

Name:

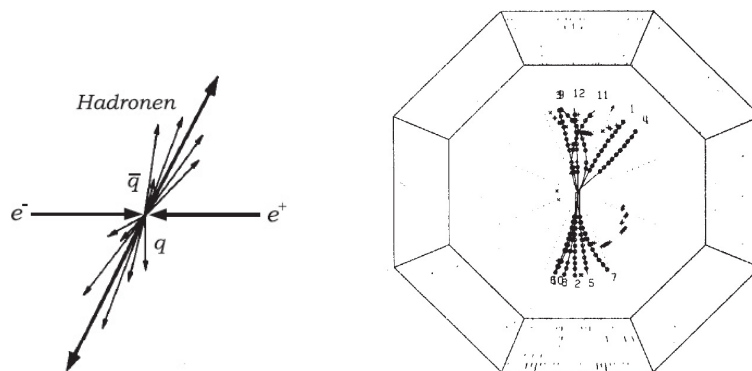
Gruppe:

Aufgabenblatt 5 (TP) - Physik V - WS 2013/2014

Diskussion/Abgabe: 21./22. 11. 2013 in den Übungsgruppen

Aufgabe 5.1: e^+e^- -Annihilation in Hadronen (1 Punkt)

Am DESY wurde in den 1980er Jahren der e^+e^- -Speicherring PETRA betrieben, in dem Elektronen und Positronen bei einer Schwerpunktsenergie von bis zu 38 GeV zur Kollision gebracht wurden. An diesem Beschleuniger wurde neben der Produktion von Leptonpaaren auch die Produktion von Hadronen untersucht, was zur Entdeckung des Gluons führte. Hadronen entstehen aus Quarkpaaren, die in der e^+e^- -Annihilation erzeugt werden. Die folgende Abbildung zeigt ein vom CELLO-Detektor aufgenommenes hadronisches Ereignis, in dem man 2 hadronische Teilchenjets, die den ursprünglichen Quarks entsprechen, erkennen kann.



- Welche Quark-Antiquarkpaare werden bei einer Schwerpunktsenergie von 38 GeV produziert.
- Neben Sie an, dass zur Annihilationsreaktion bei dieser Schwerpunktsenergie nur die elektromagnetische Wechselwirkung beiträgt, und drücken Sie den Wirkungsquerschnitt für die Produktion eines Quark-Antiquarkpaares des Flavors q_f als Funktion des Myonpaarwirkungsquerschnitts ($\sigma_{\mu\mu} = \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$) aus. Berücksichtigen Sie, dass ein Quark-Antiquarkpaar in verschiedenen Farbladungen produziert werden kann, die im Experiment nicht unterscheidbar sind.
- Berechnen Sie den Wirkungsquerschnitt für die Hadronproduktion, d.h. für die Produktion aller möglichen Quark-Antiquarkpaare.

Aufgabe 5.2: Zweikörperzerfall (1 Punkt)

Die Zerfallsrate Γ_f eines instabilen Teilchens in einen gegebenen Endzustand f kann mit der "Goldenen Regel" berechnet werden:

$$\Gamma_f \propto |\mathcal{A}_f|^2 \rho(E_f).$$

- Betrachten Sie die beiden Zweikörperzerfälle des Pions, $\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$ und $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$, und nehmen Sie zunächst an, dass die Übergangsamplitude \mathcal{A}_f für beide Prozesse gleich sei. Berechnen Sie unter dieser Annahme das Verhältnis der beiden Raten $\Gamma_{\pi \rightarrow \mu\nu} / \Gamma_{\pi \rightarrow e\nu}$. Benutzen Sie hierzu die Zweiteilchenzustandsdichte der Vorlesung:

$$\rho_2 = \frac{V}{2\pi\hbar c^2} \cdot \frac{1}{E_1 + E_2} \cdot |\vec{p}_1| \int d\Omega_1$$

Hinweis: Berechnen Sie E_1 und $|\vec{p}_1|$ im Ruhesystem des zerfallenden Pions. Zeigen Sie, dass im allgemeinen Fall gilt:

$$E_1 = \frac{M^2 + m_1^2 - m_2^2}{2M}$$

Berücksichtigen Sie weiter, dass Neutrinos masselos sind ($m_2 = 0$) und berechnen Sie $|\vec{p}_1|$.

- b) Aufgrund von Helizitätserhaltung sind die Quadrate der Übergangsamplituden $|\mathcal{A}_{\pi \rightarrow \ell \nu}|^2$ allerdings proportional zu $(1 - \beta_\ell)$. Hierbei ist $\beta_\ell = p_\ell/E_\ell$ für $\ell = e, \mu$. Berechnen Sie das Verhältnis $\Gamma_{\pi \rightarrow \mu \nu} / \Gamma_{\pi \rightarrow e \nu}$ unter Berücksichtigung der Helizitätsunterdrückung und vergleichen Sie es mit dem experimentellen Resultat (siehe z.B. PDG).

Aufgabe 5.3: Energieverlust von Teilchen (1 Punkt)

Beim CMS-Experiment am LHC durchqueren Myonen, die aus der Proton-Proton-Kollision stammen, zu erst die inneren Detektoren, die aus sehr wenig Material bestehen und einen vergleichsweise geringen Energieverlust bewirken. Danach passieren die Myonen das elektromagnetische Kalorimeter und das hadronische Kalorimeter, bevor sie in den Myonkammern nachgewiesen werden. Das elektromagnetische Kalorimeter besteht aus einer 230 mm dicken Schicht szintillierender Kristalle aus PbWO_4 (PbWO_4 : Dichte $\rho = 8.3 \text{ g/cm}^3$, Strahlungslänge $X_0 = 0.9 \text{ cm}$, hadronische Wechselwirkungslänge $\lambda_{WW} = 21 \text{ cm}$). Das hadronische Kalorimeter besteht aus einer 860 mm dicken Messingschicht (Messing: Dichte $\rho = 8.5 \text{ g/cm}^3$, Strahlungslänge $X_0 = 1.6 \text{ cm}$, hadronische Wechselwirkungslänge $\lambda_{WW} = 16 \text{ cm}$).

- a) Schätzen Sie für ein Myon einer Energie von 100 GeV den Energieverlust beim Durchgang durch die Kalorimeter ab. Aufgrund des sehr langsamen relativistischen Anstiegs der Bethe-Bloch-Formel können die Myonen als minimal ionisierend behandelt werden. Eine Abschätzung der Energieverlustes auf $\pm 50 \%$ ist ausreichend.
- b) Beschreiben Sie qualitativ wie sich (1) ein Photon, (2) ein Elektron und (3) ein Proton gleicher Energie (100 GeV) in den Kalorimetern verhält.

Aufgabe 5.4: Erhaltungsgrößen (1 Punkt)

Welche der folgenden Reaktionen sind aufgrund der Erhaltung von Quantenzahlen (Ladung, Leptonenzahl, Baryonenzahl) verboten? Falls eine Reaktion nicht möglich ist, begründen Sie warum. Nehmen Sie an, dass bei Reaktionen mit mehr als einem Teilchen im Anfangszustand genug Energie zur Erzeugung der Teilchen im Endzustand vorhanden ist.

- | | |
|--|---|
| a) $\nu_e + \mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ | f) $p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}_e$ |
| b) $p + n \rightarrow \Lambda + \pi^+$ | g) $\Sigma^{*0} \rightarrow \Sigma^+ + \pi^-$ |
| c) $e^+ + e^- \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^+$ | h) $\tau^- \rightarrow \pi^- + \nu_\tau$ |
| d) $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ | i) $K^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^- + \pi^0$ |
| e) $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$ | j) $p + p \rightarrow J/\psi + \pi^0 + \Delta^{++}$ |

Verständnisfragen / Fragen zur Diskussion

- Zwei Teilchen X und Y mit unterschiedlicher Masse ($M_X > M_Y$) und ansonsten gleichen Quantenzahlen zerfallen ausschließlich aufgrund des gleichen Prozesses in die Teilchen a und b : $X, Y \rightarrow a + b$. Was kann man über die Lebensdauern der beiden Teilchen sagen?

- Betrachten Sie die beiden Reaktionen $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ und $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ bei einer Schwerpunktsenergie E_{CMS} kurz oberhalb der Tau-Schwelle $E_{CMS} > 2m_\tau c^2$. Welche Reaktion hat den größeren Wirkungsquerschnitt?
- Der Wirkungsquerschnitt für eine Streureaktion $a + b \rightarrow 1 + 2$ wurde in der Vorlesung hergeleitet:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_1} \propto (p_1^2 c^2) |A_{fi}|^2$$

Für einen Streuprozess wird ein Wirkungsquerschnitt gemessen, der mit dem Quadrat der Schwerpunktsenergie ansteigt. Was ergibt sich daraus für die Energieabhängigkeit der Übergangsamplitude A_{fi} dieses Prozesses? Bemerkung: Für die Neutrino-Nukleon-Streuung findet man für nicht zu große Neutrinoenergien das Verhalten $\sigma(\nu N) \propto m_N E_\nu = E_{CMS}^2$.

- Ab welcher Energie nennt man ein Myon minimal ionisierend?
- Schätzen Sie den Energieverlust eines minimal ionisierenden Myons beim Durchgang durch einen 1 cm dicken Bleiabsorber ab ($\rho \approx 11 \text{ g/cm}^3$).