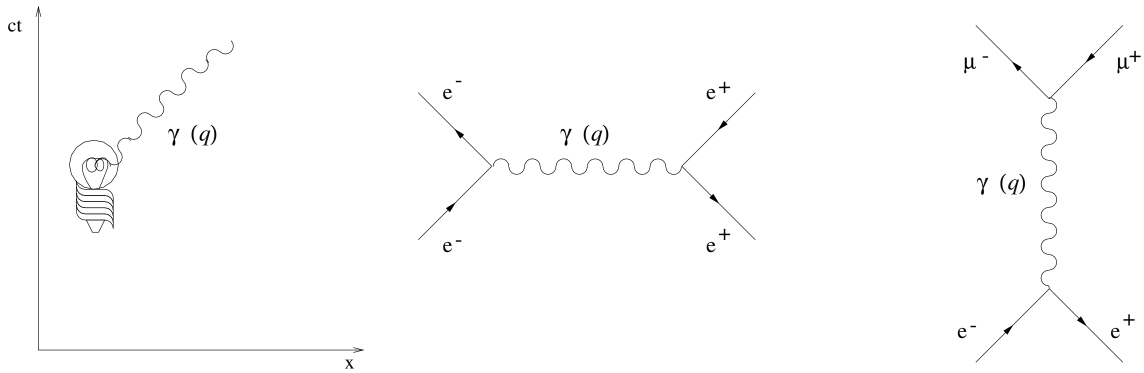
Teilchenphysik I

Übung 4: Streuprozesse

1 Anwesenheitsaufgaben

1.1 Reelle und virtuelle Photonen

Berechnen Sie das Quadrat des Viererimpulses des Photons in den folgenden drei Fällen:



Ordnen Sie die Begriffe "raumartig", "lichtartig" und "zeitartig" zu.

1.2 Der Wirkungsquerschnitt für Neutrinos

Ein Neutrinostrahl wird mit Zerfallsneutrinos von Pionen und Kaonen erzeugt. Er kann natürlich nicht fokussiert werden, da das Neutrino elektrisch neutral ist. Die Anforderung von massiver Abschirmung zur Absorption der Myonen im Strahl führt zu einem großen Abstand zwischen dem Neutrinodetektor und dem Erzeugungspunkt. Deshalb haben Neutrinostrahlen eine große transversale Ausdehnung. Wir nehmen die folgenden Werte an: ein zylindrischer Strahl mit 2 m Durchmesser und einen Fluß von 10^5 cm^{-2}s^{-1}.

Der Wirkungsquerschnitt der Neutrinos für ein Eisen-Target ist 5 $fb \times E$ pro Nukleon, wobei E die Energie des Neutrinos in GeV bezeichnet und fb Femtobarn sind (femto=10^{-15}). (Ist die Theorie der schwachen Wechselwirkung also wirklich nicht renormierbar?) Das Energiespektrum der Zerfallsneutrinos ist auch sehr breit, aber für die Zwecke dieser Aufgabe werden wir einen monochromatischen Strahl mit $E_\nu = 100\,GeV$ annehmen.

1. Berechnen Sie die Abschwächlänge des Neutrinostrahls in Eisen.
2. Wenn man einen Detektor aus Eisenplatten und dünnen Nachweisschichten baut, wie groß muß die gesamte Tiefe des Eisens sein, um eine Wechselwirkungsrate von 1 Hz zu erreichen?

3. Was ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein Neutrino in diesem Detektor wechselwirkt?

4. Vergleichen Sie diese Werte mit denen vom extrahierten Protonenstrahl im Fermi National Accelerator Laboratory, der 10^{13} 800 GeV Protonen pro Sekunde liefert. Der Wirkungsquerschnitt ist 13 millibarn pro Nukleon in Eisen und hängt von der Energie nur sehr schwach ab. Welche Länge muss ein Eisen-Target haben, damit 10% der Protonen wechselwirken? Was ist die Wechselwirkungsrate?

2 Hausaufgaben

2.1 Wirkungsquerschnitte

Ein Strahl des Stromes j trifft auf ein Target mit Dichte n_0 und der Dicke d. Der Querschnitt des Strahles ist A. Eine bestimmte Reaktion i geschieht mit einer Rate $\dot{N}_i$.

1. Geben Sie den Wirkungsquerschnitt σ_i in Abhängigkeit der oben genannten Größen an. (1 Punkt)

2. Betrachten Sie die Streuung eines Punktteilchens an einer harten Kugel des Radius R Berechnen Sie den Streuwinkel θ als Funktion des Stoßparameters und daraus den differentiellen Wirkungsquerschnitt. (2 Punkte)

3. Integrieren Sie diesen auf zum totalen Wirkungsquerschnitt. Haben Sie dieses Ergebnis erwartet ? (1 Punkt)

2.2 Luminosität

Die Reaktionsrate $R = \dot{N}$ für einen bestimmten Prozess an einem Beschleuniger ist proportional zum Wirkungsquerschnitt σ. Die Proportionalitätskonstante ist gerade die Luminosität $\mathcal{L}$:

$$R = \sigma \mathcal{L}.$$

Sie ist mit ein Maß für die Qualität des Beschleunigers. Für einen Teilchen Anti-Teilchen Beschleuniger ist sie :

$$\mathcal{L} = f\, n_b\, \frac{n_1\, n_2}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$

wobei f die Kollisionsfrequenz ist und n_b die Anzahl der Bündel (= bunches) in jedem Strahl. n_1 ist die Teilchenanzahl in den Bündeln des ersten Strahls und n_2 ist die entsprechende Anzahl für den zweiten Strahl. Die vertikale und horizontale Breite des Strahls am Wechselwirkungspunkt sei für beide Strahlen durch σ_x, σ_y gegeben.

1. Der LEP Ring ist ein 27 km langer e^+e^--Beschleuniger mit einer Schwerpunktsenergie von 91.2 GeV (diese Information reicht schon aus um die Kollisionsfrequenz zu berechnen). Jeder Strahl besteht aus 4 bunches zu je 7.5×10^{10} Teilchen. Die Strahle werden am Wechselwirkungspunkt runter auf $\sigma_x = 100\ \mu$m und $\sigma_y = 20\ \mu$m fokussiert.

   Berechnen Sie die Luminosität. (1 Punkt)

2. Der Wirkungsquerschnitt für Z^0-Produktion bei dieser Energie ist etwa 60 nb. Wieviel Z^0 Bosonen produziert man in einem typischen Betriebsjahr (10^7 Sekunden). (1 Punkt)

3. Experimentell wird die Luminosität nicht über die Strahl-Parameter bestimmt ($\sigma_{x/y}$ ist zu ungenau), sondern über die Bhabha ($e^+e^- \to \mathrm{e}^+e^-$) Streurate. Der Wirkungsquerschnitt ist genau bekannt. Er beträgt :

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = \frac{\alpha^2}{s} \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}.$$

   Wobei $\alpha = 1/137$ die Feinstrukturkonstante ist und s die quadrierte Schwerpunktsenergie. Der OPAL Detektor hat zwei spezielle Kalorimeter (genannt luminosity monitor) um Bhabha Ereignisse zu zählen. Diese Kalorimeter befinden sich jeweils 2.5 m vom Wechselwirkungspunkt entfernt und detektieren Bhabhas mit einem radialen Abstand zum Strahl zwischen 77 mm und 127 mm. Wie groß ist der Wirkungsquerschnitt für Bhabha Streuung in dem durch den Detektor überdeckten Winkelbereich ? (2 Punkte)

4. Während eines weiteren Betriebsjahres wurden 800000 Bhabha Ereignisse gesammelt und gleichzeitig 19031 Ereignisse des Typs $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$. Was ist der Wirkungsquerschnitt für diesen Prozess ? (1 Punkt)

5. Gehen Sie davon aus das Sie den inneren Radius des luminosity monitors nur mit einer Genauigkeit von 1 mm kennen. Hat das einen Auswirkung auf die vorangegangene Messung ? (1 Punkt)