

Übungen zu Physik V: Kerne und Teilchen (12)

Abgabetermin: bis 21.01.2025, 10:00 Uhr

Hinweis: Zur Lösung der Aufgaben benötigte bzw. hilfreiche Angaben finden Sie z.B. bei der Particle Data Group im Review of Particle Physics unter <https://pdg.lbl.gov>.

Aufgabe 1: Schwache Wechselwirkung, Cabibbo-Winkel [LA: nur Teilaufgabe 1] (12 Punkte)

1. Zeichnen Sie für die folgenden Fälle die Feynman-Graphen niedrigster Ordnung für die am Zerfall beteiligten Quarks und Leptonen. Geben Sie die Kopplungsstärken an den Vertices an.

- a) $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$
- b) $\Lambda \rightarrow p \pi^-$
- c) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- d) $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$
- e) $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

(10 Punkte)

2. Mit den Feynman-Graphen lassen sich die Zerfallsbreiten Γ der Teilchen berechnen. Überlegen Sie, wie Sie durch Kombination der experimentell bestimmten Zerfallsbreiten der oben angegebenen Zerfälle den Cabibbo-Winkel bestimmen können, ohne die schwache Kopplungskonstante zu kennen. Geben Sie die funktionale Abhängigkeit des Cabibbo-Winkels von Ihren gewählten Zerfallsbreiten an. (Hinweis: Sie dürfen den unterschiedlichen Phasenraum der verschiedenen Zerfälle vernachlässigen.)

(2 Punkte)

Aufgabe 2: Assoziierte Produktion

[LA: komplette Aufgabe] (10 Punkte)

Aufgrund ihrer geringen Lebensdauer kommen Teilchen mit Strangeness in der Natur nicht vor. Daher gibt es auch keine Targets mit Strangeness. Der Wirkungsquerschnitt für die Strangenessproduktion über die schwache Wechselwirkung ist viel zu gering, um damit Experimente durchführen zu können.

1. Überlegen Sie für die folgenden Reaktionen die benötigten Teilchen X (bei X kann es sich um ein oder mehrere Teilchen handeln), damit die Reaktion über die elektromagnetische oder starke Wechselwirkung ablaufen kann. Falls mehrere Möglichkeiten bestehen, wählen Sie immer die in der Summe leichtesten Teilchen.

- a) $\gamma + p \rightarrow \Lambda + X$
- b) $\gamma + p \rightarrow \Xi^0 + X$
- c) $\pi^- + p \rightarrow \Xi^- + X$
- d) $\gamma + p \rightarrow \Omega^- + X$
- e) $\bar{p} + p \rightarrow \Omega^- + X$

(5 Punkte)

2. Berechnen Sie für die Reaktionen die Schwellenenergie des Strahls, wenn das Proton im Anfangszustand in Ruhe ist.

(5 Punkte)

Aufgabe 3: Paritätsverletzung

(9 Punkte)

1. Geben Sie für die folgenden Zerfälle alle Helizitätskonfigurationen an, die nicht durch Rotationen auseinander hervorgehen. Nehmen Sie dabei Neutrinos als masselos an und beachten Sie die Erhaltungssätze.

a) $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ (1 Punkt)

b) $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ (3 Punkte)

Welche dieser Konfigurationen sind im Grenzfall $\beta \rightarrow 1$ verboten?

2. In einem Experiment werden Myonen gestoppt und die Myonen-Spins nach oben ausgerichtet. Die Myonen zerfallen ($\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$), und die Elektronen mit der *maximal* möglichen Energie sollen jeweils mit einem der beiden Detektoren D_1 und D_2 nachgewiesen werden.

Ordnen Sie die beiden Detektoren relativ zur Spinausrichtung der Myonen so an, dass sie die Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung beobachten können. Erläutern Sie, wie sich die Paritätsverletzung auf die relativen Zählraten der beiden Detektoren auswirkt.

(5 Punkte)

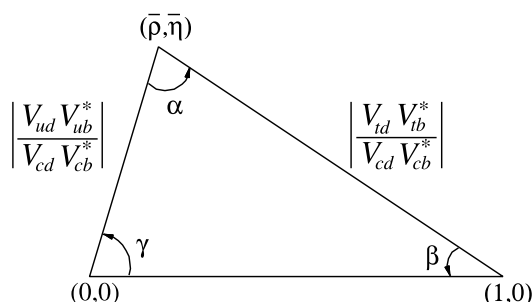
Aufgabe 4: CKM-Matrix

(9 Punkte)

Die Zeilen (und Spalten) einer unitären Matrix sind orthonormal. Für die CKM-Matrix sollte daher z.B. gelten: (orthogonalität der ersten und dritten Spalte)

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0 \quad (1)$$

Nach Division durch den mittleren Term ergibt sich das folgende Unitaritäts-Dreieck in der komplexen Ebene:



Hiermit ergibt ein anschaulicher Test für die Vollständigkeit des Standardmodells: Beschreibt dieses die Quarkübergänge vollständig, so muss das Unitaritäts-Dreieck geschlossen sein.

Finden Sie im *Review of Particle Physics* (im Kapitel zur CKM-Matrix [1]) die besten Messwerte für die Beträge der CKM-Matrixelemente und die Winkel des Unitaritätsdreiecks, und testen sie quantitativ, wie gut diese die Unitaritätsbedingung im Rahmen ihrer Fehler erfüllen. Berechnen Sie hierzu die Koordinaten $(\bar{\rho}, \bar{\eta})$ des oberen Dreieckspunktes jeweils mit den verschiedenen Seitenlängen und relevanten Winkeln. Geben Sie an, wie sehr die Ergebnisse im Verhältnis zu ihren Fehlern voneinander abweichen.

Hinweis: Auf den Vorlesungsfolien (und auch am Ende des Kapitels im *Review of Particle Physics*) sind die CKM-Matrixelemente aus einem globalen Fit des Standardmodells angegeben. Diese erfüllen die Unitaritätsbedingung exakt, eine Bearbeitung der Aufgabe mit diesen Werten ist nicht sinnvoll.

Referenzen

[1] <https://pdg.lbl.gov/2020/reviews/rpp2020-rev-ckm-matrix.pdf>