

Teilchen- und Kernphysik WS 2018/19

M. Kobel, K. Danziger, L. Wüst, O. Novgorodowa

Übung 8, Ausgabe 29.11.2018

1 Anwesenheitsübung

1.1 Vergleich QCD - QED

Benennen Sie die wesentlichen Ähnlichkeiten und die wesentlichen phänomenologischen (= in Messungen, Reaktionen oder Bindungen beobachtbaren) Unterschiede zwischen QED und QCD. Versuchen Sie, diese auf Unterschiede in den zugrundeliegenden Eichtheorien zurückzuführen.

2 Hausaufgaben

2.1 Aufgabe 2: R-Verhältnis in $e^+ + e^-$ Annihilation

Die Messung des Verhältnisses

$$R(s) = \frac{\sum_q \sigma(e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q})(s)}{\sigma(e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-)(s)} \quad (1)$$

wobei die Summe über alle in der Reaktion kinematisch erreichbaren Quark-Flavours q und möglichen Kombinationen von starken Farbladungen läuft, war ein Meilenstein auf dem Weg zur Bestätigung der SU(3) als Eichgruppe der starken Wechselwirkung und der Darstellung der Quarks als Farbladungs-Tripletts.

1. Zeichnen Sie die (jeweils einfachsten) Feynmandiagramme für $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ und $e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q}$ für eine bestimmte Quark-Sorte ("flavor") q bei Schwerpunktsenergien $\sqrt{s} \ll m_Z$.
2. Welche s -Abhängigkeit erwarten Sie für $\sigma(e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-)$? Wie lauten die Vertexfaktoren an den Diagrammen? Wie hängen die Wirkungsquerschnitte jeweils von diesen Faktoren ab?
3. Welches R -Verhältnis erwarten Sie, wenn über alle in der Reaktion möglichen Quark-Flavors q und Farbladungen summiert wird, jeweils für Schwerpunktsenergien genügend oberhalb der doppelten Masse der Strange-Quarks (also für $1 \text{ GeV} < \sqrt{s} < 3 \text{ GeV}$), der Charm-Quarks (also für $4 \text{ GeV} < \sqrt{s} < 10 \text{ GeV}$), und der Bottom-Quarks (also für $11 \text{ GeV} < \sqrt{s}$)? Wie schließt man daraus auf die Multiplett-Darstellung (= Zahl der möglichen Farbladungen) der Quarks?

2.2 Feynman-Diagramme der QCD

Überlegen Sie ob die folgende Prozesse möglich sind. q steht für ein beliebiges Quark, g für ein Gluon, γ für ein Photon und p für ein Proton. Zeichnen Sie für die möglichen Prozesse alle Feynman-Diagramme "niedrigster Ordnung", d.h. mit der kleinsten Anzahl von Vertices, die Gluonen oder Photonen involvieren. Wenn keine explizite Farbladung angegeben ist, brauchen Sie diese auch nicht zu berücksichtigen. Wir verwenden hier die Notation mit (r,g,b) als Index für Farbladungen und $(\bar{r}, \bar{g}$ und $\bar{b})$ für Anti-Farbladungen. Spezifizieren Sie auch wieder, wenn möglich, die s,t und u-Kanäle.

1. $qg \rightarrow q\gamma$
2. $\gamma g \rightarrow q\bar{q}$
3. $g_{r\bar{b}}g_{b\bar{g}} \rightarrow q_r\bar{q}_{\bar{g}}$
4. $q\bar{q} \rightarrow qqgg$
5. $q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$
6. $e^+e^- \rightarrow g_{r\bar{b}}q_b\bar{q}_{\bar{r}}$
7. $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$
8. $p\bar{p} \rightarrow \pi^+\pi^-$
9. $p \rightarrow e^+\pi^0$

2.3 Parton-Parton-Reaktionen in pp -Kollisionen

Bei Proton-Proton Kollisionen hoher Energie wechselwirkt jeweils i.a. genau ein "Parton" i des einen Protons mit einem "Parton" j des anderen Protons. Partonen sind dabei Quarks ($u, d, s, c, b, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}$) oder Gluonen (g), die in den beiden kollidierenden Protonen, entweder als dauerhafte so genannte "Valenzquarks" oder als virtuelle so genannte "See"-Teilchen vorhanden sind. Mit welcher Wahrscheinlichkeit diese im Proton zu finden sind, beschreibt die Parton-Dichte-Funktion (PDF) $f(i)$. Den totalen Wirkungsquerschnitt eines bestimmten Prozesses $pp \rightarrow X$ bei der Schwerpunktsenergie $\sqrt{s}$ kann man dann schreiben als:

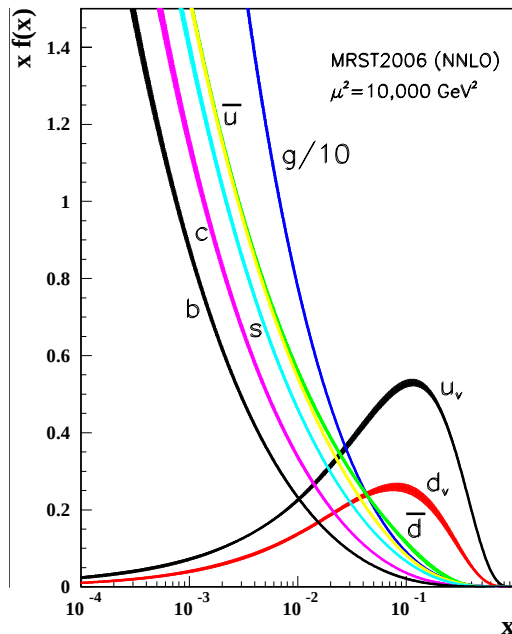
$$\sigma = \sum_{i,j} \int \hat{\sigma}_{ij}(\hat{s}) \int_0^1 \int_0^1 f_i(x_1) f_j(x_2) \delta(\hat{s} - x_1 x_2 s) dx_1 dx_2 d\hat{s} \quad (2)$$

Die verschiedenen Größen in der Gleichung sind:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{ij} &= \text{Parton-Parton Wirkungsquerschnitt } i + j \rightarrow X \\ \sqrt{\hat{s}} &= \text{reduzierte Schwerpunktsenergie der Reaktion } i + j \rightarrow X \\ x_1 &= \text{Impulsanteil des Partons } i, \text{ Energieanteil: } x_1 = \frac{2E_1}{\sqrt{s}} \\ x_2 &= \text{Impulsanteil des Partons } j, \text{ Energieanteil: } x_2 = \frac{2E_2}{\sqrt{s}} \\ f_i(x) &= \text{Parton-Dichte-Funktion (PDF) für Parton } i \text{ (genauso für } j \text{)} \\ &= \text{Wahrscheinlichkeit, das Parton } i \text{ mit Energieanteil } x \text{ in einem Proton} \\ &\quad \text{zu finden} \end{aligned}$$

Die Delta-Function $\delta(\hat{s} - x_1 x_2 s)$ beschreibt die Energieerhaltung im Streuprozesses.

1. Zeigen Sie, dass in der Tat $\hat{s} = x_1 x_2 s$ für den Parton-Parton-Prozess gilt, unter der Annahme, dass die Partonen masselos und kollinear zu den Protonenstrahlen sind. Die Protonen treffen mit entgegengesetzt gleichem Impuls aufeinander.
2. Bei Kollisionen zwischen zweier Protonen beim LHC mit einer Strahlenergie von jeweils 7 TeV entsteht ca. alle zwei Sekunden ein Paar aus einem Top- und Antitop-Quark mit einer Masse von je $m_t = 173$ GeV. Die Reaktion erfolgt über ein Parton i mit zufälligem Impulsbruchteil x_1 und ein Parton j mit zufälligem Impulsbruchteil x_2 des jeweiligen Protons.
 - Welchen Mindestwert von x_2 muss das Parton j besitzen, wenn es kinematisch möglich sein soll, bei der Kollision mit einem Parton i mit $x_1 = 0.01$ ein Top-Antitop Paar zu erzeugen?



- Was schließen Sie aus der oben abgebildeten Partondichteverteilung im Proton bei typischen LHC Energien über die relative Häufigkeit der Top-Paar Produktion über Gluon $gg \rightarrow t\bar{t}$ und Quark-Antiquark Vernichtung $u\bar{u} \rightarrow t\bar{t}$, wenn man annimmt, dass $\sigma(i(x_1)j(x_2) \rightarrow t\bar{t})$ für beide Prozesse ungefähr gleich ist? Betrachten Sie dazu als Beispiel $x_1 = 0.01$.