

# Moderne Physik: Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Kosmologie

Ulrich Husemann  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Sommersemester 2008

## Termine

- Klausur
  - Prüfungsordnung sieht zweistündige Klausur vor
  - Termin: Donnerstag, 24.07.08
    - 9-11 Uhr s.t.
    - Raum: 2'101
  - Masterstudierende: 3 Wochen vor Beginn der Prüfungswoche anmelden (29.06.08)

# Standardmodell der Elementarteilchenphysik

## Wiederholung

- Teilchen im Standardmodell (+ Antiteilchen): Spin  $1/2 \hbar$

Generation	Quarks	Leptonen
1	Up (u) Down (d)	Elektron-Neutrino ( $\nu_e$ ) Elektron (e)
2	Charm (c) Strange (s)	Myon-Neutrino ( $\nu_\mu$ ) Myon ( $\mu$ )
3	Top (t) Bottom (b)	Tau-Neutrino ( $\nu_\tau$ ) Tau ( $\tau$ )

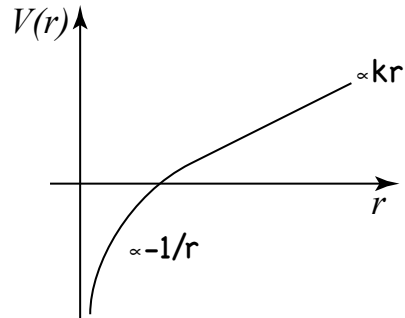
- Wechselwirkungen: Eichbosonen mit Spin  $1 \hbar$

WW	wirkt auf	Eichbosonen
Schwache WW	alle Teilchen	W- und Z-Bosonen
Elektromagnetische WW	geladene Teilchen	Photon
Starke WW	Quarks	8 Gluonen

Vereinigt zur elektroschwachen WW

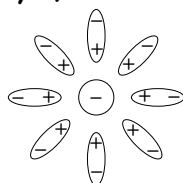
# Quantenchromodynamik

- Theorie für starke WW: Quantenchromodynamik (QCD)
- Austauschteilchen: 8 Gluonen mit Farbladung (im Gegensatz zum ungeladenen Photon in Elektrodynamik)
  - viel kompliziertere Dynamik
- Vergleiche Coulomb-Potenzial
  - $V_{\text{Coulomb}}(r) \propto -\frac{\alpha}{r}$
  - mit Potenzial der QCD:
  - $V_{\text{QCD}}(r) \propto -\frac{\alpha_s(r)}{r} + kr$
- „Confinement“ (Analogie: Feder mit Federkonstante k)
  - keine freien Quarks
  - genug Spannungsenergie: Bildung von  $q\bar{q}$ -Paaren

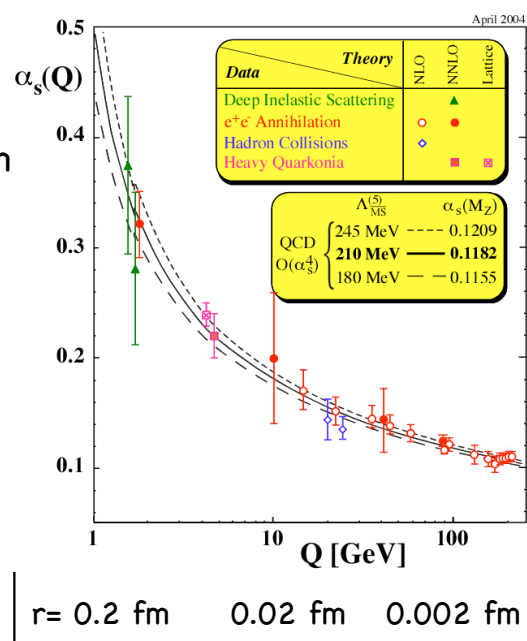


## Asymptotische Freiheit

- Elektrodynamik: „nackte“ Ladung des Elektron abgeschirmt durch Ladungswolke →  $\alpha$  nimmt mit kleinerem  $r$  zu (kleiner Effekt:  $\alpha = 1/137$  bei 0 GeV,  $1/128$  bei 90 GeV)



- Asymptotische Freiheit in QCD: Kopplungskonstante  $\alpha_s$  nimmt mit kleinerem  $r$  ab → Quarks im Proton näherungsweise frei



# Die Massenfrage

- Wie bekommen Teilchen (und W- und Z-Bosonen) ihre Massen?
- Lösung im Standardmodell: Higgs-Mechanismus
  - Peter Higgs (1964): Postuliere neues Quantenfeld, das Vakuum ausfüllt, mit zugehörigem Teilchen: Higgs-Boson (Spin 0) → noch nicht experimentell nachgewiesen
  - Löst zwei (unterschiedliche) Probleme auf einmal: Massen für Fermionen und W- und Z-Bosonen
  - Aber: Wert der Masse immer noch freier Parameter
    - Leichtestes Quark (Up):  $m_u \approx 1\text{-}3 \text{ MeV}/c^2$
    - Schwerstes Quark (Top):  $m_t \approx 172 \text{ GeV}/c^2$ , ca. Masse eines Goldatoms

## Analogie: Higgs-Mechanismus

Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party  
(= Higgs-Feld)



Prominenter betritt den Raum  
(= Teilchen)



Prominenter kommt  
schwer voran (= Masse)

Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:



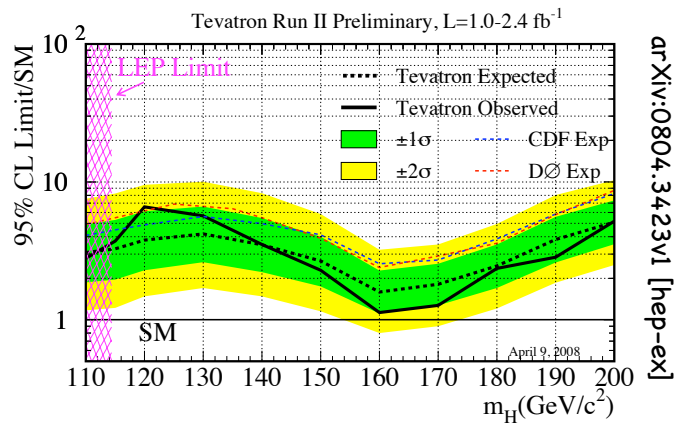
Jemand streut ein Gerücht  
(= Anregung des Higgs-Felds)



Gerücht verbreitet sich  
(= massives Higgs-Teilchen)

# Higgs-Suchen

- LEP (bis 2000): Higgs-Massen unter  $114 \text{ GeV}/c^2$  ausgeschlossen, erste Anzeichen bei  $115 \text{ GeV}/c^2$ ?
- Tevatron (ab 2001): intensive Suche



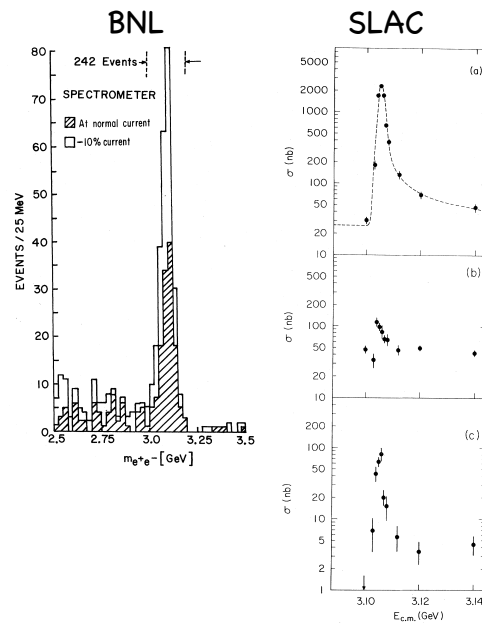
- Ab 2008/9: Suche am Large Hadron Collider (LHC)

## Kapitel 6.4

# Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

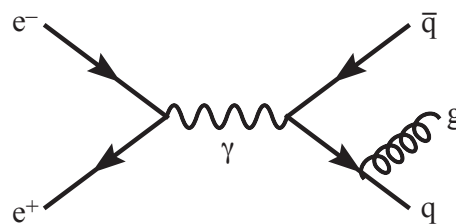
# Novemberrevolution

- November 1974: Entdeckung einer schmalen Resonanz im  $e^+e^-$ -Spektrum bei invarianter Masse von  $3.1 \text{ GeV}/c^2$ 
  - BNL: Protonen auf Fixed Target
  - SLAC:  $e^+e^-$ -Collider
  - Gleichzeitig entdeckt → Doppelname:  $J/\psi$
- Interpretation als gebundener Zustand  $c\bar{c}$  („Charmonium“) → 4. Quark entdeckt (theoretisch vorhergesagt 1970)



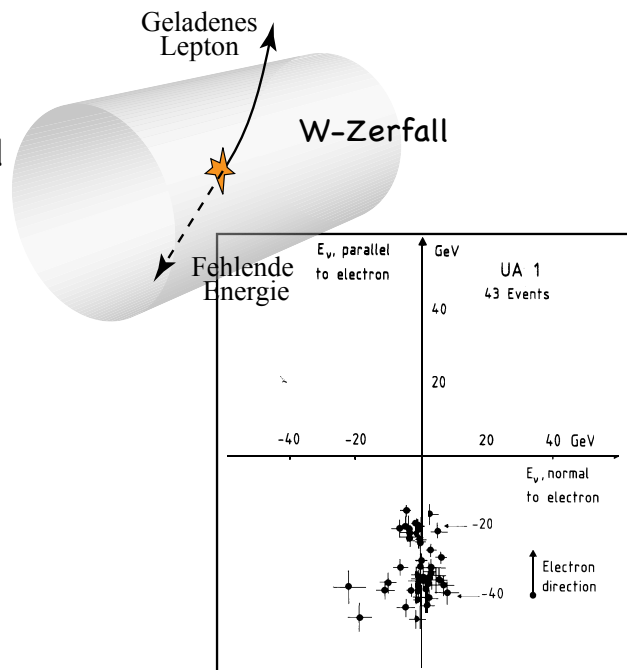
# Glukonentdeckung

- Elektron-Positron-Collider PETRA bei DESY (1979):
  - Beobachtung von Ereignissen mit  $e^+e^- \rightarrow 3 \text{ Jets}$
  - Interpretation:
    - 2 Quarks und 1 Gluon produziert
    - Neutralisierung der Farbladung („Hadronisierung“) durch Erzeugung neuer Teilchen
    - Beobachtet: 3 Bündel von Teilchen („Jet“)



# W- und Z-Entdeckung

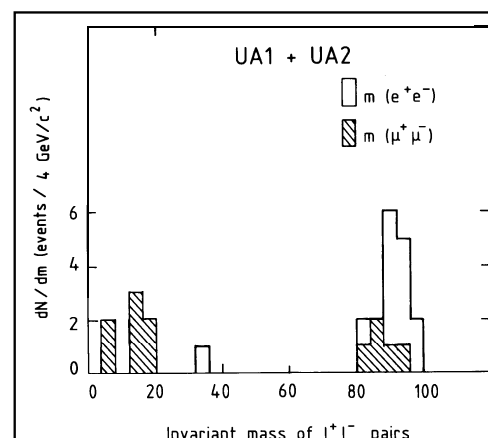
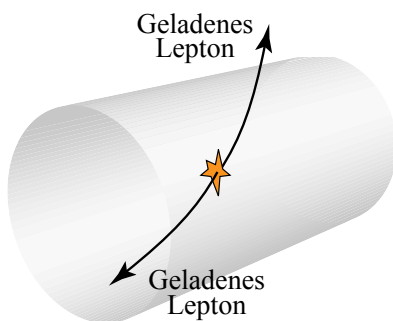
- Energie in Elektron-Positron-Collidern um 1980 nicht ausreichend zur Produktion von W/Z-Bosonen → erster Proton-Antiproton-Collider Sp $\bar{p}$ S (CERN, ab 1982)
- Zerfall  $W \rightarrow e\nu_e/\mu\nu_\mu$  (ungefähr in Ruhe): geladenes Lepton und „fehlende Energie“



[C. Rubbia, Nobel Lecture, nobelprize.org]

# W- und Z-Entdeckung

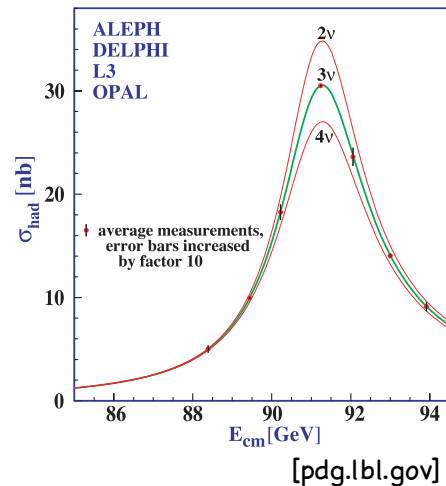
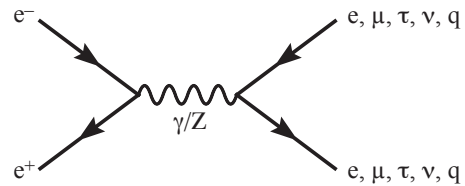
- $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ : Paar von geladenen Leptonen → Rekonstruktion der invarianten Masse



[C. Rubbia, Nobel Lecture, nobelprize.org]

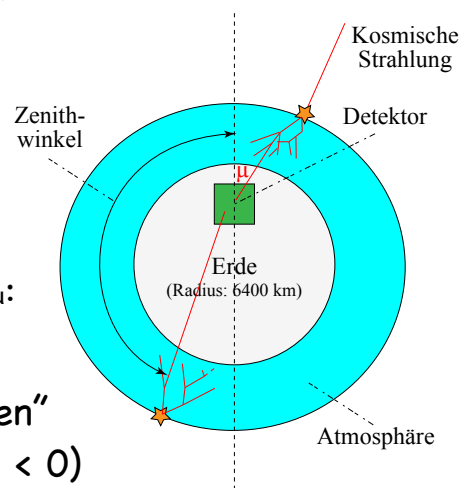
# Zahl der leichten Neutrinos

- Elektron-Positron-Collider LEP (CERN, ab 1989):  $E_{\text{CMS}} = 90 \text{ GeV}$   
→ massenhafte Erzeugung von Z-Bosonen
- Z-Zerfall in  $ee, \mu\mu, \tau\tau, q\bar{q}, \nu\bar{\nu}$  (unsichtbar) → vergleiche Form der Z-Resonanz im Spektrum der invarianten Masse mit Vorhersagen → 3 (leichte) Neutrino flavors
- Konsistenz im Standardmodell: 3 Generationen für Leptonen und Quarks



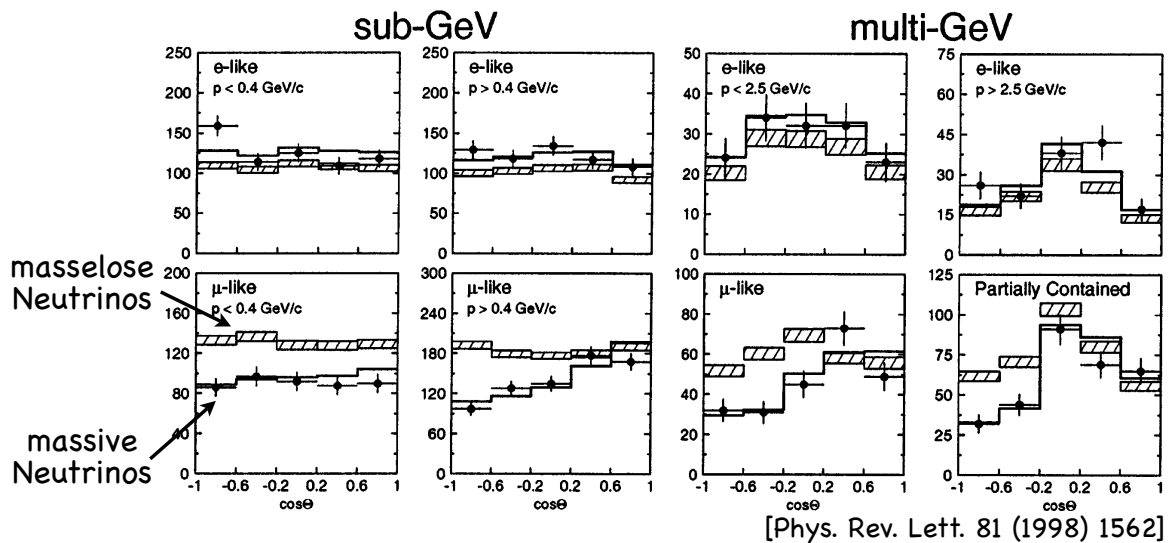
# Neutrinomasse

- Idee: massive Neutrinos → Mischung (analog zu CKM)  
→ ein Neutrino typ kann in anderen Typ „oszillieren“
- Super-Kamiokande (Kamioka, Japan): Wasser-Cherenkov-Detektor
- Atmosphärische Neutrinos
  - Kollision kosmischer Strahlung in der Atmosphäre: Pionen
  - Zerfall  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu, \mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ :  
Verhältnis  $\nu_\mu/\nu_e$  bekannt
- Zenithwinkelverteilung: „von oben“ ( $\cos\theta > 0$ ) vs. „von unten“ ( $\cos\theta < 0$ )





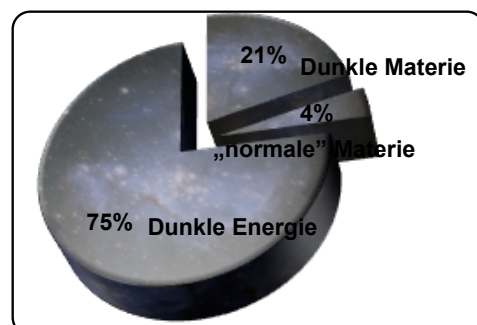
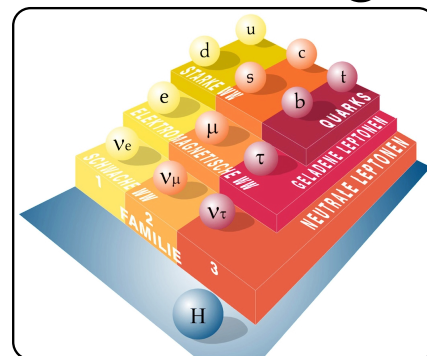
# Neutrinomasse



- Ergebnis: Nur 50% der  $\nu_\mu$  „von unten“ kommen an!
- Interpretation: massive  $\nu_\mu$  sind in  $\nu_\tau$  „oszilliert“

## Standardmodell: Offene Fragen

- Ist der Higgs-Mechanismus in der Natur realisiert?
- SM liefert keine Erklärung für freie Parameter (Teilchenmassen, CKM-Matrix)
- Probleme mit Beschreibung von Prozessen oberhalb ca. 1 TeV
- Vorgriff: SM-Teilchen: nur 4% der Materie im Universum



# Präsenzübung

- Welche der folgenden Zerfälle sind nicht erlaubt und warum? Welche Wechselwirkung vermittelt die erlaubten Zerfälle?

$$\begin{array}{ll} \mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e & p \rightarrow \pi^+ \pi^0 \\ K^+ \rightarrow e^+ \nu_e & \pi^- \rightarrow K^0 e^- \bar{\nu}_e \\ n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e & K^- \rightarrow \pi^0 e^- \bar{\nu}_e \\ \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma & t \rightarrow W^+ b \\ \gamma \rightarrow e^+ e^- & t \rightarrow Z c \\ e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma & \Delta^{++} \rightarrow p \pi^+ \end{array}$$

## Themen für Übung

- Das Wu-Experiment zur Paritätsverletzung
- Entdeckung des Top-Quarks
- Weltuntergang durch den LHC?