

Experimentelle Elementarteilchenphysik 2: Hausaufgaben

Humboldt-Universität zu Berlin, Sommersemester 2017

Prof. Dr. H. Lacker

Übungsblatt 11 (Besprechung: 19.07.2017)

Aufgabe 1: Oszillation geladener Leptonen

Geladene Leptonen können nicht von einem Flavour in einen anderen Flavour oszillieren, da die Flavoureigenzustände definierte Masse besitzen. Man könnte jedoch Überlagerungszustände aus diesen Masseneigenzuständen bilden und fragen, ob man Oszillationen zwischen diesen Überlagerungszuständen messen könnte. Wir betrachten dazu die Produktion geladener Leptonen aus dem Zerfall eines ruhenden W -Bosons und nehmen an, dass Phasenraumunterschiede durch Neutrinomassen vernachlässigbar sind.

- Wie groß ist der Energieunterschied zwischen einem τ und einem Elektron bzw. zwischen einem μ und einem Elektron, die aus dem W -Zerfall kommen, im Vergleich zur Energieunschärfe im Zerfall? Werden demnach alle drei geladenen Leptonen kohärent erzeugt?
- Da die Leptonen mit einer Energie- bzw. Impulsunschärfe (σ_p) aus dem Zerfall kommen, werden Sie durch ein Wellenpaket einer typischen Unschärfe ($\sigma_x = 1/\sigma_p$) beschrieben. Die verschiedenen Leptonen-Flavours haben unterschiedliche Gruppengeschwindigkeiten $v_g = \frac{\partial E}{\partial |\vec{p}|}$. Schätzen Sie die Kohärenzlänge L_{coh} für das Paar τ und Elektron bzw. μ und Elektron ab.

Aufgabe 2: Neutrinooszillationsformeln

In der Vorlesung wurde mit Wellenpaketen gezeigt, unter welchen Bedingungen man Neutrinooszillationen erhält. Werden die Masseneigenzustände k kohärent erzeugt und bleibt die Kohärenz über große Distanzen erhalten, dann kann man mit ebenen Wellen rechnen und die Energien E_k für hochrelativistische Neutrinos schreiben als $E_k = E + \frac{m_k^2}{2E}$ mit der mittleren Neutrinoenergie $E \approx |\vec{p}|$. Die Zeitentwicklung von Masseneigenzuständen ist $|\nu_k(t)\rangle = e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle$ ($|\nu_k\rangle = |\nu_k(0)\rangle$) und man hat für $t = 0$ den kohärenten Zustand $|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$.

- Zeigen Sie, dass aus $|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle$ für die Übergangsamplitude folgt:
$$A_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* U_{\beta k} e^{-iE_k t}.$$

- Zeigen Sie, dass mit $L \approx t$ für die Übergangswahrscheinlichkeit folgt

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = |A_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}|^2 = \sum_{k,j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i \frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E}}.$$

- Zeigen Sie damit und mit Hilfe von $\sum_k U_{\alpha k}^* U_{\beta k} = \delta_{\alpha\beta} = |\delta_{\alpha\beta}|^2$:

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{k>j} \text{Re}(U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{kj}^2 L}{4E}\right) + 2 \sum_{k>j} \text{Im}(U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E}\right)$$

- Zeigen Sie für zwei Neutrinogenerationen: $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{kj}^2 L}{4E}\right)$ für $\alpha \neq \beta$.

e) Zeigen Sie, dass daraus folgt: $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1,27 \frac{\Delta m_{kj}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E [\text{MeV}]}\right)$.

Aufgabe 3: Neutrino-Oszillationen am Beschleuniger

Nehmen Sie an, ein Experiment findet ein $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ -Oszillations-Appearance-Signal, das einem Δm^2 etwa 1 eV^2 entspricht.

Das Signal soll wie folgt überprüft werden: Protonen werden auf ein Festkörpertarget geschossen, aus dem mit Hilfe von Magneten positiv geladene Pionen und Kaonen als Strahl ausgelenkt werden. Die geladenen Pionen und Kaonen können auf einer Zerfallsstrecke von 50 m zerfallen, so dass man im Anschluss einen Neutrinostrahl hat. Die entstehenden Neutrinos können im Anschluss in einem mit 800 t Mineralöl gefüllten Detektor nachgewiesen werden. Dabei sind sowohl Charged-Current- als auch Neutral-Current-Reaktionen von Elektron- und Myon-Neutrinos möglich. Mit dem Mineralöl lassen sich Cherenkov- also auch Szintillationsphotonen nachweisen, die durch geladene Teilchen entstehen.

- a) Warum kann das behauptete Appearance-Signal nicht mit den Neutrinooszillationsmessungen atmosphärischer und solarer Neutrinos in Übereinstimmung stehen?
- b) Welchen Abstand zwischen Target und Detektor würden Sie in etwa wählen, um das behauptete Oszillationssignal am besten zu überprüfen, wenn die mittlere Energie der Myon-Neutrinos 700 MeV beträgt?
- c) Aus welchen Quellen erwarten Sie Elektron- bzw. Myon-Neutrinos, wenn es die behauptete Oszillation nicht gäbe?
- d) Aus welchen Reaktionen beider Neutrinosorten erwarten Sie Lichtsignale von Myonen bzw. Elektronen im Detektor?
- e) Erwarten Sie, dass die Signatur dieser Signale verschieden ist?

Abgabe: 17.07.2017 up to 13:15 in box in front of room 1'415