

---

# 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?

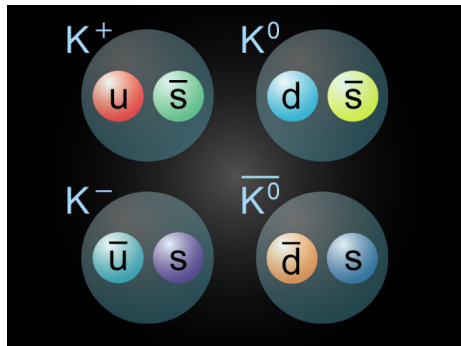


Figure: Übersicht über die Kaonen

Kaonen:

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

	$m / \text{MeV}$			$\tau / 10^{-10} \text{s}$	
$K^\pm$	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	$\pm 2,1$
$\pi^\pm$	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

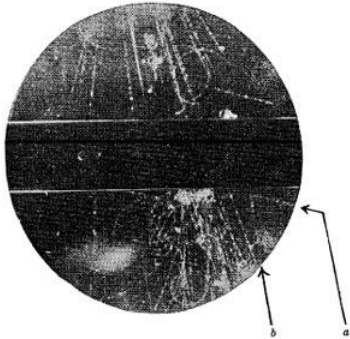
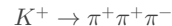


Figure: Nebulakameraufnahme der kosmischen Höhenstrahlung von Rochester und Butler 1947

- 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

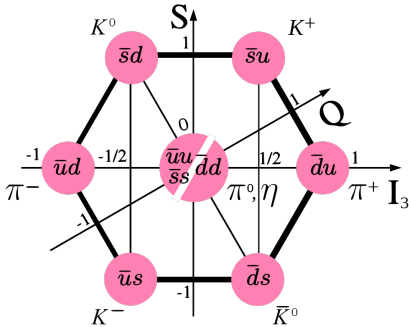


Figure: Der achtfache Weg von Gell-Mann und Ne'eman

- Sehr leichte Erzeugung (durch starke WW)
- Sehr langsamer Zerfall  $10^{-10}$ s (durch schwache WW)
- Gell-Mann 1953: Einführung einer neuen Teilcheneigenschaft/ Quantenzahl, der 'Strangeness'
- Kaonen leichteste Teilchen mit  $S = \pm 1$
- Zerfall sehr leicht möglich, wenn  $S$  durch alle Kräfte erhalten wäre
- Zerfall nur über die flavourändernde schwache WW möglich



## Paritätsverletzung und der Cosmotron

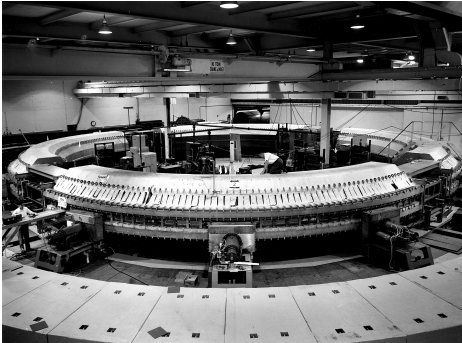


Figure: Das Cosmotron am Brookhaven National Laboratory (1952-1966)

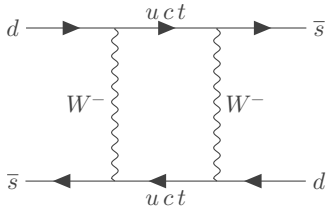
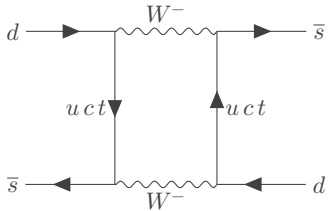
- Leistungsstärkstes Proton-Synchrotron (1952) mit Strahlenergien von 3,3 GeV
- Erstmals Produktion von schweren Teilchen der kosmischen Höhenstrahlung
- Entdeckung  $K_L$  durch Lande (1956)
- Beobachtung der Paritätsverletzung 1956 durch T.D. Lee und C.N. Yang

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

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

- $\tau^+$  und  $\theta^+$  tatsächlich  $K^+$
- Zerfälle verletzen die Paritätserhaltung

## Long und short? Die Mischung neutraler Kaonen



- 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  $|K_2\rangle \approx |K_L\rangle$

$$\tau(|K_L\rangle) \approx 600 \times \tau(|K_S\rangle)$$

- $|K_S\rangle$  haben CP = +1 und  $|K_L\rangle$  haben CP = -1
- Unterschied vor allem in Zerfallsmoden:

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

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

## CP-Verletzung

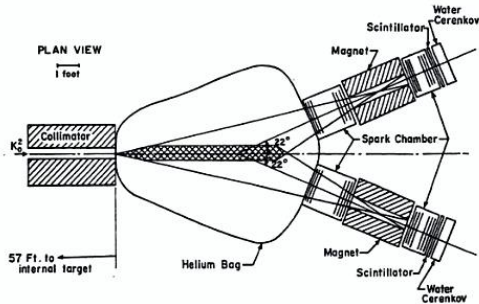


Fig. 9a. Set-up used to detect  $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$ .

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

- Planung 1964 durch Christenson, Cronin, Fitch und Turlay am Brookhaven National Laboratory
- 17 m lange Beamline
- Zerfall der  $|K_S\rangle$
- Messung des Winkels  $\theta$  zwischen  $K_L^0$ -Strahl und Teilchenimpulsen
- Bestimmung der Winkelsumme bei 'gleichzeitiger' Detektion
- Für Dreikörperzerfall mit großer Wahrscheinlichkeit  $\neq 0$
- Für Zweikörperzerfälle hingegen mit großer Wahrscheinlichkeit  $= 0$

## Ergebnis

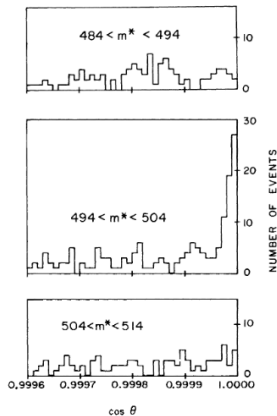


FIG. 3. Angular distribution in three mass ranges for events with  $\cos \theta > 0.9995$ .

Tatsächlich wurde der Zerfall

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

gemessen.

## Wie kann das sein?

- Konsequenz:  $|K_S\rangle$  und  $|K_L\rangle$  keine reinen CP- Zustände
- Indirekte CP-Verletzung
- Beide Zustände enthalten kleine Teile des anderen Zustands:

$$\begin{aligned}
 |K_L^0\rangle &= \frac{\epsilon |K_1\rangle + |K_2\rangle}{\sqrt{1 + \epsilon^2}} \\
 |K_S^0\rangle &= \frac{|K_1\rangle + \epsilon |K_2\rangle}{\sqrt{1 + \epsilon^2}} \\
 |\epsilon| &= (2.229 \pm 0.010) \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

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

## Direkte CP- Verletzung

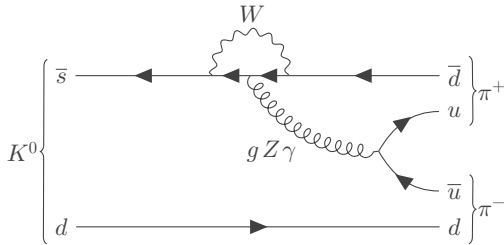


Figure: Pinguindiagramm des CP-verletzenden, neutralen Kaonenzerfalls

- Direkte CP-Verletzung setzt Verletzung ohne vorherige Mischung der Kaonen voraus
- Messung der partiellen Zerfallsbreiten von:

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

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

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

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

- Verhältnis wird gebildet
- Anteile der direkten und indirekten Verletzung spielen eine Rolle

## Was wird denn da gemessen?

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

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

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

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

Theoretische Überlegungen:

- Drei Quarkfamilien (Kobayashi und Maskawa, 1973)

Experimentelle Implikationen:

- Drei Generationen messbar
- Beobachtung direkter CP-Verletzung in Mesonen-Systemen

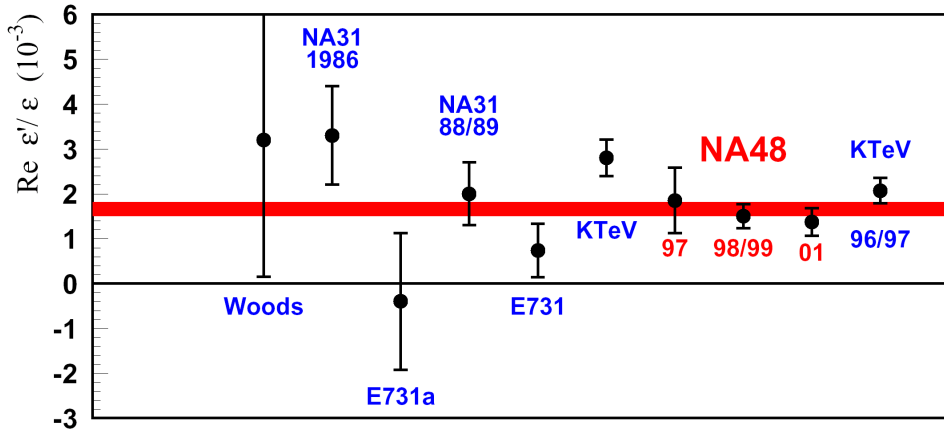


Figure: Ergebnisse für  $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$



## Wer war beteiligt?

### KTeV am FermiLab

- Vorläufer: E731  $\rightarrow \text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (7.4 \pm 5.9) \times 10^{-4}$
- Kaons at the TeVatron
- Kaon

### NA48 am Cern

- Vorläufer NA31  $\rightarrow \text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (23.0 \pm 6.5) \times 10^{-4}$
- North Area 48
- Fixed target mit 450 GeV vom SPS
- Gleichzeitige Messung von  $|K_L\rangle$  und  $|K_S\rangle$  durch Strange-Tagging

## Aufbau der NA48 Beamline

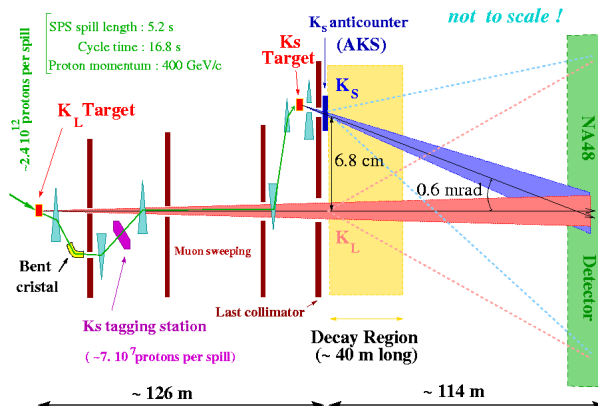


Figure: Beamline des NA48-Experiments

## Aufbau des KTeV-Detektors

### The KTeV Detector

6

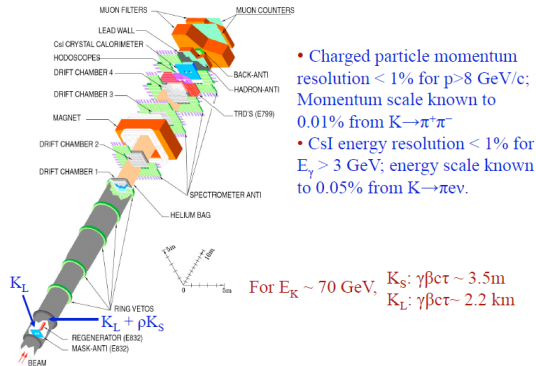


Figure: Detektor des KTeV-Experiments