

**übung zur Vorlesung**  
**”Experimentelle Elementarteilchenphysik”**  
**SS 2006**  
**H. Kolanoski, J. Kretzschmar**

**4. Übung**

**4.1 Kopplung zwischen Fermionen und dem W-Boson (8 Punkte)**

Betrachten Sie das linkshändige schwache Isospin-Duplett  $L = \begin{pmatrix} a_L \\ b_L \end{pmatrix}$  sowie die beiden Singletts  $a_R$  und  $b_R$  zweier Fermionen  $a$  und  $b$  mit Ladungen  $q_a$  und  $q_b$  (z. B.  $a = \nu_e, b = e^-$  oder  $u, d$ ). Die Wechselwirkung der beiden Teilchen mit den Eichfeldern  $W_\mu^i$  und  $B_\mu$  wird im Standard-Modell durch die folgende, unter  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  invariante Lagrangedichte beschrieben:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & i \bar{L} \gamma^\mu \left( \frac{ig}{2} \tau^i W_\mu^i + \frac{ig'}{2} \mathbf{Y} B_\mu \right) L \\ & + i \bar{a}_R \gamma^\mu \left( \frac{ig'}{2} \mathbf{Y} B_\mu \right) a_R \\ & + i \bar{b}_R \gamma^\mu \left( \frac{ig'}{2} \mathbf{Y} B_\mu \right) b_R \end{aligned}$$

Die physikalischen Felder  $W_\mu^\pm$ ,  $A_\mu$  und  $Z_\mu$  ergeben sich aus bestimmten Mischungen der Eichfelder:

$$\begin{aligned} W_\mu^\pm &= \frac{1}{\sqrt{2}} (W_\mu^1 \mp i W_\mu^2) \\ A_\mu &= \sin \theta_w W_\mu^3 + \cos \theta_w B_\mu \\ Z_\mu &= \cos \theta_w W_\mu^3 - \sin \theta_w B_\mu \end{aligned}$$

Im Folgenden betrachten wir nur den Anteil des geladenen Stroms (CC - “charged current”), der durch die physikalischen Eichbosonen  $W_\mu^\pm$  getragen wird.

a) Verwenden Sie die  $SU(2)$ -Operatoren:

$$\tau^+ = \frac{1}{2}(\tau^1 + i \tau^2) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \tau^- = \frac{1}{2}(\tau^1 - i \tau^2) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

und die oben angegebenen Beziehungen, um den CC-Anteil von  $\mathcal{L}$  in die Form

$$\mathcal{L}_{cc} = -\frac{g}{\sqrt{2}} [(\bar{L}\gamma^\mu\tau^+\mathbf{L}) W_\mu^+ + (\bar{L}\gamma^\mu\tau^-\mathbf{L}) W_\mu^-]$$

zu bringen.

- b) Formulieren Sie diesen Ausdruck auf die reinen Fermionfelder um und zeigen Sie, dass

$$\mathcal{L}_{cc} = -\frac{g}{2\sqrt{2}} [(\bar{a}\gamma^\mu(1-\gamma^5)b)W_\mu^+ + (\bar{b}\gamma^\mu(1-\gamma^5)a)W_\mu^-]$$

- c) Zeichnen Sie beispielhaft Feynmandiagramme für die beiden Summanden.

## 4.2 Partielle und totale W-Zerfallsbreite (8 Punkte)

Das W-Boson zerfällt in Lepton-Neutrino- und Quark-Antiquark-Paare. Zu beachten ist, dass die Fermionen im Falle von Quark-Antiquark-Zerfällen in drei möglichen Farben vorliegen können.

- a) In welche Fermion-Antifermion-Paare kann ein (reelles) W zerfallen? Schätzen Sie für jeden Zerfallskanal den prozentualen Beitrag zur totalen Zerfallsrate ab.
- b) Die partielle W-Zerfallsbreite  $\Gamma_{ab}$  für den Kanal  $W \rightarrow a\bar{b}$  ist näherungsweise durch folgende Beziehung gegeben<sup>1</sup>:

$$\Gamma_{ab} = \frac{G_F M_W^3}{6\sqrt{2}\pi}$$

Hierbei bezeichnet  $G_F$  die Fermi-Kopplungskonstante:  $G_F = 1,166 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ . Berechnen Sie mittels der angegebenen Beziehung die leptonische und hadronische, sowie die totale Zerfallsbreite. Unter hadronischer Breite versteht man die Summe der partiellen Breiten aller Quark-Antiquark Kanäle.

- c) Vergleichen Sie die einfache Abschätzung mit den Angaben des “Particle Data Booklet” (siehe auch [http://pdg.lbl.gov/2005/tables/contents\\_tables.html](http://pdg.lbl.gov/2005/tables/contents_tables.html)).

## 4.3 Beobachtung des W-Bosons durch die UA-1 Kollaboration (6 Punkte)

Lesen Sie die beiliegende Veröffentlichung der UA-1 Kollaboration (Phys. Lett. **122B** (1983), 103), die die erste Messung des W-Bosons am CERN SPS Proton-Antiproton-Kollider beschreibt.

- a) Im Text (Abschnitt 5) wird erwähnt, dass die aufgezeichneten Daten etwa  $10^9$  p $\bar{p}$ -Kollisionen entsprechen. Da es nicht möglich war, diese Ereignismenge aufzuzeichnen, musste bereits während der Datennahme eine Ereignisfilterung stattfinden. Beschreiben Sie kurz die Kriterien dieses als “Trigger” bezeichneten Filters. (Zusätzlich zum “Elektrontrigger” werden drei weitere Triggerbedingungen erwähnt.)

---

<sup>1</sup>Die Beziehung vernachlässigt sowohl die Fermion-Massen als auch die durch die CKM-Matrix beschriebene Mischung der Quark-Familien.

- b) Beschreiben Sie qualitativ die Selektionskriterien, die in der Datenanalyse angewendet wurden, um die  $W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$  Kandidaten aus den aufgezeichneten Daten herauszufiltern (Abschnitt 6). Diskutieren Sie in diesem Zusammenhang die in Abbildung 7 dargestellten “Lego-Plots” zweier Ereigniskandidaten. (Diese fassen die Messungen aus dem zentralen Detektorbereich — elektromagnetisches Kalorimeter, Spurdetektor und hadronisches Kalorimeter — zusammen. Beachten Sie die unterschiedliche Energieskala. Die Pseudo-Rapidity  $\eta$  ist ein Maß für den Polarwinkel  $\theta$ , gemessen relativ zur Strahlachse und ist definiert als  $\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$ .)
- c) Wieviele Ereignisse wurden als W-Kandidaten selektiert (Abschnitt 6)? Berechnen Sie den Wirkungsquerschnitt  $\sigma$ , der sich aus den gefundenen Ereignissen für die Reaktion  $p\bar{p} \rightarrow W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$  ergibt. Zwischen der Zahl der produzierten Ereignissen  $N$ , der integrierten Luminosität  $L$  und  $\sigma$  besteht der einfache Zusammenhang:

$$N = \sigma L$$

Die integrierte Luminosität  $L$  wird im Text mit  $18 \text{ nb}^{-1}$  angegeben. Bei der Berechnung des Wirkungsquerschnittes muss berücksichtigt werden, dass nur etwa 65% der produzierten Ereignisse auch tatsächlich selektiert werden (Detektorakzeptanz und Selektionseffizienz). Wie groß ist der statistische Fehler von  $\sigma$ ? Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Theoriewert für  $\sigma$  von  $0.39 \text{ nb}$ .

- d) Bei den hier betrachteten Reaktionen mit großem Transversalimpuls reagieren einzelne Bestandteile (z. B. Quarks) des Protons bzw. Antiprotons. Lässt sich die invariante Masse des W-Bosons direkt aus seinen gemessenen Zerfallsprodukten bestimmen? Lässt sich aus der transversalen Masse bzw. ihrer Verteilung (Abb. 9) die W-Masse abschätzen?