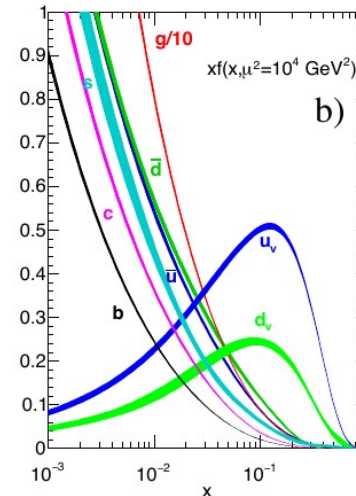
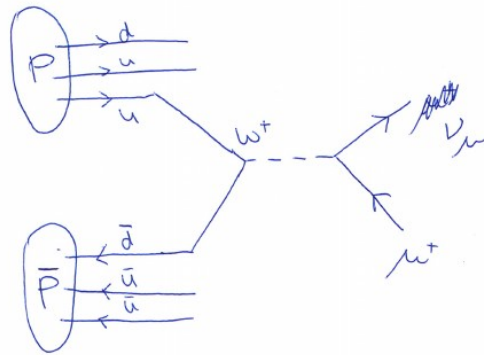


11.3 Produktion von W -Bosonen in Proton- (Anti-) Proton-Kollisionen (1 Punkt)

Die W -Bosonen wurden im Glashow-Weinberg-Salam-Modell der vereinheitlichten elektroschwachen Wechselwirkung mit einer Masse von etwa 80 GeV vorhergesagt und 1983 von den Experimenten UA1 und UA2 am $p\bar{p}$ Speicherring $S\bar{p}\bar{p}S$ am CERN bei einer Schwerpunktennergie von 540 GeV entdeckt. Die Erzeugung und Beschleunigung von Antiprotonen war dafür entscheidend. Protonen und Antiprotonen hatten dabei eine Strahlenergie von jeweils 270 GeV.

Die untenstehende Abbildung links zeigt den dominanten Feynman Graphen für die Produktion von W -Bosonen und den anschließenden Zerfall in ein Myon und ein Myon-Neutrino: $u\bar{d} \rightarrow W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$.



- Berechnen Sie die Impulsanteile der einlaufenden Quarks unter der Annahme, dass die schweren W -Bosonen in Ruhe produziert werden.
- Betrachten Sie die Partondichte-Verteilungen von Protonen in Abb. 18.5b aus <http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-structure-functions.pdf>, hier rechts in der Abbildung wiedergegeben, und diskutieren Sie die Vorzüge von $p\bar{p}$ - gegenüber pp -Kollisionen.
- Berechnen Sie die Impulsanteile auch für den LHC, d.h. für pp -Kollisionen bei $\sqrt{s} = 14$ TeV.

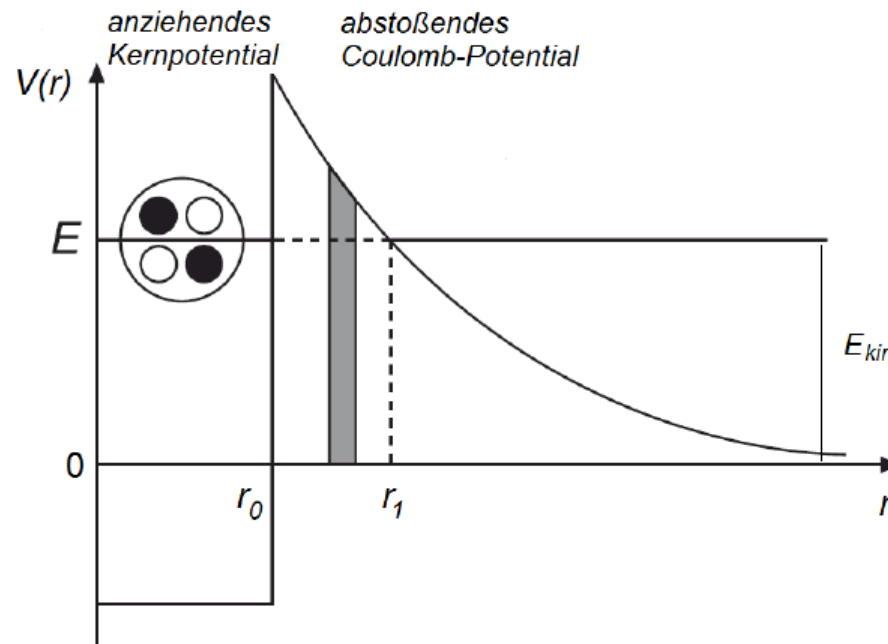
11.4 Farbladung (1 Punkt)

Ursache der starken Wechselwirkung ist die Farbladung, welche von Quarks und Gluonen getragen wird. Zusätzlich stellt die Farbladung einen weiteren inneren Freiheitsgrad dar, der experimentell beobachtet wird.

- a) Skizzieren Sie den Feynman-Graphen für den “starken Zerfall” $\Delta^+ \rightarrow p\pi^0$. Betrachten Sie für eine gültige Farbkombination der beteiligten Quarks den Fluss der Farbladungen.
- b) Die große Masse des τ -Leptons erlaubt den schwachen Zerfall in hadronische Endzustände. Zeichnen Sie einen Feynman Graphen für den Zerfall des τ^+ -Leptons in leichte Quarks (u, d) bzw. nach $\mu^+ + \nu_\mu$. Schätzen Sie das Verhältnis der Zerfallsbreiten $R_{ud} = \Gamma_{ud}/\Gamma_{\mu\nu}$, ab. Vernachlässigen Sie dabei Unterschiede im Phasenraum.

12.4 Alpha-Zerfall (1 Punkt)

Der α -Zerfall eines Kerns mit (A, Z) lässt sich durch den Tunneleffekt qualitativ erklären (siehe Skizze). Hierbei durchtunnelt ein α -Teilchen mit der Gesamtenergie $E > 0$ die Coulomb-Barriere (vom Radius r_0 nach r_1), wobei r_0 etwa dem Radius des Tochterkerns ($A - 4, Z - 2$) entspricht. Das α -Teilchen wird weit entfernt vom Kern mit der kinetischen Energie E_{kin} detektiert, welche asymptotisch der Gesamtenergie E entspricht.



- a) Geben Sie die potentielle Energie eines α -Teilchens im Coulombpotential des Tochterkerns als Funktion des Abstands zur Mitte des Tochterkerns bei den Radien r_0 und r_1 an. Schätzen Sie r_0 aus der Massenzahl des Tochterkerns ab. Wie groß ist r_1 als Funktion von E und Z ?

- b) Für ein Wellenpaket mit Energie E ist die Tunnelwahrscheinlichkeit durch ein Kastenpotential der Höhe V und Dicke Δr gegeben durch:

$$T = e^{-2\Delta r \sqrt{2m(V-E)}/\hbar} \quad (1)$$

Für das Coulomb-Potential aus a) ist die Tunnelwahrscheinlichkeit durch

$$T = e^{-2G} \quad (2)$$

gegeben, wobei $x = r_1/r_0$. Der Gamow-Faktor G lautet

$$G = \int_{r_0}^{r_1} dr \sqrt{2m(V(r) - E)}/\hbar = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \int dr \sqrt{\frac{r_1}{r} - 1} \quad (3)$$

und kann dargestellt werden als

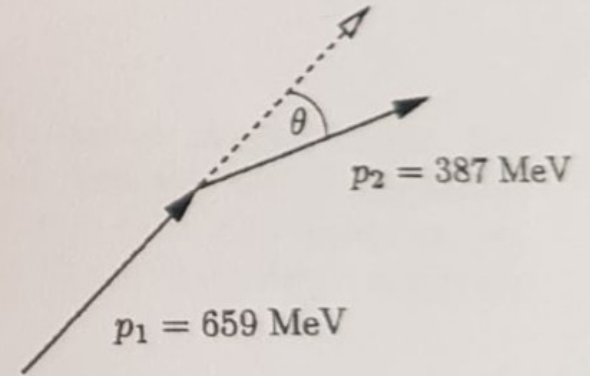
$$G = 2(Z - 2)\alpha \sqrt{\frac{2mc^2}{E}} \left(-\sqrt{x-1}/x + \arctan \sqrt{x-1} \right). \quad (4)$$

Wie hängt die Halbwertszeit $T_{1/2}$ von der α -Energie ab? Außerdem hängt die Halbwertszeit noch von der Wahrscheinlichkeit $w(\alpha)$ ab, daß sich ein α -Teilchen im Kern bildet und der Frequenz f , wie oft es gegen die Coulomb-Barriere läuft. Nehmen Sie an, dass $w(\alpha)$ gleich eins ist, d.h. stets ein α -Teilchen vorhanden ist, und die Frequenz grob abgeschätzt werden kann zu $f = \frac{v_\alpha}{2r_0}$, mit $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2$.

- c) Berechnen Sie die Halbwertszeiten der folgenden α -Strahler: ^{180}W ($E = 2.5$ MeV) und ^{267}Ds ($E = 11.6$ MeV).
- d) Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse aus c) mit experimentell gemessenen Daten. Welche Annahmen des Modells können Abweichungen verursachen?

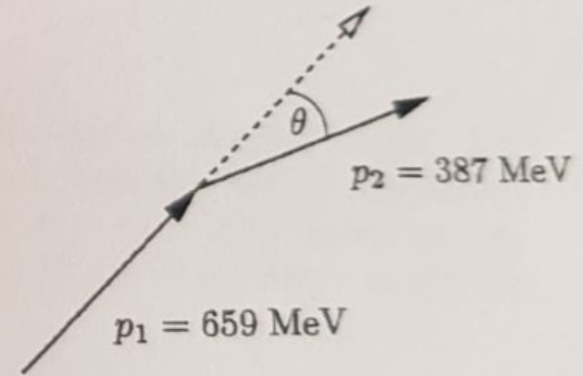
Problem 1.1 Teilchenzerfall (10P)

In einem Spurdetektor beobachtet man, dass eine Spur einen Knick macht. Die Teilchenimpulse vor und hinter dem Knick sind $p_1 = 659$ MeV und $p_2 = 387$ MeV. Der Winkel zwischen beiden Spuren beträgt $\theta = 32^\circ$. Der Experimentator glaubt, den Knick als Zerfall $K^- \rightarrow \pi^- X$ interpretieren zu können, wobei X ein unsichtbares neutrales Teilchen ist. Berechnen Sie die Masse von X als Funktion der Messgrößen und geben Sie den Zahlenwert der Masse an (Kaonmasse 494 MeV, Pionmasse 140 MeV)! Um welches Teilchen könnte es sich handeln?



Problem 1.1 Teilchenzerfall (10P)

In einem Spurdetektor beobachtet man, dass eine Spur einen Knick macht. Die Teilchenimpulse vor und hinter dem Knick sind $p_1 = 659$ MeV und $p_2 = 387$ MeV. Der Winkel zwischen beiden Spuren beträgt $\theta = 32^\circ$. Der Experimentator glaubt, den Knick als Zerfall $K^- \rightarrow \pi^- X$ interpretieren zu können, wobei X ein unsichtbares neutrales Teilchen ist. Berechnen Sie die Masse von X als Funktion der Messgrößen und geben Sie den Zahlenwert der Masse an (Kaonmasse 494 MeV, Pionmasse 140 MeV)! Um welches Teilchen könnte es sich handeln?



Lösung

Es seien $P_X = (E_X, \vec{p}_X)$, $P_1 = (E_1, \vec{p}_1)$ und $P_2 = (E_2, \vec{p}_2)$ die Viererimpulse der Teilchen. Dann gilt

$$\begin{aligned} P_1 &= P_X + P_2 \\ \Rightarrow P_X^2 &= (P_1 - P_2)^2 \\ \Rightarrow m_X^2 &= m_1^2 + m_2^2 - 2P_1 \cdot P_2 \\ &= m_1^2 + m_2^2 - 2E_1 E_2 + 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \\ &= m_1^2 + m_2^2 - 2\sqrt{m_1^2 + p_1^2} \sqrt{m_2^2 + p_2^2} + 2p_1 p_2 \cos \theta \end{aligned}$$

Ein Strahl geladener Pionen treffe auf ein 5 cm langes Target aus Graphit. Der totale Wirkungsquerschnitt σ für die π -C Reaktion sei 40 mb pro Nukleon.

- a) Wie groß ist die mittlere freie Weglänge der Pionen im Target?
- b) Welcher Anteil der Pionen erfährt eine Wechselwirkung im Target?

Hinweis: Die Dichte von Kohlenstoff ^{12}C ist $\rho = 2.265 \text{ g/cm}^3$, die Avogadro-Zahl beträgt $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Ein Strahl geladener Pionen treffe auf ein 5 cm langes Target aus Graphit. Der totale Wirkungsquerschnitt σ für die π -C Reaktion sei 40 mb pro Nukleon.

- Wie groß ist die mittlere freie Weglänge der Pionen im Target?
- Welcher Anteil der Pionen erfährt eine Wechselwirkung im Target?

Hinweis: Die Dichte von Kohlenstoff ^{12}C ist $\rho = 2.265 \text{ g/cm}^3$, die Avogadro-Zahl beträgt $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

$$a) \quad \lambda = \frac{1}{n_t \cdot \sigma} \quad ; \quad n_t = \frac{\rho \cdot N_A}{M_{\text{mol}}}$$

$$n_t = \frac{2,265 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 1,14 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{1}{1,14 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3} \cdot 40 \cdot 10^{-28} \text{ cm}^2 \cdot 12} = \frac{1}{0,055 \text{ cm}^{-1}} = 18,1 \text{ cm} = A$$

$$b) \quad f = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda}} = 1 - e^{-\frac{5 \text{ cm}}{18,1 \text{ cm}}} = 1 - e^{-0,276} = 0,24$$

$$p + \pi^{-} \rightarrow \Lambda^0 + \overline{\Sigma}^0$$

$$Z^0 \rightarrow \mu^{+} + e^{-}$$

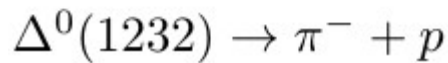
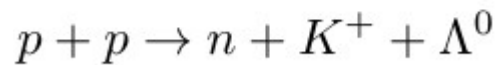
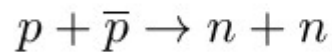
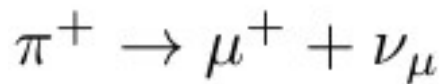
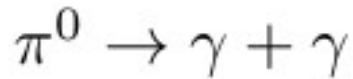
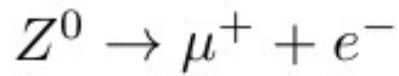
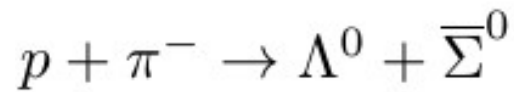
$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$$

$$p + \overline{p} \rightarrow n + n$$

$$p + p \rightarrow n + K^{+} + \Lambda^0$$

$$\Delta^0(1232) \rightarrow \pi^{-} + p$$



a) Erlaubt:



b) Erlaubt:



c) Verboten:

Verletzung der Baryonenzahl-Erhaltung

d) Verboten:

Verletzung der Leptonenzahl-Erhaltung

e) Verboten:

Verletzung der Baryonenzahl-Erhaltung

f) Verboten:

Verletzung der Ladungserhaltung

g) Erlaubt:

