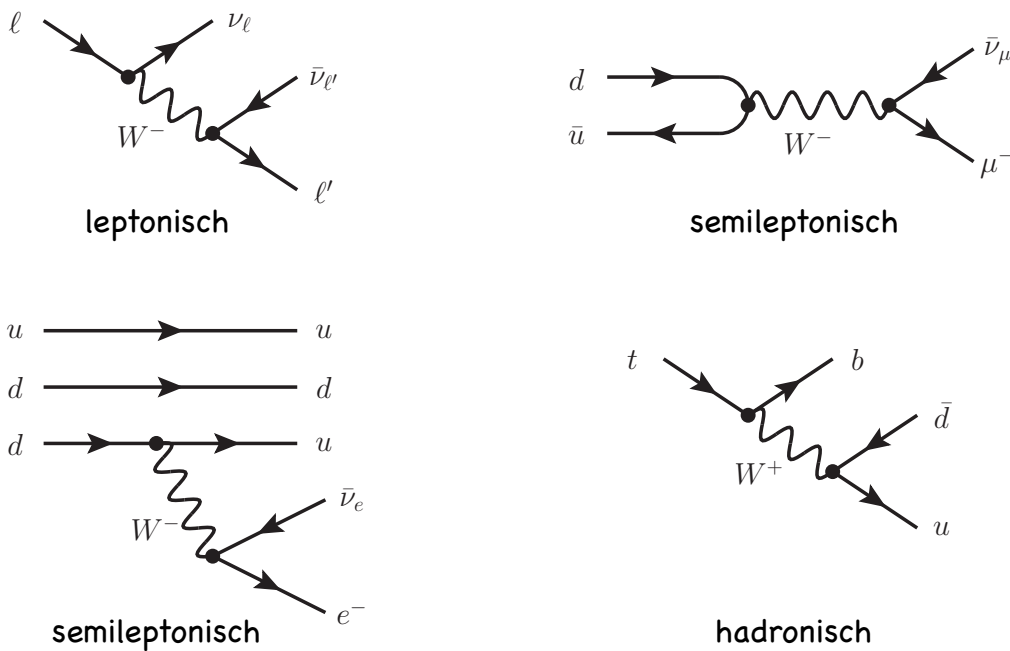
Resultate: W-Masse (März '09)



WW-Produktion bei LEP-II



Klassifikation: W-Kopplungen



CKM-Matrix

- Geladener schwacher Strom:

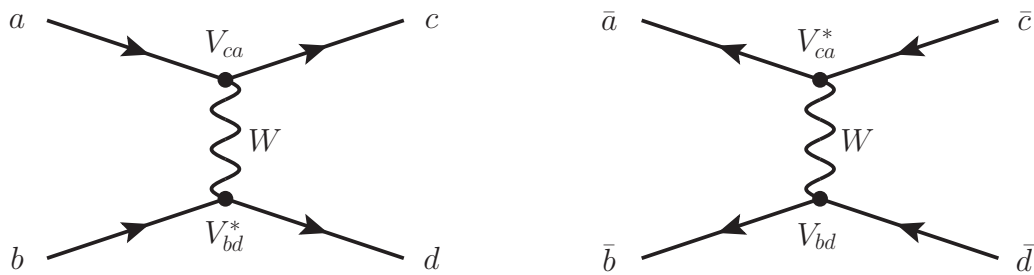
$$J_\mu^{+CC} = (\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}) \gamma_\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) V_{\text{CKM}} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$\text{mit } V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}, \quad V^\dagger V = V V^\dagger = 1$$

- Zahl der Freiheitsgrade der CKM-Matrix:

	3 × 3-Matrix		N × N-Matrix	
	Beträge	Phasen	Beträge	Phasen
Gesamt	9	9	N^2	N^2
–Quark-Phasen		5		$2N - 1$
–reelle Gleichungen	3		N	
–komplexe Gleichungen	3	3	$N(N - 1)/2$	$N(N - 1)/2$
Resultat	3	1	$N(N - 1)/2$	$(N - 1)(N - 2)/2$

CP-Verletzung



$$\begin{aligned}
 A(ab \rightarrow cd) &\sim V_{ca} V_{bd}^* \left[\bar{c} \gamma_\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) a \right] \left[\bar{d} \gamma^\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) b \right] \\
 A(\bar{a}\bar{b} \rightarrow \bar{c}\bar{d}) &\sim V_{ca}^* V_{bd} \left[\bar{a} \gamma_\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) c \right] \left[\bar{b} \gamma^\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) d \right] = A^\dagger \\
 A_{CP} &\sim V_{ca} V_{bd}^* \left[\bar{a} \gamma_\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) c \right] \left[\bar{b} \gamma^\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) d \right] \neq A^\dagger
 \end{aligned}$$

Wolfenstein-Parametrisierung

- Entwicklung der CKM-Matrix in Cabibbo-Winkel
 $\lambda := \sin \theta_c \approx 0,22$
- 3 + 1 Parameter: λ, A, ρ, η

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

8. Vorlesung

CKM-Matrix

- CKM-Matrix:

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}, \quad V^\dagger V = V V^\dagger = 1$$

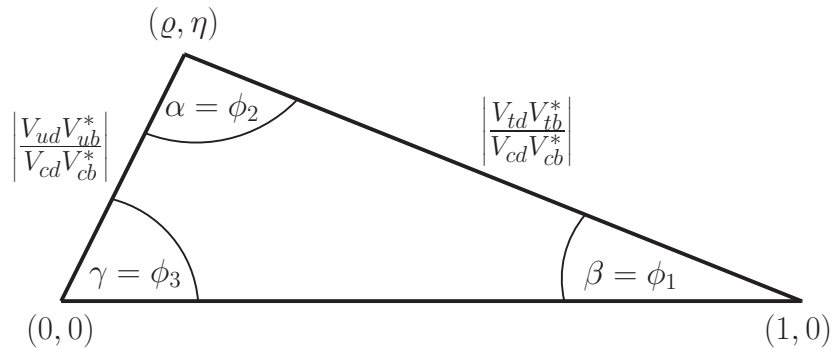
- Wolfenstein-Parametrisierung:

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

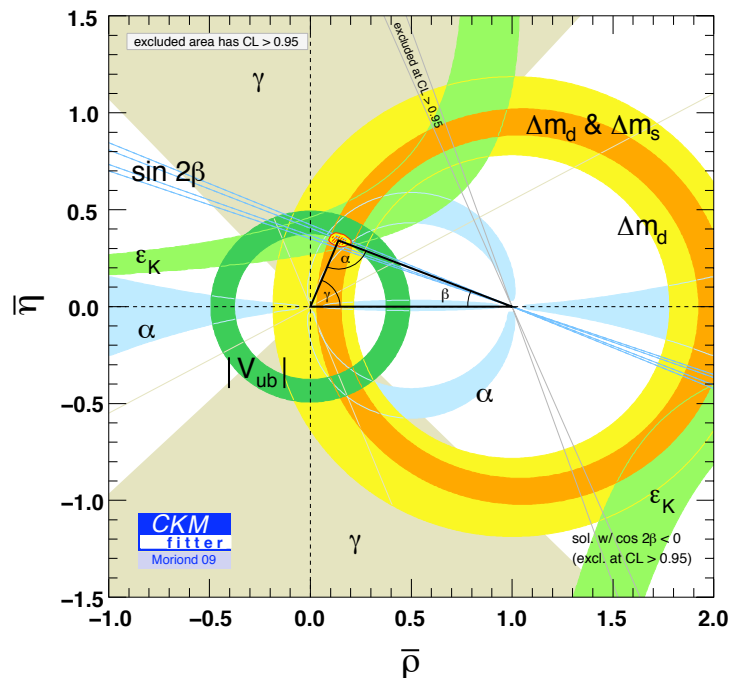
Unitaritätsdreieck

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

$$\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} + \frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} + \frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} = 0$$



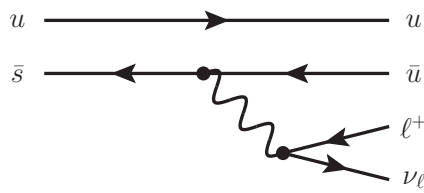
Messung des Unitaritätsdreiecks



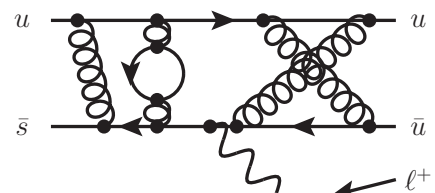
[<http://ckmfitter.in2p3.fr>]

Formfaktoren

• Semileptonischer Kaon-Zerfall

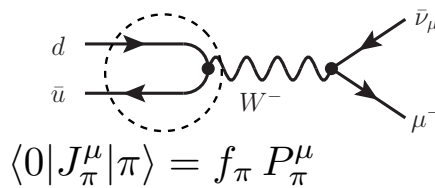


idealisiert



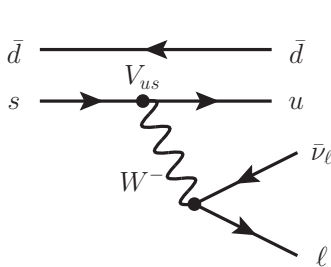
real

• Pion-Zerfall

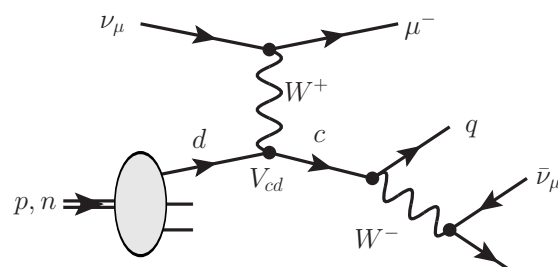


$$\langle 0 | J_\pi^\mu | \pi \rangle = f_\pi P_\pi^\mu$$

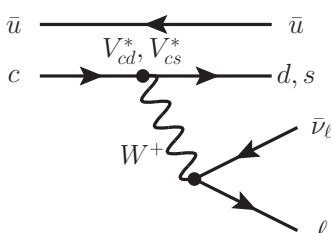
CKM-Matrixelemente



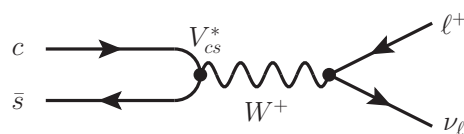
(a)



(b)

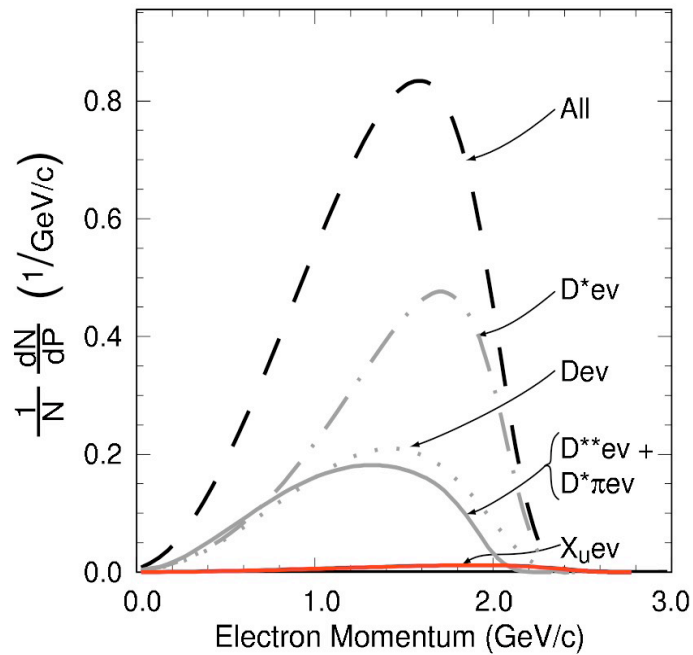


(c)

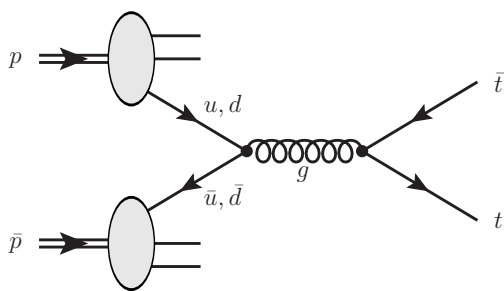


(d)

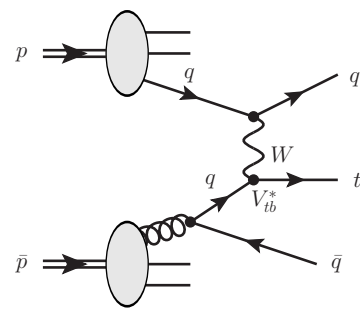
$|V_{ub}|$ und $|V_{cb}|$



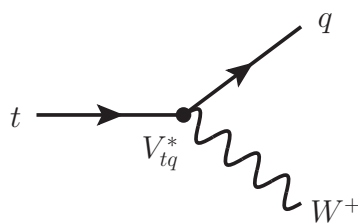
$|V_{td}|$, $|V_{ts}|$, $|V_{tb}|$



Top-Antitop-Produktion in QCD

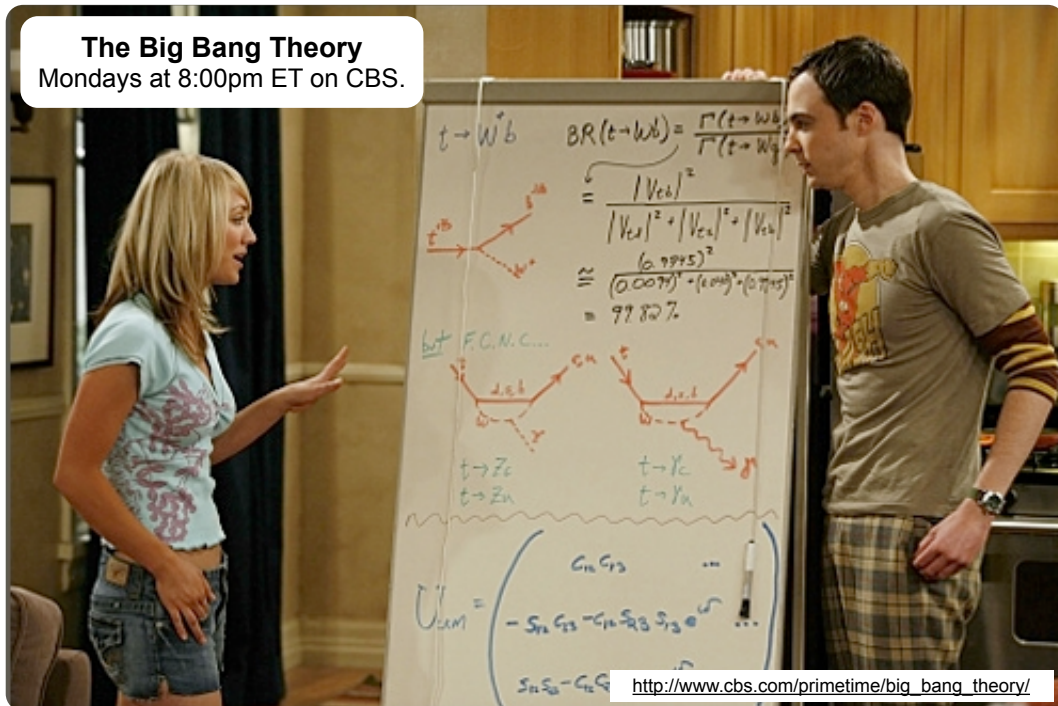


Elektroschwache Produktion einzelner Top-Quarks



Top-Quark-Zerfall

V_{tb} goes Hollywood



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

83

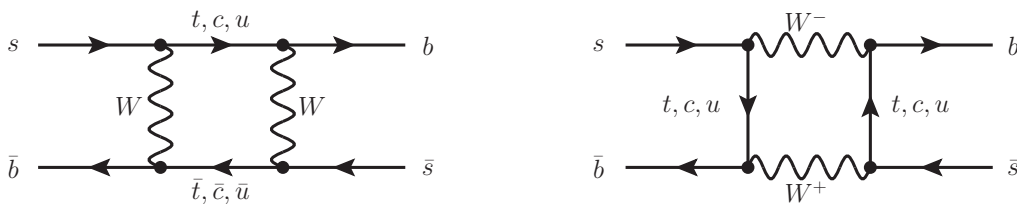
U. Husemann, Experimentelle Elementarteilchenphysik

9. Vorlesung

Flavor-Oszillationen

(Details zum Formalismus: U. Nierste, Three Lectures on Meson Mixing and CKM Phenomenology, arXiv:0904.1869 [hep-ph])

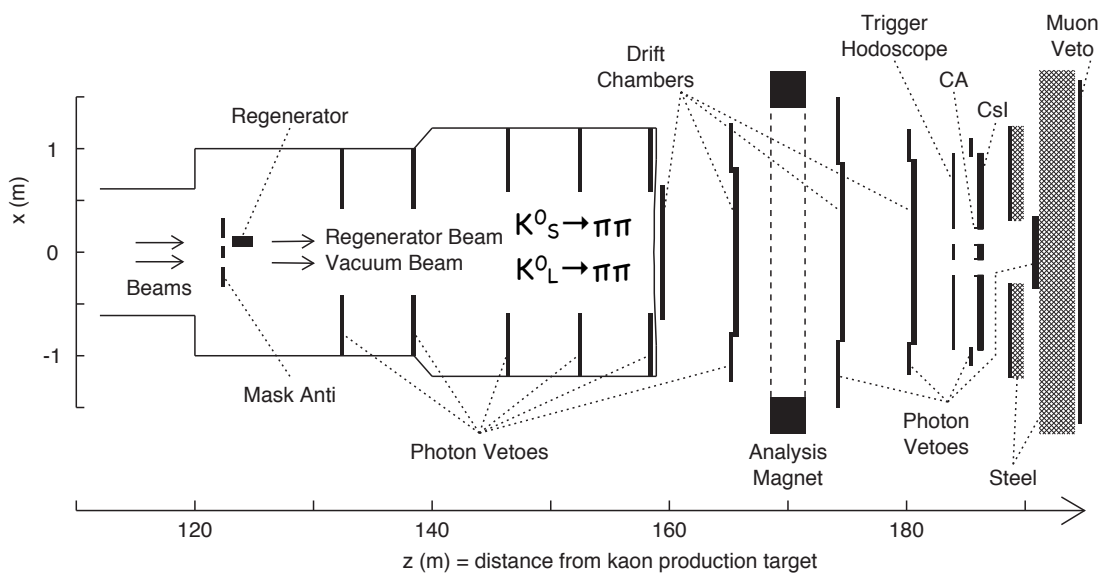
$$\begin{aligned}
 |K^0\rangle &= |\bar{s}d\rangle & \leftrightarrow & & |\bar{K}^0\rangle &= |s\bar{d}\rangle, \\
 |B_d^0\rangle &= |\bar{b}d\rangle & \leftrightarrow & & |\bar{B}_d^0\rangle &= |d\bar{b}\rangle, \\
 |B_s^0\rangle &= |\bar{b}s\rangle & \leftrightarrow & & |\bar{B}_s^0\rangle &= |s\bar{b}\rangle.
 \end{aligned}$$



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

85

KTeV-Experiment

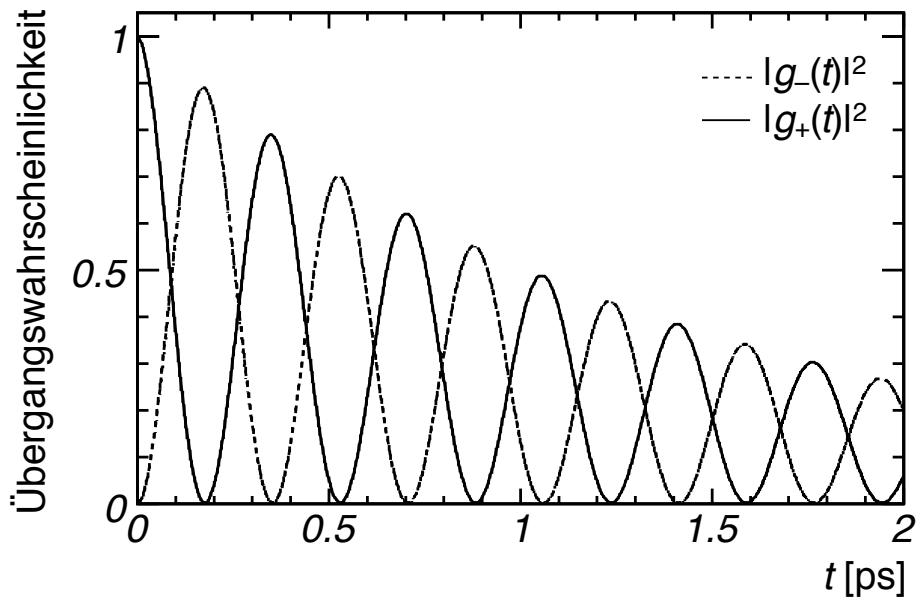


[A. Alavi-Harati et al., Phys. Rev. **D67** (2003), 012005]

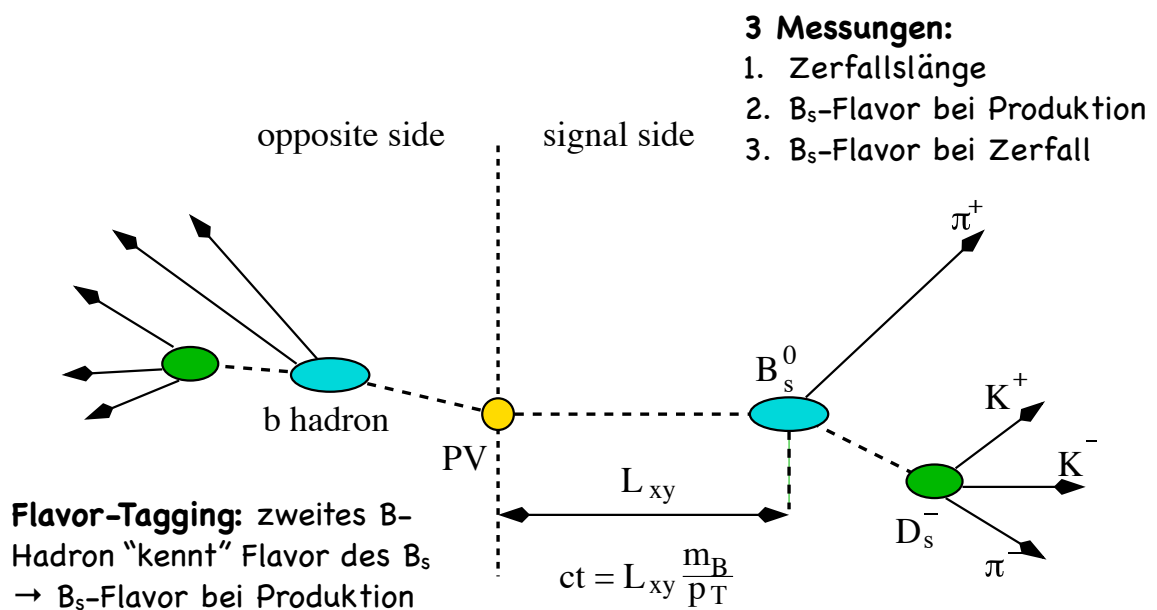
Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

86

B_s-Oszillationen

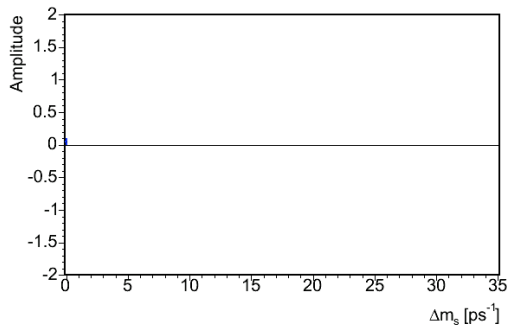


B_s-Oszillationen am Tevatron

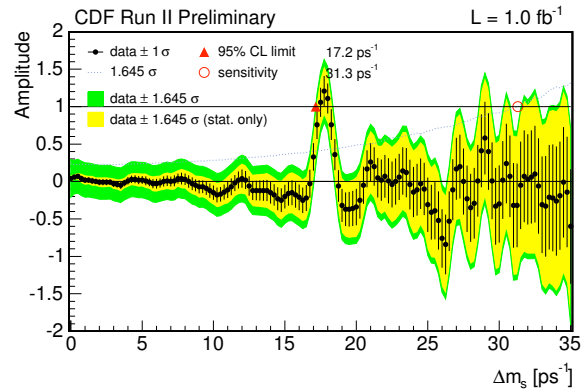


[S. Hansmann-Menzemer, DESY-Seminar, June 2006]

B_s-Oszillationen: Resultat

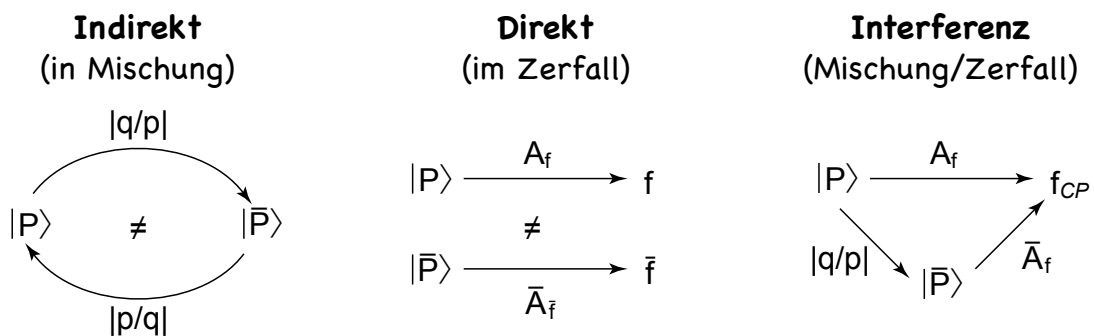


[A. Heijboer]

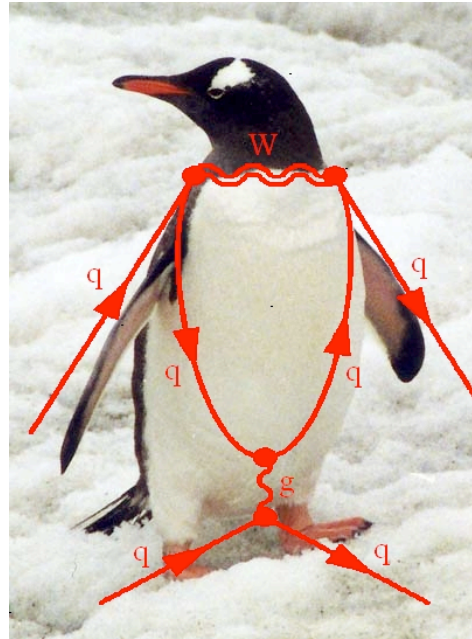
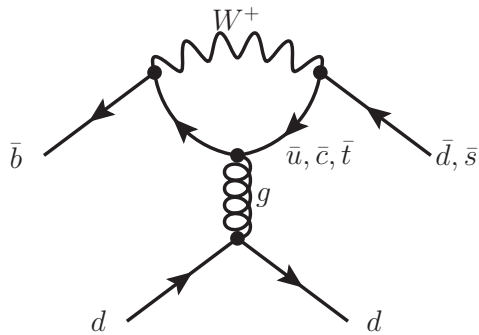


[A. Abulencia et al.,
Phys. Rev. Lett. **97** (2006), 242003]

Klassifikation: CP-Verletzung



Pinguin-Diagramme



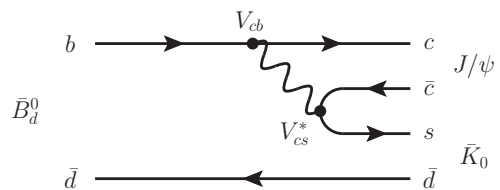
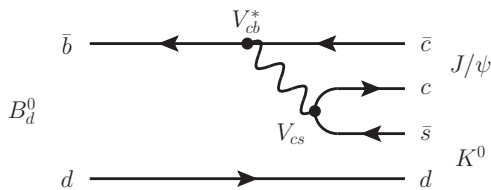
John Ellis



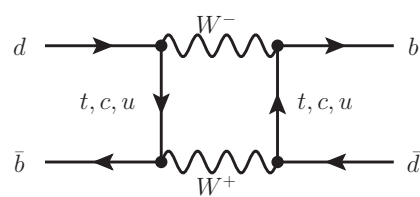
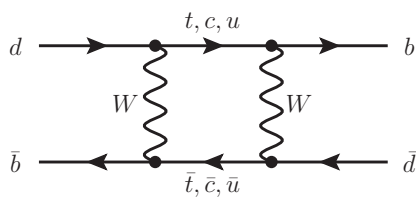
Melissa Franklin

Goldener Zerfall: $B \rightarrow J/\psi K_S$

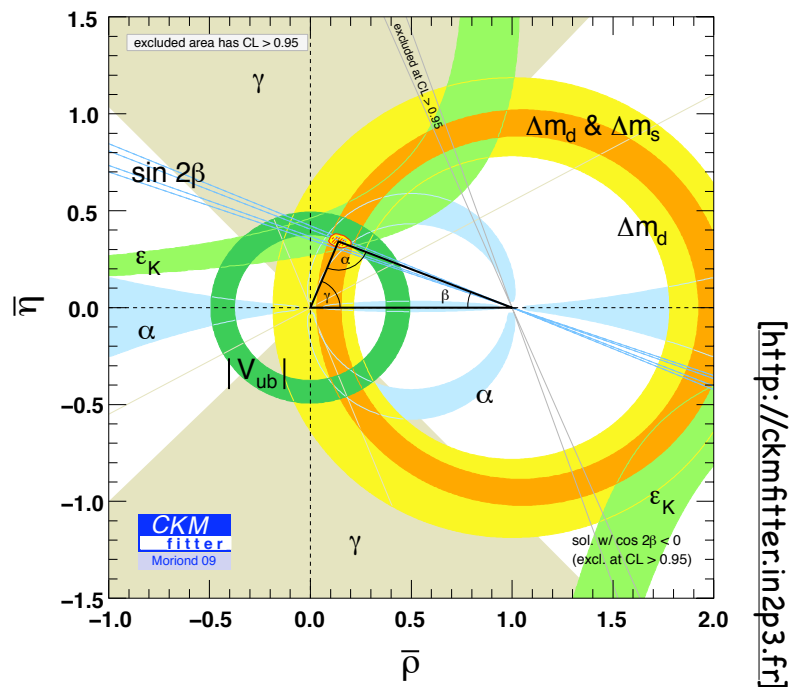
● Zerfall



● Oszillation



Messung des Unitaritätsdreiecks



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

93

U. Husemann, Experimentelle Elementarteilchenphysik

10. Vorlesung

Zahl der Farbladungen

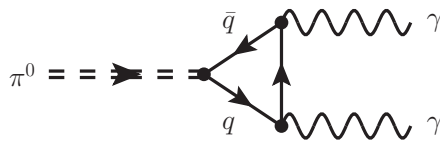
- Verhältnis R:

$$R(s) := \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})(s)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)(s)}$$

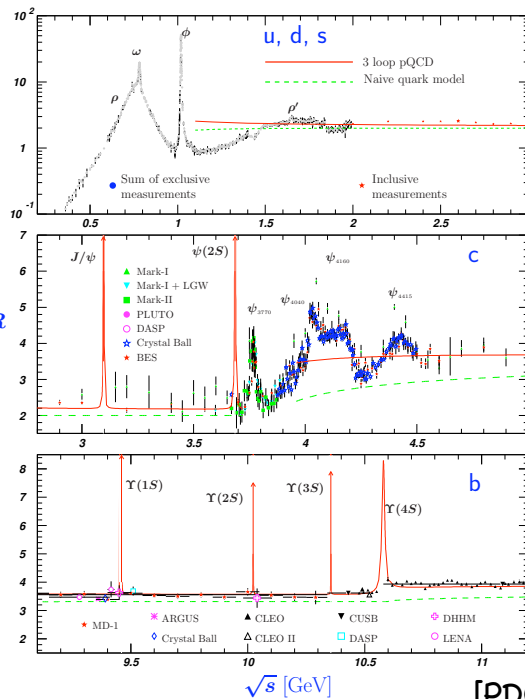
→ im naiven Partonmodell:

$$R = N_c \sum_q q^2$$

- Pionzerfall:



$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\alpha^2 m_{\pi^0}^3}{64\pi^3 f_\pi^2} N_c^2 (q_u^2 + q_d^2)^2$$



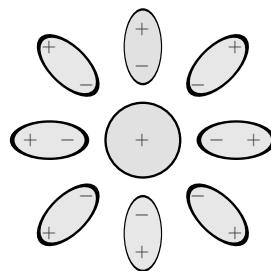
Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

[PDG]

95

Laufende QCD-Kopplung

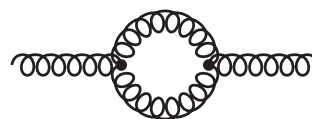
- Abschirmung einer Ladung in der QED:



- Abschirmung und Antiabschirmung in der QCD:



Fermionschleife: Abschirmung



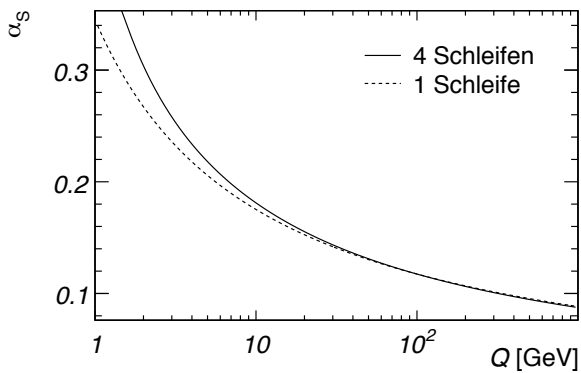
Glionschleife: Abschirmung

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

96

Laufende QCD-Kopplung

QCD-Vorhersage:

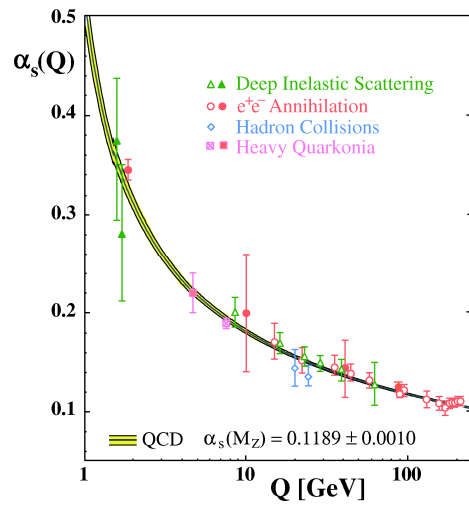


1-Schleifen-Näherung:

$$\alpha_S(Q^2) = \frac{1}{\beta_0 \ln \frac{Q^2}{\Lambda^2}}$$

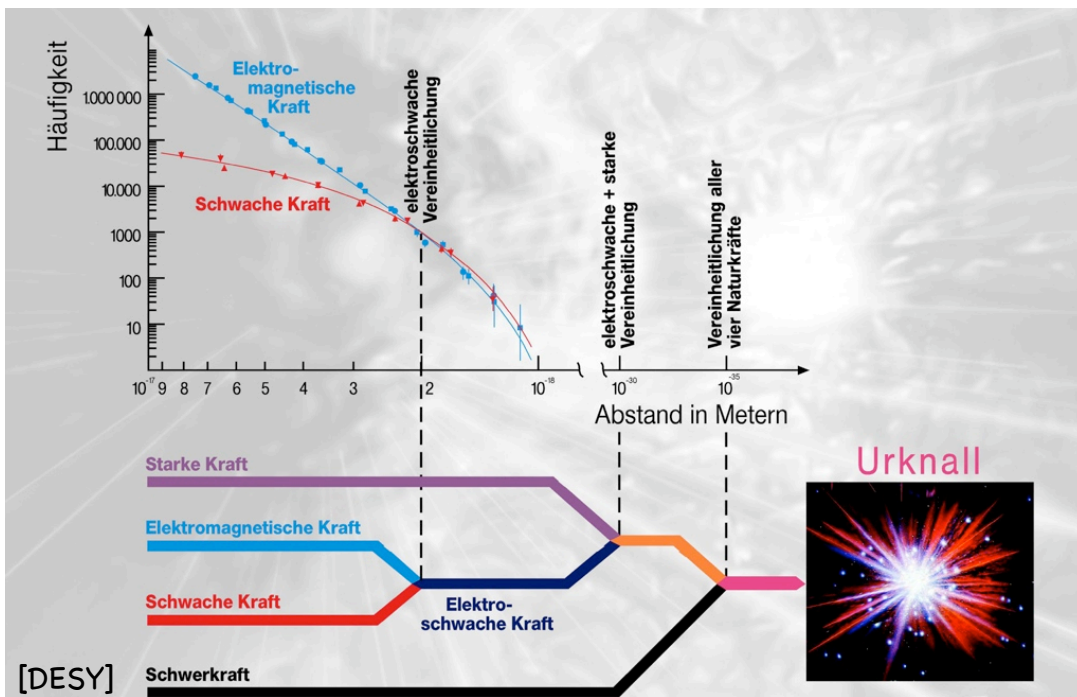
$$= \frac{12\pi}{(-2N_f + 33) \ln \frac{Q^2}{\Lambda^2}}$$

Experimentell:

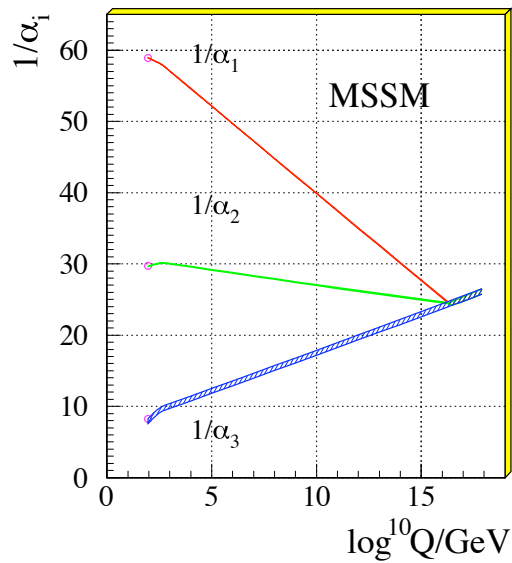
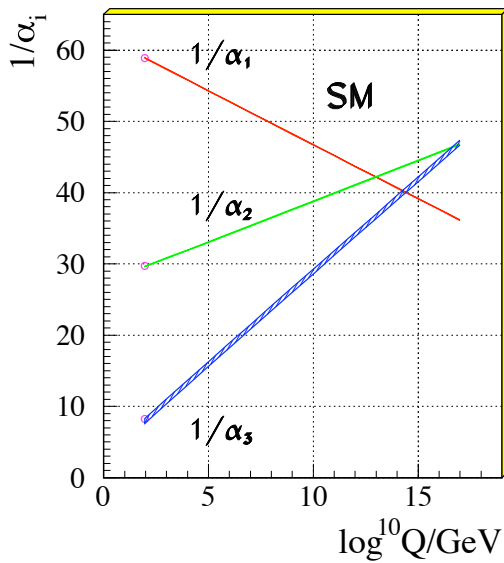


[S. Bethke, Prog. Part. Nucl. Phys. **58** (2007), 351]

NC und CC bei HERA



Vereinheitlichung der Kräfte



[D. I. Kazakov, hep-ph/0012288]

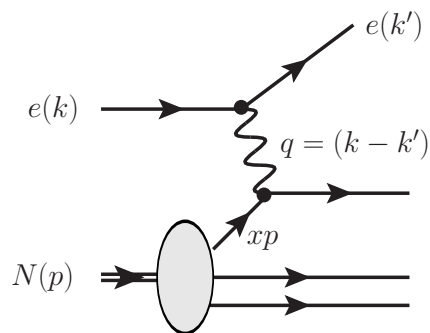
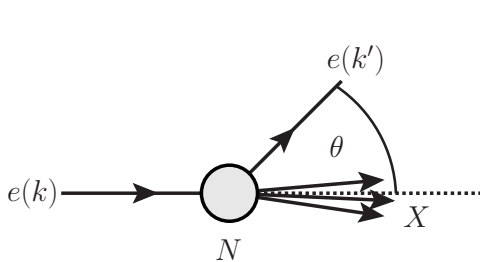
$$\alpha_1 := \frac{5 g'^2}{3 4\pi} = \frac{5}{3} \frac{\alpha}{\cos^2 \theta_W}, \quad \alpha_2 := \frac{g^2}{4\pi} = \frac{\alpha}{\sin^2 \theta_W}, \quad \alpha_3 := \frac{g_S^2}{4\pi} = \alpha_S$$

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

99

Tiefinelastische Streuung

● Kinematik:



$$Q^2 := -q^2 = -(k - k')^2$$

$$\nu := \frac{p \cdot q}{m_N}$$

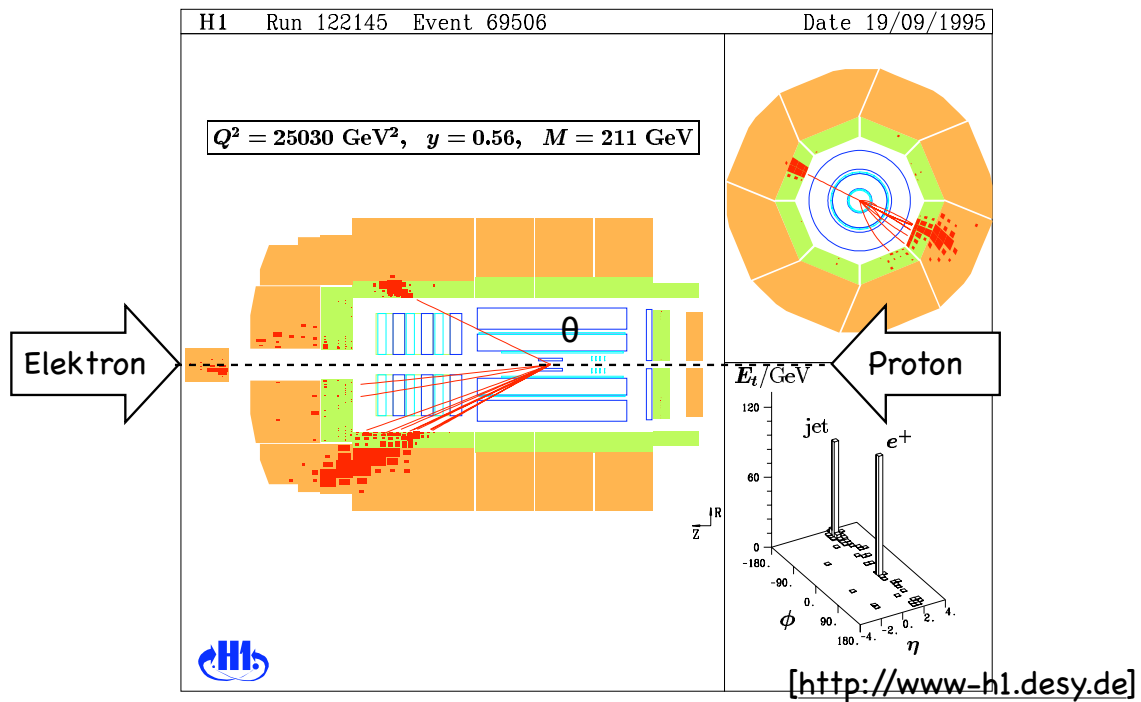
$$y := \frac{p \cdot q}{p \cdot k}$$

$$x_{Bj} := \frac{Q^2}{2m_N \nu} = \frac{Q^2}{2pq}$$

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

100

H1-Ereignis: DIS NC

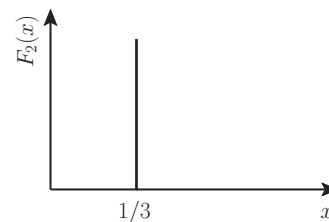


Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

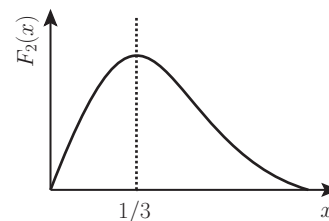
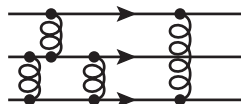
101

Proton-Strukturfunktion F_2

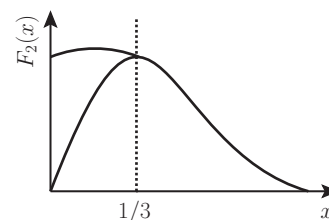
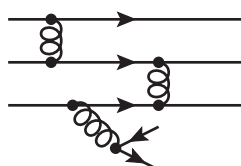
Drei Valenzquarks



Drei Valenzquarks
mit Bindung



Drei Valenzquarks
mit Bindung und
Gluonabstrahlung



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

102

11. Vorlesung

QCD-Korrekturen in DIS

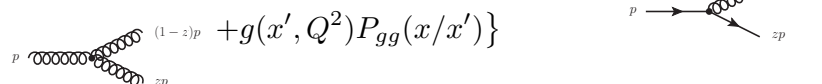
$$\frac{1}{x}F_2 = \left| \begin{array}{c} \text{Diagram 1} \\ \text{Diagram 2} \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{c} \text{Diagram 3} \\ \text{Diagram 4} \end{array} \right|^2 + \dots$$

- DGLAP-Evolutionsgleichungen:

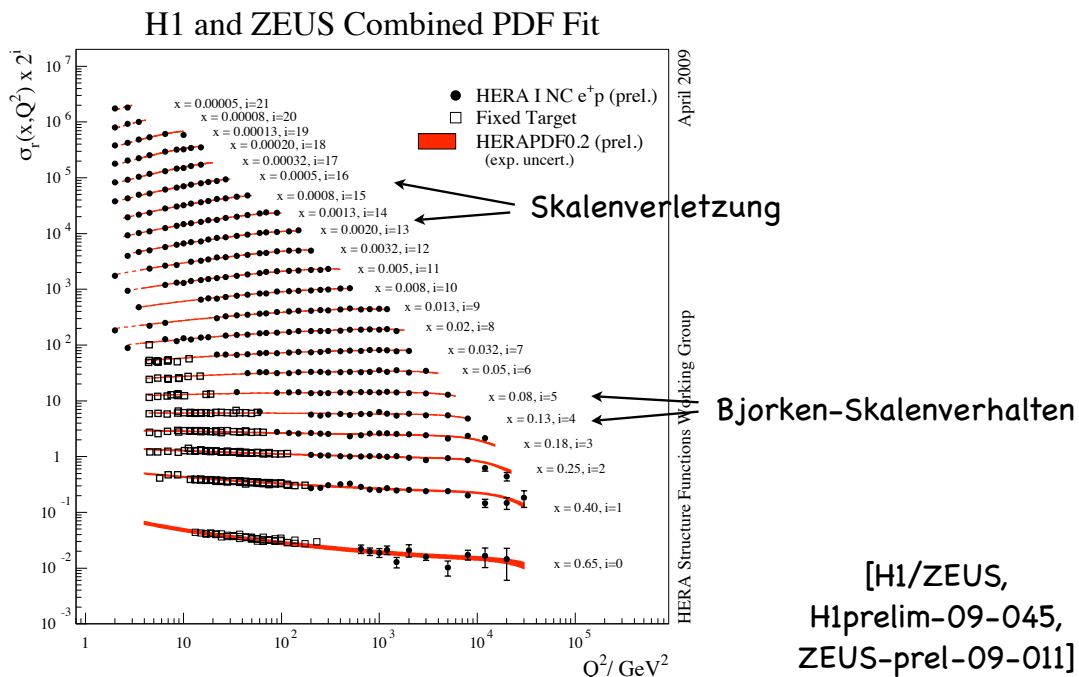
$$\frac{dq(x, Q^2)}{d \ln Q^2} = \frac{\alpha_S(Q^2)}{2\pi} \int \frac{dx'}{x'} \{ q(x', Q^2) P_{qq}(x/x') + g(x', Q^2) P_{qg}(x/x') \}$$



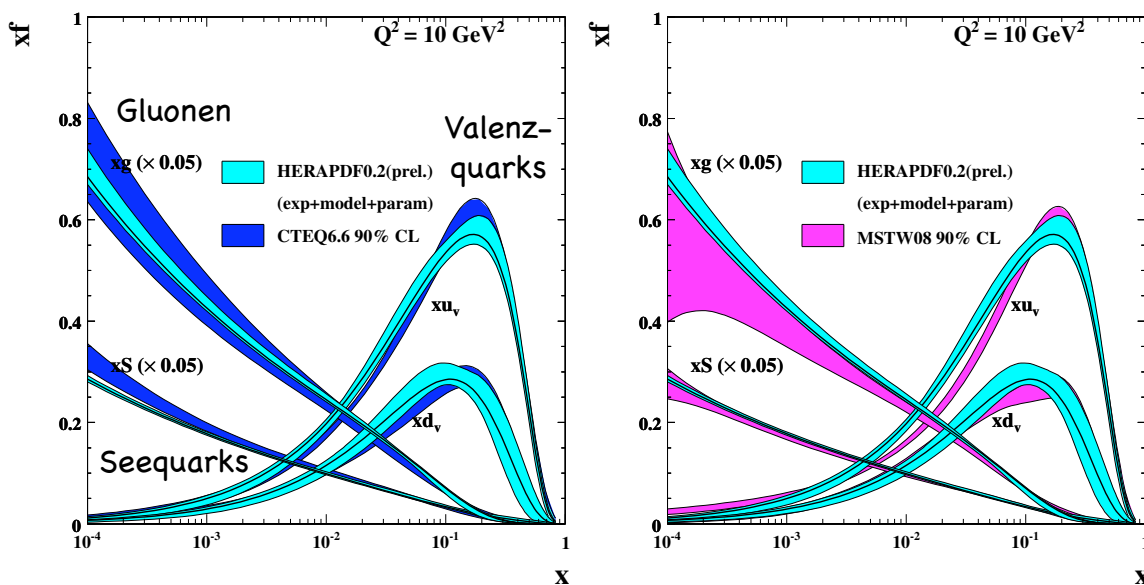
$$\frac{dg(x, Q^2)}{d \ln Q^2} = \frac{\alpha_S(Q^2)}{2\pi} \int \frac{dx'}{x'} \left\{ \sum_q [q(x', Q^2) + \bar{q}(x', Q^2)] P_{gq}(x/x') \right.$$



Messungen von F_2

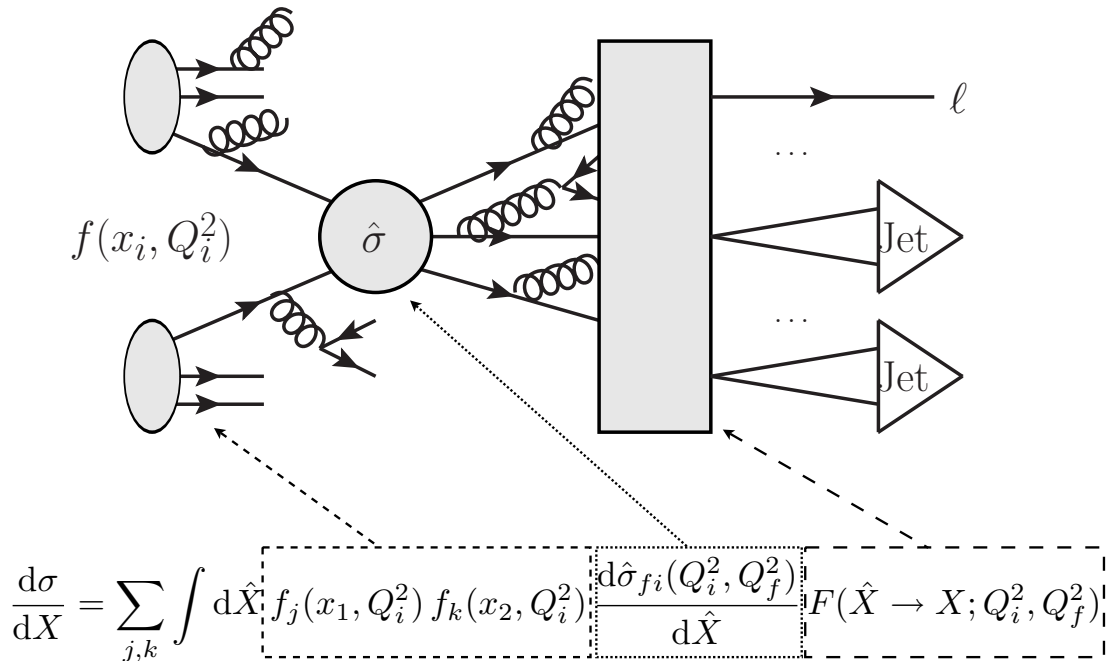


Partonverteilungen



[H1/ZEUS, H1prelim-09-045, ZEUS-prel-09-011]

QCD-Faktorisierung

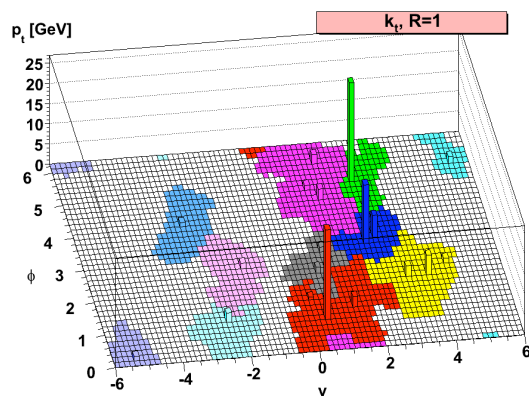
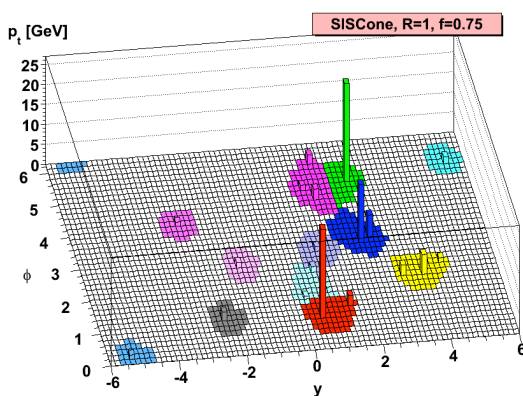


Jet-Algorithmen

$$\Delta_{ij} = \sqrt{(y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2} < R$$

Kegelalgorithmus (R=1)

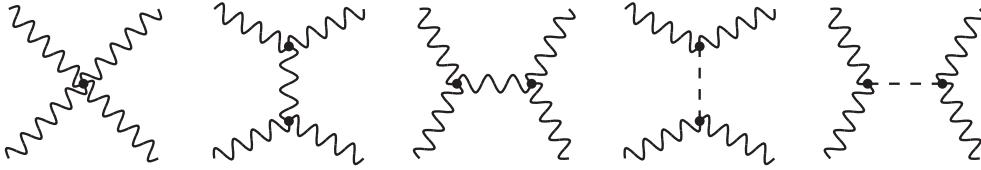
Rekombinationsalgorithmus (R=1)



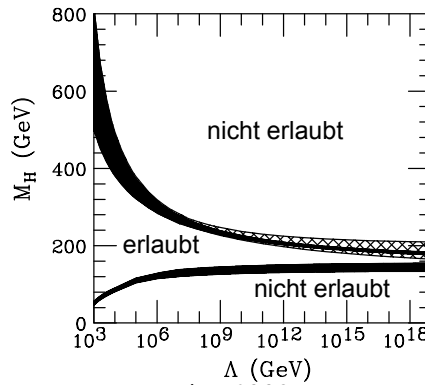
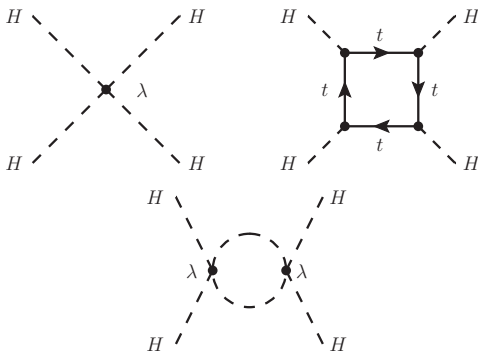
[M. Cacciari, G. P. Salam, G. Soyez, JHEP 04 (2008) 063]

Higgs-Massenschranken

Streuung longitudinaler W^+W^-



Higgs-Selbstkopplung

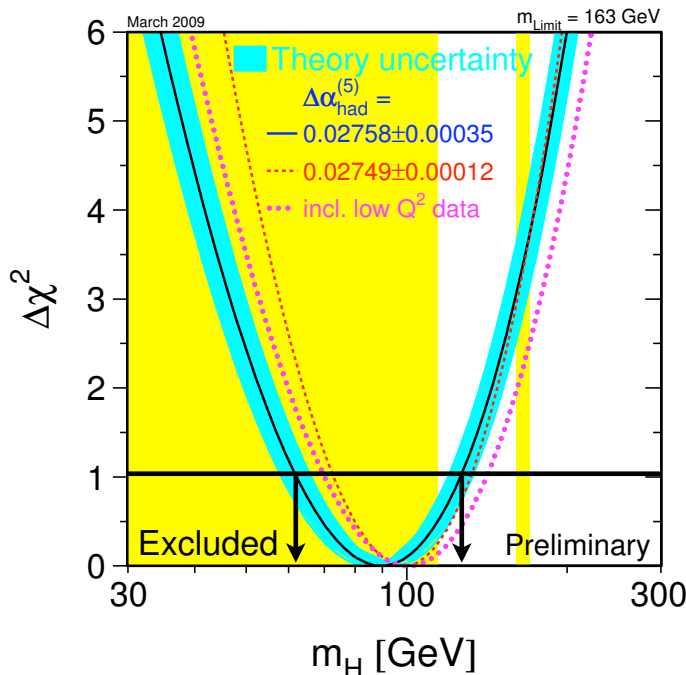


[T. Hambye, K. Riesselmann,
Phys. Rev. D55 (1997), 7255]

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

109

Blue-Band-Plot



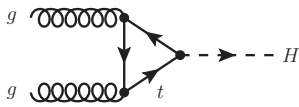
[<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>]

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

110

Higgs-Produktion: Tevatron

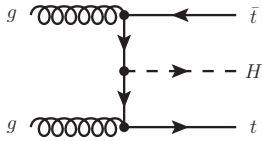
Gluon-Gluon-Fusion



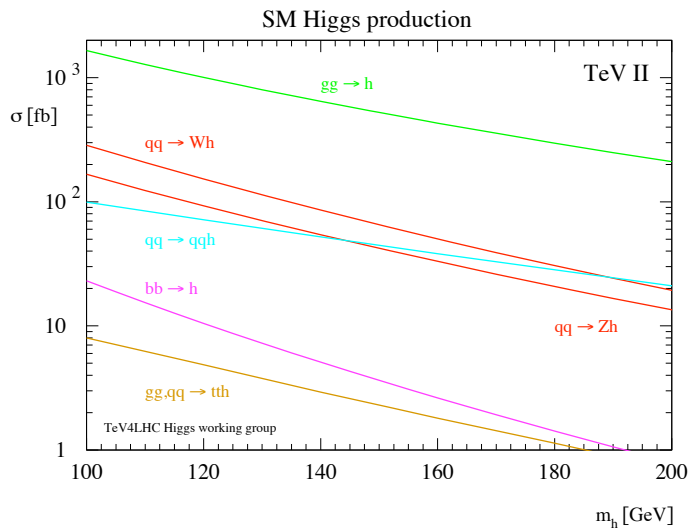
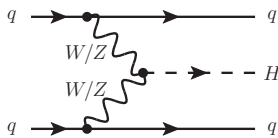
Assoziierte Produktion



Assoziierte Produktion



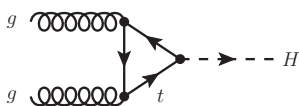
Vektorboson-Fusion



[<http://maltoni.home.cern.ch/maltoni/TeV4LHC/index.html>]

Higgs-Produktion: LHC

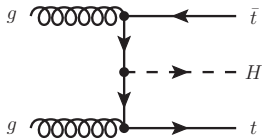
Gluon-Gluon-Fusion



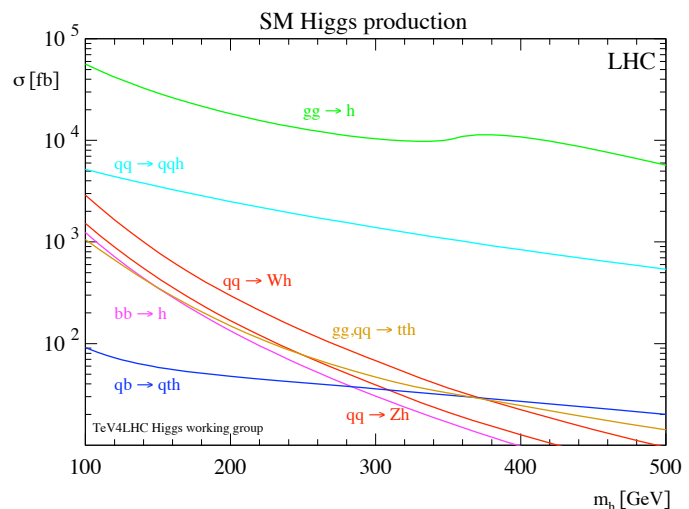
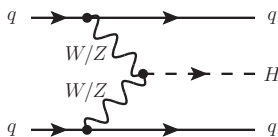
Assoziierte Produktion



Assoziierte Produktion



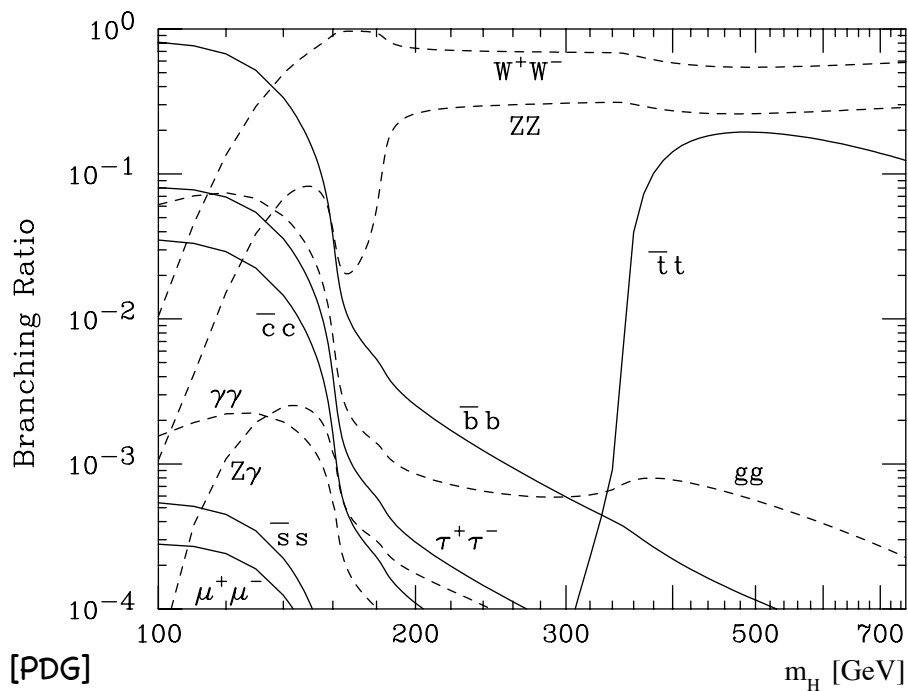
Vektorboson-Fusion



[<http://maltoni.home.cern.ch/maltoni/TeV4LHC/index.html>]

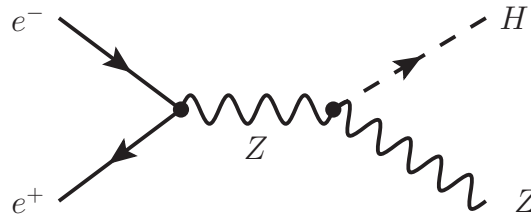
12. Vorlesung

Higgs-Zerfall



Higgs-Signaturen bei LEP

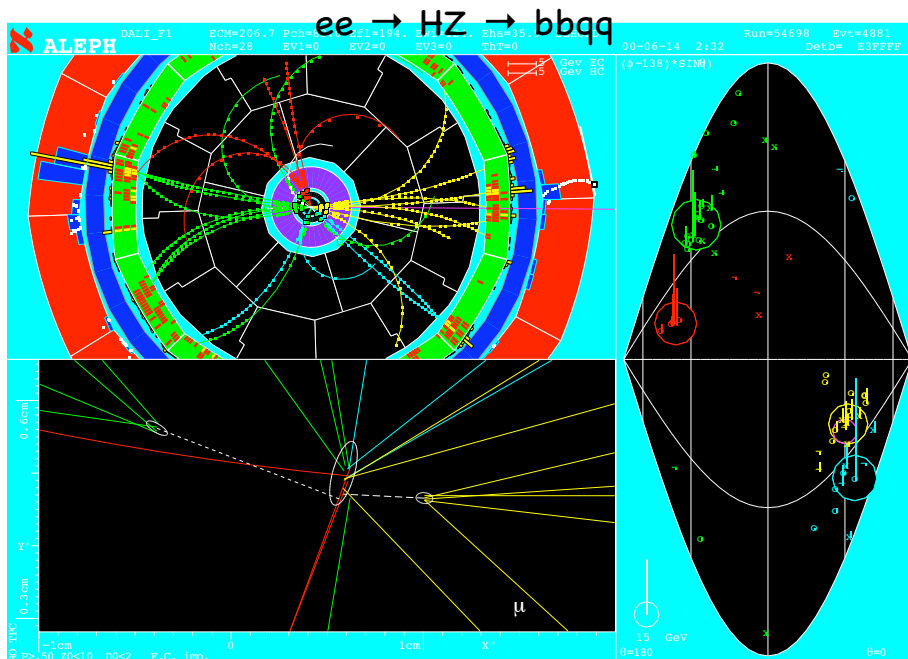
- Produktion: Higgs-Strahlung



- Zerfall: B-Jets sehr wichtig

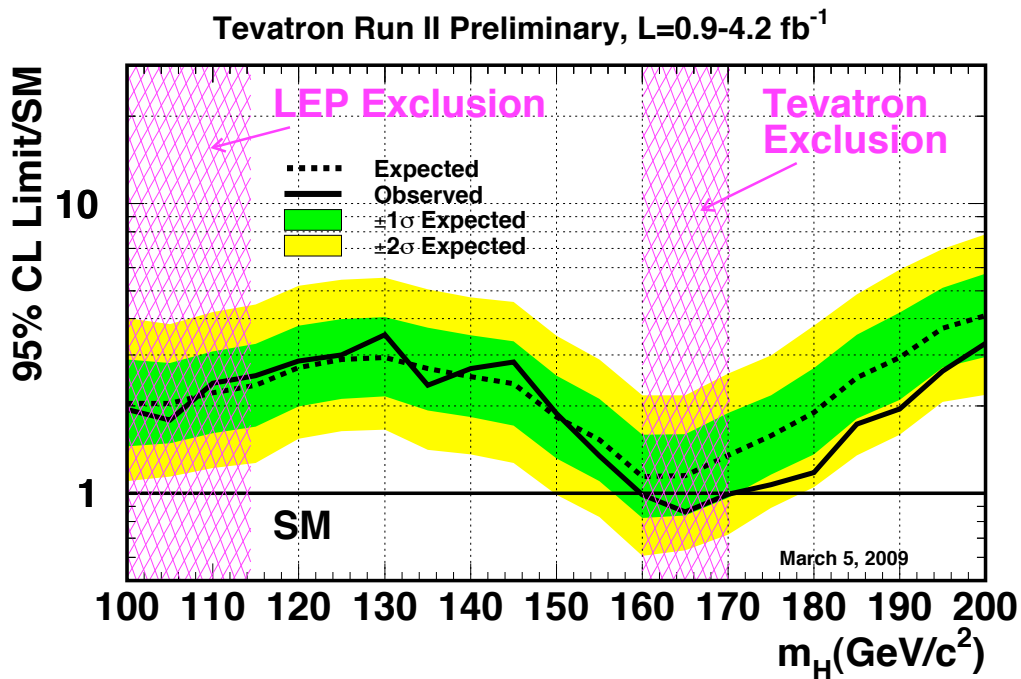
Higgs-Zerfall	Z-Zerfall	Signatur
$H \rightarrow b\bar{b}$	$Z \rightarrow q\bar{q}$	4 Jets, zwei davon mit B- Hadronen
$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	$Z \rightarrow q\bar{q}$	2 Jets und 2 Tau-Leptonen
$H \rightarrow b\bar{b}$	$Z \rightarrow \tau^+\tau^-$	2 B-Jets und 2 Tau-Leptonen
$H \rightarrow b\bar{b}$	$Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$	2 B-Jets und fehlende Energie
$H \rightarrow b\bar{b}$	$Z \rightarrow \ell^+\ell^-$	2 B-Jets und zwei Leptonen

Higgs-Kandidat bei ALEPH



[<http://cdsweb.cern.ch>]

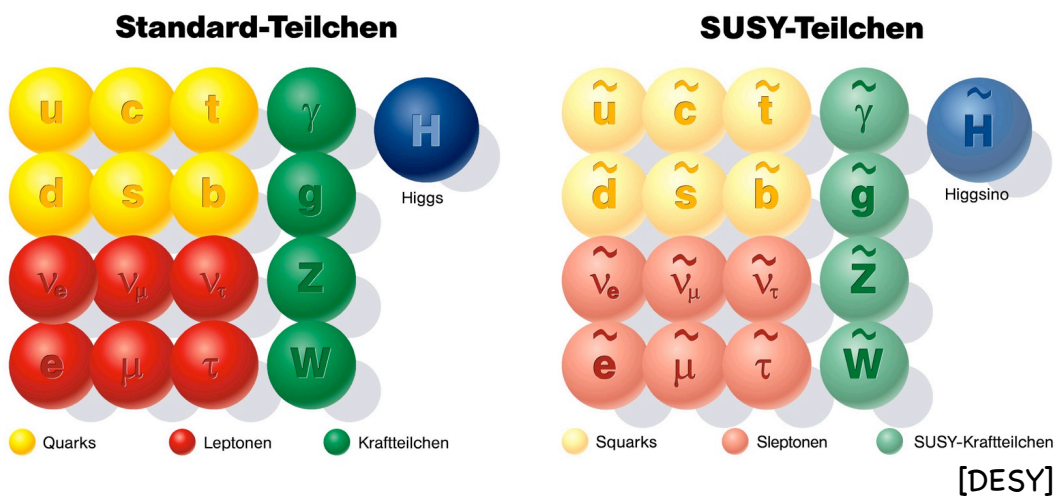
Higgs-Limits: Tevatron



[FERMILAB-PUB-09-060-E, arXiv:0903.4001 [hep-ex]]

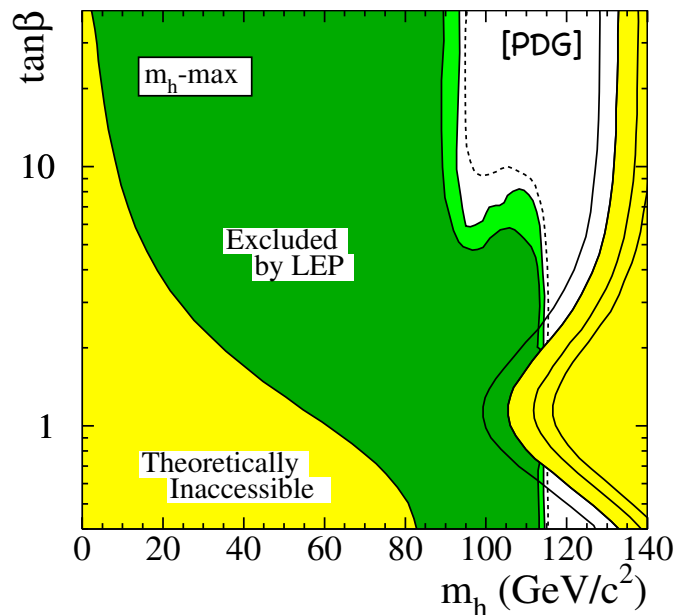
Supersymmetrie

- SUSY: Symmetrie zwischen Bosonen und Fermionen



Leichtestes MSSM-Higgs

- CP-erhaltendes MSSM-Szenario:



Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

119

PMNS-Matrix

- Standard-Parametrisierung:

$$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13}e^{i\alpha_1/2} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta}e^{i\alpha_2/2} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

mit $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$

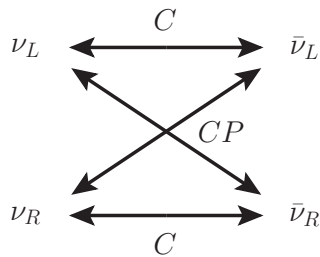
- Zusätzliche Phasen $\alpha_{1,2}$, falls Neutrinos Majorana-Teilchen
- Phasen der PMNS-Matrix: Quellen von CP-Verletzung im Neutrino-sektor?

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

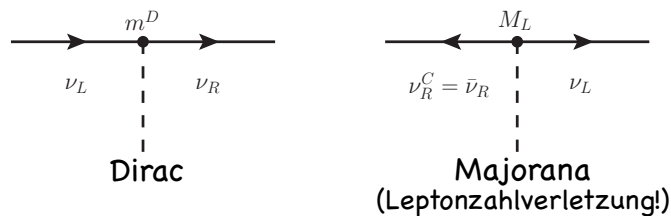
120

Dirac oder Majorana?

- Ladungskonjugation C und CP -Operation bei Neutrinos:



- Majorana-Neutrinos: identifiziere $\nu_L \equiv \nu_R^C$, $\nu_R \equiv \nu_L^C$
- Dirac- und Majorana-Massen:



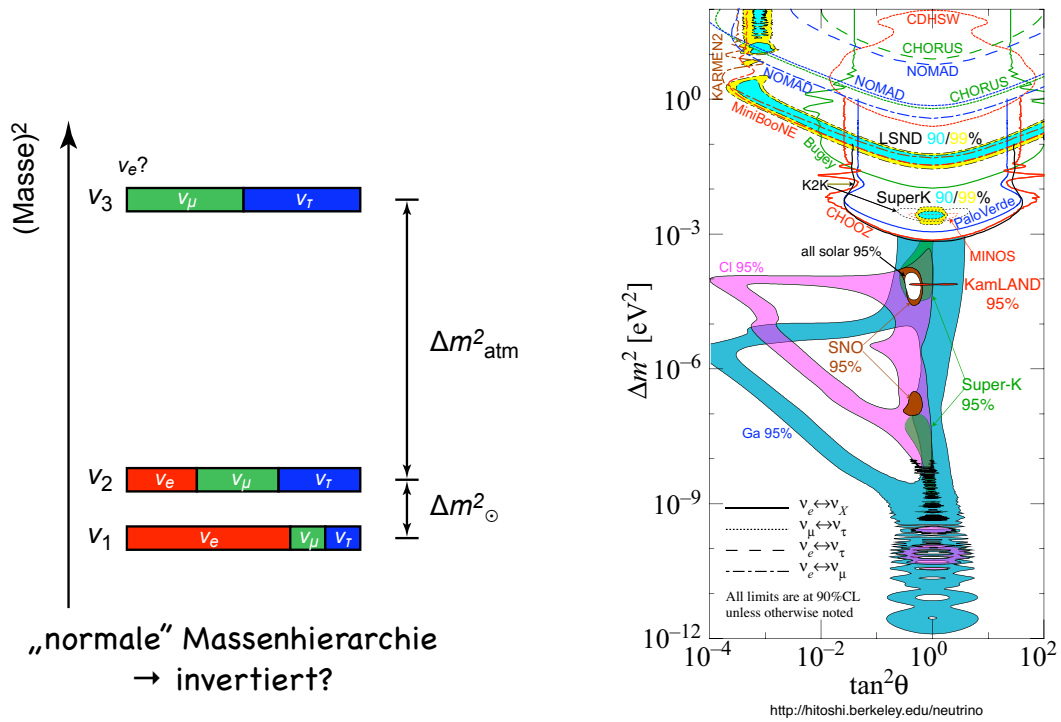
Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

121

U. Husemann, Experimentelle Elementarteilchenphysik

13. Vorlesung

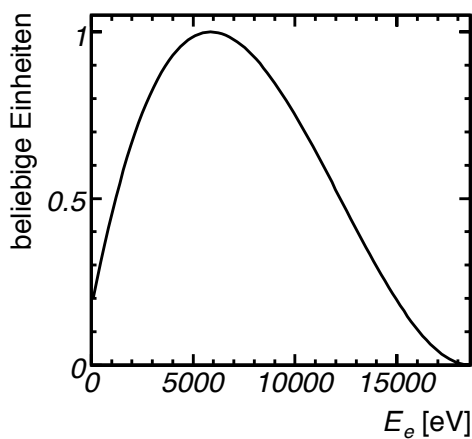
Evidenz für Neutrinomassen



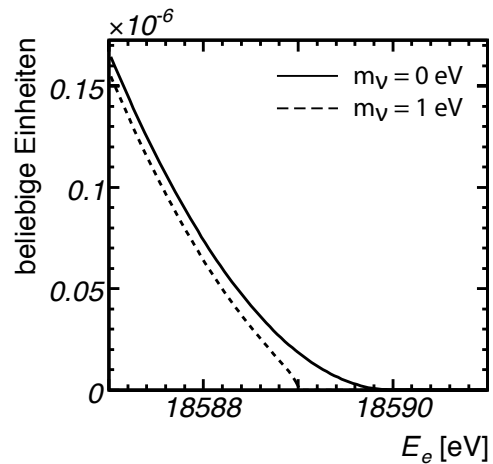
Tritium-Betazerfall

- Energiespektrum der Elektronen:

Gesamtspektrum
(ohne Fermi-Funktion)

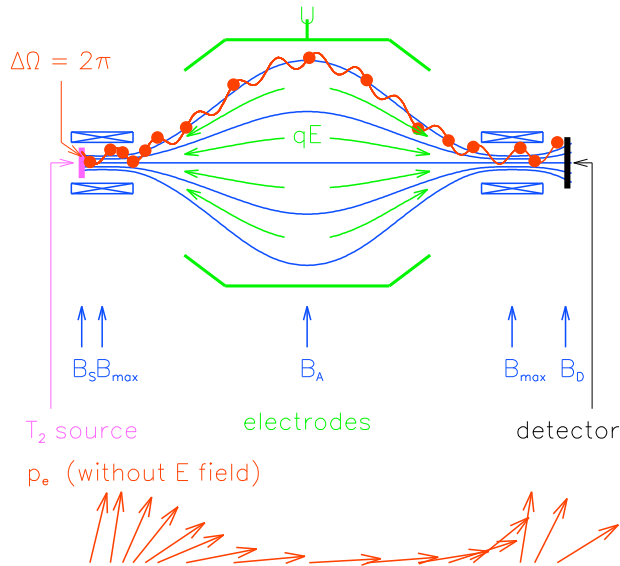


Endpoint des
Energiespektrums



Tritium-Experimente

- MAC-E-Prinzip: elektrostatischer Filter mit magnetischer adiabatischer Kollimation



[J. Angrik et al.,
FZKA Scientific
Report 7090]

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

125

Ab 2012: KATRIN

[<http://www-ik.fzk.de/~katrin/>]

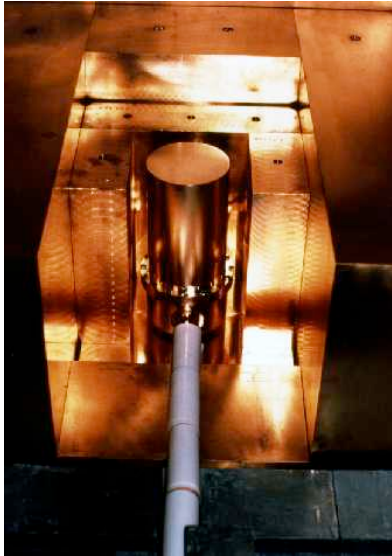


Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

126

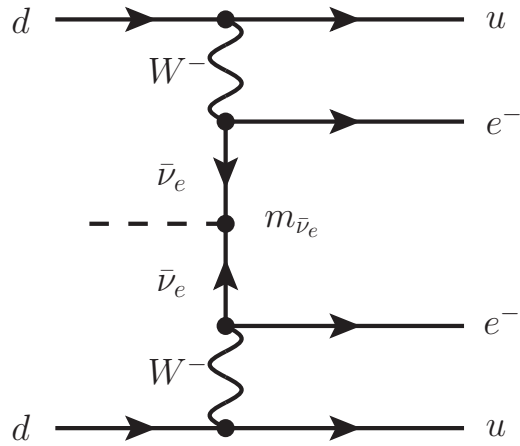
$0\nu\beta\beta$ -Experimente

Germaniumkristall im Heidelberg-Moskau-Experiment



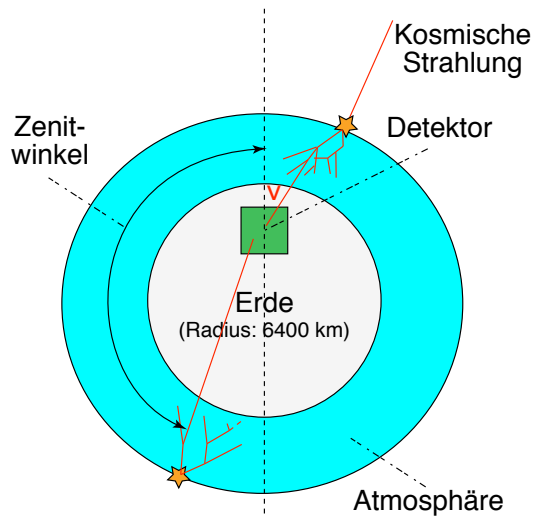
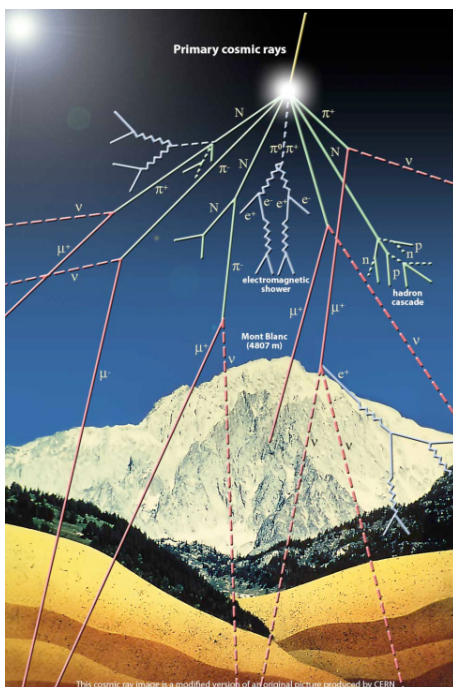
[<http://www.klapdor-k.de/>]

$0\nu\beta\beta$ -Zerfall auf Quarkniveau

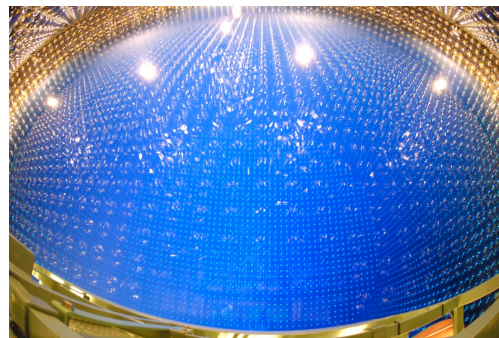
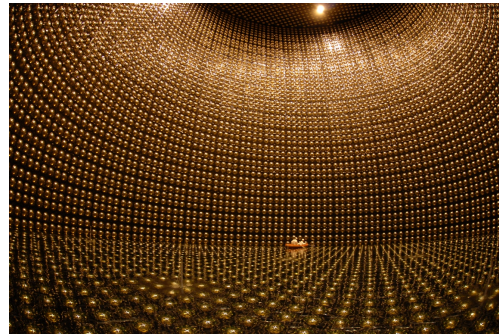
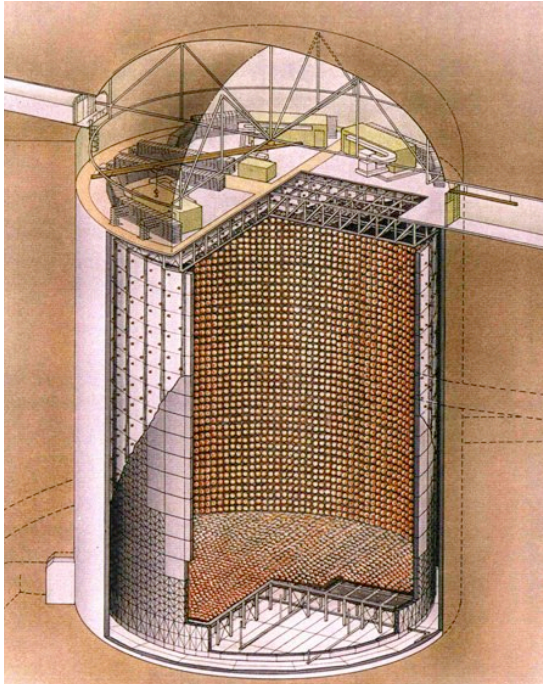


Atmosphärische Neutrinos

[<http://www.expeditions.udel.edu/antarctica/>]



Super-Kamiokande



[<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>]

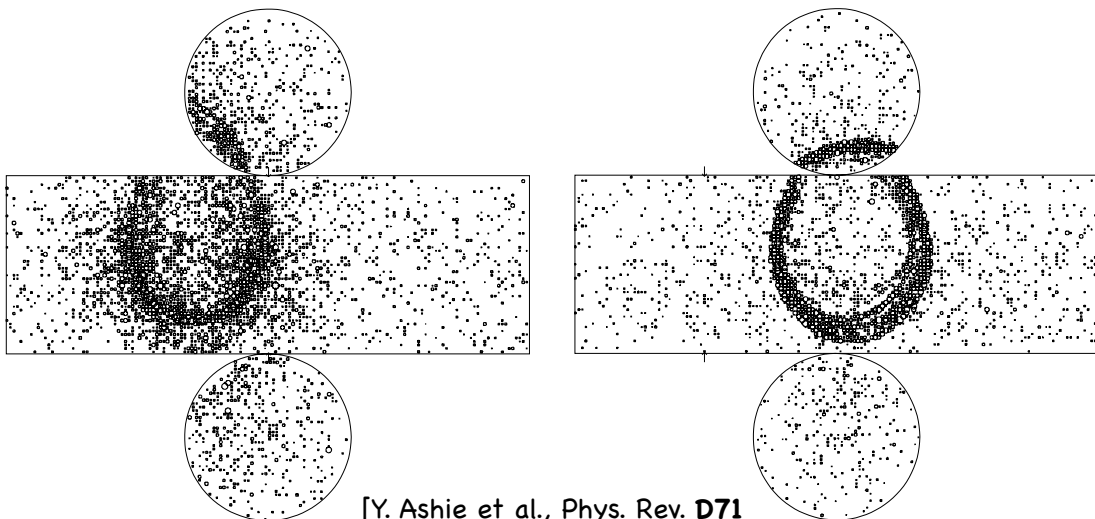
Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

129

Super-K: e- und μ -Nachweis

Gestopptes Elektron:
elektromagnetischer Schauer

Gestopptes Myon:
klarer Cherenkov-Ring

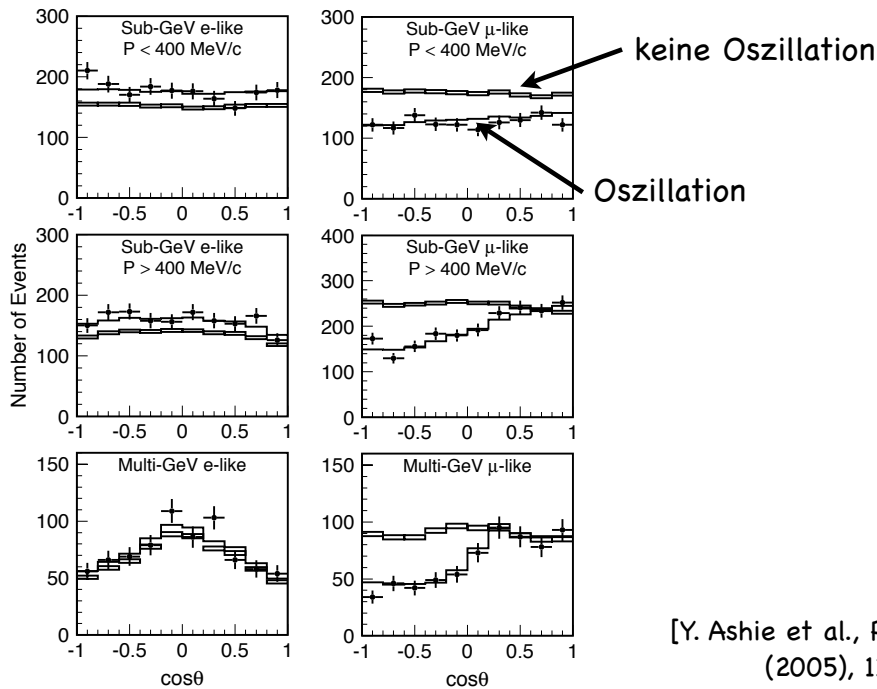


[Y. Ashie et al., Phys. Rev. **D71**
(2005), 112005]

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

130

Super-K: Zenitwinkel-Analyse

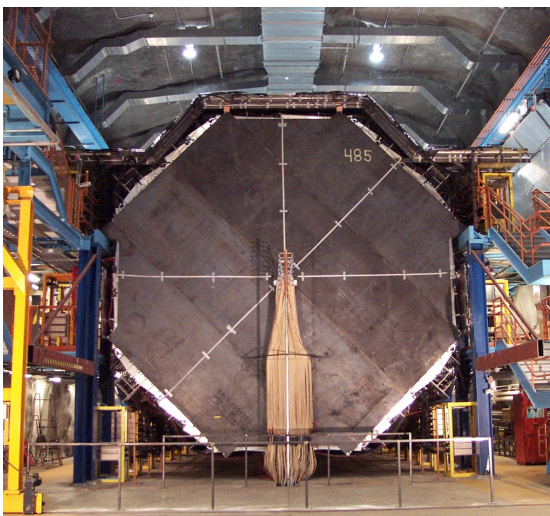


Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

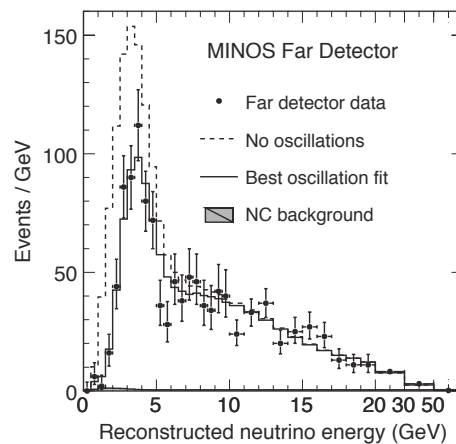
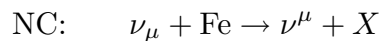
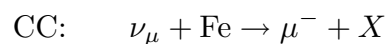
131

Beschleuniger-v: MINOS

MINOS Far Detector



[<http://www-numi.fnal.gov/>]



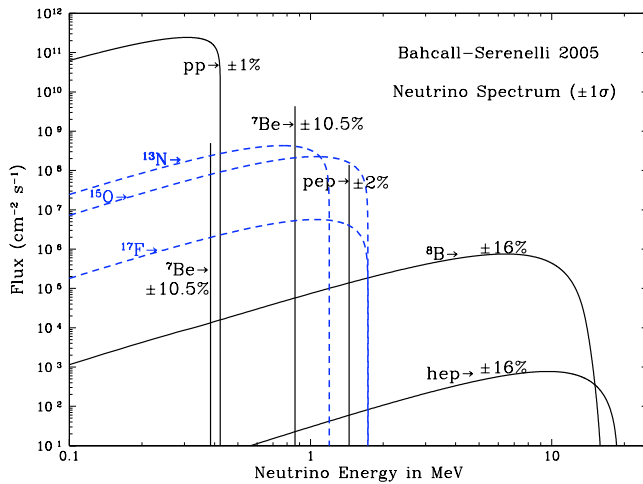
[P. Adamson et al., Phys. Rev. Lett. **101** (2008)]

Exp. Elementarteilchenphysik (P23.1.1), HU Berlin, Sommersemester 2009

132

Sonnenneutrinos

Neutrinofluss im Standard-Sonnenmodell

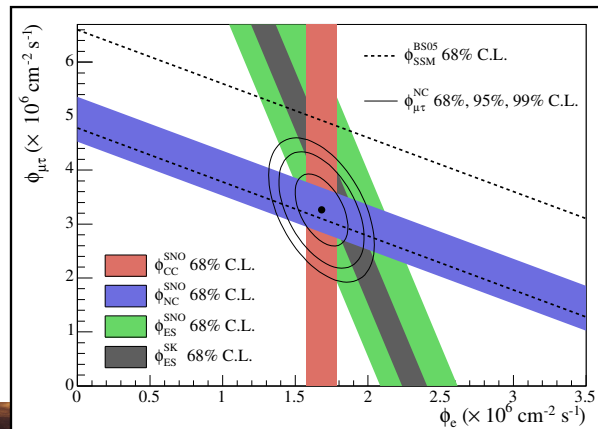


[<http://www.sns.ias.edu/~jnb/SNviewgraphs/snviewgraphs.html>]

Fusionsreaktionen in der Sonne

Name	Reaktion
Wasserstofffusion	${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$
Deuteriumfusion	${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
<i>pp</i> -Reaktion I	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H}$
<i>pp</i> -Reaktion II	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$ ${}^7\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$
<i>pp</i> -Reaktion III	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ ${}^7\text{Be} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$ ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$ ${}^8\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$
<i>pep</i> -Reaktion	${}^1\text{H} + e^- + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$
<i>hep</i> -Reaktion	${}^3\text{He} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$

Sonnenneutrinos: SNO



[B. Aharmim et al., Phys. Rev. **C72** (2005), 055502]

CC: $\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p$

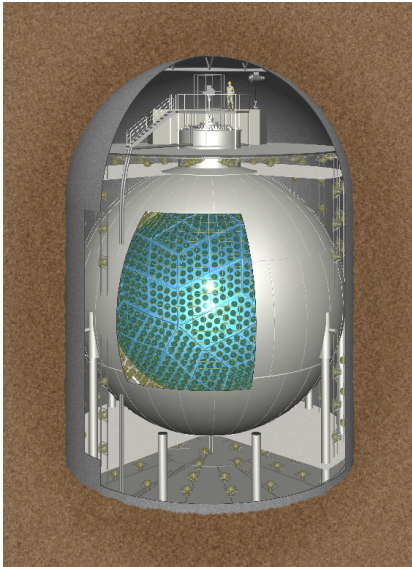
ES: $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$

NC: $\nu + d \rightarrow \nu + p + n$

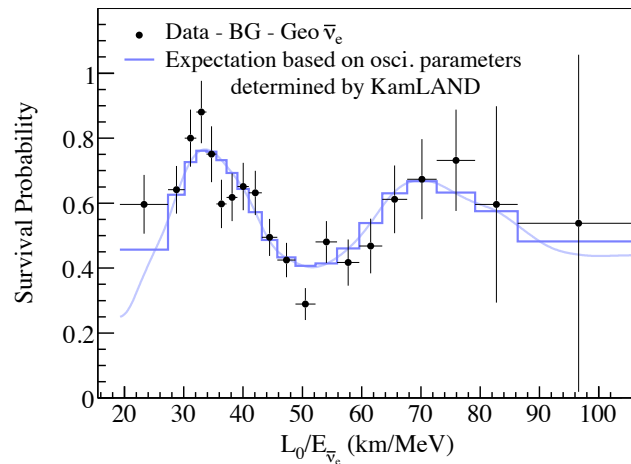
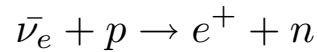
[<http://www.sno.phy.queensu.ca/>]

Reaktorneutrinos: KamLAND

KamLAND: Flüssigszintillator



[<http://kamland.lbl.gov/>]



[S. Abe et al., Phys. Rev. Lett. **100** (2008), 221803]

Neutrino-physik: Offene Fragen

- Welche Masse haben Neutrinos?
- Gibt es sterile Neutrinos?
- Sind Neutrinos Majorana-Teilchen?
- Ist der Mischungswinkel θ_{13} ungleich Null?
- Ist die Hierarchie der Neutrinomassen normal oder invertiert?