

---

## 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

### Moderne Experimente

- Motivation für moderne Kaon-Experimente
- Zurück zu direkter CP-Verletzung
- KTeV
- NA48

## Inhalt

### Was sind Kaonen

#### Historische Kaonenexperimente

- Entdeckung der Kaonen
- Paritätsverletzung
- Kaonenmischung
- Direkte und indirekte CP-Verletzung

#### Moderne Experimente

- Motivation für moderne Kaon-Experimente
- Zurück zu direkter CP-Verletzung
- KTeV
- NA48

## Was sind Kaonen?

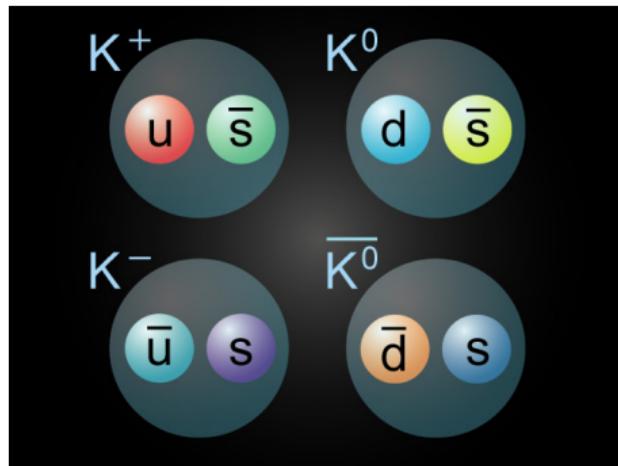


Figure: Übersicht über die Kaonen

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

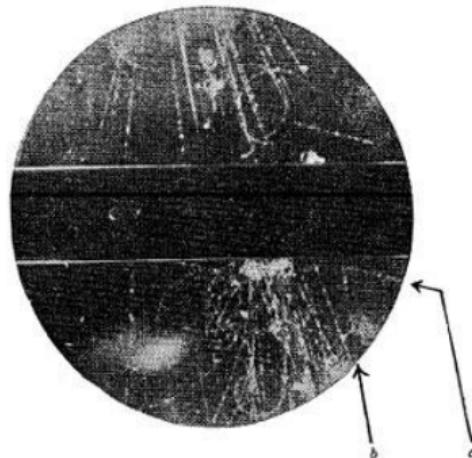
- Entdeckung der Kaonen
- Paritätsverletzung
- Kaonenmischung
- Direkte und indirekte CP-Verletzung

### Moderne Experimente

- Motivation für moderne Kaon-Experimente
- Zurück zu direkter CP-Verletzung
- KTeV
- NA48

## Weltkarte

## Entdeckung der Kaonen

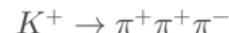


**Figure:** Nebelkammeraufnahme der kosmischen Höhenstrahlung von Rochester und Butler 1947

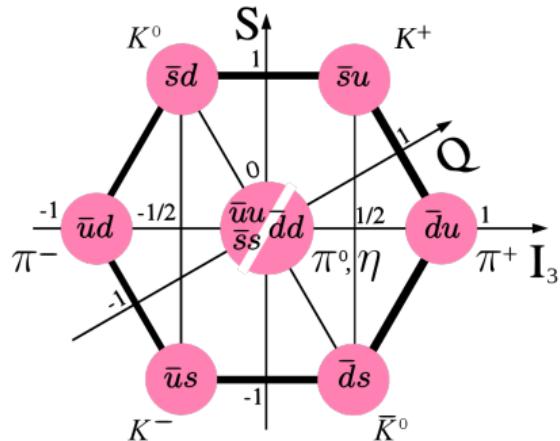
- Entdeckung des ersten (neutralen) Kaons 1947 durch George Rochester et. al
- Höhenstrahlung wurde in Nebelkammer untersucht
- Zerfall eines neutralen Teilchens in ein positives und negatives Pion



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



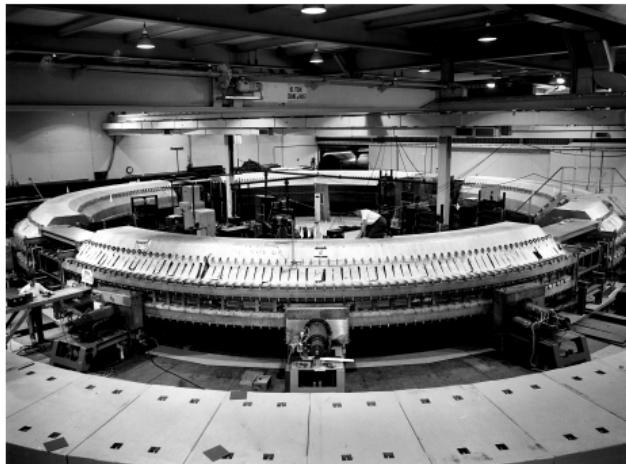
## Seltsam lange Lebensdauer



- 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  $\mathbf{S} = \pm 1$
- Zerfall sehr leicht möglich, wenn  $\mathbf{S}$  durch alle Kräfte erhalten wäre
- Zerfall nur über die flavourändernde schwache WW möglich

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

## Paritätsverletzung und der Cosmotron



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

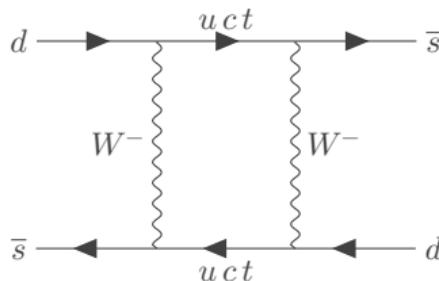
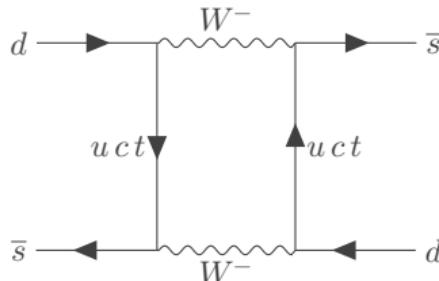
- Leistungsstärkstes Proton-Synchrotron (1952) mit Strahlenergien von 3,3 GeV
- Erstmals Produktion von schweren Teilchen der kosmischen Höhenstrahlung
- Entdeckung  $K_L$  durch Lande (1956)
- Beobachtung der Paritätsverletzung 1956 durch T.D. Lee und C.N.Yang

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

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

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

## Long und short? Die Mischung neutraler Kaonen



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

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

- 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  $|K_L\rangle$  habe  $CP = -1$
- Unterschied vor allem in Zerfallsmoden:

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

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

## CP-Verletzung

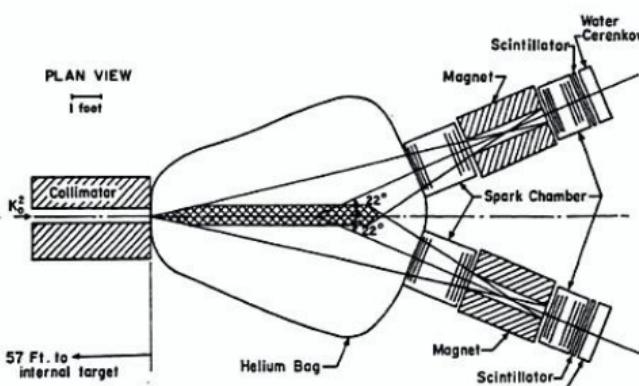
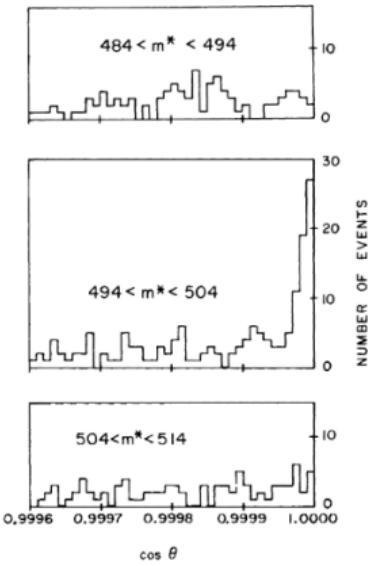


Fig. 9a. Set-up used to detect  $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ .

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

- Planung 1964 durch Christenson, Cronin, Fitch und Turlay am Brookhaven National Laboratory
- 17 m lange Beamlne
- ➔ 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



Tatsächlich wurde der Zerfall

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

gemessen.

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
  - Indirekte CP-Verletzung
  - Beide Zustände enthalten kleine Teile des anderen Zustands:

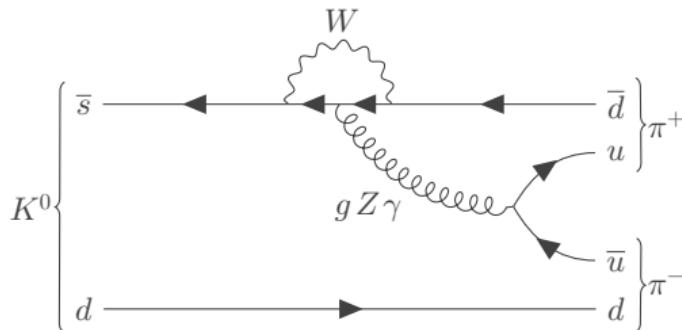
$$|K_L^0\rangle = \frac{\epsilon |K_1\rangle + |K_2\rangle}{\sqrt{1 + \epsilon^2}}$$

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

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

- 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

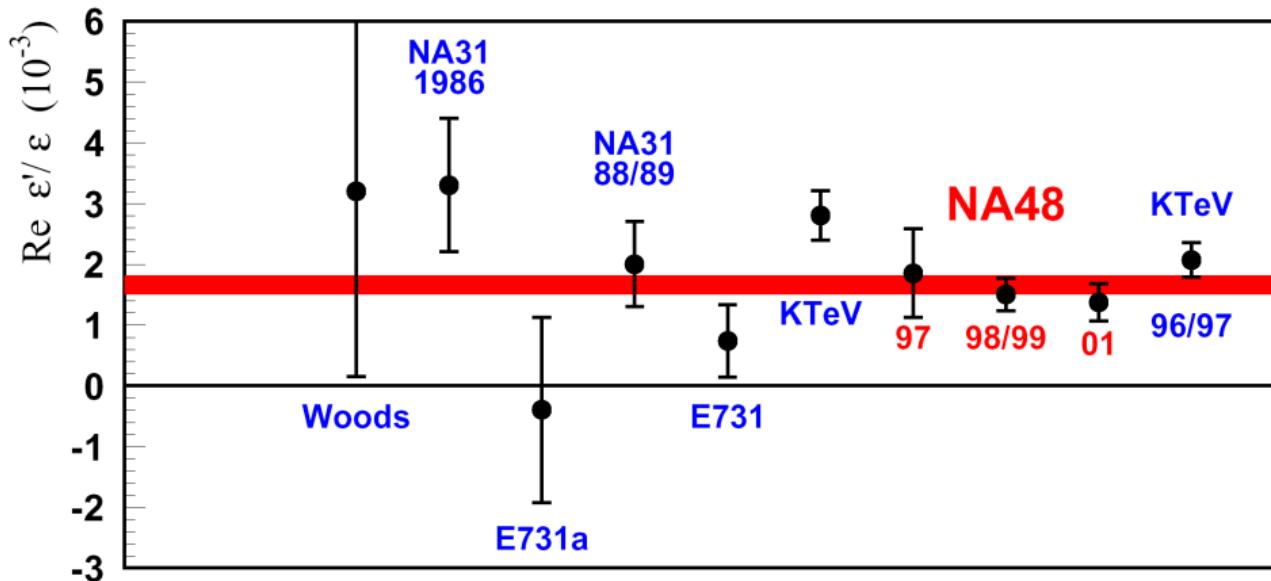


Figure: Ergebnisse für  $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$

## Inhalt

Was sind Kaonen

### Historische Kaonenexperimente

- Entdeckung der Kaonen
- Paritätsverletzung
- Kaonenmischung
- Direkte und indirekte CP-Verletzung

### Moderne Experimente

- Motivation für moderne Kaon-Experimente
- Zurück zu direkter CP-Verletzung
- KTeV
- NA48

## Motivation

Warum sind Kaonen-Experimente immer noch wichtig für das Verständnis fundamentaler Fragen der Teilchenphysik?

- Gibt es noch weitere Ursachen für CP-Verletzung, abseits der komplexen Phase der CKM-Matrix?
- Inwieweit ist die Leptonuniversalität berücksichtigt?
- Wie weit können die Grenzen der Hochenergie-Teilchenphysik in Bezug auf seltene Prozesse gebracht werden?
- Gibt es neue Physik, die man durch die Untersuchung von mesonischen Loopzerfällen, beobachten kann?
- Können fundamentale Symmetrien, wie CPT, untersucht werden und wenn ja bis zu welchem Grad?

## Wer war an der Messung von $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$ beteiligt?

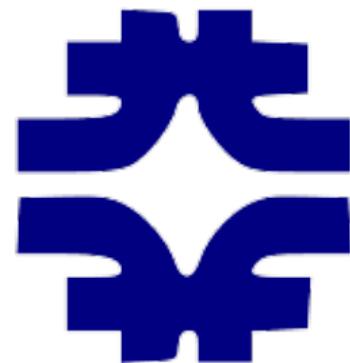
KTeV am FermiLab

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

NA48 am Cern

- Vorläufer NA31  $\rightarrow \text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (23.0 \pm 6.5) \times 10^{-4}$
- North Area 48

## Das KTeV-Experiment



# Fermilab

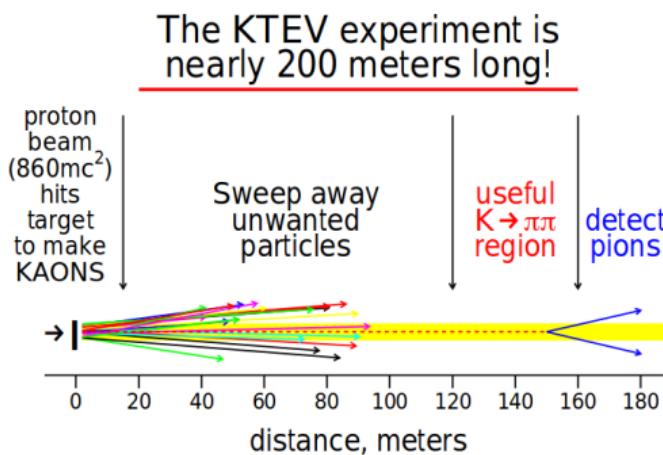
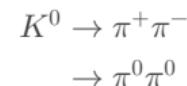


Figure: Konzept des KTeV Experiments

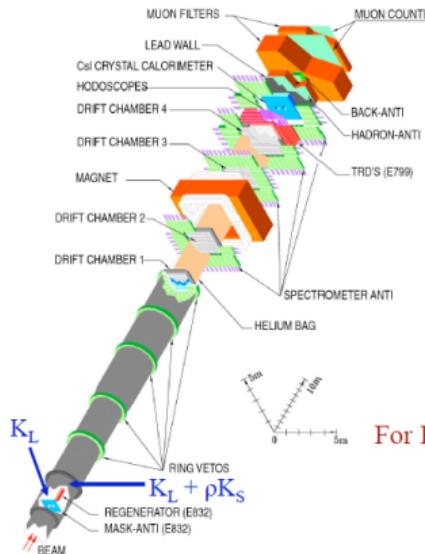
- Kaonzerfall im Vakuum um Kollision mit Luft zu verhindern



- $\pi$ -Impulse werden durch die Krümmung ihrer Bahnen gemessen (Magnetfeld)
- Anschließend Spurmessung durch 'wire chambers'
- $\pi$  die Detektor verfehlten, werden simuliert und berücksichtigt

## The KTeV Detector

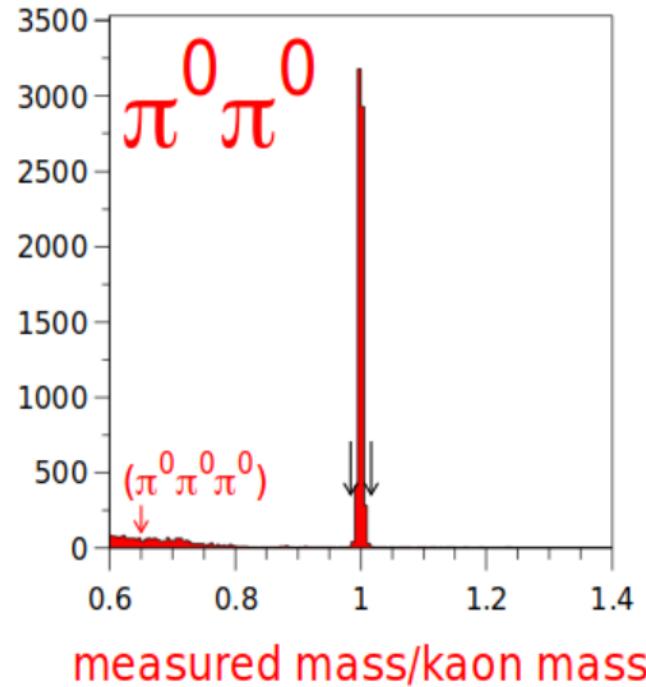
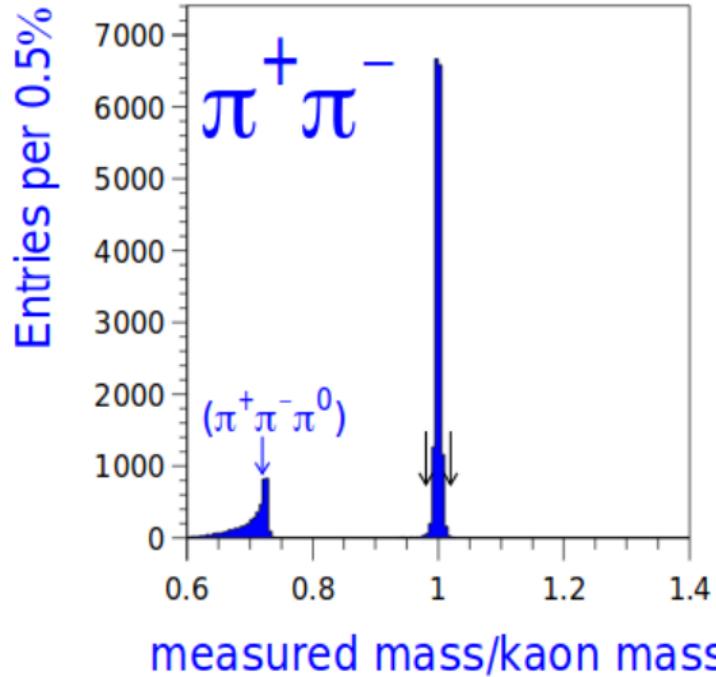
6



- Charged particle momentum resolution < 1% for  $p>8$  GeV/c; Momentum scale known to 0.01% from  $K\rightarrow\pi^+\pi^-$
- CsI energy resolution < 1% for  $E_\gamma > 3$  GeV; energy scale known to 0.05% from  $K\rightarrow\pi\nu\bar{\nu}$ .

For  $E_K \sim 70$  GeV,  $K_S: \gamma\beta c\tau \sim 3.5$  m  
 $K_L: \gamma\beta c\tau \sim 2.2$  km

Figure: Detektor des KTeV-Experiments  
Moderne Experimente: KTeV



## Das Experiment NA48

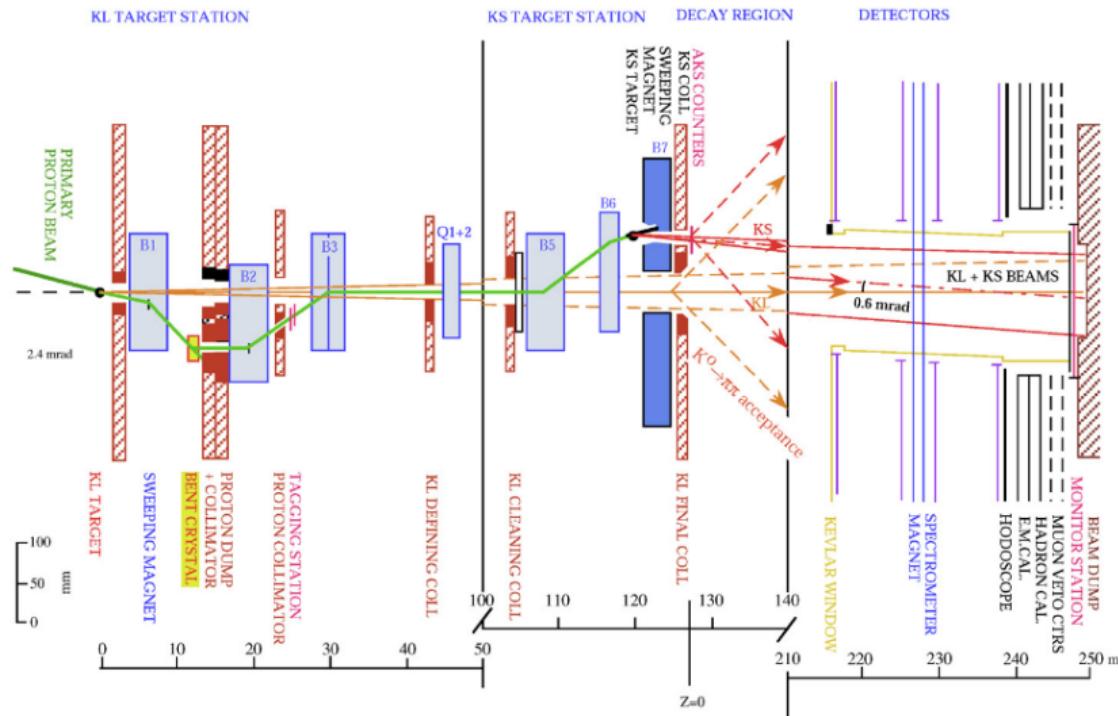




**Figure:** Tunnel des Super Proton Synchrotrons  
(SPS)

- Fixed target mit 450 GeV vom SPS
- Gleichzeitige Messung von  $|K_L\rangle$  und  $|K_S\rangle$  durch  $K_S$ -Tagging
- Trennung von  $|K_L\rangle$  und  $|K_S\rangle$  nach letztem Collimator
- Auftreffen von  $|K_L\rangle$  und  $|K_S\rangle$  am gleichen Detektorpunkt
- Vertexrekonstruktion ausreichend für Zerfall in geladene  $\pi$
- Tagging ermöglicht zeitliche Trennung

## Aufbau der NA48 Beamlne



Moderne Experimente: NA48

## *K<sub>S</sub>*-Tagging

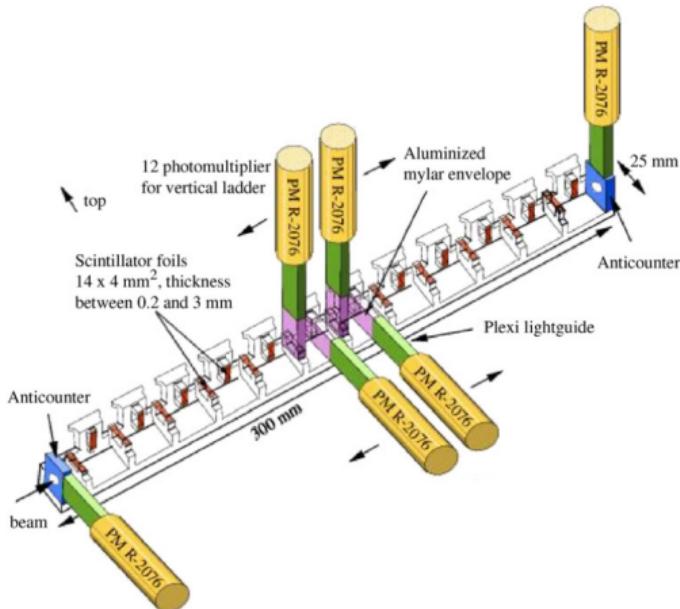


Figure: Schema des NA48-Taggings

- Zerfall in  $\pi^0$  problematisch
- Zuordnung durch Messung der Zeitdifferenz
- Tagging eines Protons vor  $K_S$ -Target
- Überprüfen der Zeit der Detektion durch LKr-Calorimeter
- ➔ Zuordnung möglich

## Detektor

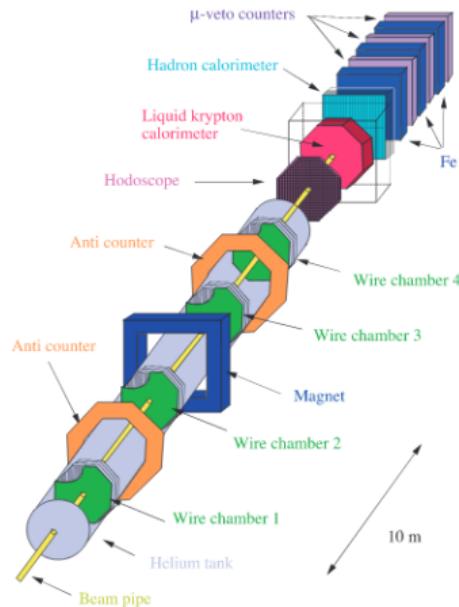


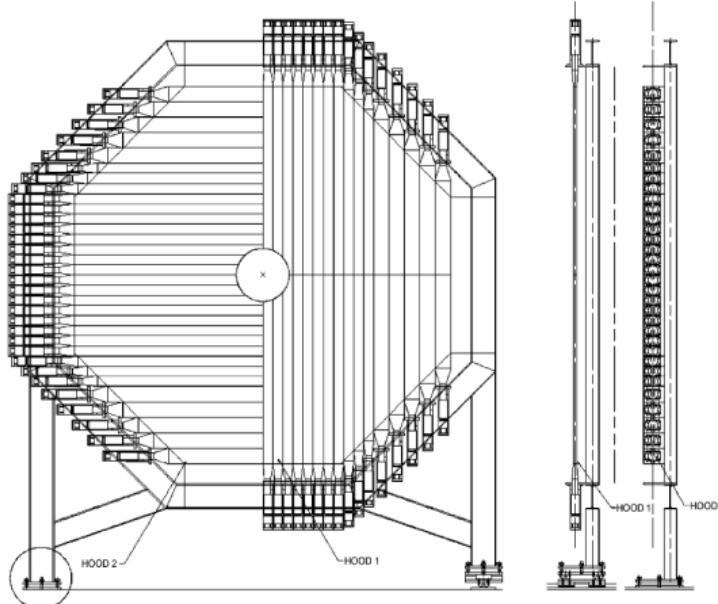
Figure: Detektor des NA48-Experiments

Moderne Experimente: NA48

## Heliumtank

- Atmosphärendruck
- Beherbergt Spektrometer und Wire chambers
- Genutzt zur Bestimmung der Winkel von geladenen  $\pi$

## Hodoskop



- Griechisch für Pfadseher
- System aus Plastik-Szintillatoren und Photomultipliern
- ➔ 64x64 im Abstand von 74 cm
- Signal für Zerfall in geladene  $\pi$

Figure: Detektor des NA48-Experiments

## Flüssig-Krypton-Kalorimeter



- Hohe Granularität und Energieauflösung
- Hauptsächlich zur Detektion von:

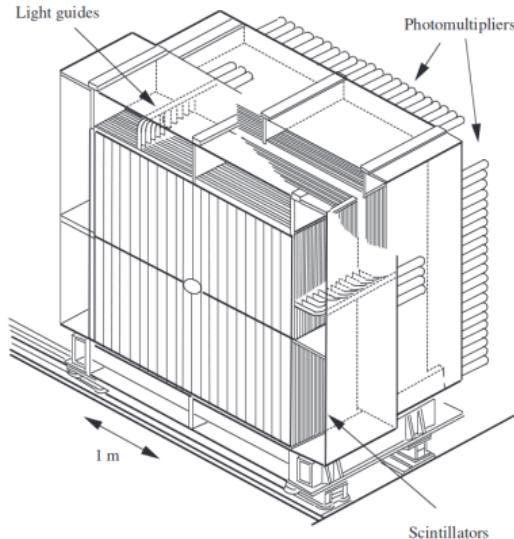
$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

und Bestimmung der  $\gamma$ -Energie und Transversalimpulse

- Echtzeitmessung zum taggen der  $\pi^0$
- Unterdrückung des Untergrunds durch semileptonische Zerfälle

Figure: Das LKR-Kalorimeter vor dem Einbau

## Hadronen-Kalorimeter



- Messung der Energie und Position der Teilchenschauer innerhalb des Detektors
- Hauptsächlich zum Triggern genutzt
- ➔ Trigger auf Gesamtenergie und als Veto für neutrale Teilchen
- ➔  $\pi^0$  sollten vor EM-Kalorimeter in  $2\gamma$  zerfallen

**Rest:** Andere Zerfälle (Hintergrund)

**Figure:** Schema des hadronischen Kalorimeters von NA48

## Die $\mu$ -Veto-Counter

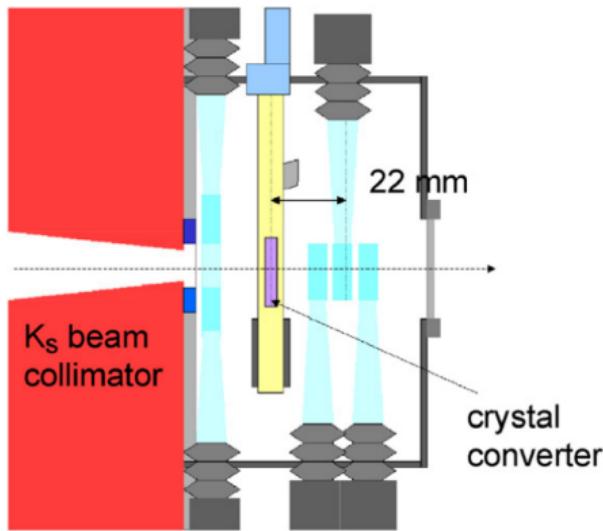
- $\mu$ -Kammern zur Detektion von



Zerfällen

- Ausgestattet mit Szintillatotions-Hodoskopen zur Bahnberechnung
- Abgeschirmt durch dicke Eisenwände

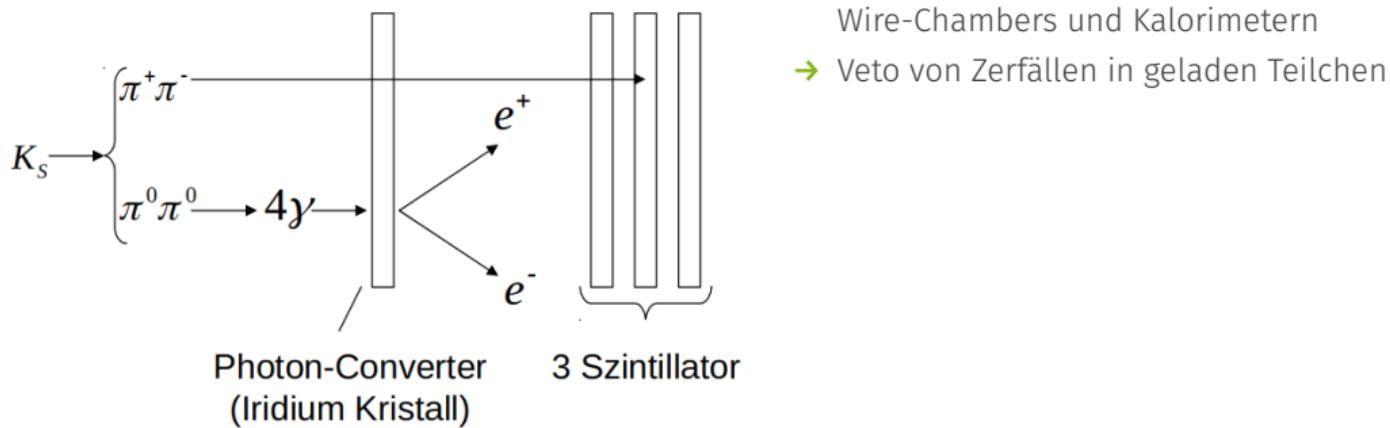
## $K_S$ Anti-Counter



- Veto von Zerfällen außerhalb der Wire-Chambers und Kalorimetern
- Veto von Zerfällen in geladen Teilchen

Figure: Aufbau des  $K_S$  Anti-Counters

## $K_S$ Anti-Counter



**Figure:** Schema des  $K_S$  Anti-Counters

## Ergebnisse beider Experimente

