
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

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

Was sind Kaonen?

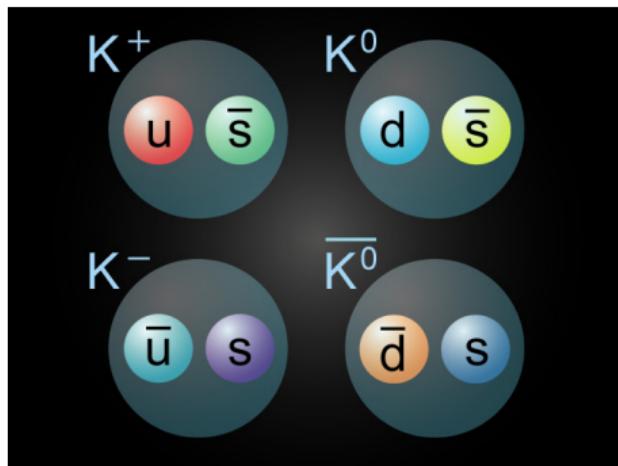


Figure: Übersicht über die Kaonen

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

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

Weltkarte

Entdeckung der Kaonen

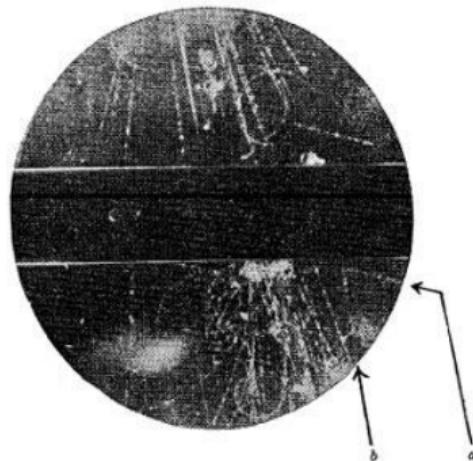
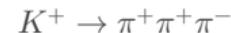


Figure: Nebelkammeraufnahme der kosmischen Höhenstrahlung von Rochester und Butler 1947

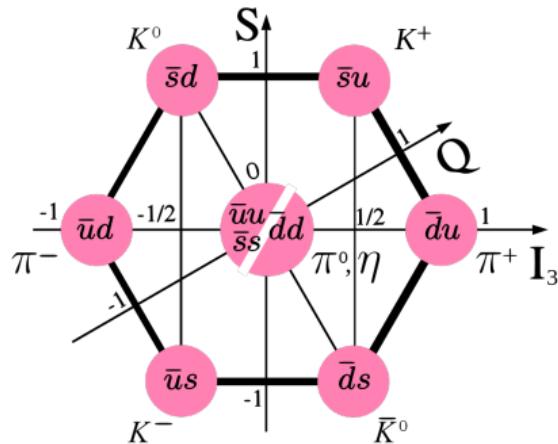
- Entdeckung des ersten (neutralen) Kaons 1947 durch George Rochester et. al
- Höhenstrahlung wurde in Nebelkammer untersucht
- Zerfall eines neutralen Teilchens in ein positives und negatives Pion



- 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
- 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

Paritätsverletzung und der Cosmotron

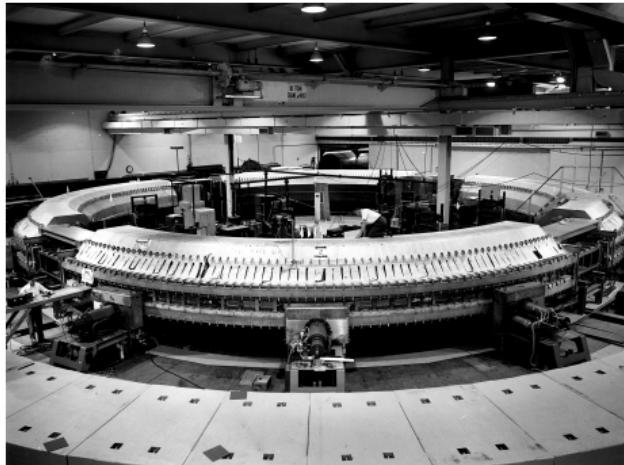


Figure: Das Cosmotron am Brookhaven National Laboratory (1952-1966)

- 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 Zerfälle

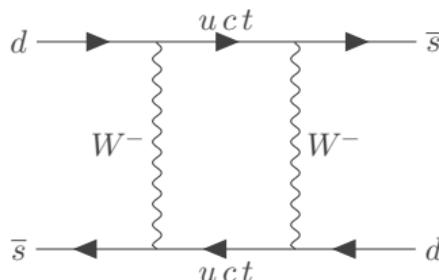
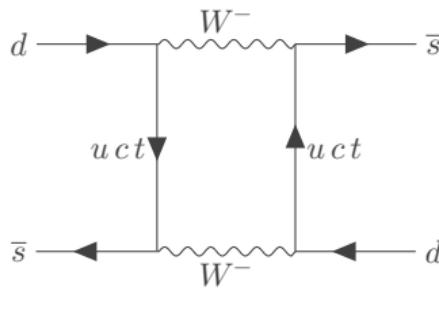
$$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

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

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

- τ^+ und θ^+ 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

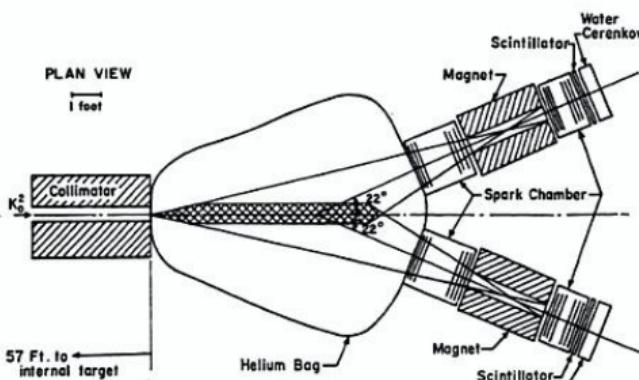
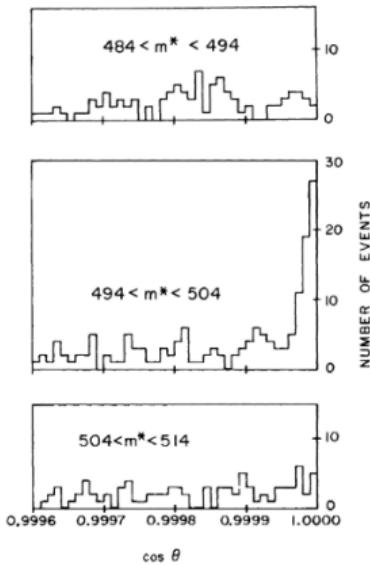


Fig. 9a. Set-up used to detect $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$.

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 θ 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

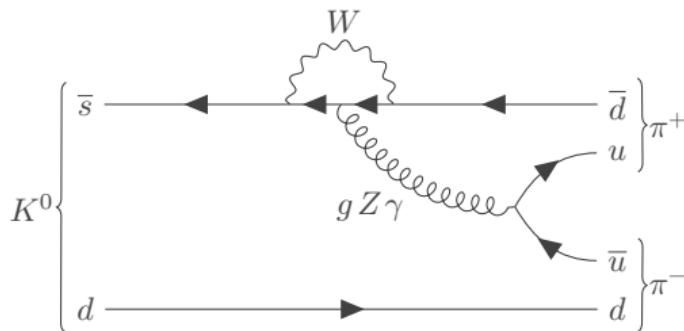


Figure: Pinguindiagramm des CP-verletzenden, neutralen Kaonenerfalls

- 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

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

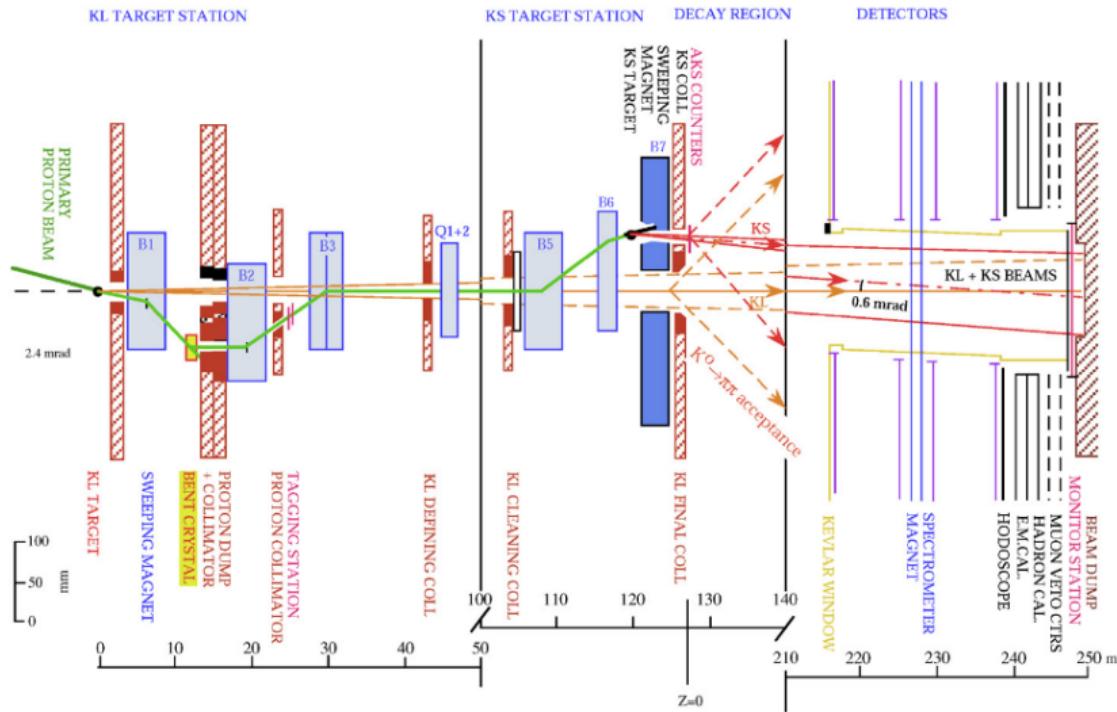




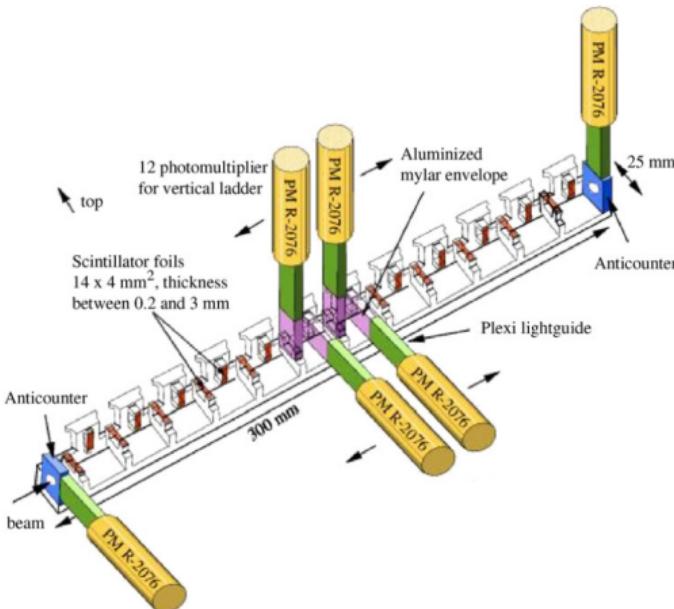
Figure: Tunnel des Super Proton Synchrotrons (SPS)

- 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 π
- Tagging ermöglicht zeitliche Trennung

Aufbau der NA48 Beamlne



K_S -Tagging



- Zerfall in π^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

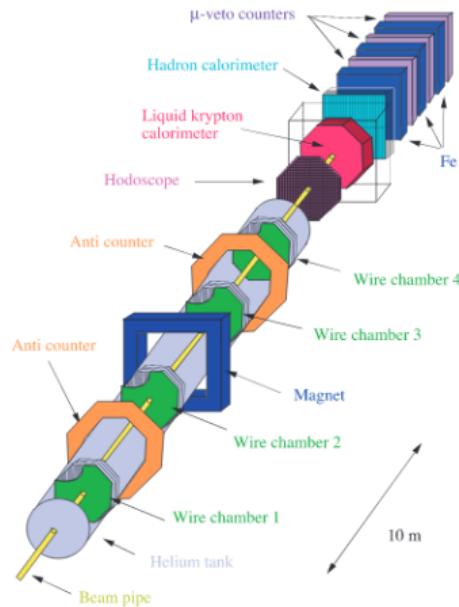


Figure: Detektor des NA48-Experiments

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 π
- Beherbergt dafür Eisenjochmagnet (0,37 T im Zentrum)

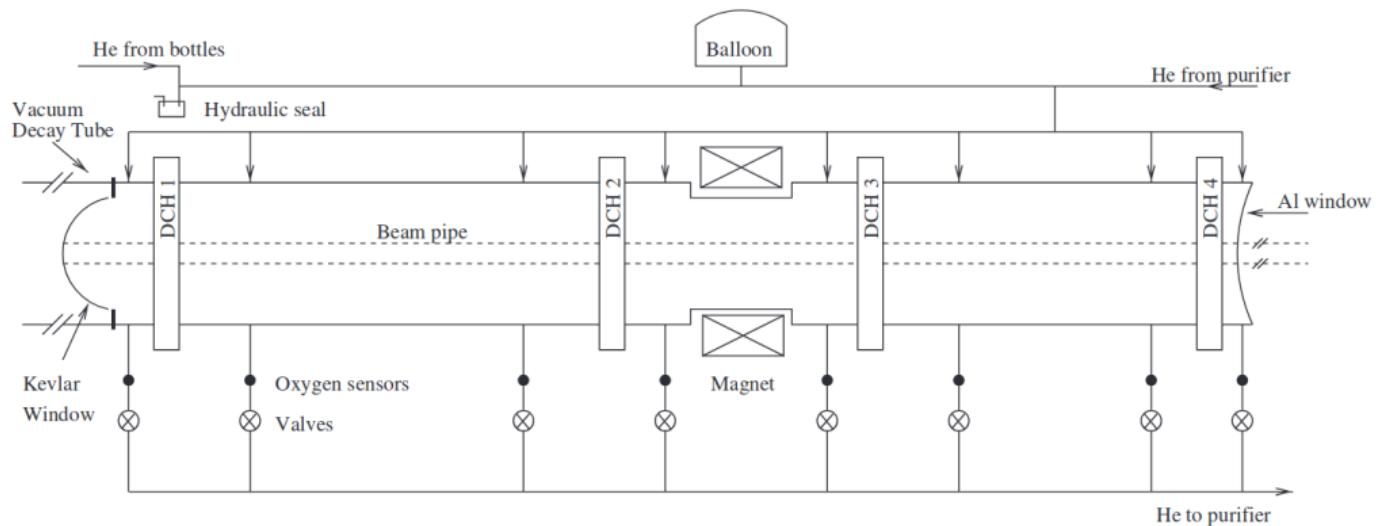
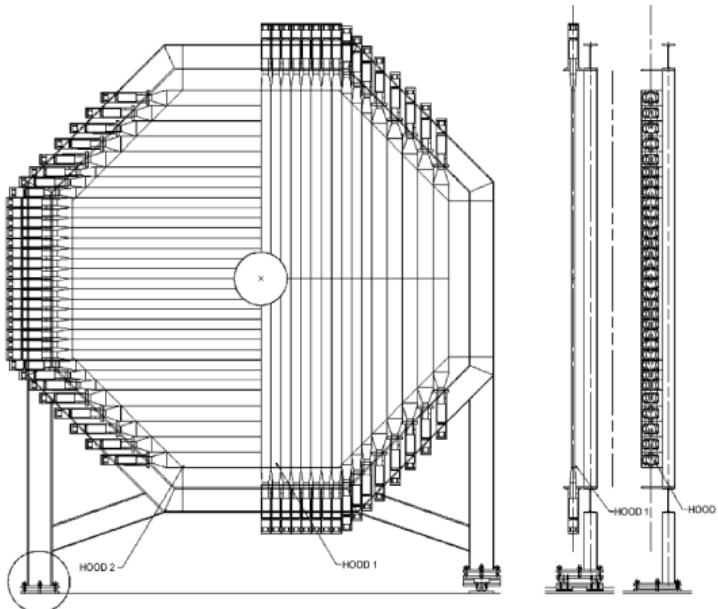


Figure: Schema des Heliumtanks aus NA48 mit Spektrometern

Hodoskop



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

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 γ -Energie und Transversalimpulse
- Funktion ähnlich einer normalen Ionisationskammer
- ➔ Stabiles Signal bei hoher Reinheit
- ➔ Korreliert gut mit der Energie der eingehenden γ und e^-
- Echtzeitmessung zum taggen der π^0
- Unterdrückung des Untergrunds durch semileptonische Zerfälle

Hadronen-Kalorimeter

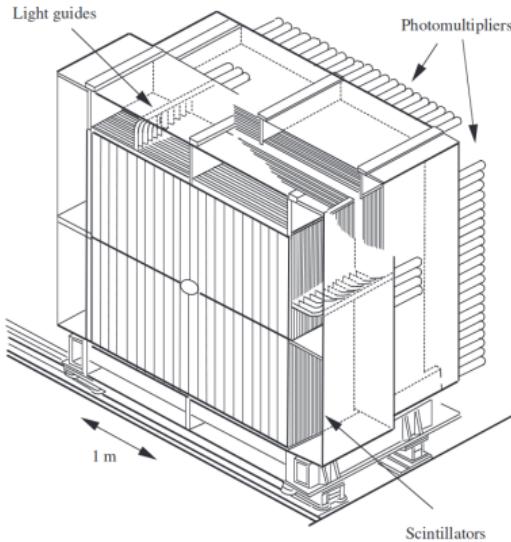


Figure: Schema des hadronischen Kalorimeters
von NA48

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

Rest: Andere Zerfälle (Hintergrund)

Die μ -Veto-Counter

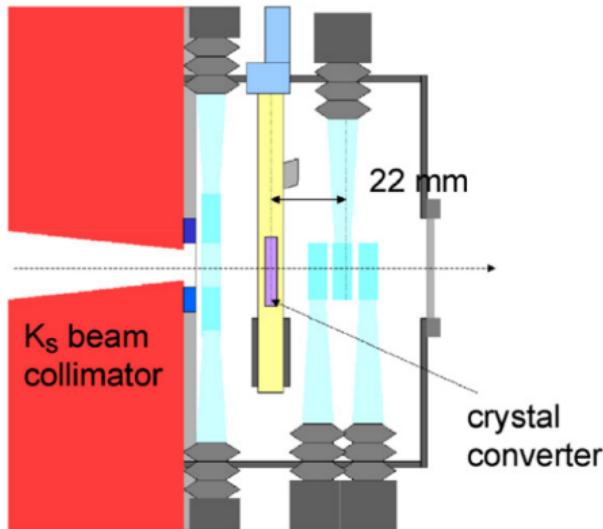
- μ -Kammern zur Detektion von



Zerfällen

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

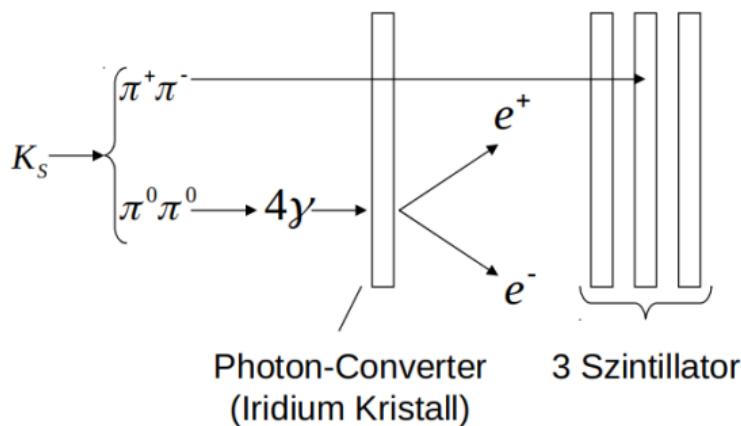
K_S Anti-Counter



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

Figure: Aufbau des K_S Anti-Counters

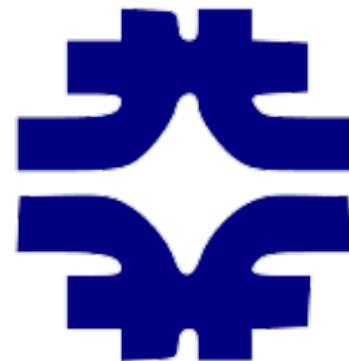
K_S Anti-Counter



- 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!

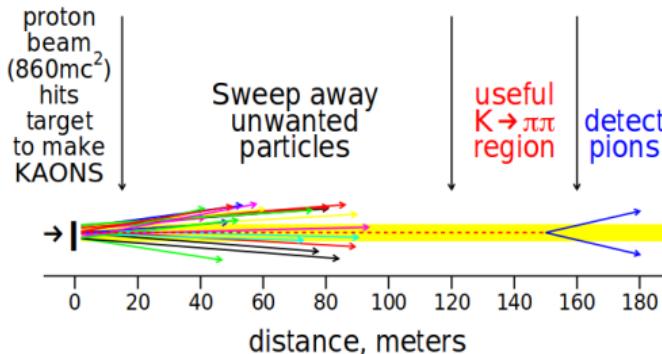
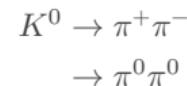


Figure: Konzept des KTeV Experiments

- Kaonzerfall im Vakuum um Kollision mit Luft zu verhindern



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

The KTeV Detector

6

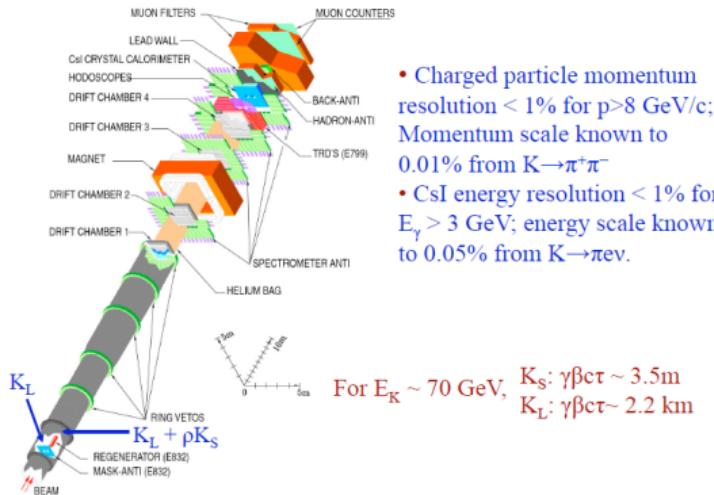


Figure: Detektor des KTeV-Experiments

Ergebnisse beider Experimente

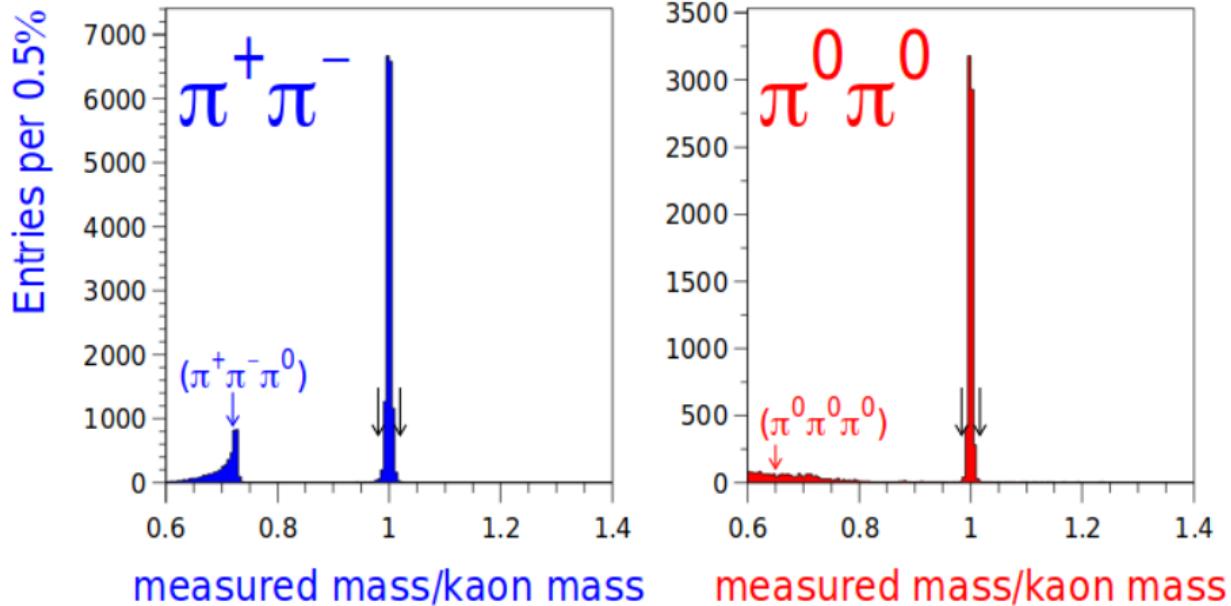
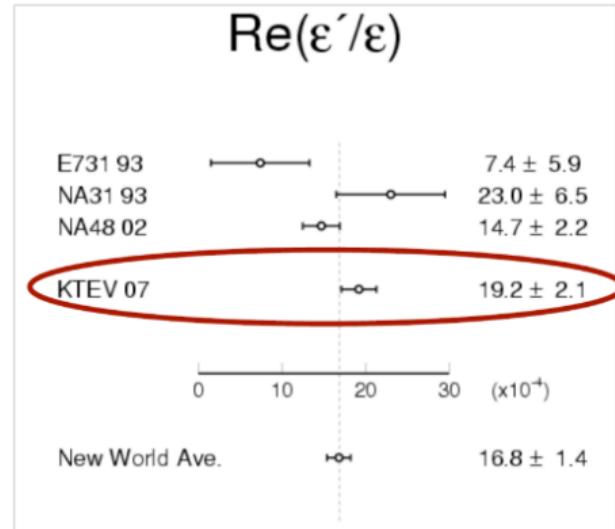


Figure: Massenverteilung von KTeV



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

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

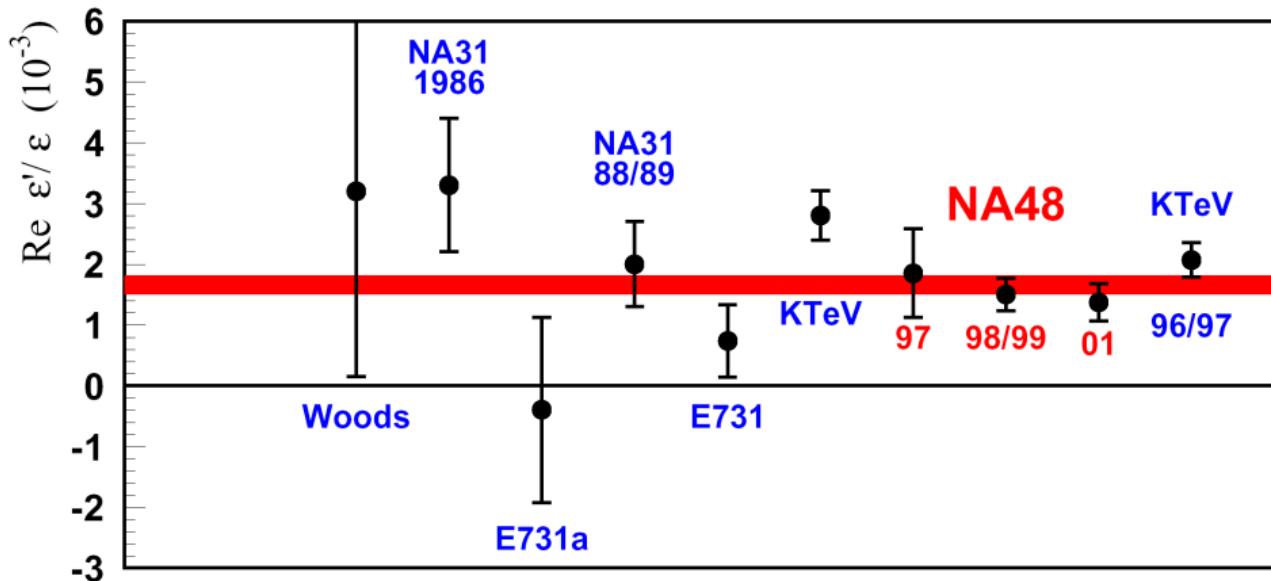


Figure: Ergebnisse für $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$

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

Der goldene Zerfall der Kaonphysik

- Der Anteil des Zerfalls



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

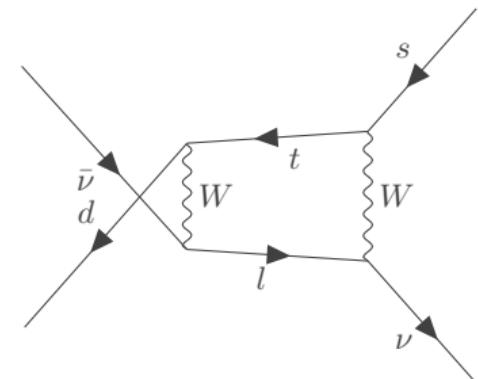
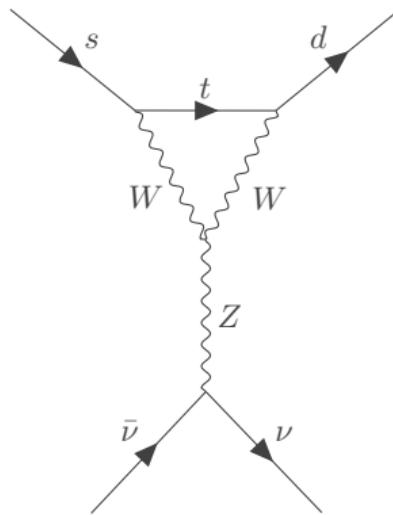
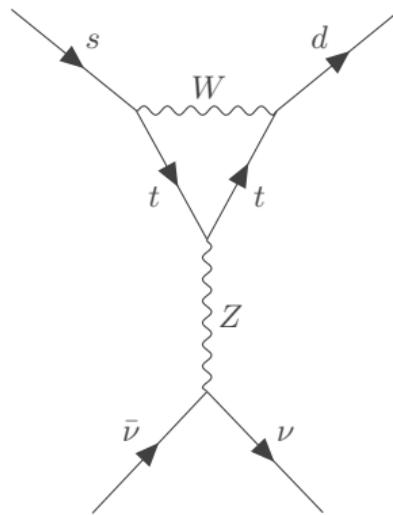
- Goldener Zerfall der Kaonphysik
- Berechnung aber mit hoher Genauigkeit möglich
- Hohe Sensitivität auf Prozesse außerhalb des Standardmodells
- Bisher große Lücke zwischen Experimenten und Theorie
- Beispiel:

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

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

- Erste experimentelle Daten von E787/949 in Brookhaven

Feynmangraphen



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

Seltene Zerfälle und Präzisionsmessungen: Der goldene Zerfall der Kaonphysik

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 Vetosysteme, genauere Spurdetektoren

Detektor

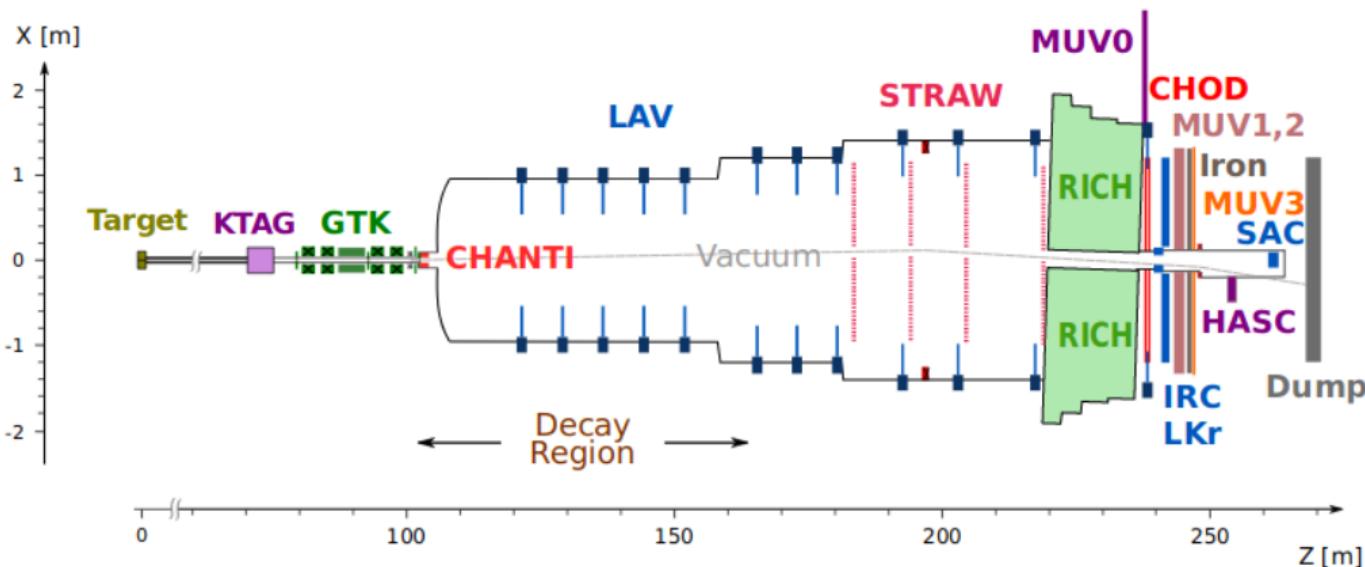


Figure: Aufbau des genutzten Detektors von NA62

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 γ 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?

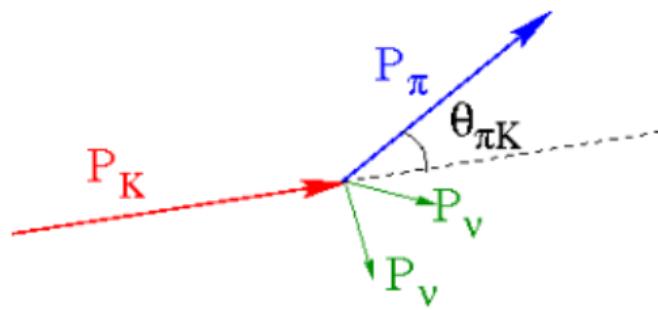


Figure: Darstellung des Zerfalls

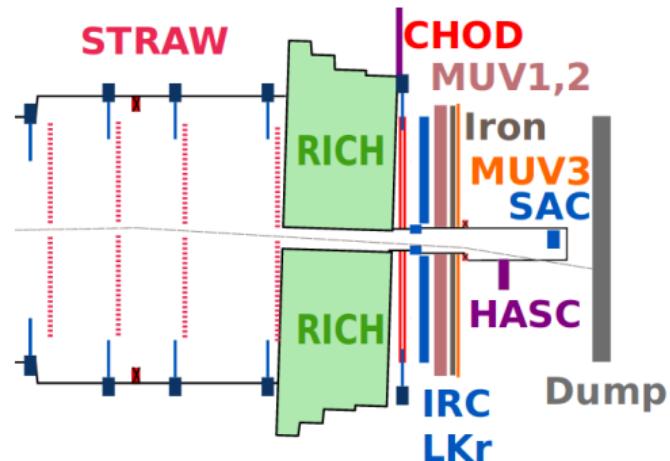
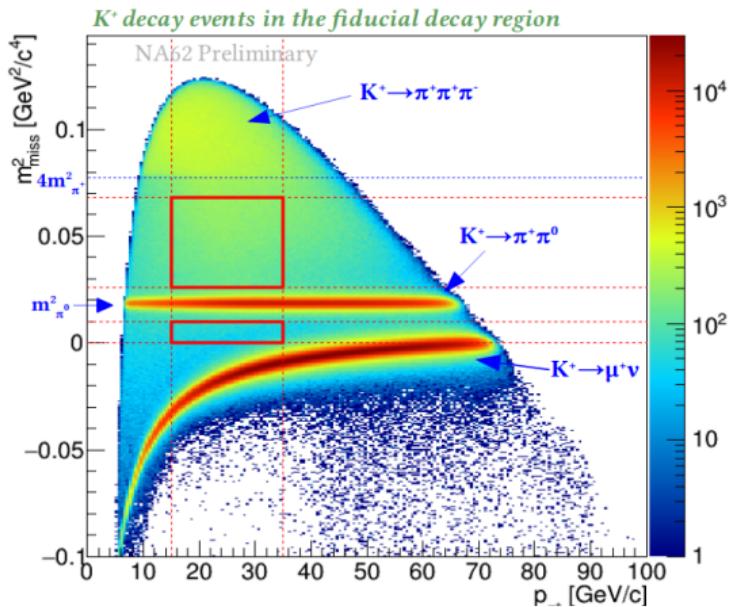


Figure: Zoom auf den Knick im Detektor

Nach den vetoes, wie misst man den richtige Zerfall?



Übersicht über Kriterien:

- Einzelne Spur im Detektor
- π^+ -Identifikation
- γ -Ausschluss
- Multispur-Ausschluss

Ergebnis der 2016er Daten

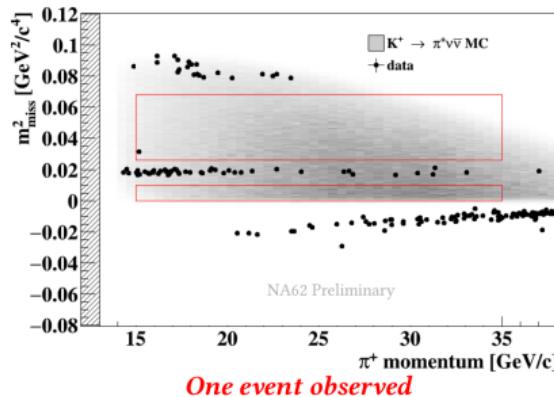


Figure: Resultat der Messungen

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: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$
- Außerdem: $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$
- X^0 unsichtbares leichtes Bosonm, mit Masse 135 MeV

Detektor

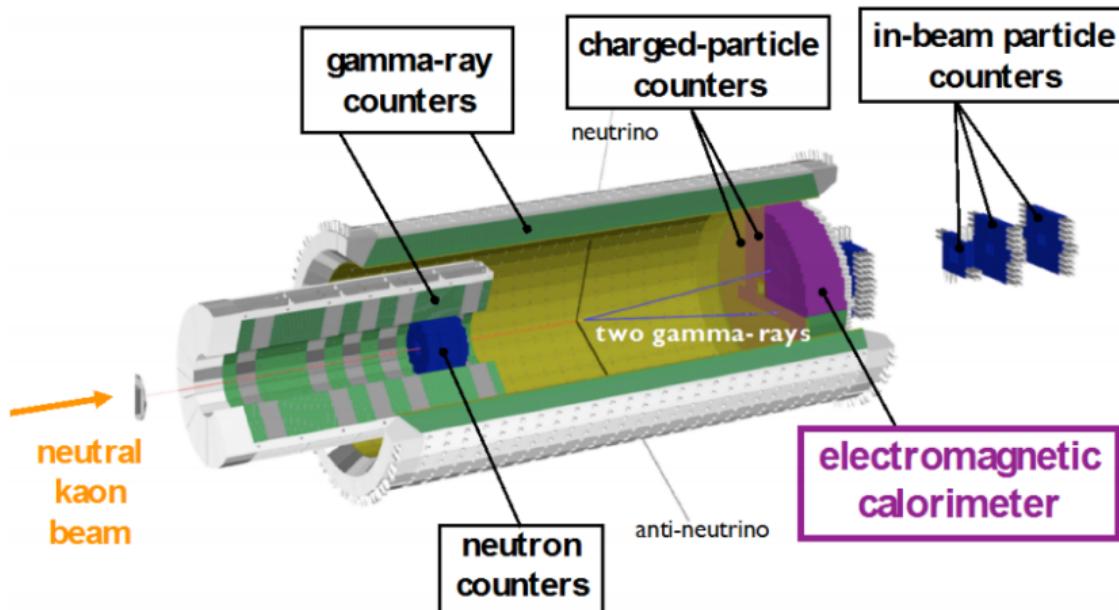


Figure: Schema des KOTO-Detektors

Das KOTO-Experiment

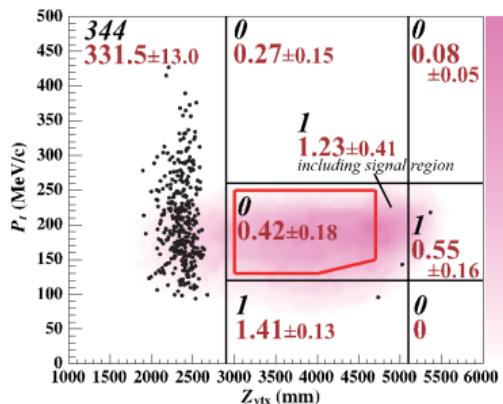


Figure: Analyse der KOTO-Daten aus 2015

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