

Übungen zu Moderne Experimentalphysik III (Teilchen und Hadronen) Sommersemester 2020

Übungsblatt Nr. 5

Bearbeitung bis 08.06.2020

Bitte denken Sie an die Anmeldung zur Vorleistung im Campus-System.

Aufgabe 1: Quarkmodell

(1+2+2+3=8 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 können mit Darstellungen der Symmetriegruppe $SU(3)$ identifiziert werden.

- 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: Die Entdeckung des Gluons

(0 Punkte)

Nur für aktiven Beitrag: Die Quantenchromodynamik (QCD) hatte sich in den 1970er Jahren als Theorie zur Beschreibung der Hadronen und der starken Wechselwirkung durchgesetzt, gestützt durch experimentelle Befunde. Eine weitere Vorhersage der QCD war die Existenz eines Austauschteilchens, analog zum Photon in der elektromagnetischen Wechselwirkung, welches die Kräfte zwischen den Quarks vermittelt: das Gluon. Obwohl damals kaum noch jemand an der Existenz des Gluons zweifelte, gab es bis Ende 1979 keinen experimentellen Nachweis.

Im Nachfolgenden wollen wir uns mit der Entdeckung des Gluons bei PETRA (Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage) beschäftigen. Lesen Sie dazu die Originalpublikation der TASSO-Kollaboration [1] zur ersten Evidenz für die Produktion von Gluonen (freier Zugriff innerhalb des KIT-Netzwerks): Physics Letters B, 86 (1979) 243-249.

Entwerfen Sie eine kurze Präsentation und gehen Sie dabei auf folgende Aspekte ein:

- Wie ist das Experiment aufgebaut? Welcher Prozess wird untersucht? Welcher Energiebereich wird abgedeckt? Wie manifestiert sich das hypothetische Gluon im Detektor?
- Beschreibt der vorhergesagte Wirkungsquerschnitt für Quark-Antiquark-Produktion die gemessenen Daten zufriedenstellend in allen Energiebereichen?
- Wie kann man Ereignisse mit einem „harten“, d.h. hochenergetischen, Gluon von Ereignissen ohne ein solches Gluonen unterscheiden? Welche Observablen eignen sich hierzu besonders gut?
- Wie wurde überprüft, dass es sich um keinen zufälligen Überschuss an Ereignissen handelt?

Aufgabe 3: Quark-Gluon-Plasma

(0 Punkte)

Nur für aktiven Beitrag: Aus der Theorie der QCD folgt, dass sich Quarks und Gluonen nicht frei bewegen können, sondern dem sog. *confinement* unterliegen. Es gibt jedoch theoretische Vorhersagen, nach denen dieser Effekt bei hohen Temperaturen oder Dichten verschwindet und sich ein Quark-Gluon-Plasma (QGP) einstellt, ähnlich einem klassischen Plasmas mit ionisiertem Gas. Die Beobachtung und Vermessung des QGPs ist Gegenstand aktueller Forschung, sowohl am Large Hadron Collider (LHC) in der Schweiz, als auch am Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) in den USA. Beschreiben Sie in einem kurzen Vortrag die Relevanz des QGPs für

aktuelle Fragestellungen der Physik und wie der experimentelle Nachweis an den Beschleunigerexperimenten gelingt.

Aufgabe 4: Bjorken-x und Partonimpulsanteil (4 Punkte)

In der tiefinelastischen Streuung gilt näherungsweise, dass für einen gegebenen Wert der Bjorkensche Skalenvariable an einem Parton mit Impulsanteil $\xi = x$ gestreut wird. Zeigen Sie, dass der Impulsanteil ξ des gestreuten Partons bei Berücksichtigung der Nukleonmasse M und der Partonmasse m gegeben ist durch ($c = 1$):

$$\xi = x \left(1 + \frac{m^2 - M^2 x^2}{Q^2} \right),$$

wobei Q^2 den Impulsübertrag bei der Streuung an einem anderen Teilchen angibt. Verwenden Sie dabei folgende Näherung:

$$\sqrt{1 + \epsilon(1 + \epsilon')} \approx 1 + \frac{\epsilon}{2} \left(1 + \epsilon' - \frac{\epsilon}{4} \right)$$

für kleine ϵ und ϵ' . Wann gilt diese Näherung?

Aufgabe 5: Tiefinelastische Streuung bei HERA (2+4+2=8 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. 1 sind die Signale visualisiert, die in einem Proton-Elektron-Kollisionsereignis entstandenen Teilchen im ZEUS-Detektor erzeugten. 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.

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

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

- In einer weiteren Kollision wird im Endzustand nur das hadronische System, aber kein Elektron nachgewiesen¹. Welcher Streuprozess hat stattgefunden? Zeichnen Sie ein mögliches Feynman-Diagramm der Quark-Elektron-Wechselwirkung. Welches Eichboson wird ausgetauscht?

¹Nehmen Sie eine 100%ige Nachweiseffizienz für Elektronen an.

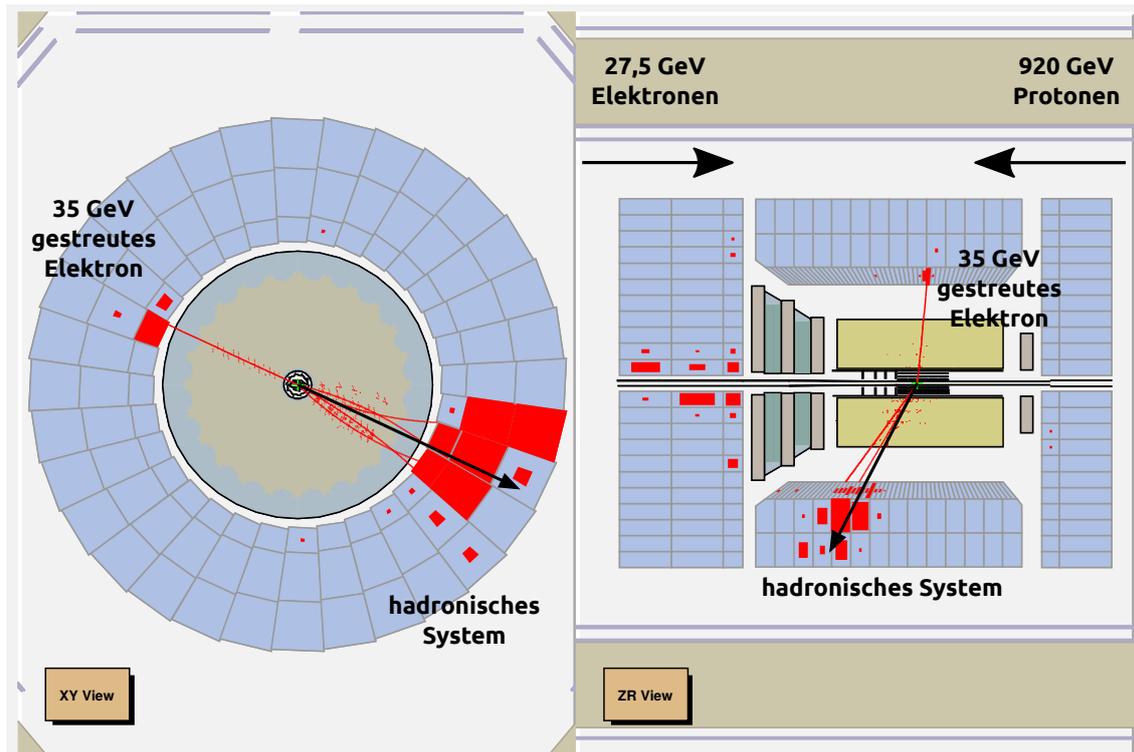


Abbildung 1: Visualisierung der Signaturen („event display“), welche die in einem Proton-Elektron-Kollisionsereignis entstandenen Teilchen im ZEUS-Detektor erzeugen. Die linke Teilabbildung (‘‘XY View‘‘) zeigt das Kollisionsereignis in Strahlrichtung, die rechte Teilabbildung (‘‘ZR View‘‘) zeigt eine Ansicht von der Seite. Entnommen aus [2].

Literatur

- [1] TASSO Collaboration, ‘‘Evidence for Planar Events in $e^+ e^-$ Annihilation at High-Energies’’, *Phys. Lett. B* **86** (1979) 243–249.
doi:10.1016/0370-2693(79)90830-X.
- [2] P. Newman and M. Wing, ‘‘The Hadronic Final State at HERA’’, *Rev. Mod. Phys.* **86** (2014), no. 3, 1037, arXiv:1308.3368.
doi:10.1103/RevModPhys.86.1037.