

### Aufgabe 17: CP-Verletzung im Kaon-System

Nehmen Sie an, dass - allen Skeptikern zum Trotz - SETI@home sich als Erfolg erwiesen habe und es gelungen sei, Kontakt mit außerirdischen intelligenten Lebewesen aufzunehmen. Es konnte u.a. geklärt werden, dass die Außerirdischen in der Lage sind,  $K^0$ -Experimente durchzuführen und Leptonen zu identifizieren. Nun soll ein gegenseitiger Besuch verabredet werden, aber dazu muss geklärt werden, ob die Delegationen bei Annäherung an ihr Reiseziel zu einer spektakulären Himmelserscheinung in Form einer heftigen Materie-Antimaterie-Reaktion werden. Dazu werden die folgenden Anweisungen (mit Hilfe elektromagnetischer Wellen) übermittelt. Versuchen Sie, sie nachzuvollziehen:

- a) Bei einer Masse von 0.53 des leichtesten Atomkerns gibt es ein Teilchen, das hier auf der Erde  $K^0$  genannt wird. Durch die  $C$ -Operation erhält man das Antiteilchen:

$$C|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle; \quad P|K^0\rangle = -|K^0\rangle; \quad P|\bar{K}^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle. \quad (1)$$

Bilde Sie  $CP$ -Eigenzustände durch Linearkombinationen von  $K^0$  und  $\bar{K}^0$ .

- b) Einer der Zustände kann in zwei Pionen ( $\pi^+\pi^-$ ,  $\pi^0\pi^0$ ), der andere nur in drei Pionen ( $\pi^+\pi^-\pi^0$ ,  $\pi^0\pi^0\pi^0$ ) zerfallen und ist deshalb langlebiger. Die Pionen haben keinen relativen Bahndrehimpuls.
- Warum ist das Teilchen, welches in drei Pionen zerfällt, langlebiger?
  - Welcher  $CP$ -Zustand ist es?

Den langlebigen Zustand nennen wir  $|K_2\rangle$ , den anderen  $|K_1\rangle$ .

*Hinweis:*  $C|\pi^0\rangle = |\pi^0\rangle$ .

- c) Wir auf der Erde haben aber gemessen, dass der langlebige Zustand auch in zwei Pionen zerfallen kann. Diesen Zustand nennen wir besser  $K_L^0$ .

$$\frac{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0)}{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0)} = 4 \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

Ist das  $K_L^0$  ein  $CP$ -Eigenzustand?

d) Wir hier stellen uns das  $K_L^0$  vor als

$$|K_L^0\rangle = \frac{1}{\text{Norm}} (|K_2\rangle + \varepsilon|K_1\rangle) . \quad (3)$$

Dann kann man mit dem Wert aus (c) und der Tatsache, dass die unterschiedliche Größe der Phasenräume beim Zerfall in zwei oder drei Pionen direkt durch das Verhältnis der Lebensdauern von  $K_S^0$  und  $K_L^0$  gegeben ist,  $\varepsilon^2$  berechnen. Wir haben

$$\tau(K_S^0) = 0.89 \cdot 10^{-10} \text{ s} , \quad (4)$$

$$\tau(K_L^0) = 5.20 \cdot 10^{-8} \text{ s} . \quad (5)$$

Man nimmt dazu an, dass  $\varepsilon$  reell ist, und dass  $K_1$  in 2,  $K_2$  in 3 Pionen zerfällt. Welchen Wert hat  $\varepsilon^2$ ?

- e) Nun folgt eine längere Erklärung über Oszillation von  $CP$ -Eigenzuständen und experimentelle Details. Für uns Erdbewohner mit gemeinsamer Sprache genügt hier aber, dass aus Messungen folgt:  $\varepsilon$  hat das Vorzeichen, welches den  $K^0$ -Anteil in  $K_L^0$  gegenüber dem Anteil in  $K_2$  vergrößert. Wie groß sind die  $K^0$  und  $\overline{K^0}$ -Komponenten in  $K_L^0$ ? Berechnen Sie  $\langle K^0 | K_L^0 \rangle$  und  $\langle \overline{K^0} | K_L^0 \rangle$ .
- f)  $K^0$  und  $\overline{K^0}$  können auch in Elektron, Neutrino und Pion zerfallen. Skizzieren Sie die Feynman-Graphen dafür. Welche Leptonladung stammt aus dem  $K^0$ , welche aus dem  $\overline{K^0}$ ?
- g) Bestimmen Sie nun, welche Leptonenladung bei  $K_L^0$ -Zerfällen bevorzugt auftritt, also

$$\frac{\Gamma(K_L^0 \rightarrow e^+ \pi^- \nu_e) - \Gamma(K_L^0 \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu}_e)}{\Gamma(K_L^0 \rightarrow e^+ \pi^- \nu_e) + \Gamma(K_L^0 \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu}_e)} \quad (6)$$

Betrachten Sie dazu den  $K^0$  und  $\overline{K^0}$ -Anteil in  $K_L$ . Vergleichen Sie die Ladung des häufigsten Leptons mit dem Ladungsvorzeichen der Atomkerne in gewöhnlicher Materie.

*Hinweis:* Die Partialbreiten  $\Gamma$  sind proportional zu den Betragsquadraten der in (e) berechneten Matrixelemente.

- h) Weitere Aufzeichnungen sind leider verlorengegangen. Aus geschichtlichen Forschungen und Dokumentationen wissen wir aber, dass den Außerirdischen eine unversehrte Landung gelang. Sie äußerten später, in ihrem Experiment hätte das häufigste Lepton das gleiche Ladungsvorzeichen wie die Atomkerne in ihren Teetassen gehabt. Haben sie richtig gemessen?