

---

**Übung zur Kern- Teilchen- und Astrophysik II**  
**Prof. Dr. S. Schönert, Prof. Dr. W. Hollik**  
**Sommersemester 2013/14**

---

Blatt Nr. 5

8. Mai 2014

### Aufgabe 1 : Gluonen

- a. Überlegen Sie sich (in Analogie zur Konstruktion der Flavour-Wellenfunktionen der Mesonen) wie die Farbwellenfunktionen der Gluonen dargestellt werden können. Welche Bedeutung kommt dem total symmetrischen Zustand zu?
- b. Was kann man aus den 3-Jet-Ereignissen über die Gluonen lernen?

### Aufgabe 2 : Universalität der schwachen Wechselwirkung

Die Theorie der schwachen Wechselwirkung besagt, dass alle Quarks und Leptonen die gleiche schwache Ladung  $g$  tragen, d.h. W- und Z-Bosonen koppeln an alle Quarks und Leptonen gleichermaßen. Eine Folge ist, dass, wenn ein Teilchen auf mehrere Arten schwach zerfallen kann, die verschiedenen Kanäle alle gleich häufig auftreten, sofern der Phasenraum dabei vernachlässigt wird.

- a. Geben Sie die möglichen Zerfallskanäle für das  $\mu^-$ - und das  $\tau^-$ -Lepton an. Beachten Sie hierbei die Massen der Zerfallsprodukte. Skizzieren Sie jeweils die Feynman-Diagramme.
- b. Die Zerfallsbreite des Myons ergibt sich zu

$$\Gamma(\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu) = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3}$$

Leiten Sie damit die Lebensdauer des  $\tau^-$ -Leptons aus der Lebensdauer des Myons ab.

$$m_\mu = 105.7 \text{ MeV}, \tau_\mu = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}, m_\tau = 1776.9 \text{ MeV}$$

### Aufgabe 3 : Pionen-Zerfall

Geladene Pionen können als leichteste geladene Hadronen nur in einem semileptonischen Prozess zerfallen. Die beobachtete Lebensdauer ist  $\tau_\pi = 2.603 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ . Die Messung des Verzweigungsverhältnisses  $R$  ergab

$$R = \frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu)} = 1.23 \cdot 10^{-4}.$$

- a. Warum treten die energetisch möglichen Zerfälle  $\pi^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$  oder  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \gamma$  nicht auf?
- b. Zeichnen Sie das Feynman-Diagramm für den Zerfall des Pions und überlegen Sie sich wie sich Spin und Impuls der Zerfallsprodukte im Schwerpunktssystem des Pions verhalten. Wie würden die geladenen Pionen zerfallen, wenn Elektron und Myon masselos wären?

- c. Welches Verzweigungsverhältnis  $R$  für den Zerfall von geladenen Pionen würden Sie aufgrund von Phasenraumbetrachtungen erwarten?
- d. Zeigen Sie, dass der experimentelle Wert für das Verzweigungsverhältnis  $R$  erklärt werden kann, wenn das  $W$ -Boson nur an linkshändige Teilchen und rechthändige Antiteilchen koppelt.
- e. Die schwache Wechselwirkung hat keine Symmetrie unter Paritätstransformation ( $P$ ) und Ladungskonjugation ( $C$ ). Überlegen Sie sich, dass beides gleichbedeutend ist mit der Helizitätsabhängigkeit der Kopplung der  $W/Z$ -Bosonen. Wie verhält sich die schwache Wechselwirkung unter einer  $CP$ -Transformation?

#### **Aufgabe 4 : Stochastisches Kühlen**

Eine wichtige Voraussetzung für die Entdeckung der Austauschbosonen der schwachen Wechselwirkung  $W^\pm$  und  $Z^0$  am CERN im Jahr 1983 war eine Entwicklung, die Simon van der Meer 1984 den Nobelpreis für Physik einbringen sollte: das stochastische Kühlen, eine Methode zur Reduktion des Phasenraumvolumens von Teilchen in einem Speicherring.

- a. Die Antiprotonen werden durch Beschuß eines stationären Kupfer-Targets mit Protonen ( $E=26$  GeV) erzeugt ( $p + p \rightarrow p + p + \bar{p} + p$ ). Welche Konsequenzen hat diese Produktionsweise für die Impulsverteilung und den Emissionswinkel der Antiprotonen? Wie hoch ist der Fluss der Antiprotonen im Vergleich zu den einlaufenden Protonen?
- b. Die Antiprotonen werden weiterhin in einem Speicherring (antiproton accumulator) gesammelt, um eine hohe Strahlintensität zu erreichen. Wie verläuft ihre Trajektorie bezüglich der idealen Kreisbahn?
- c. Mittels des Prinzips der stochastischen Kühlung werden die Antiprotonen nun gebündelt. Dazu wird an einer Stelle des Speicherrings ('pick-up') ein Signal proportional zur Abweichung  $x$  des Antiprotons von der idealen Bahn an einen sogenannten 'kicker' übertragen, der dann wiederum das Antiproton um einen Winkel proportional zur Abweichung ablenkt (siehe Abb. 1). Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit eine Fokussierung aller Antiprotonen jeglicher Phase auftritt? Auf was muss für den Abstand von pick-up zu kicker noch geachtet werden?
- d. Betrachtet man nun realistischerweise statt eines einzelnen Teilchens nun ein Sample von Antiprotonen, muss nun die Überlagerung der Signale aller Antiprotonen im entsprechenden Zeitfenster berücksichtigt werden. Welche Bedeutung kommt den Signalen der anderen Antiprotonen zu (in Bezug auf das Referenz-Teilchen)? Was passiert in erster/ zweiter Näherung?
- e. Die  $W^\pm$ -Bosonen zerfallen via  $W^\pm \rightarrow e^\pm(\bar{\nu}_e)$  und  $W^\pm \rightarrow \mu^\pm(\bar{\nu}_\mu)$ . Wie kann man diese Zerfälle von Zerfällen von Hadronen in Leptonen unterscheiden?

#### **Aufgabe 5 : $e^+e^-$ Collider**

Durch Kollision von Elektronen und Positronen bei genügend hohen Energien lassen sich alle elektromagnetisch und schwach wechselwirkenden Teilchen erzeugen. In Speicherringen werden diese dann in entgegengesetzter Richtung beschleunigt und mit der gleichen Energie zur Kollision gebracht.

- a. Welche Teilchen können erzeugt werden? Zeichnen Sie die Feynman-Diagramme der möglichen Reaktionen.

- 
- b. Am LEP am CERN (Umfang 27 km, Betrieb bis 2000) konnten Elektronen und Positronen auf jeweils maximal 105 GeV beschleunigt werden. Schätzen sie unter Annahme einer idealen Kreisbahn ab, wieviel Energie man den Teilchen pro Umlauf als Ersatz für Strahlungsverluste durch Synchrotronstrahlung zuführen muss, um sie auf maximaler Energie zu halten.
- c. Im Bereich der  $Z^0$ -Resonanz ist der Teilchenerzeugungs-Wirkungsquerschnitt durch  $e^+e^-$ -Annihilation etwa 50 pb. Welche Luminosität ist erforderlich, um ein  $Z^0$  pro Stunde zu beobachten? Berechnen Sie die vom LEP erreichte Luminosität. Es sind jeweils 4 Teilchenpakete im Ring, der mittlere Strom pro Teilchensorte beträgt 2 mA und der Strahlquerschnitt ist  $0,02 \text{ mm}^2$ .