
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

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

NA62

KOTO

Weitere Experimente

Was sind Kaonen?

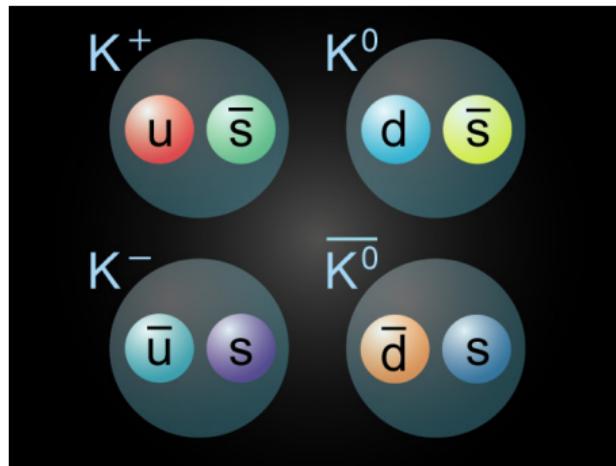


Figure: Übersicht über die Kaonen

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

NA62

KOTO

Weitere Experimente

Weltkarte

Entdeckung der Kaonen

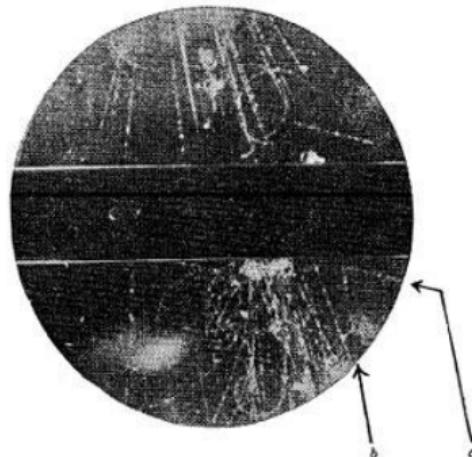
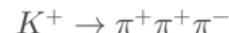


Figure: Nebelkammeraufnahme der kosmischen Höhenstrahlung von Rochester und Butler 1947

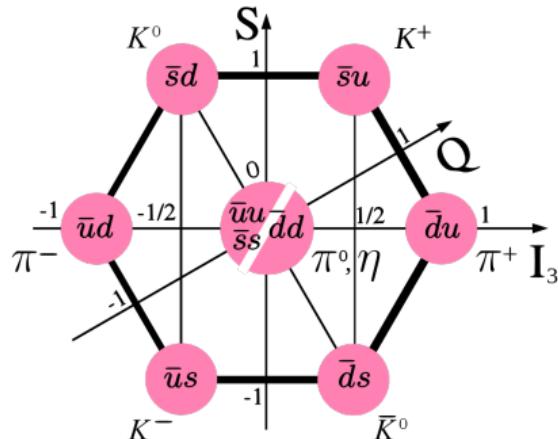
- Entdeckung des ersten (neutralen) Kaons 1947 durch George Rochester et. al
- Höhenstrahlung wurde in Nebelkammer untersucht
- Zerfall eines neutralen Teilchens in ein positives und negatives Pion



- 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)
- Große Halbwertszeit 10^{-10} s (durch schwache WW)
- Gell-Mann 1953: Einführung einer neuen Teilcheneigenschaft/ Quantenzahl
- Strangeness
- Zerfall leicht möglich, wenn **S** durch alle Kräfte verletzt wäre

Aber: Zerfall nur über die flavourändernde schwache WW möglich

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

Paritätsverletzung und das Cosmotron

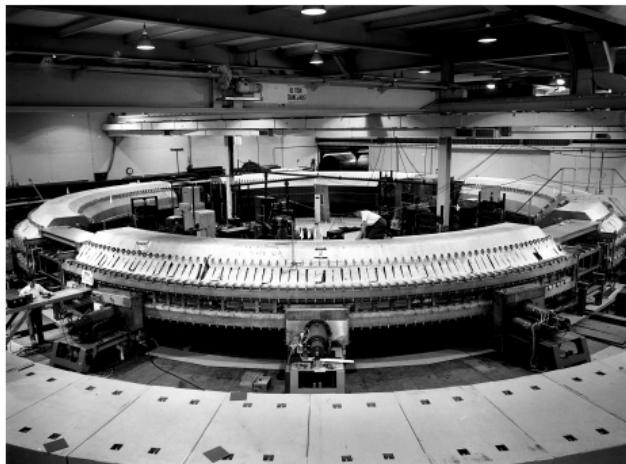


Figure: Das Cosmotron am Brookhaven National Laboratory (1952-1966)

- Leistungsstärkstes Proton-Synchrotron (1952) mit Strahlenergien von 3,3 GeV
- Erstmalige Produktion von Mesonen und leichten Hadronen im Labor
- Entdeckung K_L durch Lande (1956)
- Beobachtung der Zerfälle

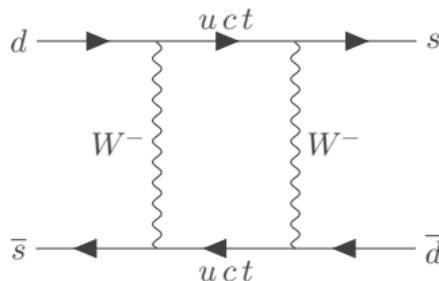
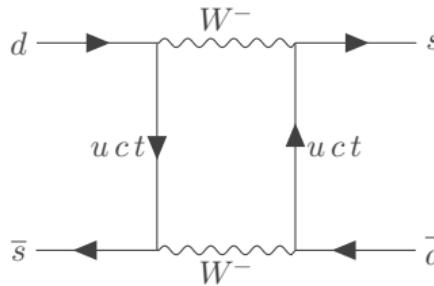
$$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

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

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:

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

- $|K_1\rangle$ haben $CP = +1$ und $|K_2\rangle$ habe $CP = -1$
- Dabei ist $|K_1\rangle \approx |K_S\rangle$ und $|K_2\rangle \approx |K_L\rangle$

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

- 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

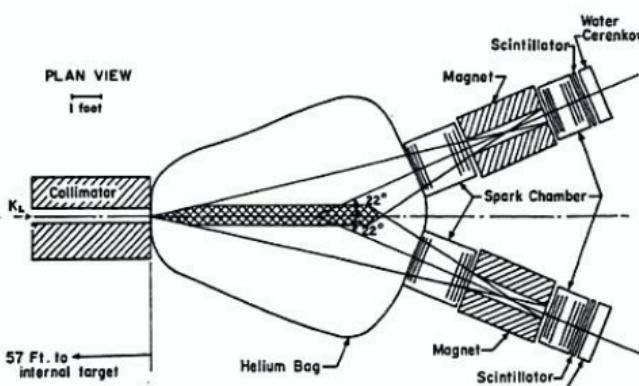


Fig. 9a. Set-up used to detect $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$.

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

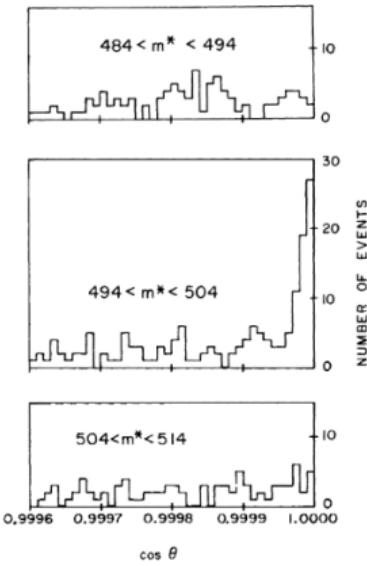


FIG. 3. Angular distribution in three mass ranges
for events with $\cos\theta > 0.9995$.

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- Eigenzustände
→ Beide Zustände enthalten kleine Teile des anderen Zustands:

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

- Auftreten von CP-Verletzung innerhalb von Oszillation (indirekt) oder eines Zerfalls (direkt)
- Problem: Im Jahre 1964 noch keine Quarks oder der CKM-Mechanismus bekannt
- Erst 1973: Postulierung der drei Quarkfamilien und des CKM-Mechanismus durch Kobayashi und Maskawa
→ Grundlage für viele weitere Forschungsprogramme

Wie wird das gemessen?

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

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

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

- Messung der unterschiedlichen partiellen Zerfallsbreiten

$$\begin{aligned}\Gamma(K_L \rightarrow \pi^0\pi^0) &\neq \Gamma(K_S \rightarrow \pi^0\pi^0) \\ \Gamma(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-) &\neq \Gamma(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-)\end{aligned}$$

→ Bilden der Verhältnisse

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

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

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



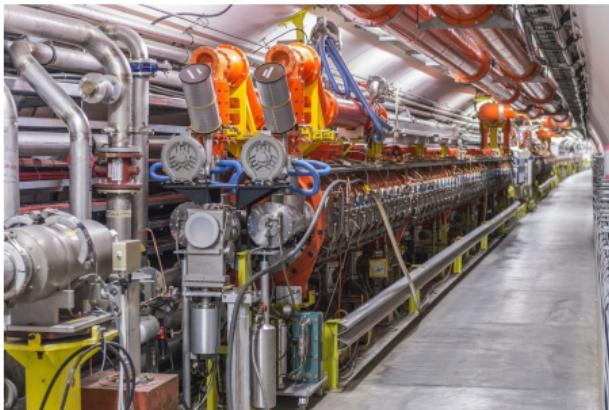
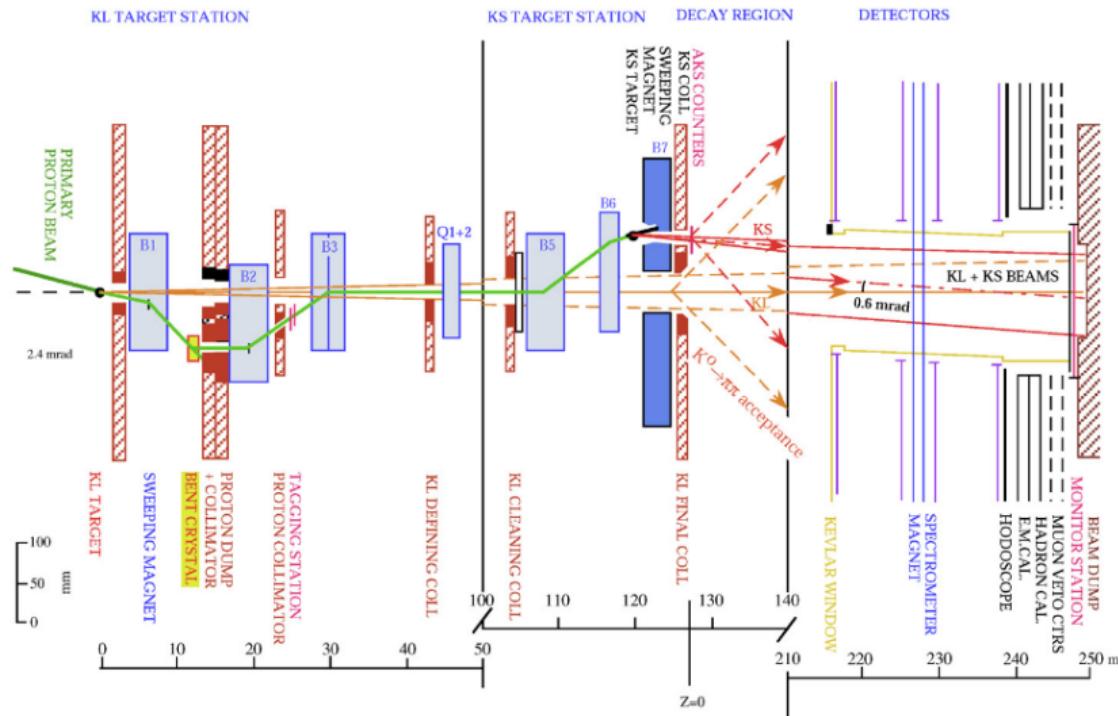


Figure: Tunnel des Super Proton Synchrotrons (SPS)

- 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 π
- Tagging ermöglicht zeitliche Trennung

Aufbau der NA48 Beamlne



K_S -Tagging

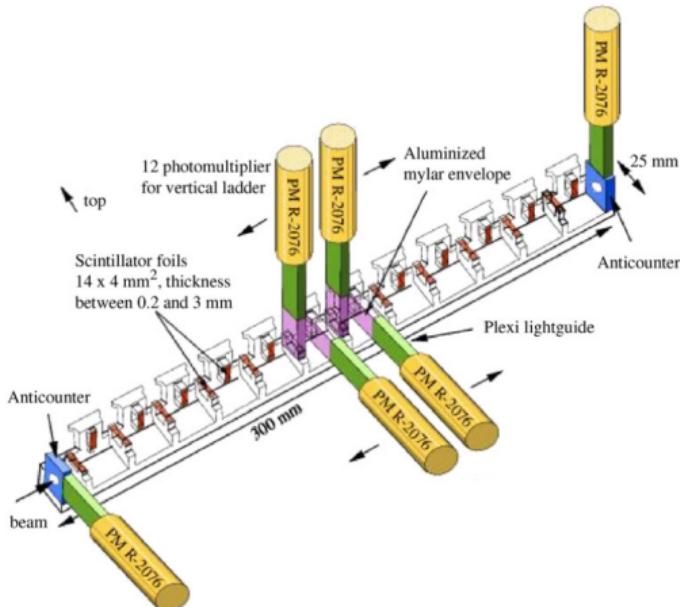


Figure: Schema des NA48-Taggings

- 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

Detektor

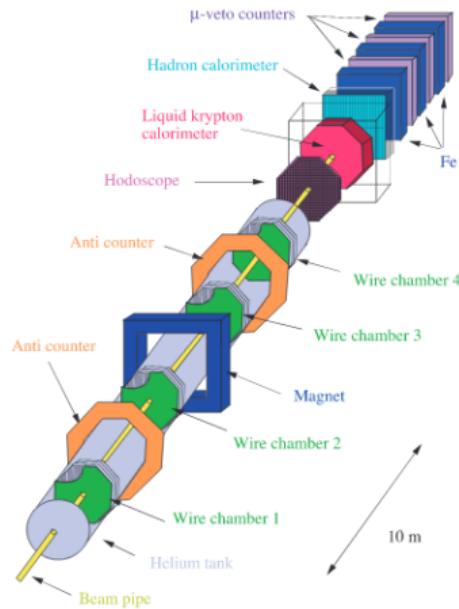


Figure: Detektor des NA48-Experiments

Heliumtank

- Geschützt durch hochstabiles Kevlar-Glas
- Atmosphärendruck
- Verhindern von vielfacher Streuung an Molekülen
- Beherbergt Spektrometer und Wire chambers
- Genutzt zur Bestimmung der Winkel von geladenen π
- Beherbergt dafür Eisenjochmagnet (0,37 T im Zentrum)

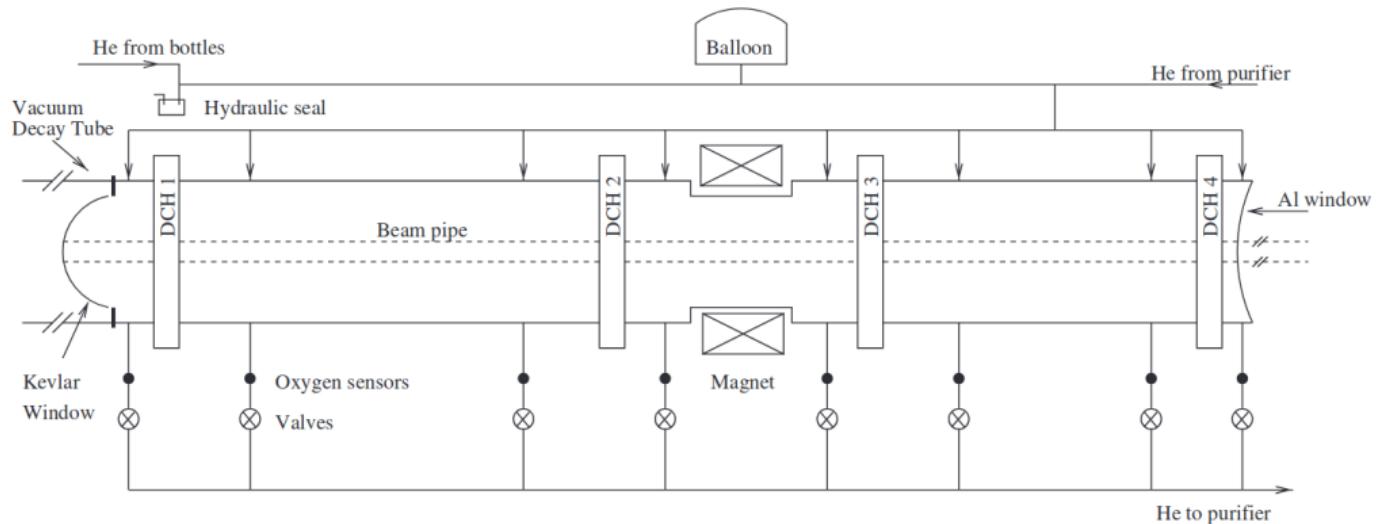
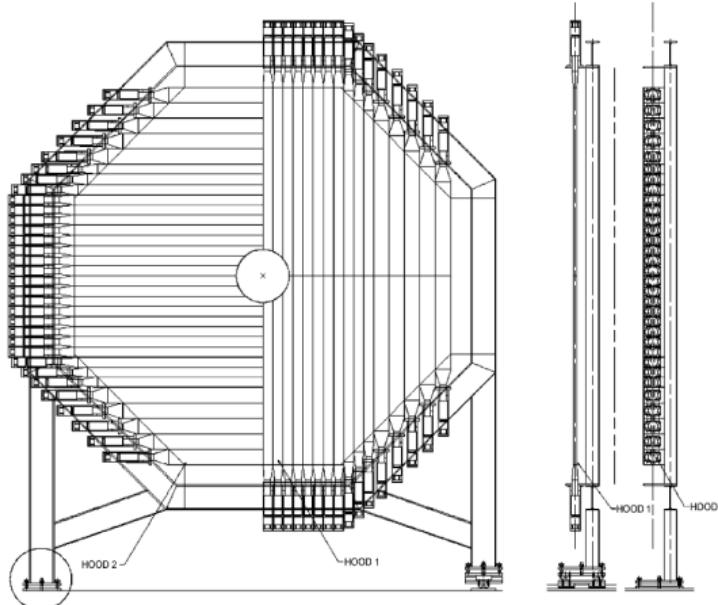


Figure: Schema des Heliumtanks aus NA48 mit Spektrometern

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

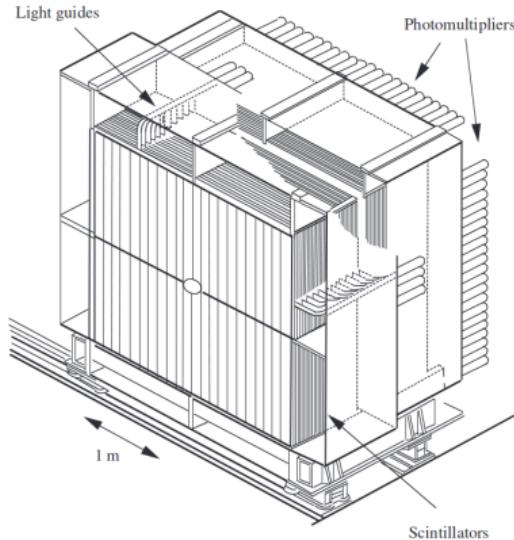
Flüssig-Krypton-Kalorimeter



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



- 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)

Figure: Schema des hadronischen Kalorimeters von NA48

Die μ -Veto-Counter

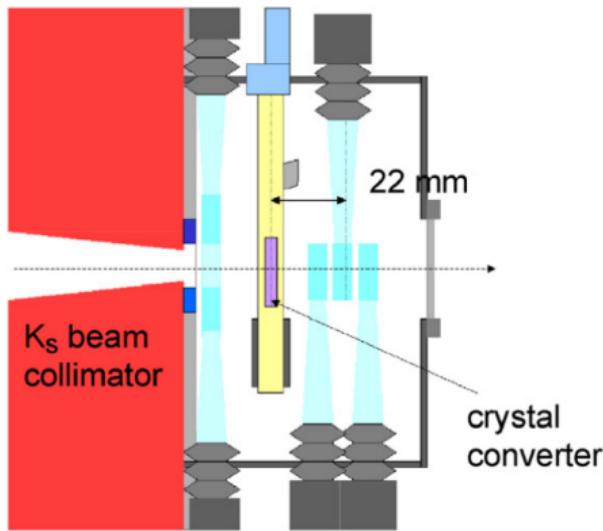
- μ -Kammern zur Detektion von



Zerfällen

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

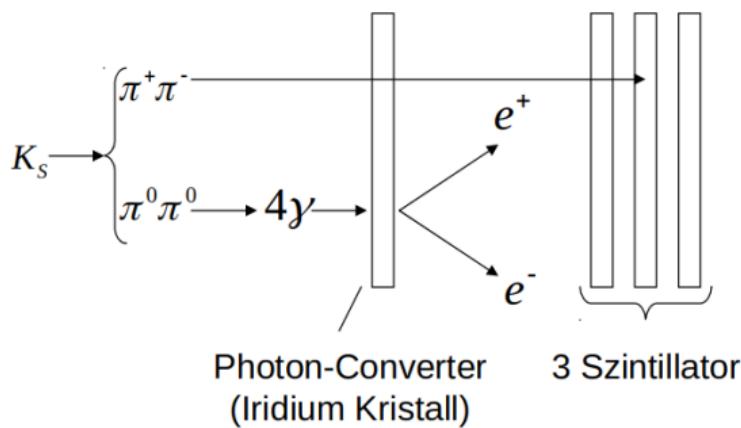
K_S Anti-Counter



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

Figure: Aufbau des K_S Anti-Counters

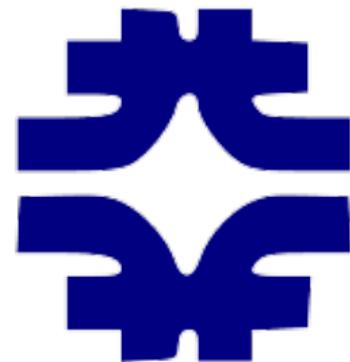
K_S Anti-Counter



- 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

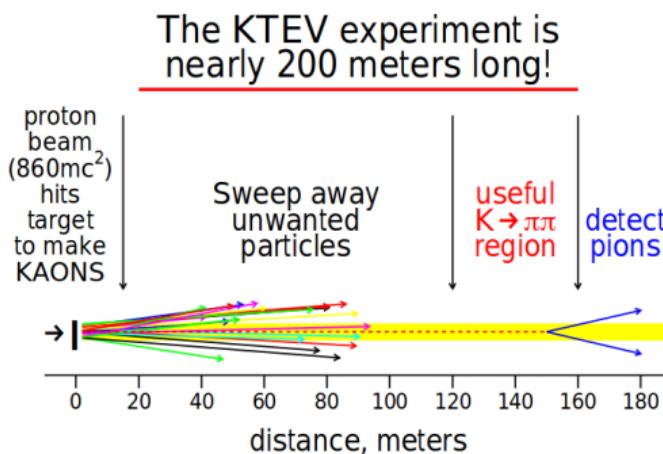
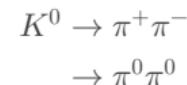


Figure: Konzept des KTeV Experiments

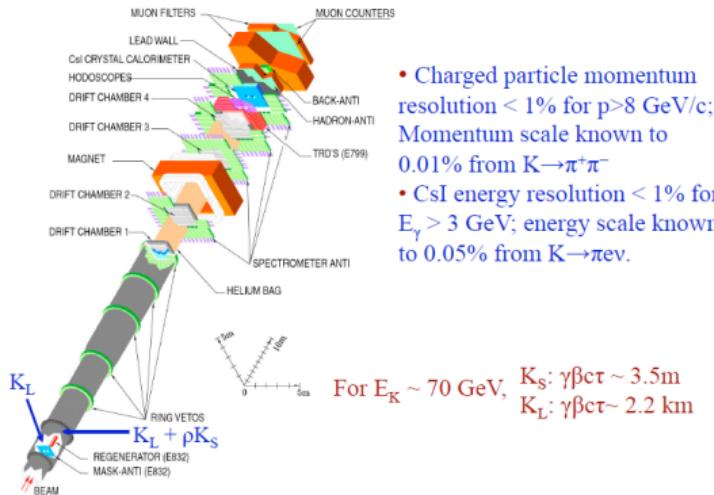
- Kaonzerfall im Vakuum um Kollision mit Luft zu verhindern



- 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

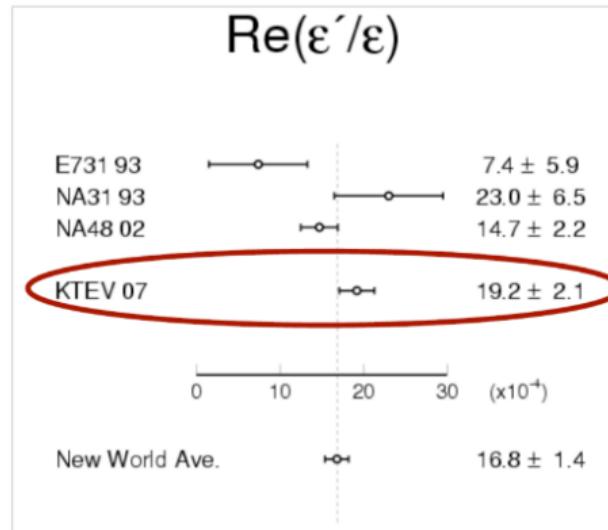
6



- 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 $K\rightarrow\pi\nu\bar{\nu}$.

Figure: Detektor des KTeV-Experiments

Ergebnisse beider 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

NA62

KOTO

Weitere Experimente

Der goldene Zerfall der Kaonphysik

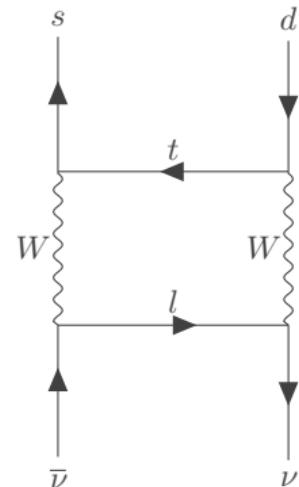
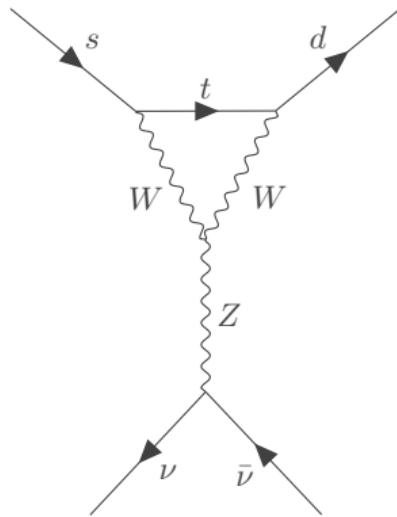
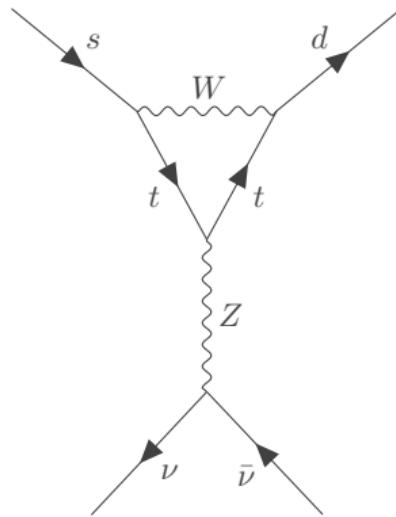
- Der Anteil des Zerfalls

$$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$$

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

- Goldener Zerfall der Kaonphysik
- Berechnung aber mit hoher Genauigkeit möglich
- Hohe Sensitivität auf Prozesse außerhalb des Standardmodells
- Potentiell auf mehrere Hundert TeV sensitiv
- Wichtig um Daten von B-Zerfällen auszuwerten
- Aufspüren neuer Freiheitsgrade wie Leptoquark

Feynmangraphen



- Nur Pinguin- und Boxdiagramme
- hohe Sensitivität auf neue 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:

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

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

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

→ Einschränkung auf:

$$\text{Experiment : } \text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}) < 2.6 \times 10^{-8} @ 90 \% CL$$

$$\text{Theorie : } \text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}) = (3.4 \pm 0.6) \times 10^{-11}$$

- → Große Lücke/Unsicherheit zwischen Experimenten und Theorie

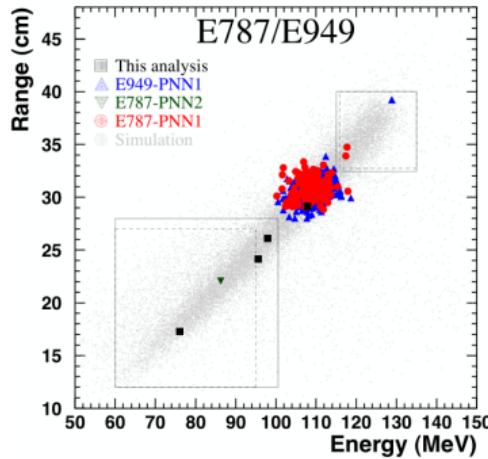


Figure: Ergebnisse von E787a → 7 Ereignisse gemessen

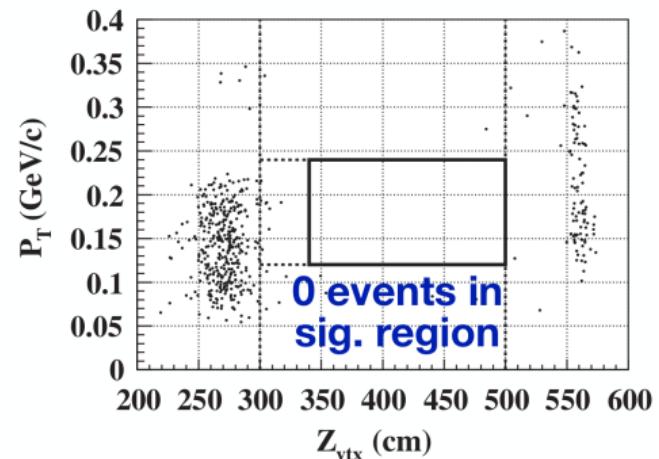


Figure: Ergebnisse von E391a → keine Ereignisse gemessen

NA62 - Übersicht

Ziel: Messung von $\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu})$

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

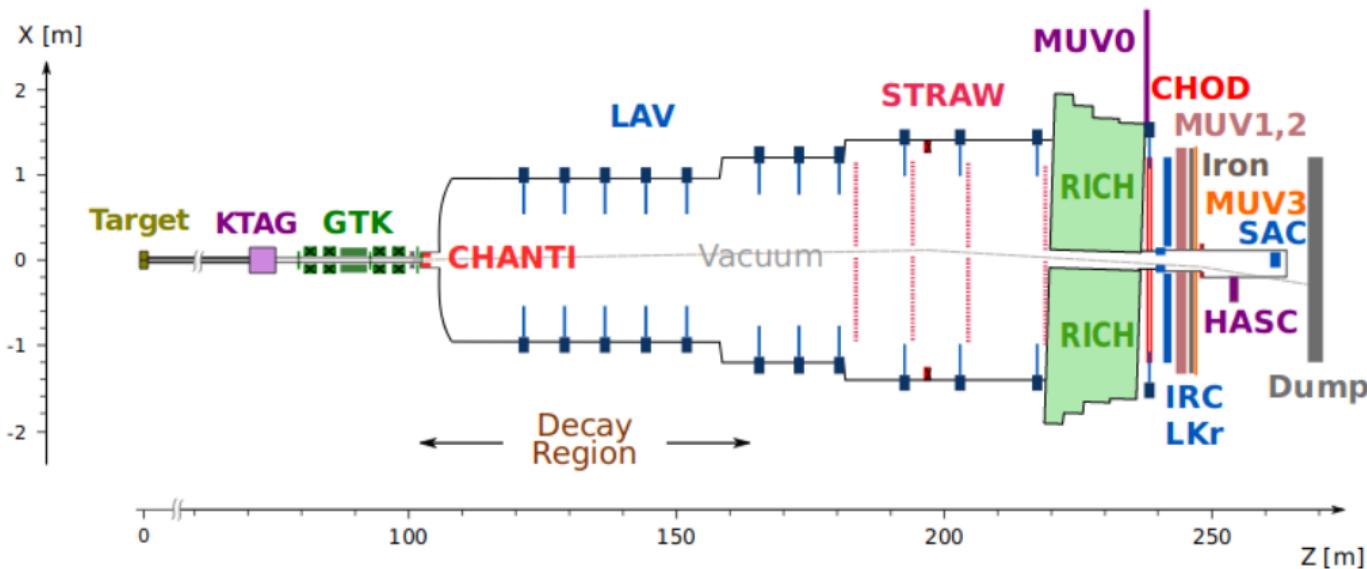


Figure: Aufbau des genutzten Detektors von NA62

Ereignis und Veto

- Protonen des SPS treffen auf Be-Block mit 400 GeV
- Sekundärer Strahl wird durch Cherenkov-Detektor auf Kaonen mit 75 GeV selektiert
- Tracking aller Teilchen durch Pixeldetektor(GTK)
- Langer Zerfallstank → interessante Region nach 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
- μ -Veto durch Ring Imaging Cherenkov (RICH)-Detektoren
- γ in Flugrichtung werden durch LKr und kleinere Shashlik-Kalorimeter aussortiert
- Abschluss durch hadron sampling calorimeter (HASC)

Nach den vetos, wie misst man den richtigen Zerfall?

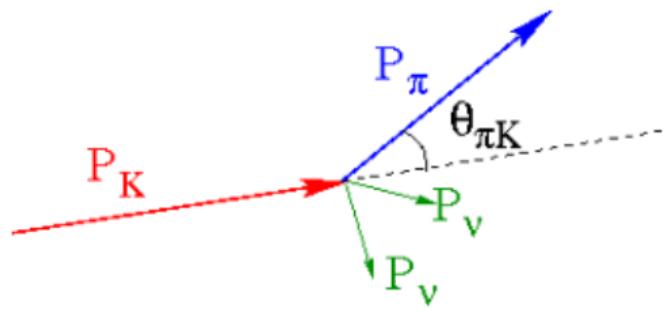


Figure: Darstellung des Zerfalls

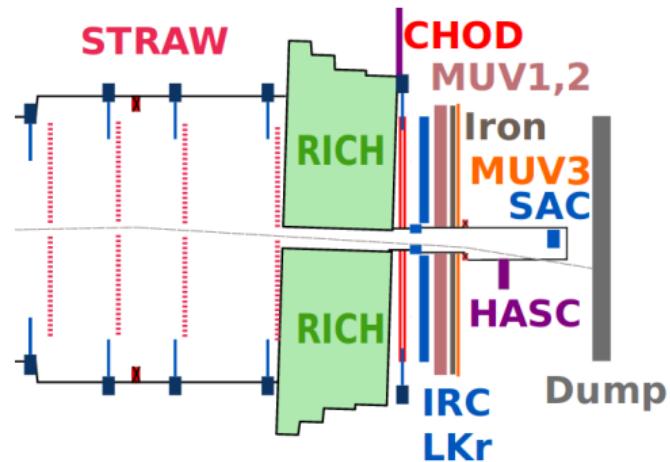
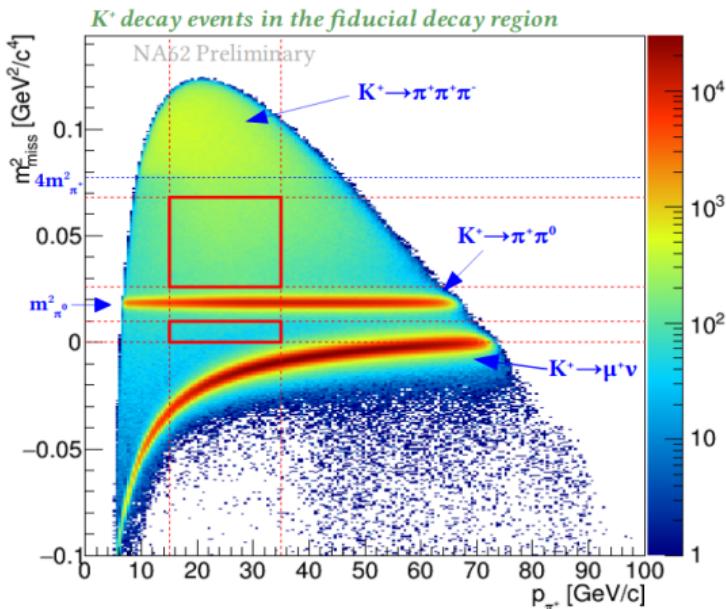


Figure: Zoom auf den Knick des Strahls im Detektor

Nach den vetos, wie misst man den richtigen Zerfall?



Übersicht über Kriterien:

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

Ergebnis der 2016er Daten

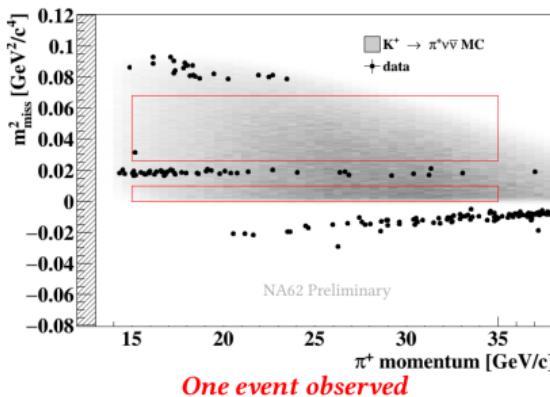


Figure: Resultat der Messungen

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

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

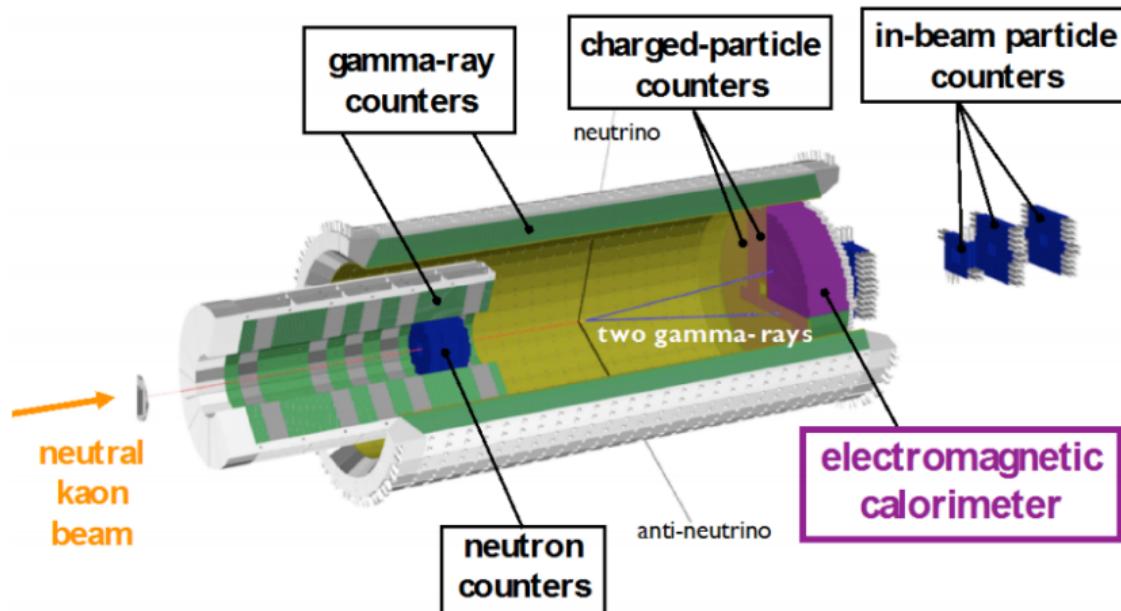


Figure: Schema des KOTO-Detektors

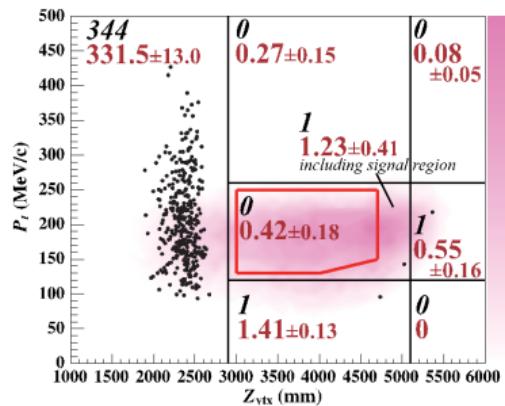


Figure: Analyse der KOTO-Daten aus 2015

- Vorherige Sensitivität auf $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ um Größenordnung verbessert:
 - Neue obere Schranke von 3.0×10^{-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 2.4×10^{-9} @ 90% CL

Weitere Experimente

KLOE II:

- Experiment am DA ϕ NE-Beschleuniger am INFN Frascati National Laboratory
- e^+e^- -Beschleuniger
- Operiert an Massenresonanz des ϕ -Mesons @ 1019 MeV
- ϕ fast in Ruhe
- Zerfall in 49 % in K^+K^- und 34 % in K_SK_L
- Messung von V_{us} , Untersuchung von CP und CPT diskreten Symmetrien und Dekohärenz von Kaonverschränkung durch KLOE
- KLOE II soll präzisere Daten liefern

KLEVER:

- Nachfolger/ Zukunft von NA62
- Präzisere Messung von $\text{BR}(K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu})$
- Wichtig beide Zerfallsmoden zu vermessen
- Unterschiedliche Beeinflussung durch verschiedene Modelle neuer Physik
- Start der Datennahme im Jahr 2026
- Veto mechanismen ähnlich zu KOTO
- Upgrade der Strahlproduktionen und Detektion im Vergleich zu NA62