

---

## K-Mesonen und wo sie zu finden sind

---

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

NA48

Aufbau des NA48-Detektors

KTeV

Ergebnisse von KTeV und NA48

### Seltene Zerfälle und Präzisionsmessungen

Der goldene Zerfall der Kaonphysik

Experiment NA62

KOTO

Weitere Experimente

## 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

NA48

Aufbau des NA48-Detektors

KTeV

Ergebnisse von KTeV und NA48

#### Seltene Zerfälle und Präzisionsmessungen

Der goldene Zerfall der Kaonphysik

Experiment NA62

KOTO

Weitere Experimente

## Was sind Kaonen?

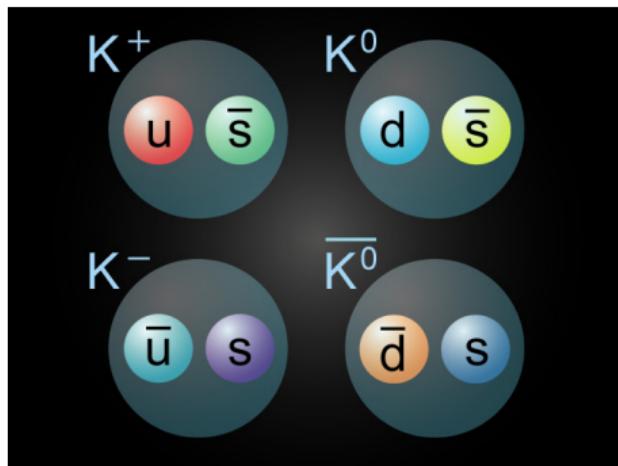


Figure: Übersicht über die Kaonen[1, p. 7]

Kaonen:

- sind die leichtesten Teilchen mit Strangeness  $S = \pm 1$
- besitzen einen ganzzahligen Spin
- sind Bosonen
- verfügen über eine relativ lange Lebensdauer[5]

	$m / \text{MeV}$		$\tau / 10^{-10} \text{s}$	
$K^\pm$	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

NA48

Aufbau des NA48-Detektors

KTeV

Ergebnisse von KTeV und NA48

### Seltene Zerfälle und Präzisionsmessungen

Der goldene Zerfall der Kaonphysik

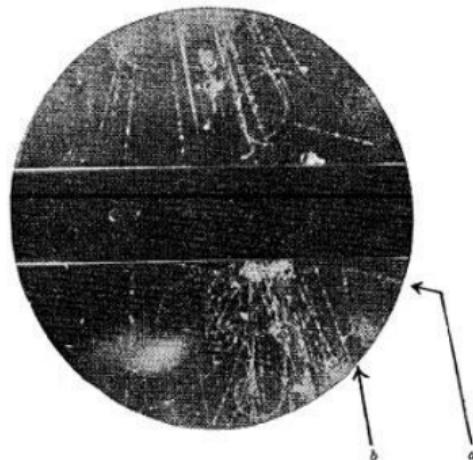
Experiment NA62

KOTO

Weitere Experimente

## Weltkarte

## Entdeckung der Kaonen



**Figure:** Nebelkammeraufnahme der kosmischen Höhenstrahlung von Rochester und Butler 1947[2, p. 4]

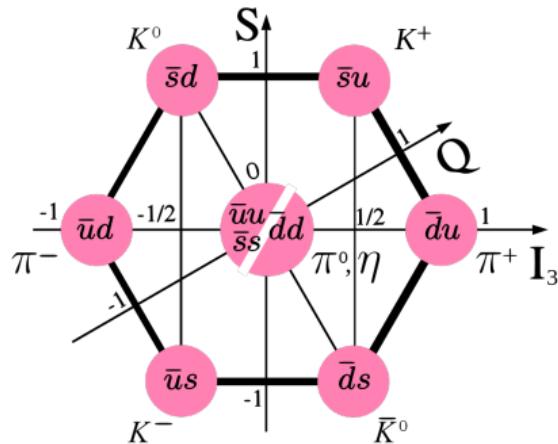
- Entdeckung des ersten (neutralen) Kaons 1947 durch George Rochester et. al
- Höhenstrahlung wurde in Nebelkammer untersucht
- Zerfall eines neutralen Teilchens in ein positives und negatives Pion



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



## Seltsam lange Lebensdauer

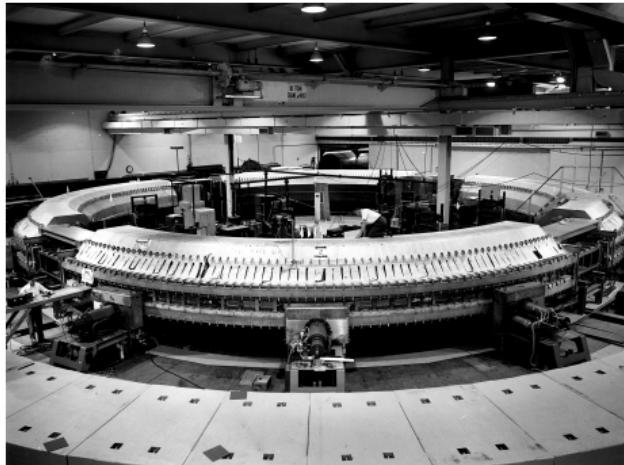


- Sehr leichte Erzeugung (durch starke WW)
- Sehr langsamer Zerfall  $10^{-10}\text{s}$  (durch schwache WW)
- Gell-Mann 1953: Einführung einer neuen Teilcheneigenschaft/ Quantenzahl
- Strangeness
- Zerfall sehr leicht möglich, wenn **S** durch alle Kräfte erhalten wäre

**Aber:** Zerfall nur über die flavourändernde schwache WW möglich

**Figure:** Der achtfache Weg von Gell-Mann und Ne'eman[4]

## Paritätsverletzung und der Cosmotron



**Figure:** Das Cosmotron am Brookhaven National Laboratory (1952-1966)[3]

- 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 Zerfälle

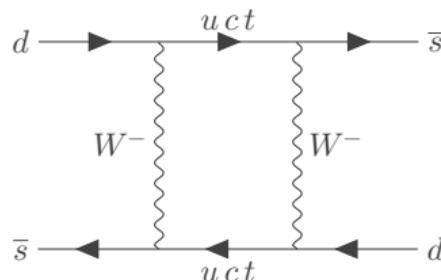
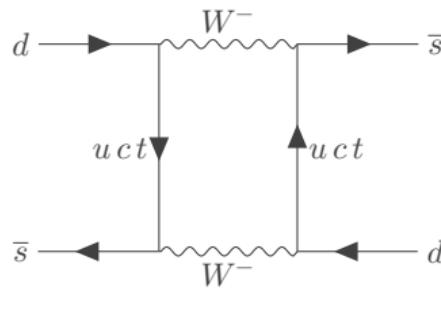
$$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

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

durch T.D. Lee und C.N.Yang (1956)

- $\tau^+$  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:

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

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

$$\begin{aligned} |K_S\rangle &\rightarrow \pi^+ \pi^- \\ |K_L\rangle &\rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \end{aligned}$$

## CP-Verletzung

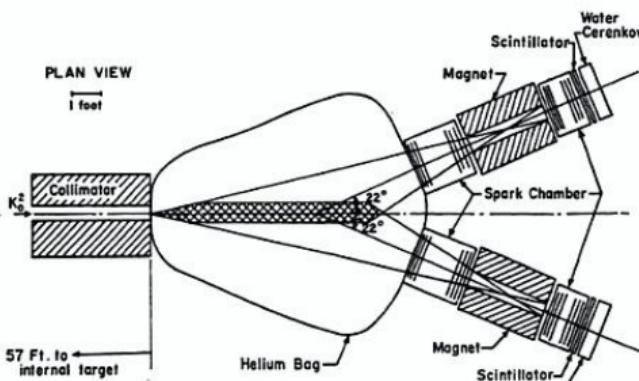
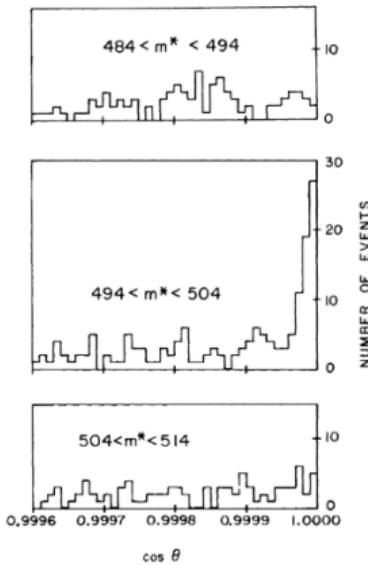


Fig. 9a. Set-up used to detect  $K_0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ .

**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:

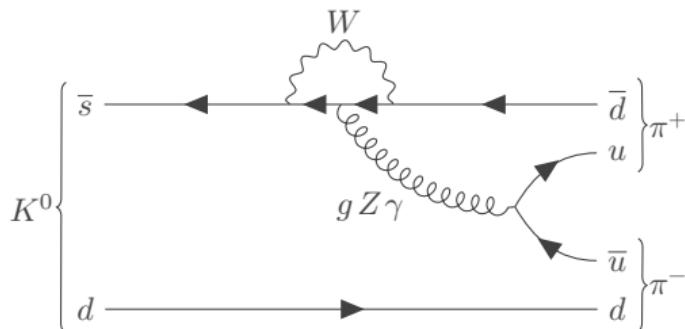
$$|K_L^0\rangle = \frac{\epsilon |K_1\rangle + |K_2\rangle}{\sqrt{1 + \epsilon^2}}$$

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

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

- 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 Kaonenerfalls

- Direkte CP-Verletzung:
- Keine vorherige Mischung der Kaonen
- Messung der partiellen Zerfallsbreiten von:

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

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

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

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

- Bildung der Verhältnisse
- Anteile der direkten und indirekten Verletzung spielen eine Rolle

## Was wird dann gemessen?

$$\eta_{00} = \frac{A(K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0)}{A(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0)} = \epsilon - 2\epsilon'$$

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

$$\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = \frac{1}{6} \left\{ 1 - \left| \frac{\eta_{00}}{\eta_{\pm}} \right|^2 \right\}$$

- 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

## 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

NA48

Aufbau des NA48-Detektors

KTeV

Ergebnisse von KTeV und NA48

Seltene Zerfälle und Präzisionsmessungen

Der goldene Zerfall der Kaonphysik

Experiment NA62

KOTO

Weitere Experimente

## 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 Experiment NA48

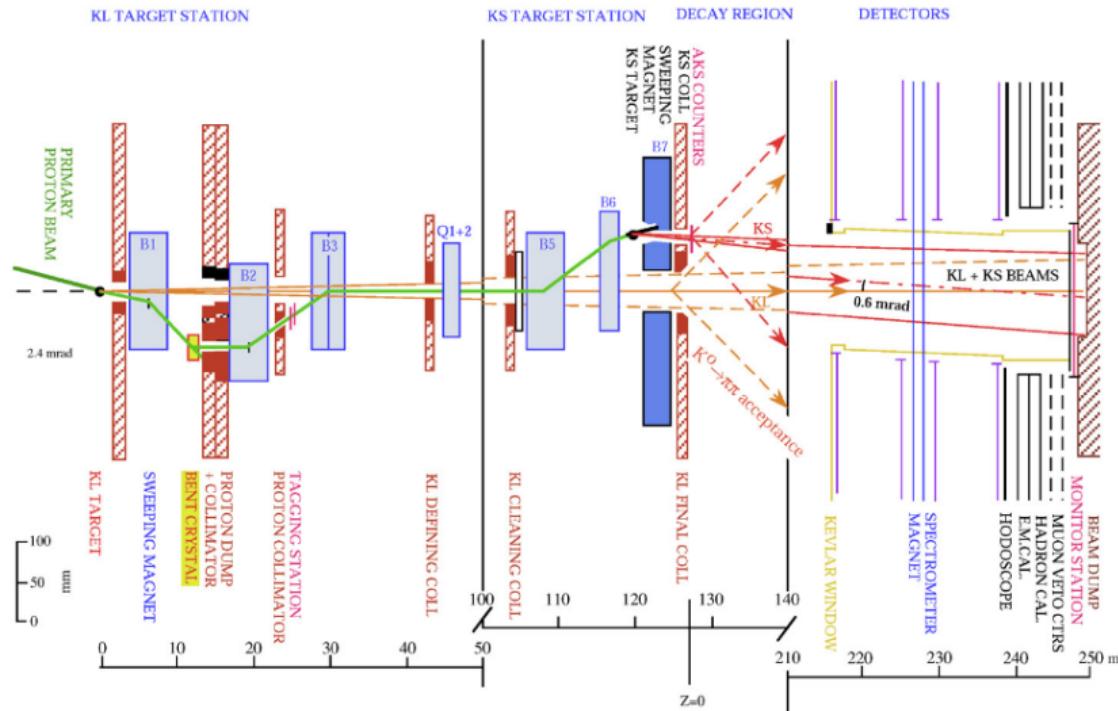




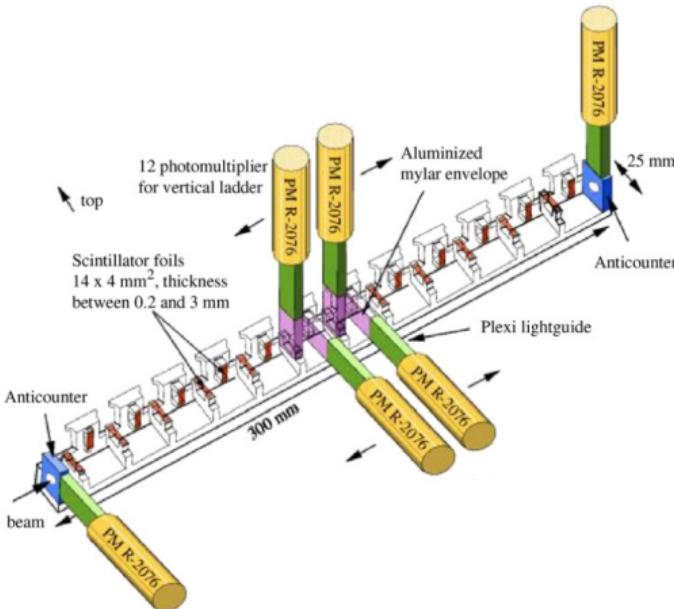
**Figure:** Tunnel des Super Proton Synchrotrons (SPS)

- 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



## $K_S$ -Tagging



- 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

Figure: Schema des NA48-Taggings

## Detektor

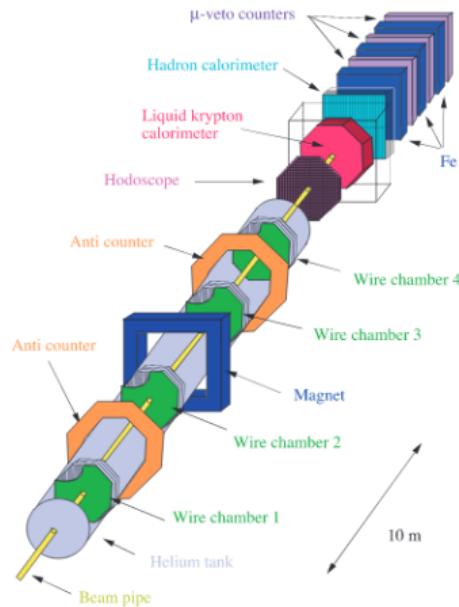
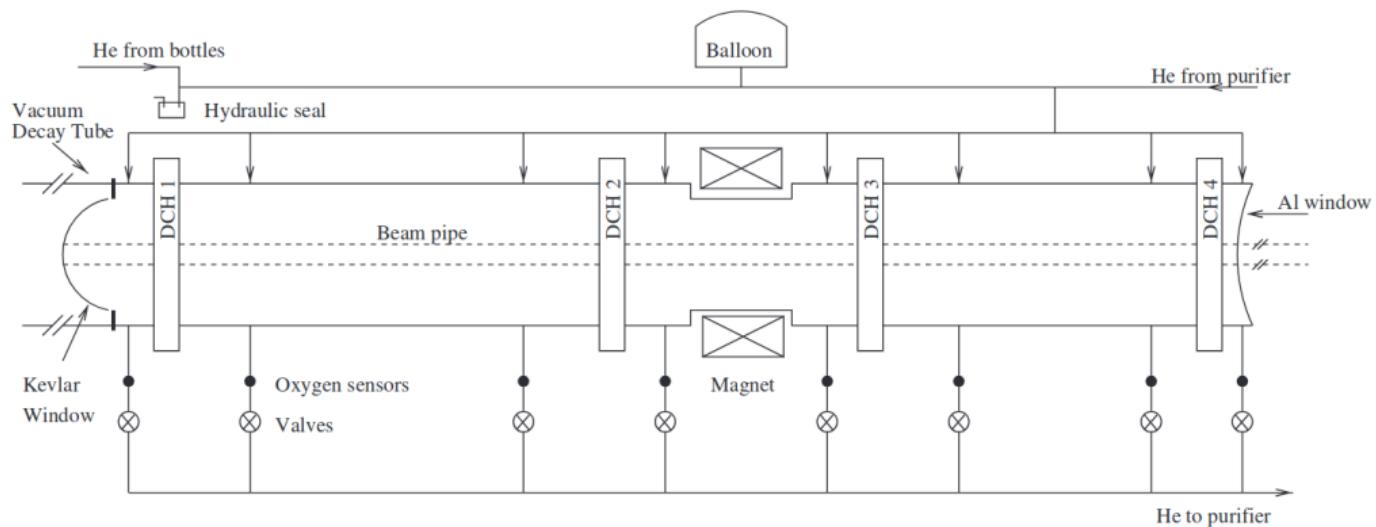


Figure: Detektor des NA48-Experiments

Moderne Experimente: Aufbau des NA48-Detektors

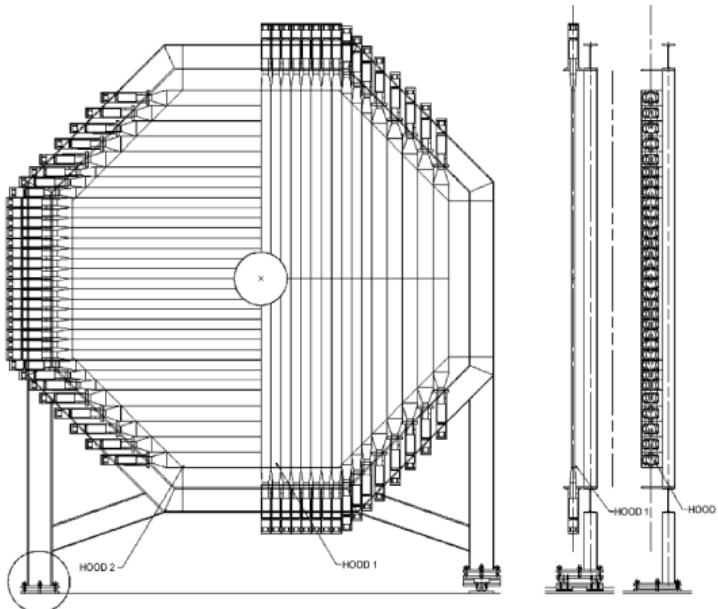
## Heliumtank

- Geschützt durch hochstables Kevlar-Glas
- Atmosphärendruck
- Beherbergt Spektrometer und Wire chambers
- Genutzt zur Bestimmung der Winkel von geladenen  $\pi$
- Beherbergt dafür Eisenjochmagnet (0,37 T im Zentrum)



**Figure:** Schema des Heliumtanks aus NA48 mit Spektrometern

## Hodoskop



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

Figure: Detektor des NA48-Experiments

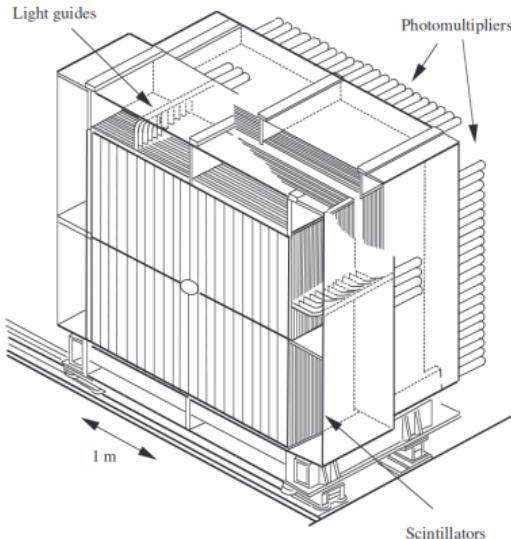
## Flüssig-Krypton-Kalorimeter



Figure: Das LKr-Kalorimeter vor dem Einbau

- Hohe Granularität und Energieauflösung
- Hauptsächlich zur Detektion von:  
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- Bestimmung der  $\gamma$ -Energie und Transversalimpulse
- Funktion ähnlich einer normalen Ionisationskammer
- ➔ Stabiles Signal bei hoher Reinheit
- ➔ Korreliert gut mit der Energie der eingehenden  $\gamma$  und  $e^-$
- Echtzeitmessung zum taggen der  $\pi^0$
- Unterdrückung des Untergrunds durch semileptonische Zerfälle

## 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

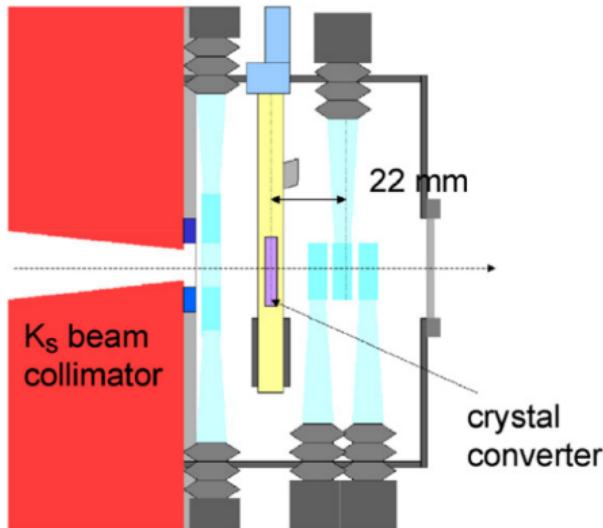
- $\mu$ -Kammern zur Detektion von



Zerfällen

- Ausgestattet mit Szintillations-Hodoskopen zur Bahnberechnung
- Abgeschirmt durch dicke Eisenwände
- Anordnung analog zu neueren Experimenten, z.B. LHCb und ATLAS

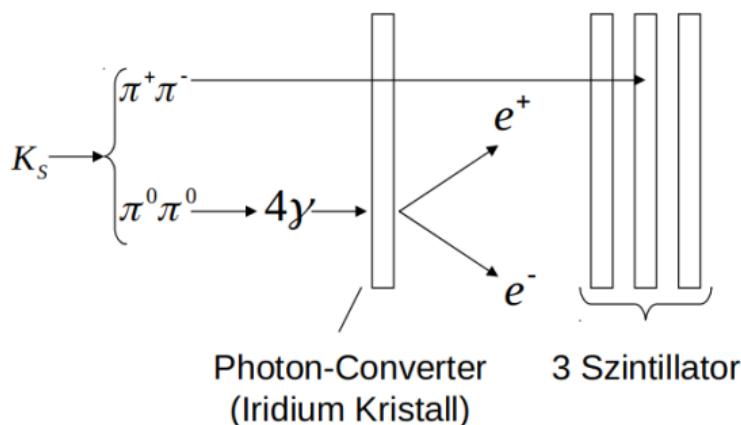
## $K_S$ Anti-Counter



- Veto-Trigger 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

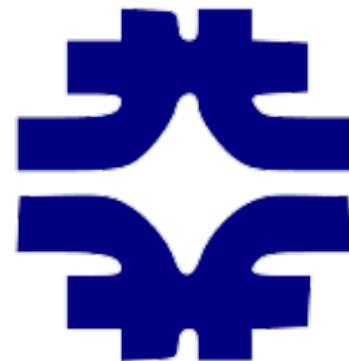


- Veto-Trigger von Zerfällen außerhalb der Wire-Chambers und Kalorimetern
- Veto von Zerfällen in geladen Teilchen

Figure: Schema des  $K_S$  Anti-Counters

---

## Das KTeV-Experiment



# Fermilab

The KTeV experiment is  
nearly 200 meters long!

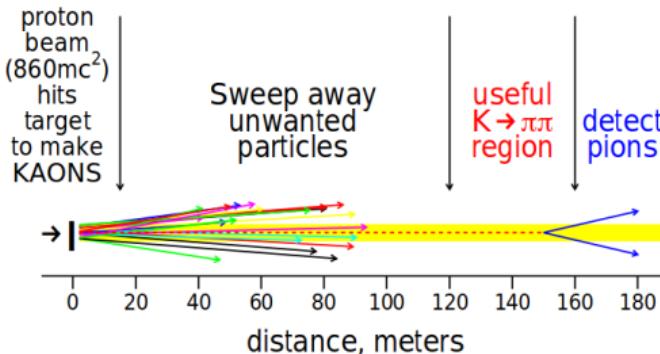
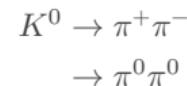


Figure: Konzept des KTeV Experiments

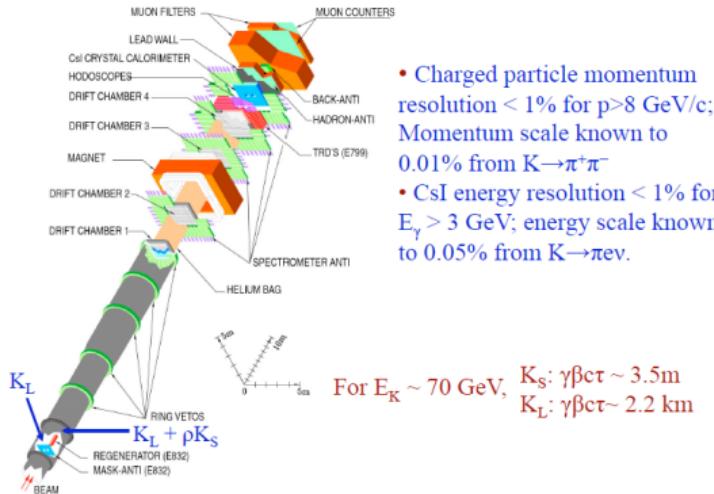
- Kaonzerfall im Vakuum um Kollision mit Luft zu verhindern



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

Figure: Detektor des KTeV-Experiments

## Ergebnisse beider Experimente

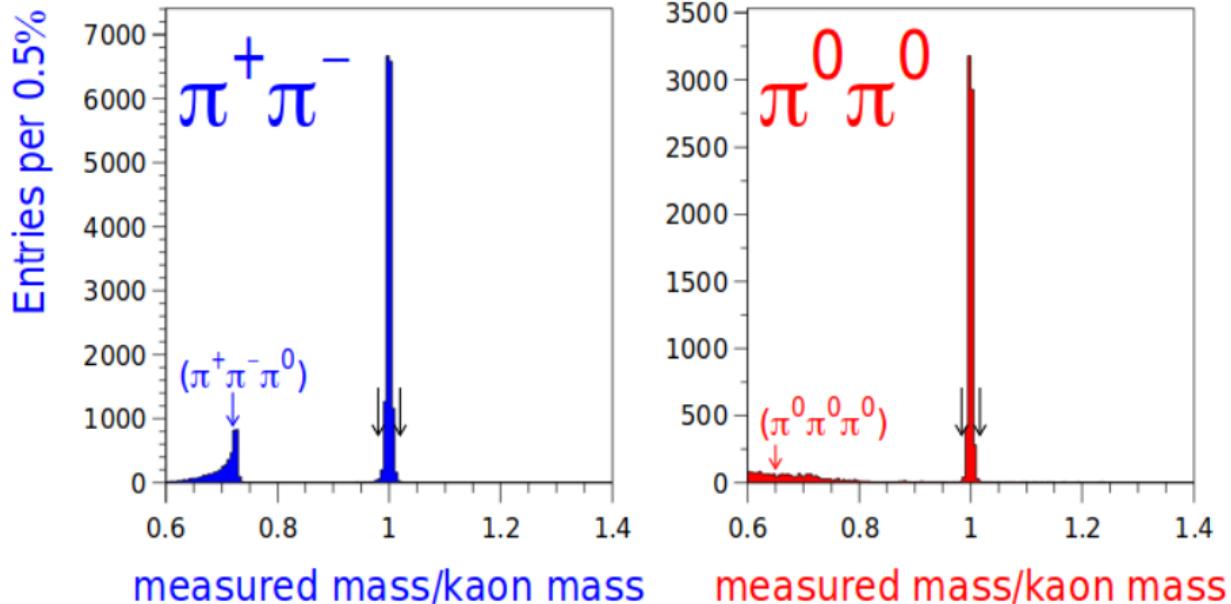
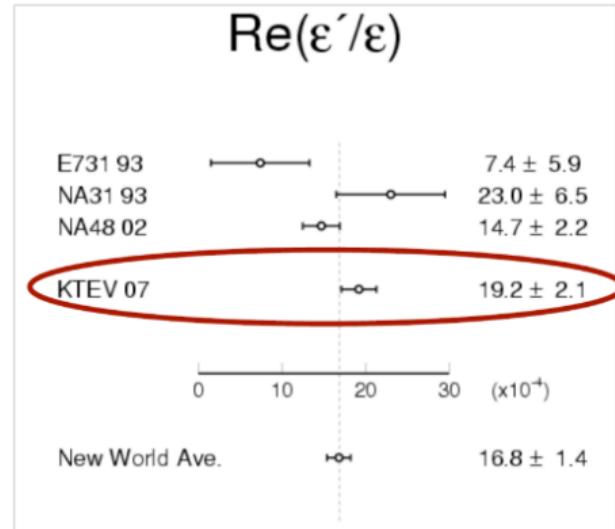


Figure: Massenverteilung von KTeV



KTeV Ergebnis:  $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (19.2 \pm 2.1) \times 10^{-4}$  (Stand: 2009)

Weltdurchschnitt:  $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (16.8 \pm 1.4) \times 10^{-4}$

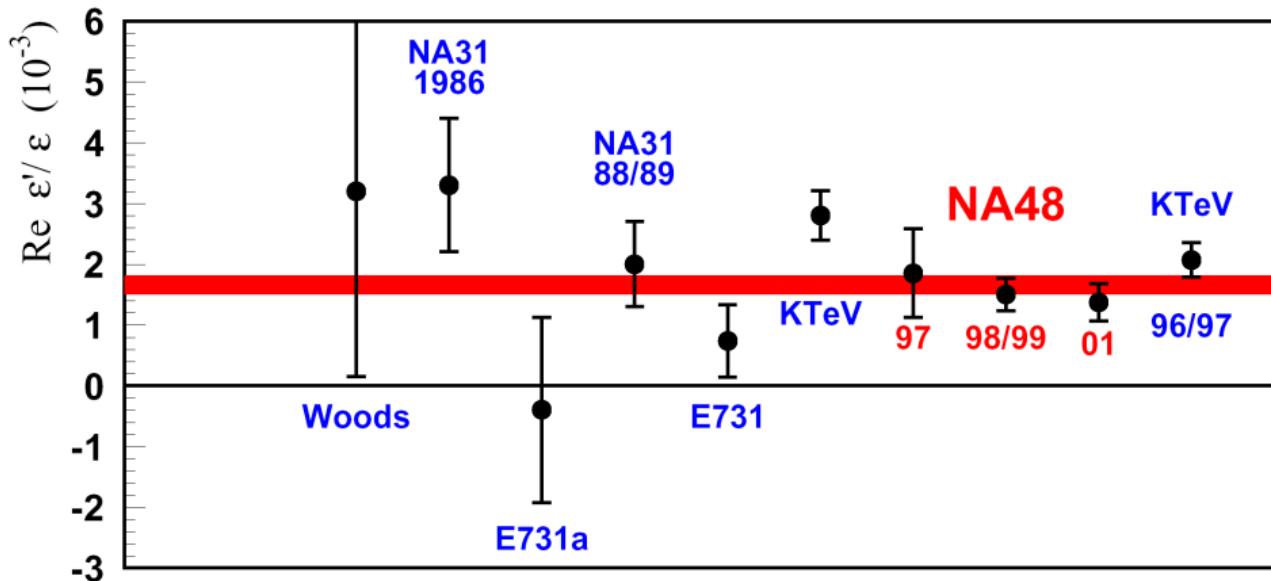


Figure: Ergebnisse für  $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$

## 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

NA48

Aufbau des NA48-Detektors

KTeV

Ergebnisse von KTeV und NA48

Seltene Zerfälle und Präzisionsmessungen

Der goldene Zerfall der Kaonphysik

Experiment NA62

KOTO

Weitere Experimente

## Der goldene Zerfall der Kaonphysik

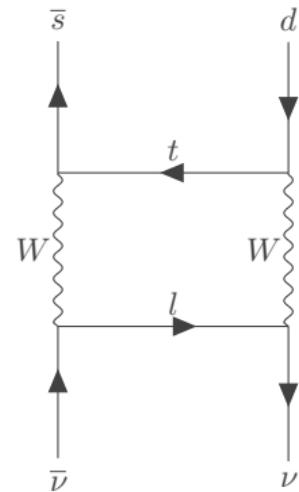
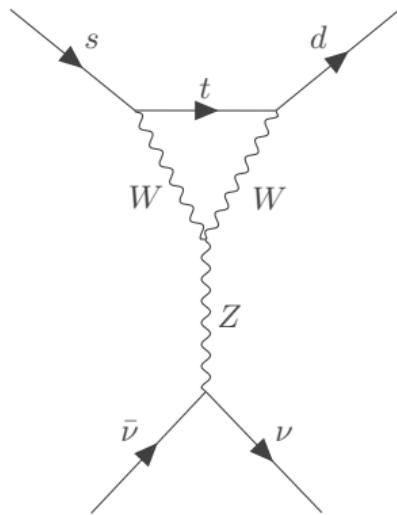
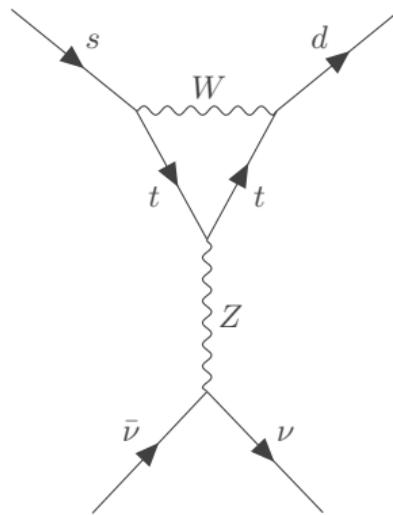
- Der Anteil des Zerfalls



ist im Standardmodell stark unterdrückt ( $< 10^{-10}$ )

- Goldener Zerfall der Kaonphysik
- Berechnung aber mit hoher Genauigkeit möglich
- Hohe Sensitivität auf Prozesse außerhalb des Standardmodells

## Feynmangraphen



- Nur Pinguin- und Boxdiagramme
- hohe Sensitivität zu neuer Physik

Seltene Zerfälle und Präzisionsmessungen: Der goldene Zerfall der Kaonphysik

## Erste Versuche

- Zerfall  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$  durch E787/E949 am BNL untersucht  
→ Einschränkung auf:

$$\begin{aligned}\text{Experiment : } \text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}) &= (17.3_{-10.5}^{+11.5}) \times 10^{-11} \\ \text{Theorie : } \text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}) &= (8.4 \pm 1.0) \times 10^{-11}\end{aligned}$$

- Zerfall  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$  durch E391a am J-PARC/KEK untersucht  
→ Einschränkung auf:

$$\begin{aligned}\text{Experiment : } \text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}) &< 2.6 \times 10^{-8} @ 90\% CL \\ \text{Theorie : } \text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}) &= (3.4 \pm 0.6) \times 10^{-11}\end{aligned}$$

- → Große Lücke/Unsicherheit zwischen Experimenten und Theorie

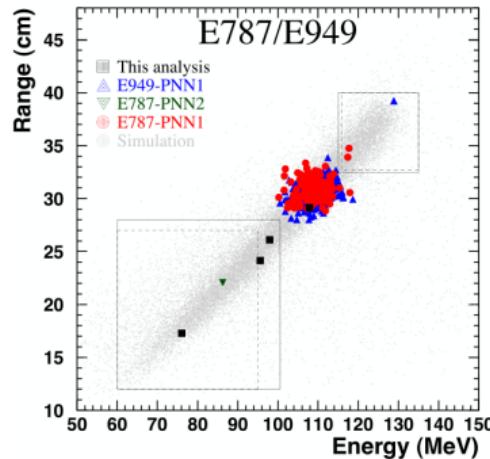


Figure: Ergebnisse von E787a → 7 Ereignisse gemessen

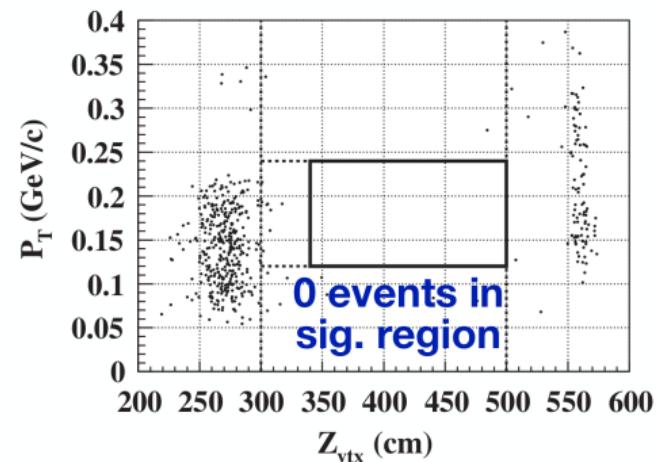


Figure: Ergebnisse von E391a → keine Ereignisse gemessen

## NA62 - Übersicht

**Ziel:** Messung der BR von  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$

**Erhofft:** Gleiche Präzision wie Theorie: 10%

**Benötigt:**  $10^{13}$  Zerfälle

- Ablehnungsfaktor von  $10^{12}$  für andere Zerfälle
- Detektorsignatur 'einfach': Einkommendes Kaon zerfällt in einzelnes geladenes Pion
- Es müssen viele Hintergrundzerfälle gefiltert werden
- Detektor ähnlich wie bei NA48
- Mehr Vetsysteme, genauere Spurdetektoren

## Detektor

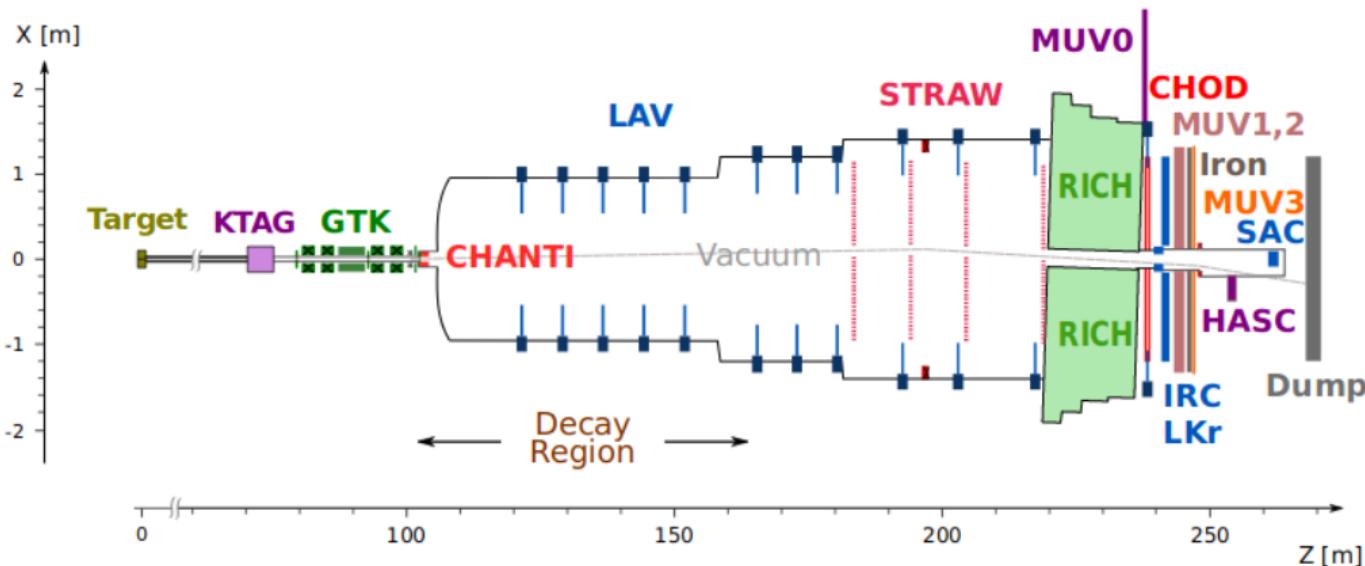


Figure: Aufbau des genutzten Detektors von NA62

## Ereignis und Veto

- Protonen des SPS treffen auf Be-Block mit 400 GeV
- Sekundärer Strahl wird auf Kaonen mit 75 GeV selektiert
- Tracking aller Teilchen durch Pixeldetektor
- Langer Zerfallstank → interessante Region bei 60 m
- Umgeben von large-angle-vetoes(LAV) für  $\gamma$  aus  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$
- STRAWS (Tracking Detektoren) innerhalb des Vakuums um Streuprozesse zu verhindern
- -Veto durch Ring Imaging Cherenkov (RICH)-Detektoren
- in Flugrichgeln werden durch LKr und kleinere shashlik-Kalorimeter aussortiert
- Abschluss durch hadron sampling calorimeter (HASC)

## Nach den vetoes, wie misst man den richtige Zerfall?

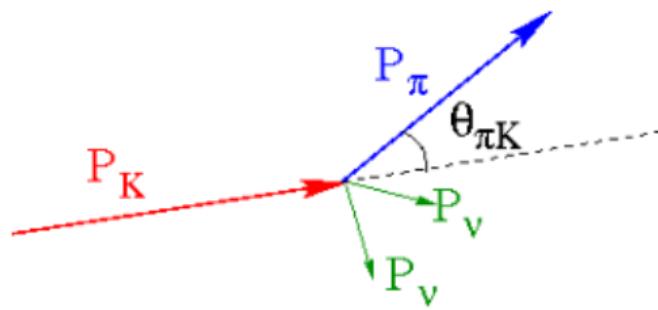


Figure: Darstellung des Zerfalls

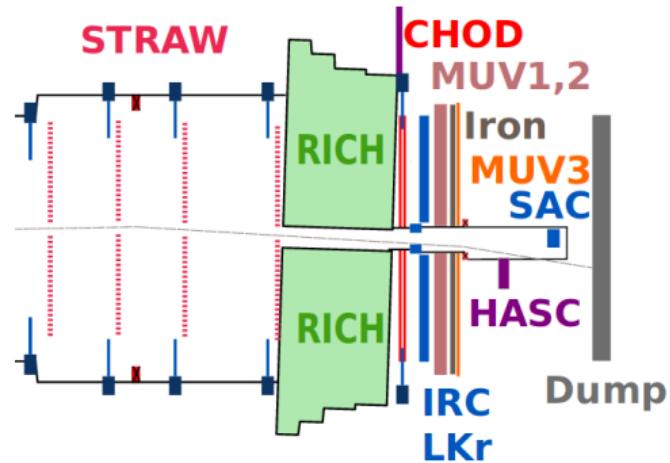
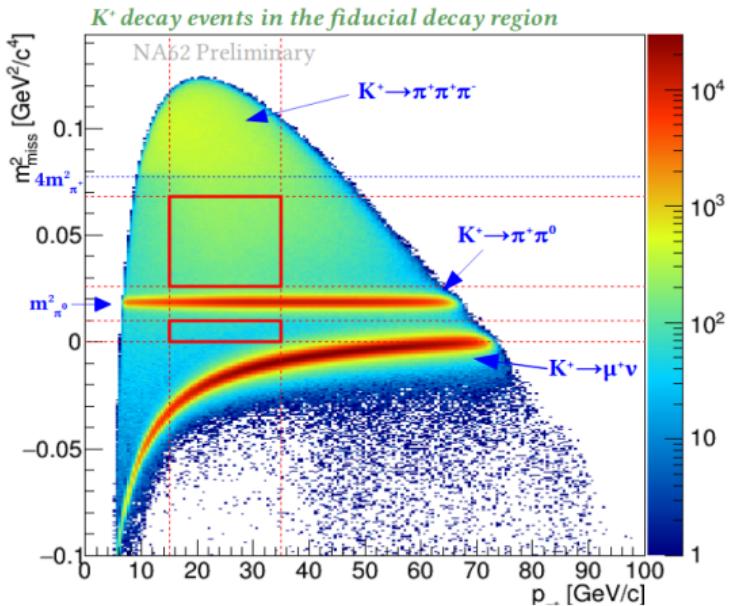


Figure: Zoom auf den Knick im Detektor

## Nach den vetoes, wie misst man den richtige Zerfall?



Übersicht über Kriterien:

- Einzelne Spur im Detektor
- $\pi^+$ -Identifikation
- $\gamma$ -Ausschluss
- Multispur-Ausschluss

## Ergebnis der 2016er Daten

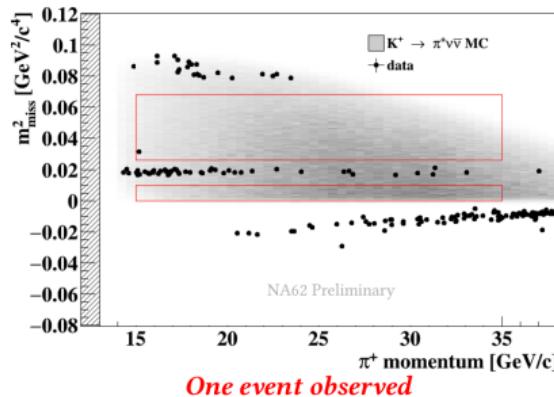


Figure: Resultat der Messungen

Neue Ergebnisse:

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) < 11 \times 10^{-10} \text{ @90 \% CL}$$

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) < 14 \times 10^{-10} \text{ @95 \% CL}$$

→ Ergebnisse sind mit SM kompatibel

Vergleich:

Theorie :  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (8.4 \pm 1.0) \times 10^{-11}$

Experiment :  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (17.3^{+11.5}_{-10.5}) \times 10^{-11}$

## Das KOTO-Experiment



- KOTO: K0 at Tokai
- Experiment am J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)
- ➔ Nutzung des high intensity proton beams (30 GeV) des J-PARC
- Ähnlicher Zerfall wie NA62:  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$
- ➔ Wurde von E391a auf  $< 2.6 \times 10^{-8}$  @ 90 % beschränkt
- Außerdem:  $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$
- ➔  $X^0$  unsichtbares leichtes Bosonm, mit Masse 135 MeV

## Detektor

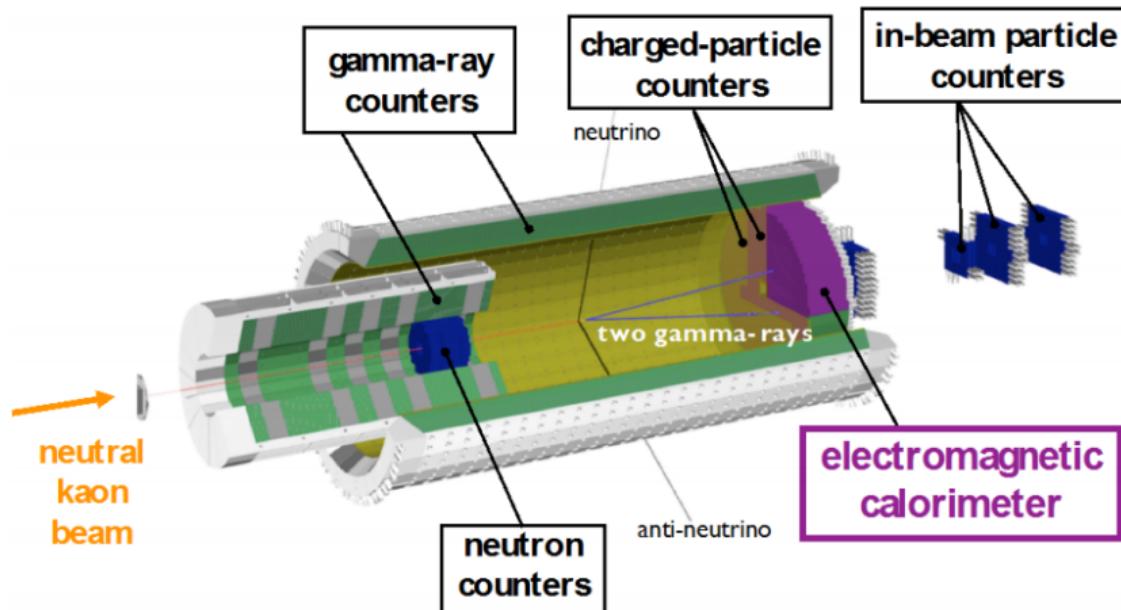


Figure: Schema des KOTO-Detektors

## Das KOTO-Experiment

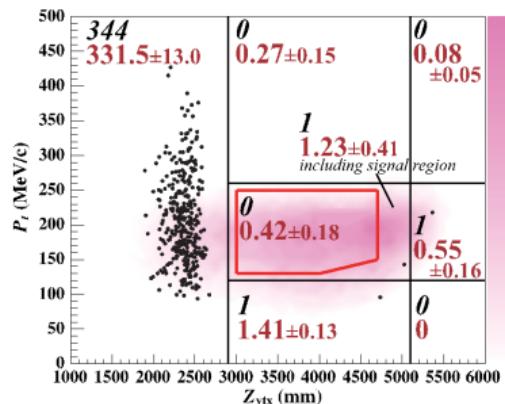


Figure: Analyse der KOTO-Daten aus 2015

- Vorherige Sensitivität auf  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  um Größenordnung verbessert:
  - Neue obere Schranke von  $3.0 \times 10^{-9}$  @ 90% CL
  - SM-Vorhersage von  $(3.00 \pm 0.30) \times 10^{-11}$
- Vorherige Sensitivität auf  $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$  verbessert:
  - Neue obere Schranke von  $2.4 \times 10^{-9}$  @ 90% CL

## Weitere Experimente

KLOE II

- Experiment am DA $\phi$ NE-Beschleuniger am INFN Frascati National Laboratory
-

-  J. K. Ahn et al. "Search for  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  and  $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$  Decays at the J-PARC KOTO Experiment". In: [Phys. Rev. Lett.](#) 122 (2 Jan. 2019), p. 021802. doi: [10.1103/PhysRevLett.122.021802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.021802). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.021802>.
-  A. Ceccucci. [Kaon Physics Review](#). Presentation for Flavianet School. June 2010.
-  U.S. Department of Energy. [Cosmotron](#). URL: <https://www.flickr.com/photos/37916456@N02/11970235563>.
-  Meson-Oktett. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meson-octet.svg>.
-  M. Tanabashi et al. "Review of Particle Physics". In: [Phys. Rev. D](#) 98 (3 Aug. 2018), p. 030001. doi: [10.1103/PhysRevD.98.030001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.030001). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.98.030001>.