

Übungen zu Moderne Experimentalphysik III (Kerne und Teilchen) Sommersemester 2017

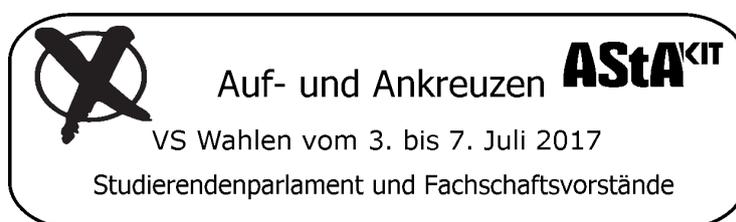
Übungsblatt Nr. 9

Ausgabe: Di, 04.07.2017

Abgabe: Di, 11.07.2017 (13:30) Briefkasten Geb. 30.23

Name des Übungsgruppenleiters und Gruppenbuchstabe:

Namen der bearbeitenden Gruppe:



Aufgabe 1: Quarkmodell

(5 Punkte)

Hadronen werden im Quarkmodell als gebundene Zustände elementarer stark wechselwirkender Spin- $\frac{1}{2}$ -Fermionen beschrieben, die als Quarks bezeichnet werden. Die Mesonen und Baryonen mit der geringsten Masse sind gebundene Zustände der u -, d - und s -Quarks und formen ein Triplett unter der Symmetriegruppe $SU(3)$.

- Beschreiben Sie kurz die experimentelle Evidenz für das Quarkmodell.
- Was ist die physikalische Bedeutung der globalen Flavor- $SU(3)$ -Symmetrie der starken Wechselwirkung, wie sie von Gell-Mann und Ne'eman eingeführt wurde? Wodurch ist diese Symmetrie gebrochen?
- Geben Sie die Multipletts der leichtesten pseudoskalaren und Vektormesonen an. Charakterisieren Sie jeden Zustand im Multiplett mit den Quantenzahlen J^P (Gesamtdrehimpuls und Parität), T und T_3 (starker Isospin), S (Strangeness) und Y (Hyperladung).
- Basierend auf den Vorhersagen des Quarkmodells wurde eine weitere Quantenzahl, die „Farbe“, eingeführt. Welche experimentelle Evidenz gibt es für die Existenz dieser physikalischen Eigenschaft? Wie viele Farbzustände gibt es in der Natur und wie kann man diese Zahl experimentell bestimmen?

Aufgabe 2: e^+e^- -Collider

(5 Punkte)

Elektronen und Positronen kollidieren in einem Speicherring frontal mit einer Strahlenergie E von jeweils 4 GeV. Der differentielle Wirkungsquerschnitt für den Prozess $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ ist gegeben durch

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{(\alpha\hbar c)^2}{4s} (1 + \cos^2\theta) ,$$

wobei θ den Polarwinkel und s die bekannte Mandelstam-Variable bezeichnet.

- Zeigen Sie, dass der totale Wirkungsquerschnitt gegeben ist durch

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{4\pi\alpha^2(\hbar c)^2}{3s} .$$

- Welche Produktionsrate von $\mu^+\mu^-$ -Paaren erwartet man bei einer Luminosität von $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$?
- Welche Produktionsrate für Ereignisse mit hadronischem Endzustand erwartet man?

- d) An dem geplanten International Linear Collider [1] sollen Elektronen und Positronen mit einer Schwerpunktsenergie von 500 GeV frontal kollidieren. Wie groß müsste die Luminosität sein, damit man den Wirkungsquerschnitt für Ereignisse mit hadronischem Endzustand innerhalb von 2 Stunden mit 10% statistischer Unsicherheit messen kann? Nehmen Sie an, dass der Detektor alle Hadronen mit 100% Effizienz misst.

Hinweis: Es ist $\alpha = \frac{1}{137}$ und $\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$.

Aufgabe 3: Invariante Zwei-Myonen-Masse bei CMS (3 Punkte)

Mit dem CMS-Detektor werden die in Proton-Proton-Kollisionen am LHC entstehenden Teilchen vermessen. Unter anderem wird nach den Zerfällen von schweren Teilchen in zwei Myonen gesucht. Dazu werden Ereignisse selektiert, in denen zwei Myonen mit entgegengesetzter Ladung detektiert werden, und aus deren gemessenen Vierervektoren die invariante Masse berechnet. In Abb. 1 ist die Verteilung der so rekonstruierten invarianten Zwei-Myonen-Masse gezeigt, die aus den ersten $0,9 \text{ fb}^{-1}$ in diesem Jahr aufgezeichneten Proton-Proton-Kollisionsereignissen bestimmt wurde¹.

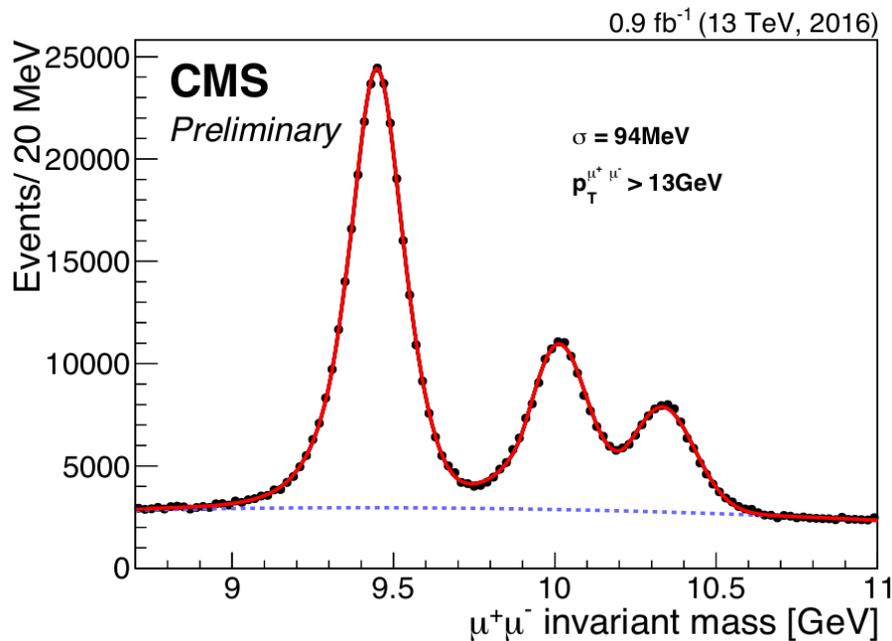


Abbildung 1: Invariante Zwei-Myonen-Masse, rekonstruiert aus $0,9 \text{ fb}^{-1}$ mit dem CMS-Detektor im Mai 2016 aufgezeichneten Proton-Proton-Kollisionsereignissen. Entnommen aus [2].

- a) Welchen in zwei Myonen zerfallenden Teilchen $X \rightarrow \mu^+ \mu^-$ entsprechen die beobachteten Resonanzen?

¹Die Daten wurden im Mai 2016 aufgezeichnet.

- b) Betrachten Sie die Resonanz bei 9,5 GeV, deren gemessene Breite $\sigma = 94 \text{ MeV}$ beträgt. Wie vergleicht sich dies mit der erwarteten Zerfallsbreite des Teilchens X und der Impulsauflösung des CMS-Detektors für Myonspuren?

Es genügt, hier die Größenordnungen zu betrachten. Machen Sie eine einfache Abschätzung: nehmen Sie an, dass X im Laborsystem in Ruhe produziert wird und sich die beiden Myonen in der transversalen Ebene bewegen.

Hinweis: In dem betrachteten Impulsbereich ist die Myonimpulsauflösung bei CMS durch die Messung des inneren Spurdetektors bestimmt. Diese wurde z.B. in Aufgabe 3 d) auf Aufgabenblatt 3 bestimmt.

Aufgabe 4: Tiefinelastische Streuung bei HERA (7 Punkte)

Mit den Detektoren H1 und ZEUS am HERA-Speicherring am DESY wurde die Struktur des Protons untersucht. Dazu wurden u.a. Protonen mit Energien von $E_p = 920 \text{ GeV}$ und Elektronen mit Energien von $E_e = 27,5 \text{ GeV}$ zur Kollision gebracht. In Abb. 2 sind die Signale visualisiert, die in einem

Proton-Elektron-Kollisionsereignis entstandenen Teilchen im ZEUS-Detektor erzeugt. In diesem Ereignis wurde ein Elektron unter einem Streuwinkel $\theta = 85^\circ$ relativ zur Flugrichtung des einlaufenden Elektronenstrahls und mit einer Energie von $E'_e = 35 \text{ GeV}$ gemessen.

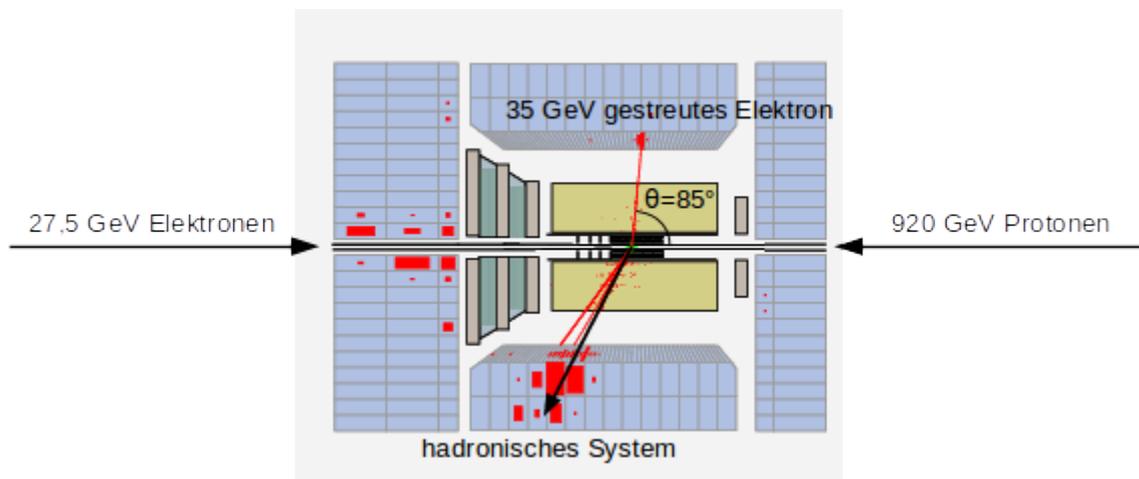


Abbildung 2: Visualisierung der Signaturen („event display“), welche die in einem Proton-Elektron-Kollisionsereignis entstandenen Teilchen im ZEUS-Detektor erzeugen. Entnommen aus [3].

- a) Zeichnen Sie ein mögliches Feynman-Diagramm der zugrundeliegenden Quark-Elektron-Wechselwirkung. Welches Eichboson wurde ausgetauscht?
- b) Berechnen Sie den Impuls des Quarks vor der Streuung. Geben Sie das Ergebnis in GeV an.

Hinweise: Erinnern Sie sich an die Interpretation der Bjorken-Skalierungsvariable. Bei der Rechnung müssen Sie das hadronische System nicht explizit berücksichtigen. Sie können die beteiligten Teilchen als relativistisch annehmen und die Massen vernachlässigen.

- c) In einer weiteren Kollision wird im Endzustand nur das hadronische System, aber kein Elektron nachgewiesen. Welcher Streuprozess hat stattgefunden? Zeichnen Sie ein mögliches Feynman-Diagramm der Quark-Elektron-Wechselwirkung. Welches Eichboson wird ausgetauscht?

Nehmen Sie an, dass der ZEUS-Detektor eine Effizienz von 100% für den Nachweis von Elektronen besaß.

Literatur

- [1] “International Linear Collider”. <http://www.linearcollider.org/ILC>.
- [2] CMS Collaboration, “Muon performance in early 2016 collision data”. CMS-DP-2016-027, <http://cds.cern.ch/record/2161025>, 2016.
- [3] P. Newman and M. Wing, “The Hadronic Final State at HERA”, *Rev. Mod. Phys.* **86** (2014), no. 3, 1037, [arXiv:1308.3368](https://arxiv.org/abs/1308.3368).
doi:10.1103/RevModPhys.86.1037.