

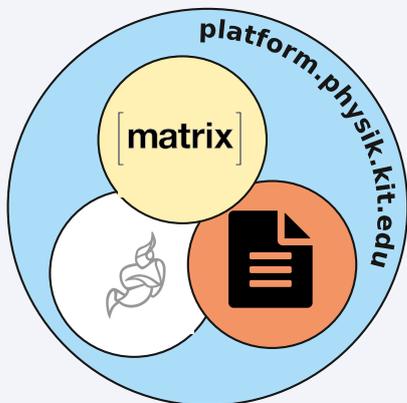
Übungen zu Moderne Experimentalphysik III (Teilchen und Hadronen) Sommersemester 2020

Übungsblatt Nr. 4

Bearbeitung bis 01.06.2020

Am 21.05.2020 findet kein Tutorium statt (Christi Himmelfahrt), das Tutorium für Übungsblatt 3 verschiebt sich daher um eine Woche nach hinten. Entsprechend verlängert sich die Abgabefrist von Übungsblatt 4 um eine Woche nach hinten auf den 01.06.2020.

Ein Angebot der Fachschaft und Fakultät für Physik:



The diagram shows a large light blue circle containing three smaller circles: a yellow one with '[matrix]', a white one with a leaf icon, and an orange one with a document icon. The text 'platform.physik.kit.edu' is written around the perimeter of the large circle.

Codimd:	Gemeinsam z.B. Übungsblätter bearbeiten und Zusammenfassungen schreiben
Jitsi:	Videokonferenzen mit Freunden und der Lerngruppe
Matrix:	Textnachrichten schreiben in Gruppen mit allen Physikstudierenden

Für mehr Informationen: einfach auf platform.physik.kit.edu gehen!

 in Kooperation mit der Fakultät für Physik

Aufgabe 1: Diskrete Symmetrien

(je 0,5=3 Punkte)

Geben Sie an, wie sich die folgenden physikalischen Größen unter der Paritätsoperation \hat{P} (Punktspiegelung am Ursprung) und der Zeitumkehroperation \hat{T} verhalten:

- Impulsvektor \vec{p}
- Spin- oder Drehimpulsvektor $\vec{\sigma} = \vec{r} \times \vec{p}$
- Statisches elektrisches Feld $\vec{E} = \vec{\nabla}\phi$
- Statisches Magnetfeld $\vec{B} = \vec{j} \times \vec{r}$
- Potenzielle Energie eines elektrischen Dipols aufgrund von Teilchenspin $\vec{s} \cdot \vec{E}$
- Potenzielle Energie eines magnetischen Dipols aufgrund von Teilchenspin $\vec{s} \cdot \vec{B}$

Aufgabe 2: Elektrisches Dipolmoment des Neutrons

(0 Punkte)

Nur für aktiven Beitrag: Eine Möglichkeit zur Suche nach T-Verletzung ist die Beobachtung eines nichtverschwindenden elektrischen Dipolmoments d_n des Neutrons. Das aktuell stärkste Limit beträgt $|d_n| < 1,8 \times 10^{-26} e \cdot \text{cm}$ und wurde vom nEDM-Experiment am Paul Scherrer Institut aufgestellt. Lesen Sie die aktuelle Publikation des Experiments [1] (öffentliche Vorabversion: arxiv.org/abs/2001.11966) und stellen Sie den Aufbau und die Messmethode in einer kurzen Präsentation vor.

Aufgabe 3: K^0 - und B^0 -Oszillation

(2+2+2+1+2=9 Punkte)

Zum Zeitpunkt $t = 0$ werden am Ort $x = 0$ $N_0 = 10000$ K^0 -Mesonen erzeugt, die sich mit einem Impuls von $p = p_x = 1 \text{ GeV}/c$ durch das Vakuum bewegen. Durch Prozesse zweiter Ordnung der schwachen Wechselwirkung wird aus dem reinen K^0 -Strahl für Zeiten $t > 0$ eine Mischung aus K^0 - und \bar{K}^0 -Mesonen. Im Folgenden soll die CP-Verletzung vernachlässigt werden, d.h. $|K_S^0\rangle \equiv |K_1^0\rangle$ und $|K_L^0\rangle \equiv |K_2^0\rangle$.

- a) Zeigen Sie, dass die Anzahl von K_S^0 -, K_L^0 -, K^0 - und \bar{K}^0 -Mesonen als Funktion der Zeit t im Kaon-Ruhesystem gegeben ist durch ($\hbar = c = 1$):

$$N_{K_S^0}(t) = \frac{N_0}{2} e^{-\Gamma_S t}$$

$$N_{K_L^0}(t) = \frac{N_0}{2} e^{-\Gamma_L t}$$

$$N_{K^0}(t) = \frac{N_0}{4} [e^{-\Gamma_S t} + e^{-\Gamma_L t} + 2 \cos(\Delta m t) e^{-\Gamma t}]$$

$$N_{\bar{K}^0}(t) = \frac{N_0}{4} [e^{-\Gamma_S t} + e^{-\Gamma_L t} - 2 \cos(\Delta m t) e^{-\Gamma t}]$$

mit

$$\Delta m = |m_S - m_L| \quad , \quad \Gamma_{S/L} = \frac{1}{\tau_{S/L}} \quad , \quad \Gamma = \frac{\Gamma_S + \Gamma_L}{2}$$

Dabei ist $m_{S/L}$ die Masse und $\tau_{S/L}$ die Lebensdauer von K_S^0 - bzw. K_L^0 -Mesonen.

Verwenden Sie für die Herleitung folgenden Ansatz für die Wellenfunktion von K_S^0 - bzw. K_L^0 -Mesonen

$$|K_{S/L}^0\rangle(t) = A_{S/L} \cdot e^{-im_{S/L}t} \cdot e^{-\Gamma_{S/L}t/2}$$

mit $A_{S/L}$ als konstantem Normierungs- und Phasenfaktor.

- b) Stellen Sie die Anzahl von K_S^0 -, K_L^0 -, K^0 - und \bar{K}^0 -Mesonen grafisch dar für das Zeitintervall von 0 bis $2 \cdot 10^{-9}$ s. Welcher Flugstrecke der Kaonen entspricht dieser Zeitraum? Verwenden Sie $\Delta m = 5,3 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$.
- c) Wie K^0 -Mesonen können auch B^0 - und B_s^0 -Mesonen über die schwache Wechselwirkung in ihre Antiteilchen oszillieren. Ein B^0 -Meson ist ein gebundener Zustand aus einem Down-Quark und einem Bottom-Antiquark ($d\bar{b}$), ein B_s^0 -Meson besteht aus einem Strange-Quark und einem Bottom-Antiquark ($s\bar{b}$). Zeichnen Sie die Feynmandiagramme für B^0 - und B_s^0 -Oszillation.
- d) Für B^0 - und B_s^0 -Mesonen ist näherungsweise $\tau := \tau_S = \tau_L = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s. Geben Sie die Anzahl von B^0 - und \bar{B}^0 - bzw. B_s^0 - und \bar{B}_s^0 -Mesonen sowie die Asymmetrie

$$A(t) = \frac{N_{B^0}(t) - N_{\bar{B}^0}(t)}{N_{B^0}(t) + N_{\bar{B}^0}(t)}$$

als Funktion der Zeit t an. Nehmen Sie dabei an, dass zum Zeitpunkt $t = 0$ eine Anzahl von N_0 B^0 - bzw. B_s^0 -Mesonen erzeugt wurden.

- e) Im B^0 -System ist $\Delta m = 0,5 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$. Im B_s^0 -System wurde ein Δm -Wert (hier Δm_s genannt) von $17,8 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$ gemessen. Skizzieren Sie die Anzahl von B^0 -, \bar{B}^0 -, B_s^0 - und \bar{B}_s^0 -Mesonen für $N_0 = 10000$ sowie die Asymmetrie in beiden Systemen für den Zeitraum $0 \leq t \leq 10^{-11}$ s. Welcher Flugstrecke der B-Mesonen entspricht die Periodendauer einer B^0 - bzw. B_s^0 -Oszillation bei einem Impuls von $5 \text{ GeV}/c$?

Aufgabe 4: Materie-/Antimaterieasymmetrie

(2+5+1=8 Punkte)

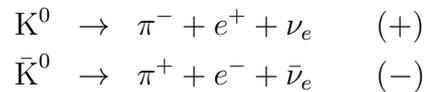
Im Gegensatz zur vorherigen Aufgabe betrachten wir nun indirekte CP-Verletzung im Kaon-System. Die physikalischen Zustände K_S^0 und K_L^0 sind also nicht identisch mit den CP-Eigenzuständen K_1^0 und K_2^0 , sondern als deren Superpositionen

$$|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}} (|K_1^0\rangle + \epsilon |K_2^0\rangle)$$

$$|K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}} (|K_2^0\rangle + \epsilon |K_1^0\rangle)$$

gegeben, mit dem komplexen Mischungsparameter ϵ , wobei $|\epsilon| = 2.228 \cdot 10^{-3}$.

Die CP-Verletzung führt zu einer beobachtbaren Asymmetrie zwischen Materie- und Antimaterie. Neben dem Zerfall in Pionen¹ zerfällt das K_L^0 mit einem großen Verzweigungsverhältnis von etwa 41% in Endzustände mit Elektronen („semileptonische“ Zerfälle), wobei die beiden Prozesse



beitragen. Man kann nun die Raten $R^+ = R(K^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e)$ und $R^- = R(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e)$ der beiden Zerfälle messen und daraus die Ladungsasymmetrie

$$\delta_C = \frac{R^+ - R^-}{R^+ + R^-}$$

berechnen. Das Ergebnis einer solchen Messung ist in Abb. 1 in Abhängigkeit der Zeit t dargestellt. Der ursprüngliche K^0 -Strahl besteht aufgrund der geringeren

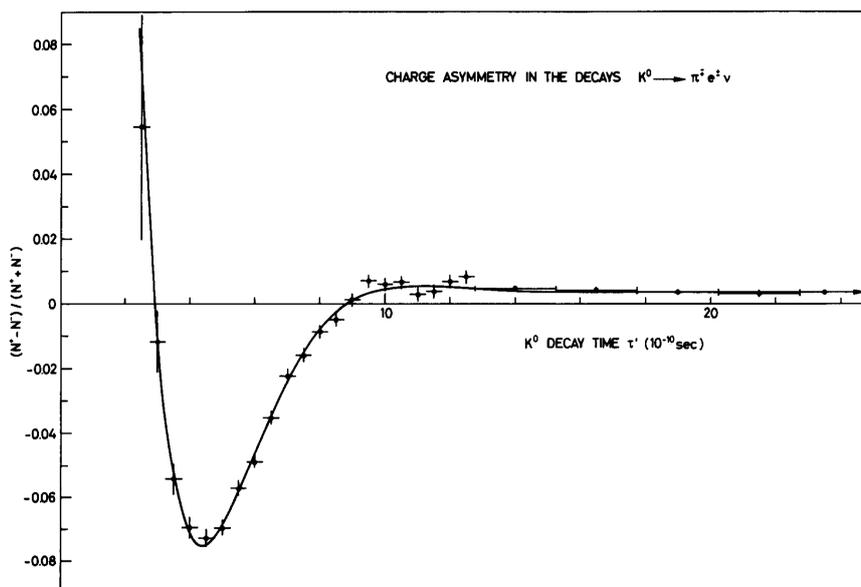


Abbildung 1: Ladungsasymmetrie δ_C in semileptonischen Zerfällen neutraler K-Mesonen als Funktion der Zeit t . Entnommen aus [2].

Lebensdauer der K_S^0 -Mesonen nach einer „Einschwingphase“ vollständig aus K_L^0 -Mesonen. Die Ladungsasymmetrie ist aber auch für große t nicht null sondern nimmt einen positiven Wert an.

- a) Zeichnen Sie die Feynmandiagramme der semileptonischen Zerfälle (+) und (-) der K^0 - und \bar{K}^0 -Mesonen.

¹Das Verzweigungsverhältnis für den Zerfall $K_L^0 \rightarrow \pi\pi\pi$ beträgt etwa 32%. Das Verzweigungsverhältnis für $K_S^0 \rightarrow \pi\pi$ beträgt dagegen fast 100%.

- b) Zeigen Sie, dass für große Zeiten $t \gtrsim 20 \cdot 10^{-10}$ s für die Ladungsasymmetrie gilt

$$\delta_C = 2 \cdot \text{Re}(\epsilon).$$

Machen Sie dazu den Ansatz

$$\begin{aligned} R^+ &\propto |\langle \pi^- e^+ \nu_e | T | K_L^0 \rangle|^2 \\ R^- &\propto |\langle \pi^+ e^- \bar{\nu}_e | T | K_L^0 \rangle|^2, \end{aligned}$$

wobei T den Operator des semileptonischen Zerfalls bezeichne. Wie ist dieser Ansatz motiviert? Nutzen Sie dann, dass

$$\begin{aligned} (i) \quad &\langle \pi^- e^+ \nu_e | T | K^0 \rangle = \langle \pi^+ e^- \bar{\nu}_e | T | \bar{K}^0 \rangle \\ (ii) \quad &\langle \pi^- e^+ \nu_e | T | \bar{K}^0 \rangle = \langle \pi^+ e^- \bar{\nu}_e | T | K^0 \rangle = 0. \end{aligned}$$

Wie lassen sich diese Beziehungen begründen? Vernachlässigen Sie bei der Rechnung ferner Terme $\mathcal{O}(|\epsilon|^2)$.

- c) Aus Abb. 1 entnimmt man, dass für große Zeiten gilt $\delta_C = 3,3 \cdot 10^{-3}$. Welcher Wert für die Phase des Mischungsparameters ϵ folgt daraus?

Aufgabe 5: “Doppelte” Entdeckung des Υ -Mesons (0 Punkte)

Nur für aktiven Beitrag: Im Jahr 1976 publizierte das E228-Experiment am Fermilab unter der Führung von Leon M. Lederman die Beobachtung einer neuen Resonanz im invarianten Massenspektrum von Elektron-Positron-Paaren mit einer Masse von 6 GeV, welche als Υ -Resonanz bezeichnet wurde (Originalartikel von 1976 [3]). Ein Jahr später erschien eine weitere Publikation derselben Arbeitsgruppe mit der Beobachtung einer Υ -Resonanz bei einer Masse von 9,5 GeV (Originalartikel von 1977 [4]). Recherchieren Sie, was mit der ursprünglichen Entdeckung von 1976 passierte (“Oops-Leon”) und wie es dazu kommen konnte. Stellen Sie Ihre Schlussfolgerungen, sowie die experimentellen Unterschiede beider Publikationen in einem kurzen Vortrag vor.

Literatur

- [1] nEDM Collaboration, “Measurement of the permanent electric dipole moment of the neutron”, *Phys. Rev. Lett.* **124** (2020), no. 8, 081803, arXiv:2001.11966. doi:10.1103/PhysRevLett.124.081803.
- [2] S. Gjesdal et al., “A Measurement of the K_L - K_S Mass Difference from the Charge Asymmetry in Semileptonic Kaon Decays”, *Phys. Lett.* **B52** (1974) 113–118. doi:10.1016/0370-2693(74)90734-5.

- [3] D. Hom et al., “Observation of High Mass Dilepton Pairs in Hadron Collisions at 400-GeV”, *Phys. Rev. Lett.* **36** (1976) 1236.
doi:10.1103/PhysRevLett.36.1236.
- [4] S. Herb et al., “Observation of a Dimuon Resonance at 9.5-GeV in 400-GeV Proton-Nucleus Collisions”, *Phys. Rev. Lett.* **39** (1977) 252–255.
doi:10.1103/PhysRevLett.39.252.