
Kaonenexperimente im Wandel der Zeit

Fabian Koch

02.05.19

Fakultät Physik

Übersicht

Was sind Kaonen

Historische Kaonenexperimente

- Entdeckung der Kaonen

- Paritätsverletzung

- Kaonenmischung

- Direkte und indirekte CP-Verletzung

Inhalt

Was sind Kaonen

Historische Kaonenexperimente

Entdeckung der Kaonen

Paritätsverletzung

Kaonenmischung

Direkte und indirekte CP-Verletzung

Was sind Kaonen?

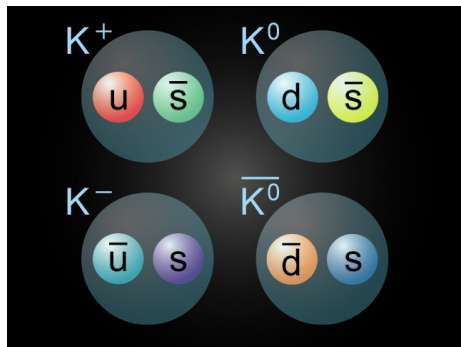


Figure: Übersicht über die Kaonen

Kaonen:

- sind die leichtesten Teilchen mit Strangeness $S = \pm 1$
- besitzen einen ganzzahligen Spin
- sind Bosonen
- verfügen über eine relativ lange Lebensdauer

	m / MeV			$\tau / 10^{-10} \text{s}$	
K^\pm	493,677	$\pm 0,016$		123,80	$\pm 0,21$
K_S^0	497,614	$\pm 0,024$		0,8954	$\pm 0,0004$
K_L^0	497,614	$\pm 0,024$		511,6	$\pm 2,1$
π^\pm	139,570 18	$\pm 0,000 35$		260,33	$\pm 0,05$

Inhalt

Was sind Kaonen

Historische Kaonenexperimente

- Entdeckung der Kaonen

- Paritätsverletzung

- Kaonenmischung

- Direkte und indirekte CP-Verletzung

Weltkarte

Entdeckung der Kaonen

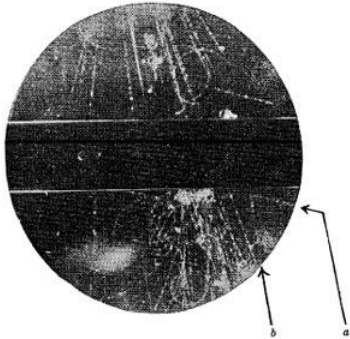
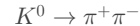
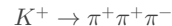


Figure: Nebelkammeraufnahme der kosmischen Höhenstrahlung von Rochester und Butler 1947

- Entdeckung des ersten (neutralen) Kaons 1947 durch George Rochester et. al
- Höhenstrahlung wurde in Nebelkammer untersucht
- Zerfall eines neutralen Teilchens in ein positives und negatives Pion



- Entdeckung des positiv geladenen Kaons 1949 durch Powell in Kernreaktionen
- Zerfall eines positiven Kaons in zwei positive und ein negatives Pion



Seltsam lange Lebensdauer

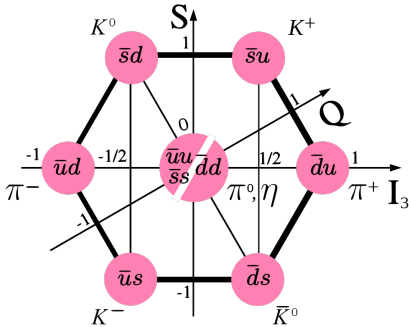


Figure: Der achtfache Weg von Gell-Mann und Ne'eman

- Konnten sehr leicht erzeugt werden (durch starke WW)
- Zerfielen aber sehr langsam $10^{-10}s$ (durch schwache WW)
- Durch Gell-Mann 1953 Einführung einer neuen Teilcheneigenschaft/ Quantenzahl, der 'Strangeness' (der achtfache Weg)
- Kaonen sind leichteste Teilchen mit $S = \pm 1$ und könnten somit nicht zerfallen, wenn S durch alle Kräfte erhalten wäre
- Einziger Zerfall somit über die flavourändernde schwache WW möglich
- S veranlasste Cabibo 1963 zur Postulierung des Cabibo-Winkels

Paritätsverletzung und der Cosmotron

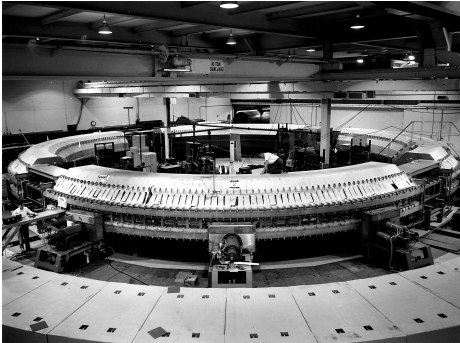


Figure: Das Cosmotron am Brookhaven National Laboratory (1952-1966)

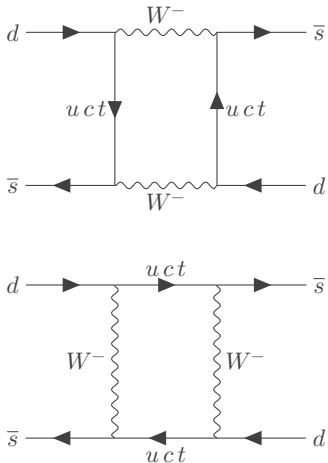
- Bau des damals leistungsstärksten Proton-Synchrotron mit Strahlenergien von 3,3 GeV im Jahr 1952
- Erstmals Produktion von schweren Teilchen der kosmischen Höhenstrahlung möglich
- Entdeckung des K_L 1956 durch Lande in Nebelkammer
- Beobachtung der Paritätsverletzung 1956 durch T.D. Lee und C.N.Yang

$$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

$$\theta^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

- τ^+ und θ^+ tatsächlich ein Teilchen K^+ , die Zerfälle verletzen also die Paritätserhaltung

Long und short? Die Mischung neutraler Kaonen



- Die Flavour-Eigenzustände $|K^0\rangle, |\bar{K}^0\rangle$ unterscheiden sich von den CP-Eigenzuständen:

$$\left. \begin{aligned} CP|K^0\rangle &= |\bar{K}^0\rangle \\ CP|\bar{K}^0\rangle &= |K^0\rangle \end{aligned} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{aligned} |K_1\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \\ |K_2\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \end{aligned} \right.$$

- Dabei ist $|K_1\rangle \approx |K_S\rangle$ und $|K_2\rangle \approx |K_L\rangle$, mit $\tau(|K_L\rangle) \approx 600 \times \tau(|K_S\rangle)$
- $|K_S\rangle$ hatben CP = +1 und $|K_L\rangle$ habe CP = -1
- Unterschied vor allem in Zerfallsmoden:

$$|K_S\rangle \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

$$|K_L\rangle \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$$

CP-Verletzung

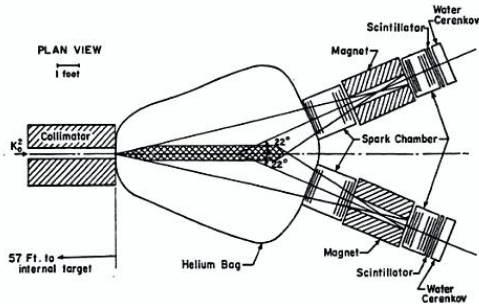


Fig. 9a. Set-up used to detect $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$.

Figure: Das Cronin-Fitch-Experiment am Brookhaven National Laboratory (1964)

- Christenson, Cronin, Fitch und Turlay planen 1964 Experiment am Brookhaven National Laboratory
- 17 m lange Beamline in der alle $|K_S\rangle$ zerfallen sollen und nur noch $|K_L\rangle$ übrig bleiben
- Hauptsächlich wird der Winkel θ zwischen dem K_L^0 -Strahl und den Teilchenimpulsen gemessen.
- Treffen zwei Teilchen 'gleichzeitig' den Detektor so kann die Summe der Winkel bestimmt werden (aus Spurdetektion)
- Diese ist für einen Dreikörperzerfall mit großer Wahrscheinlichkeit $\neq 0$ für Zweikörperzerfälle hingegen mit großer Wahrscheinlichkeit $= 0$

Ergebnis

Es wurden tatsächlich Zerfälle von

$$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

beobachtet.

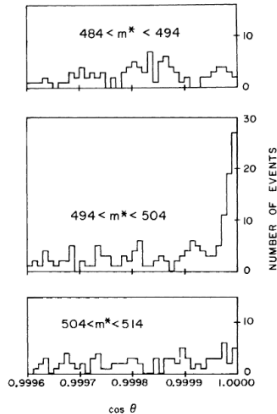


FIG. 3. Angular distribution in three mass ranges for events with $\cos \theta > 0.9995$.

Wie kann das sein?

- Konsequenz: $|K_S\rangle$ und $|K_L\rangle$ keine reinen CP- Zustände, also indirekte CP-Verletzung
→ In beiden Zuständen sind kleine Teile des jeweils anderen Zustands enthalten:

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

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

$$|\epsilon| = (2.229 \pm 0.010) \times 10^{-3}$$

- Die neutralen Kaonenzustände oszillieren über Box-Diagramme in einander über und zerfallen so
- Oder direkte CP-Verletzung über Pinguin- Diagramme
- Problem: Im Jahre 1964 noch keine Quarks oder der CKM-Mechanismus bekannt

Direkte CP- Verletzung

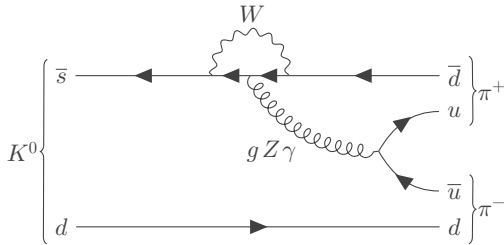


Figure: Pinguindiagramm des CP-verletzenden, neutralen Kaonenzerfalls

- Direkte CP-Verletzung würde eine CP-Verletzung innerhalb des Zerfalls ohne vorherige Mischung der Kaonen voraussetzen
- Messung der partiellen Zerfallsbreiten von:

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$$

$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

$$K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$$

- Es muss das Verhältnis gebildet werden, da sowohl Anteile der direkten als auch der indirekten Verletzung eine Rolle spielen müssen

Was wird denn da gemessen?

$$\frac{A(K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0)}{A(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0)} = \epsilon - 2\epsilon'$$

$$\frac{A(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{A(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)} = \epsilon + \epsilon'$$

$$R = \frac{A(K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0)}{A(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0)} / \frac{A(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{A(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)} \\ \approx 1 - 6 \operatorname{Re}(\epsilon' / \epsilon)$$

Bla

- Vorteil: Viele systematische Fehler kürzen sich raus
- Wäre $\epsilon' = 0$ so gäbe es keine direkte CP-Verletzung
- Bis in die 90er kein eindeutiges Ergebnis durch Experimente

Theoretische Überlegungen:

- Drei Quarkfamilien (Kobayashi und Maskawa, 1973 → noch vor Entdeckung des Charm-Quarks)

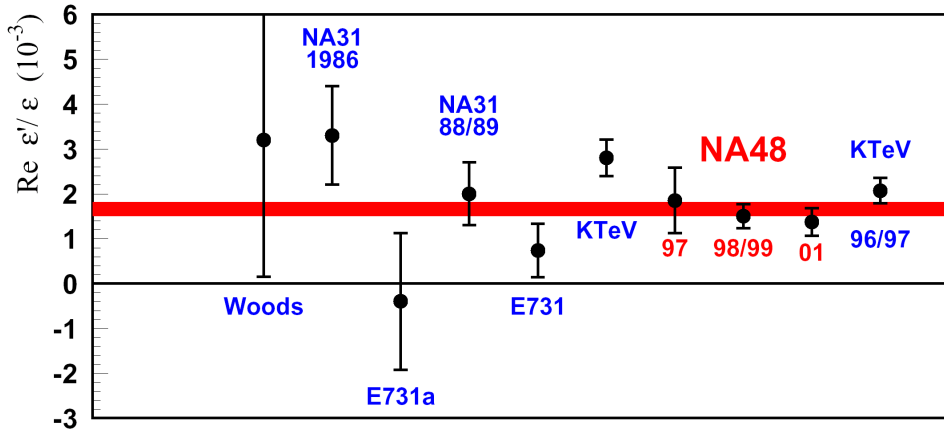


Figure: Ergebnisse für $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$