

---

# 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?

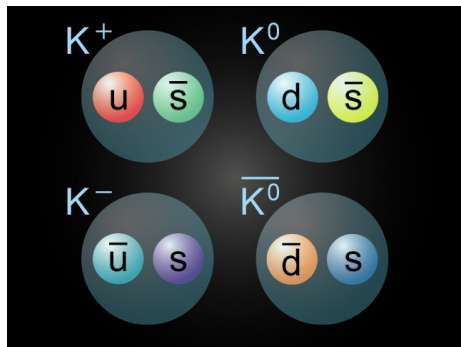


Figure: Übersicht über die Kaonen

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

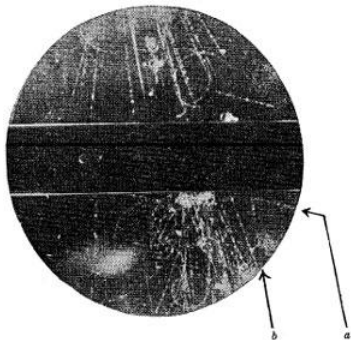
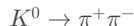
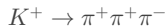


Figure: Nebelkammeraufnahme der kosmischen Höhenstrahlung von Rochester und Butler 1947

- 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

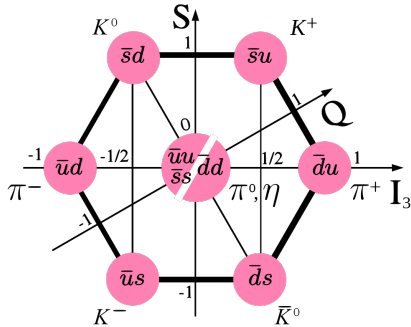


Figure: Der achtfache Weg von Gell-Mann und Ne'eman

- 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

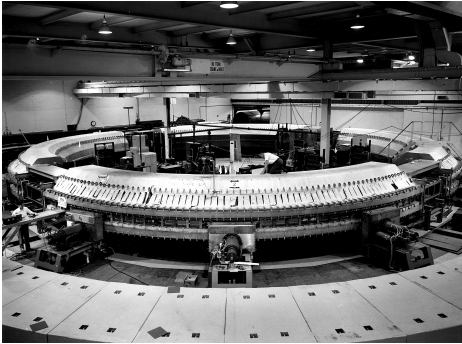


Figure: Das Cosmotron am Brookhaven National Laboratory (1952-1966)

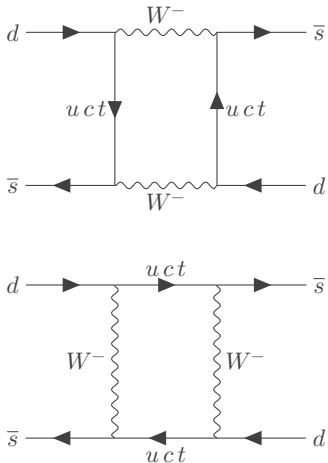
- Bau des damals leistungsstärksten Proton-Synchrotron mit Strahlenergien von 3,3 GeV im Jahr 1952
- Erstmals Produktion von schweren Teilchen der kosmischen Höhenstrahlung möglich
- Entdeckung des  $K_L$  1956 durch Lande in Nebelkammer
- Beobachtung der Paritätsverletzung 1956 durch T.D. Lee und C.N.Yang

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

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

- $\tau^+$  und  $\theta^+$  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

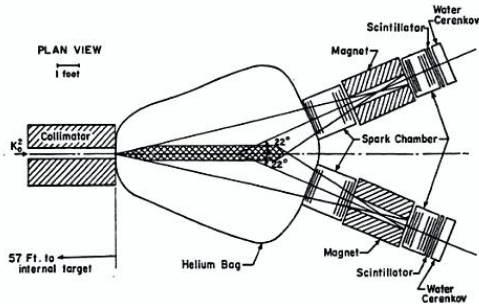


Fig. 9a. Set-up used to detect  $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$ .

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  $\theta$  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.

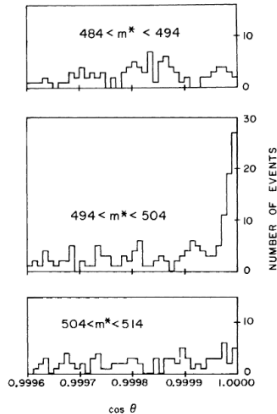


FIG. 3. Angular distribution in three mass ranges for events with  $\cos \theta > 0.9995$ .

## 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:

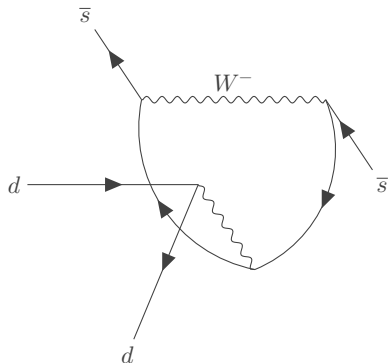
$$|K_L^0\rangle = \frac{\epsilon |K_1\rangle + |K_2\rangle}{\sqrt{1 + \epsilon^2}}$$

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

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

- 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



- 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