

CP-Verletzung im Zerfall neutraler Kaonen

Stefan Dolezel
 Johannes Gutenberg-Universität, Mainz
 Seminar Kern- und Teilchenphysik
 Wintersemester 08/09

Die indirekte CP-Verletzung in der schwachen Wechselwirkung wurde für Kaonen bereits 1964 von Christenson et al. nachgewiesen. Erklärt wird sie im Rahmen des Standardmodells mit dem Kobayashi-Maskawa Modell, welches auch eine direkte CP-Verletzung im System der Kaonen ermöglicht. Zur Messung dieser direkten CP-Verletzung wurde am CERN das NA48-Experiment durchgeführt.

Symmetrien

Symmetrien lassen sich in zwei Kategorien unterteilen, die kontinuierlichen Symmetrien (z.B. Drehungen und Translationen) und die diskreten Symmetrien (\mathcal{C} , \mathcal{P} und \mathcal{T}). Emmy Noether fand bereits 1918 heraus, dass zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eine Erhaltungsgröße gehört und umgekehrt. Pauli und Lüders stellte 1955 das \mathcal{CPT} -Theorem auf, das besagt, dass jede relativistische lokale Feldtheorie unter der kombinierten Operation \mathcal{CPT} erhalten sein muss. Eine Widerlegung dieses Theorems hätte die Verletzung der Lorentz-Invarianz zur Folge. Manche String- und Quantenfeldtheorien sagen eine solche Verletzung vorher.

Hierbei ist \mathcal{C} die Ladungskonjugation, die ein Teilchen in sein Antiteilchen überführt, also alle inneren Quantenzahlen ändert. Die Parität \mathcal{P} vollführt eine Raumspiegelung am Ursprung. Axiale Vektoren, wie z.B. der Spin, sind hiervon nicht betroffen. Der Operator \mathcal{T} kehrt die Zeitrichtung eines Prozesses um. Die Operatoren \mathcal{C} , \mathcal{P} und \mathcal{T} sind einzeln je unter der starken und elektromagnetischen Wechselwirkung erhalten, nicht aber unter der schwachen Wechselwirkung.

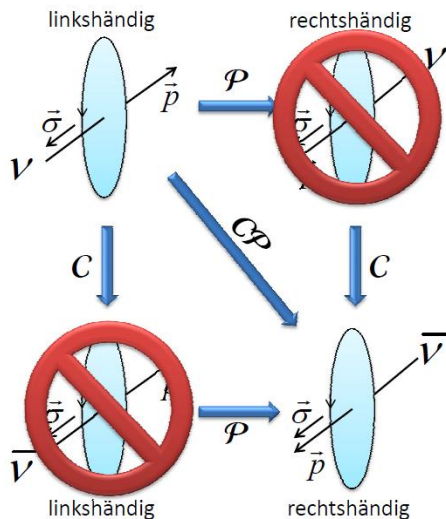


Abbildung 1: Symmetrieverletzung bei Neutrinos

Die Verletzung von \mathcal{C} und \mathcal{P} lässt sich gut anhand der Neutrinos zeigen (vgl. Abbildung 1). Neutrinos unterliegen nur der schwachen Wechselwirkung. Man stellte fest, dass in der Natur nur zwei Sorten von Neutrinos vorkommen. Linkshändige Neutrinos und rechtshändige Antineutrinos. Wendet man nun die Operatoren \mathcal{C} oder \mathcal{P} auf diese Neutrinos an, so erhält man nicht-physikalische Zustände. \mathcal{C} und \mathcal{P} sind also maximal verletzt. Die Operation \mathcal{CP} scheint in der schwachen Wechselwirkung zunächst erhalten.

Tatsächlich wurde 1964 von Christenson et al. eine schwache CP-Verletzung im Zerfall der Kaonen gefunden.

Kaonen

Die Kaonen wurden 1947 in der Höhenstrahlung entdeckt. Sie sind Bosonen (Spin = 0) und unterliegen der starken Wechselwirkung, sind also Hadronen. Sie sind mit 493.7 eV (geladene Kaonen) bzw. 497.7 MeV (neutrale Kaonen) die leichtesten Mesonen mit Strangeness S , d.h. sie entstehen durch Prozesse der starken Wechselwirkung, aber zerfallen langsamer als erwartet unter der schwachen Wechselwirkung, da unter der starken Wechselwirkung S erhalten ist. Tabelle I gibt einen Überblick über die Eigenschaften von Kaonen und deren Quarkinhalt.

Teilchen	Quarkinhalt	Ladung	Strangeness
K^+	$u\bar{s}$	+1	+1
K^-	$\bar{u}s$	-1	-1
K^0	$d\bar{s}$	0	+1
\bar{K}^0	$\bar{d}s$	0	-1

Tabelle I: Eigenschaften von Kaonen

Im Weiteren wollen wir nur noch das neutrale Kaon K^0 und sein Antiteilchen das \bar{K}^0 betrachten. Diese werden durch den Beschuss eines *fixed targets* mit Protonen erzeugt. Hierbei sind folgende Prozesse möglich:

$$p + p \rightarrow K^+ + \bar{K}^0 + p + n \quad (1)$$

$$p + n \rightarrow \Lambda + K^0 + p \quad (2)$$

Da die \mathcal{CP} -Verletzung untersucht werden soll, benötigen wir die \mathcal{CP} -Eigenzustände. Unter Annahme der \mathcal{CP} -Invarianz erhalten wir bei geeigneter Wahl der Phasen $\mathcal{CP}|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle$ und $\mathcal{CP}|\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle$. Offensichtlich sind K^0 und \bar{K}^0 keine \mathcal{CP} -Eigenzustände. Diese müssen über Linearkombinationen konstruiert werden. Man erhält somit:

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \quad \text{mit } \mathcal{CP}|K_1\rangle = +|K_1\rangle \quad (3)$$

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \quad \text{mit } \mathcal{CP}|K_2\rangle = -|K_2\rangle \quad (4)$$

Geht man davon aus, das \mathcal{CP} unter schwacher Wechselwirkung erhalten ist, so kann man die möglichen Zerfallsprodukte den \mathcal{CP} -Eigenzuständen, wie in Tabelle II dargestellt, zuordnen.

Zerfallsprodukt	\mathcal{CP}	Zuordnung
$\pi^0\pi^0$	+1	$ K_1\rangle$
$\pi^+\pi^-$	+1	$ K_1\rangle$
$\pi^0\pi^0\pi^0$	-1	$ K_2\rangle$
$\pi^+\pi^-\pi^0$	-1	$ K_2\rangle$

Tabelle II: Zerfallsprodukte und Zuordnung

Aufgrund des kleineren Phasenraumvolumens für Drei-Körper-Zerfälle hat das K_2 ($\tau(K_2) = 0.5 \times 10^{-7}$ s) eine etwa 600 mal längere Lebensdauer als das K_1 ($\tau(K_1) = 0.9 \times 10^{-10}$ s). Durch den schnellen Zerfall des K_1 -Anteils, kann man mit einer geeignet gewählten Flugzeit einen reinen K_2 -Strahl erhalten. Dieser sollte nach Tabelle II nur in drei Pionen zerfallen dürfen. Als Christenson et al. dieses Experiment 1964 durchführten, fanden sie jedoch auch Zerfälle in zwei Pionen. Sie entdeckten somit die indirekte \mathcal{CP} -Verletzung (Nobelpreis 1980 für Cronin und Fitch).

Indirekte \mathcal{CP} -Verletzung

Die indirekte \mathcal{CP} -Verletzung lässt sich durch K^0 - \bar{K}^0 -Oszillationen erklären. Diese werden durch Boxgraphen (siehe Abbildung 2) dargestellt.

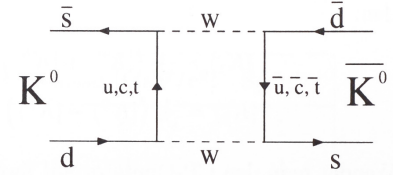


Abbildung 2: Boxgraph. K^0 - \bar{K}^0 -Oszillationen mit $\Delta S = 2$.

Dadurch sind die physikalisch beobachtbaren Zustände nicht die \mathcal{CP} -Eigenzustände (3) und (4), sondern Mischungen davon, wobei jeder Teil \mathcal{CP} -erhaltend zerfällt. Man erhält für den langlebigen ($L=Long$) bzw. kurzlebigen ($S=Short$) Zustand somit:

$$|K_L\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}} \left(\underbrace{|K_2\rangle}_{\mathcal{CP}\text{-erhaltend } \rightarrow 3\pi} + \epsilon \underbrace{|K_1\rangle}_{\mathcal{CP}\text{-erhaltend } \rightarrow 2\pi} \right) \quad (5)$$

$$|K_S\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}} (|K_1\rangle + \epsilon |K_2\rangle) \quad (6)$$

$$\text{mit komplexem } \epsilon \text{ und } |\epsilon| \approx 2.28 \times 10^{-3} \quad (7)$$

Direkte \mathcal{CP} -Verletzung

Bei der direkten \mathcal{CP} -Verletzung zerfällt ein Kaon direkt in zwei Pionen. Die direkte \mathcal{CP} -Verletzung ist noch einmal drei Größenordnungen kleiner. Ihre Stärke ist über den Parameter $\epsilon' \approx \mathcal{O}(10^{-6})$ gegeben. Der Zerfall eines K^0 in zwei Pionen ist im sog. Pinguingraph in Abbildung 3 zu sehen.

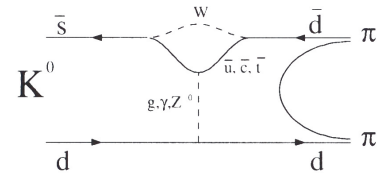


Abbildung 3: Pinguingraph. Zerfall eines K^0 in zwei Pionen mit $\Delta S = 1$.

Kobayashi-Maskawa Modell

1973 gelang Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa die vollständige Erklärung der \mathcal{CP} -Verletzung im Rahmen des Standardmodells (Nobelpreis 2008). Sie erweiterten hierfür den Mechanismus von N. Cabibbo unter der Annahme von drei Quark- und Leptonenfamilien. Die CKM-Matrix beschreibt die Transformation der Masseigenzustände der Quarks (d, s, b) in die Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung (d', s', b').

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{sd} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad (8)$$

Vergleicht man zwei Amplituden \mathfrak{M} für schwache Prozesse, so folgt aus der Hermitizität des Hamiltonian, dass $\hat{H}_{tot} \propto \mathfrak{M} + \mathfrak{M}^\dagger$. Um die Theorie auf \mathcal{CP} -Invarianz zu überprüfen, muss man \mathfrak{M} \mathcal{CP} -transformieren und testen, ob der Hamiltonian hermitesch bleibt bzw. ob gilt $\mathfrak{M}_{\mathcal{CP}} \stackrel{?}{=} \mathfrak{M}^\dagger$. Man kann zeigen, dass diese Gleichheit gilt, wenn $V_{ij} = V_{ij}^*$. Dies ist zwar erfüllt, wenn die V_{ij} reell ist, dann ist aber keine \mathcal{CP} -Verletzung möglich. Diese lässt sich nur über auftretende Phasen komplexer Einträge V_{ij} erklären.

NA48-Experiment

Das NA48-Experiment ist ein Fixed-Target Experiment, das am CERN in Genf durchgeführt wurde. Um statistische Fehler zu minimieren wurde das Doppelverhältnis R der Zerfallsbreiten Γ benutzt. Ziel war es $\Re\left(\frac{\epsilon'}{\epsilon}\right)$ mit einer Genauigkeit von 2×10^{-4} zu bestimmen.

$$R = \frac{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0) / \Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{\Gamma(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0) / \Gamma(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)} \approx 1 - \Re\left(\frac{\epsilon'}{\epsilon}\right) \quad (9)$$

Der Strahlengang ist in Abbildung 4 zu sehen. Aus dem SPS treffen Protonen mit einer Energie von etwa 400 GeV auf ein Beryllium-Target. Dort erzeugt ein Teil der Protonen kurz- und langlebige Kaonen K_S und K_L . Auf den Weg bis zum Zerfallsvolumen zerfällt der kurzlebige Anteil K_S . Man erhält somit einen K_L -Strahl. Die restlichen Protonen werden zum K_S -Target geführt. Hierbei werden sie im Tagger zeitlich markiert, um später K_S und K_L -Zerfälle unterscheiden zu können. Auch am K_S -Target werden K_S und K_L erzeugt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein K_L im Zerfallsvolumen zerfällt ist allerdings $< 1\%$.

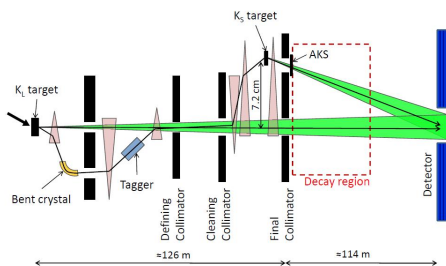


Abbildung 4: Strahlengang im NA48-Experiment

Anschließend werden die Zerfallsprodukte im Detektor nachgewiesen. Dieser ist in Abbildung 5 zu sehen. Das Myon-Veto System wird zur Unterdrückung des Untergrunds genutzt. Die Kalorimeter und das Magnetspektrometer dienen der Energie- und Ortsmessung bzw. der Impulsmessung der Zerfallsprodukte.

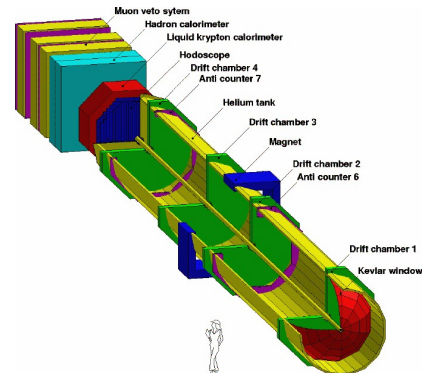


Abbildung 5: Der NA48-Detektor

Über die Laufzeiten von 1997 bis 2001 gemittelt erhält man $\Re(\epsilon'/\epsilon) = (14.7 \pm 2.2) \times 10^{-4}$. Der Weltmittelwert liegt bei $\Re(\epsilon'/\epsilon) = (16.6 \pm 1.6) \times 10^{-4}$. Die geforderte Genauigkeit wurde also erreicht und die direkte \mathcal{CP} -Verletzung konnte somit nachgewiesen werden.

Quellen

- Bogdan Povh, Klaus Rith, Christoph Scholz, Frank Zetsche „*Teilchen und Kerne*“ (2006) Springer-Verlag
- Francis Halzen, Alan D. Martin „*Quarks & Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*“ (1984) John Wiley & Sons
- Donald H. Perkins „*Introduction to High Energy Physics*“ (1987) Addison-Wesley Publishing Company
- Konrad Kleinknecht „*Uncovering CP Violation. Experimental Clarification in the Neutral K Meson and B Meson Systems*“ (2003) Springer-Verlag
- Andreas Winhart „*Messung der direkten CP-Verletzung im System der neutralen Kaonen mit dem NA48-Detektor. Analyse der Daten aus dem Jahr 2001*“ (2003) Shaker Verlag