
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
- 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
- KTeV
- Ergebnisse von KTeV und NA48

Seltene Zerfälle und Präzisionsmessungen

- Der goldene Zerfall der Kaonphysik
- NA62
- KOTO
- Weitere Experimente

Was sind Kaonen?

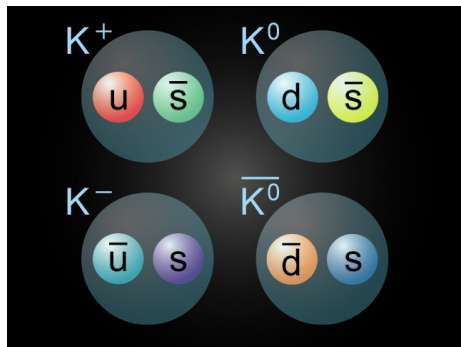


Figure: Übersicht über die Kaonen

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
- KTeV
- Ergebnisse von KTeV und NA48

Seltene Zerfälle und Präzisionsmessungen

- Der goldene Zerfall der Kaonphysik
- NA62
- KOTO
- Weitere Experimente

Weltkarte



Entdeckung der Kaonen

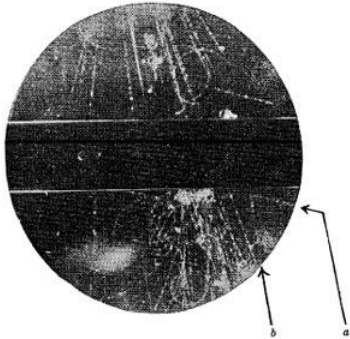
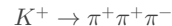


Figure: Nebelkammeraufnahme der kosmischen Höhenstrahlung von Rochester und Butler 1947

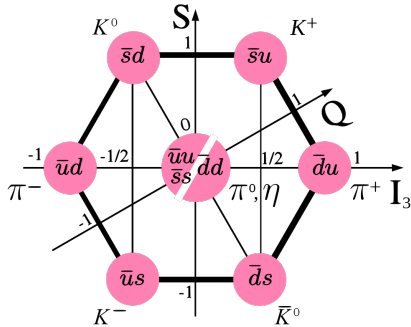
- Entdeckung des ersten (neutralen) Kaons 1947 durch George Rochester et. al
- Höhenstrahlung wurde in Nebelkammer untersucht
- Zerfall eines neutralen Teilchens in ein positives und negatives Pion



- 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

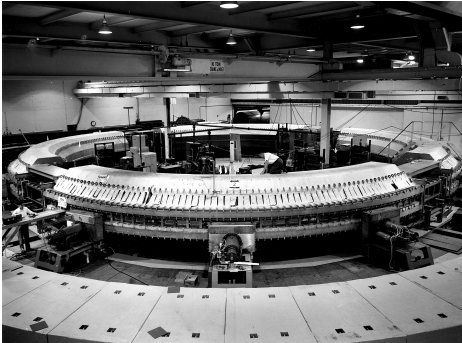


Figure: Das Cosmotron am Brookhaven National Laboratory (1952-1966)

- 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

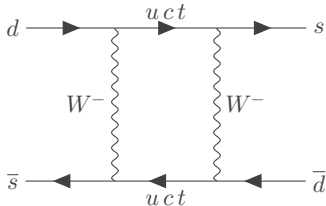
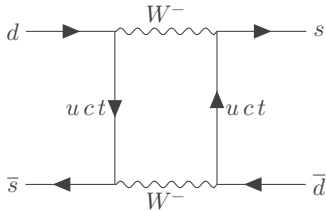
$$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

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

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

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

- $|K_1\rangle$ haben CP = +1 und $|K_2\rangle$ haben 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:

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

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

CP-Verletzung

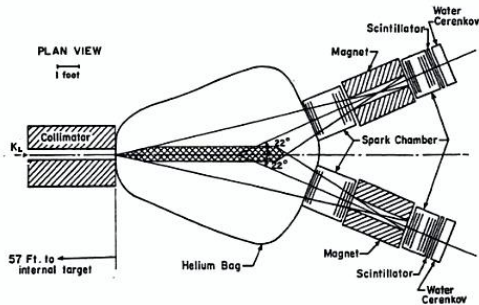


Fig. 9a. Set-up used to detect $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$.

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 Beamline
- 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

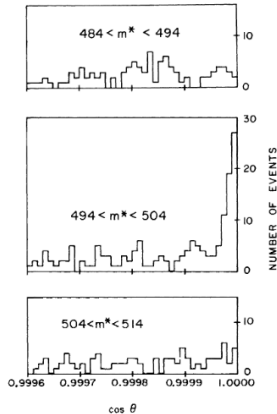


FIG. 3. Angular distribution in three mass ranges for events with $\cos \theta > 0.9995$.

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 der 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

$$\Gamma(K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0) \neq \Gamma(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0)$$

$$\Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-) \neq \Gamma(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)$$

→ 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
- 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 Teilchenphysik in Bezug auf seltene Prozesse gebracht werden?
- Gibt es neue Physik, die durch die Untersuchung von Pinguindiagrammen beobachtet werden 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?

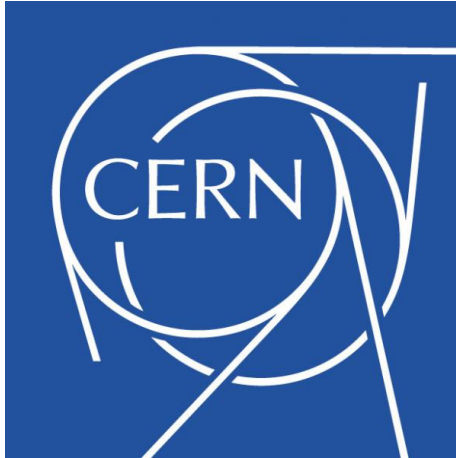
KTeV am FermiLab

- Kaons at the TeVatron
- Vorläufer: E731 → Anfang: 198x Abschluss Datenanalyse: 1992
- $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (7.4 \pm 5.9) \times 10^{-4}$
- KTeV → Anfang: 1996 Abschluss Datenanalyse: 2011
- $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (19.2 \pm 2.1) \times 10^{-4}$

NA48 am Cern

- North Area 48
- Vorläufer NA31 → Anfang: 1986 Abschluss Datenanalyse: 1993
- $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (23.0 \pm 6.5) \times 10^{-4}$
- NA48 → Anfang: 1997 Abschluss Datenanalyse: 2002
- $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (14.7 \pm 2.2) \times 10^{-4}$

Das Experiment NA48



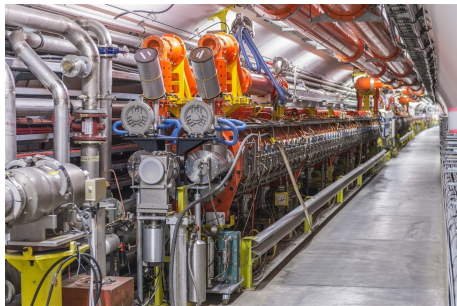


Figure: Tunnel des Super Proton Synchrotrons (SPS)

- Fixed target mit 450 GeV vom SPS
- Gleichzeitige Messung von $|K_L\rangle$ und $|K_S\rangle$
- Extraktion von ϵ' durch Messen des Doppelverhältnisses
- Aufspalten des Protonstrahles in $|K_L\rangle$ und später $|K_S\rangle$
- Auftreffen von $|K_L\rangle$ und $|K_S\rangle$ am gleichen Detektorpunkt
- Vertexrekonstruktion ausreichend für Zerfall in π^\pm
- Problematischer π^0

The diagram illustrates the experimental setup for the KOTO experiment, divided into four main sections: KL Target Station, KS Target Station, Decay Region, and Detectors.

- KL Target Station (0 to 50 m):** A primary proton beam enters from the left, passing through a 2.4 mrad deflection. It then passes through a series of magnets (B1, B2, B3) and a proton pump/collimator. The beam is then deflected upwards by a sweeping magnet and passes through a KL target. The resulting beam is then deflected downwards by a KL defining coil and a KL cleaning coil.
- KS Target Station (50 to 140 m):** The beam enters the KS target station, passing through a KS target and a KS sweeping magnet. The beam is then deflected upwards by a KS target and a KS sweeping magnet, and then downwards by a KS target and a KS sweeping magnet.
- Decay Region (140 to 210 m):** The beam enters the decay region, passing through a KS target and a KS sweeping magnet. The beam is then deflected upwards by a KS target and a KS sweeping magnet, and then downwards by a KS target and a KS sweeping magnet.
- Detectors (210 to 250 m):** The beam enters the detector region, passing through a KS target and a KS sweeping magnet. The beam is then deflected upwards by a KS target and a KS sweeping magnet, and then downwards by a KS target and a KS sweeping magnet.

The diagram also shows the beam's path through various components, including magnets (B1, B2, B3, B5, B6), coils (Q1+2, KL defining coil, KL cleaning coil), and targets (KL target, KS target). The beam's path is shown as a solid line, and the beam's path is shown as a dashed line. The beam's path is shown as a solid line, and the beam's path is shown as a dashed line.

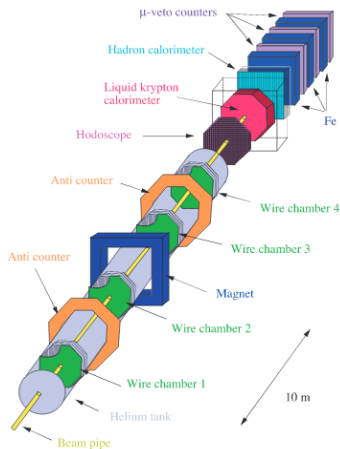


Figure: Detektor des NA48-Experiments

- Trennung der Zerfallsprodukte von $|K_L\rangle$ und $|K_S\rangle$
- Verhindern von Regeneration ($|K_L\rangle \rightarrow |K_S\rangle$)
- Vetomechanismen um andere Zerfälle zu filtern, z.B. Myonkammern
- Messung der Produkte:

$$\left. \begin{array}{l} K_L \\ K_S \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \pi^0 \pi^0 \rightarrow \gamma \gamma \gamma \gamma : \text{EMKalorimeter} \\ \pi^+ \pi^- : \text{Spektrometer, Hadronenkalorimeter} \end{array} \right.$$

→ Besonders bei $|K_S\rangle$ sehr frühe Detektion von γ durch AKS

Das KTeV-Experiment



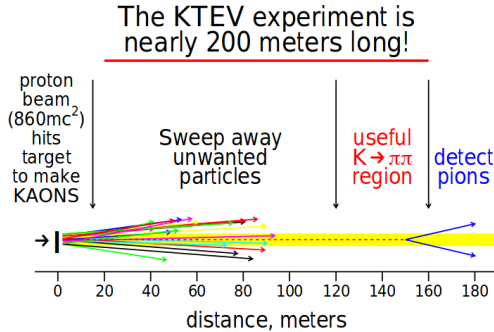
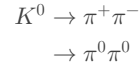


Figure: Konzept des KTeV Experiments

- 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 verfehlen, werden simuliert und berücksichtigt

The KTeV Detector

6

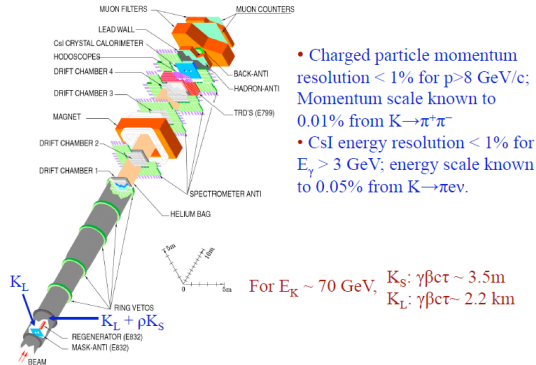
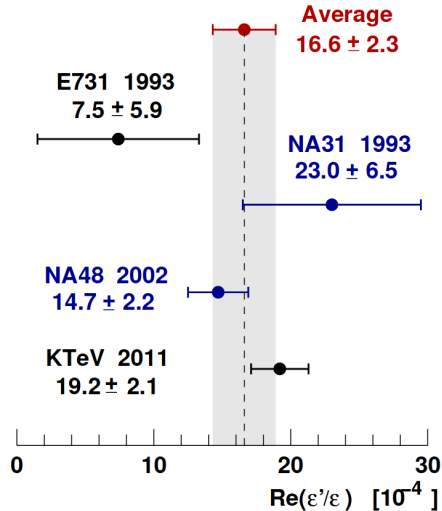


Figure: Detektor des KTeV-Experiments

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
- 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

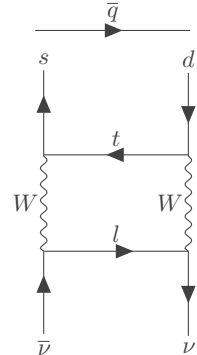
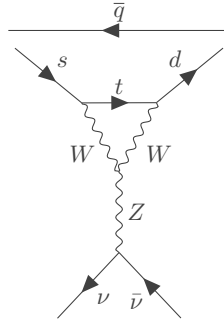
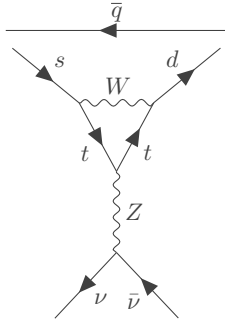
$$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$$

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 Penguin- 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:

$$\text{Experiment : BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) < 3.35 \times 10^{-10} @ 90 \% CL$$

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

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

→ Einschränkung auf:

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

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

- → Große Lücke/Unsicherheit zwischen Experimenten und Theorie

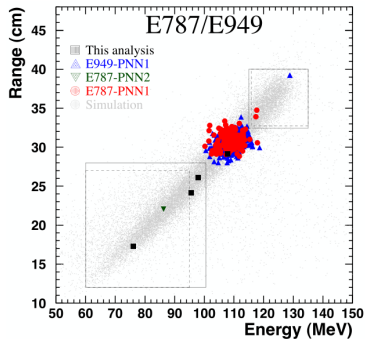


Figure: Ergebnisse von E787a → 7 Ereignisse gemessen

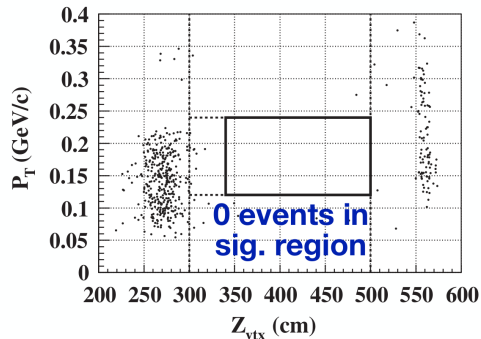


Figure: Ergebnisse von E391a → keine Ereignisse gemessen

Seltene Zerfälle und Präzisionsmessungen: Der goldene Zerfall der
Kaonphysik

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

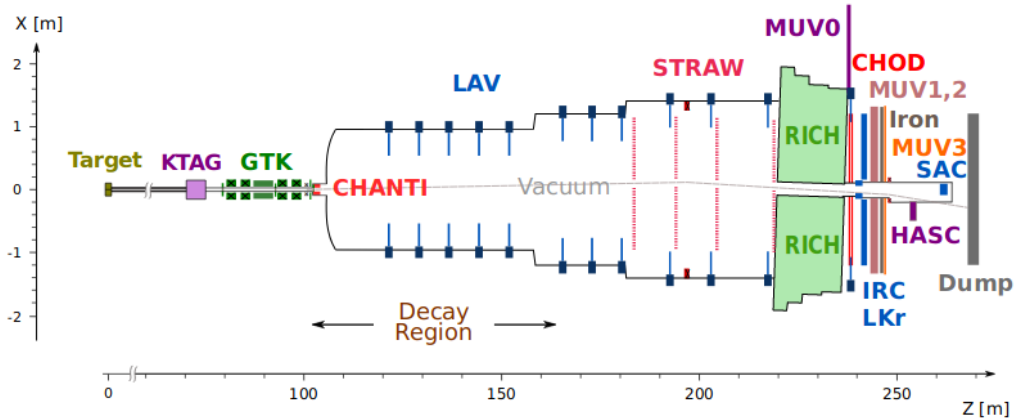
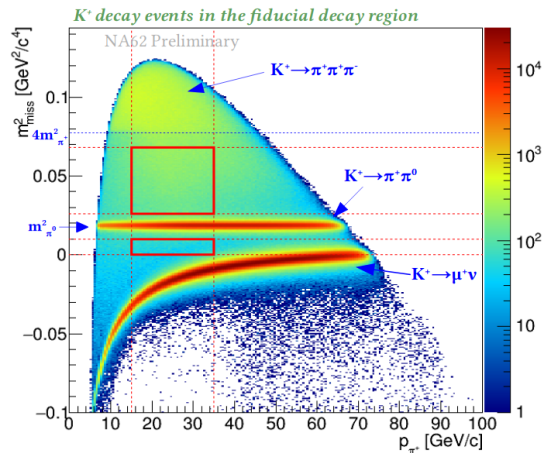


Figure: Aufbau des genutzten Detektors von NA62

Kriterienübersicht

Übersicht über Kriterien:

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



Ergebnis der 2016er Daten

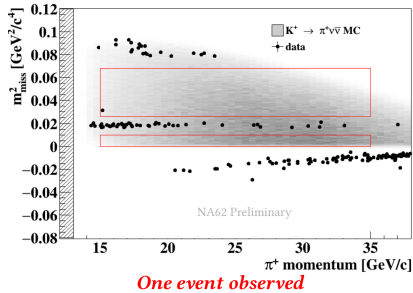


Figure: Resultat der Messungen

Neue Ergebnisse:

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

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

→ Ergebnisse sind mit SM kompatibel

Vergleich:

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

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

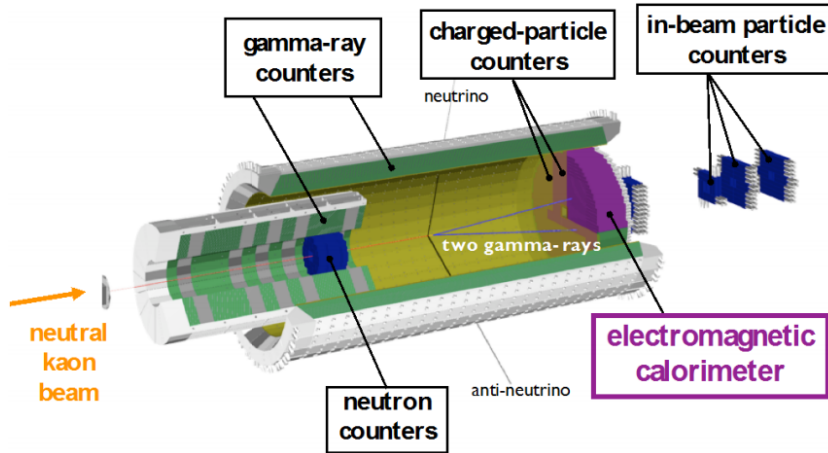


Figure: Schema des KOTO-Detektors

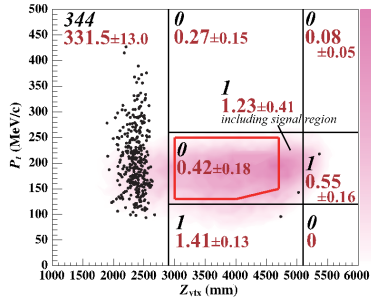


Figure: Analyse der KOTO-Daten aus 2015

- Vorherige Sensitivität auf $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ um Größenordnung verbessert:
- Neue obere schranke von $3.0 \times 10^{-9} @ 90 \% CL$
- 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 DAΦNE-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 $K_S K_L$
- 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 $BR(K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu})$
- Wichtig beide Zerfallsmoden zu vermessen
- Unterschiedliche Beeinflussung durch verschiedene Modelle neuer Physik
- Start der Datennahme im Jahr 2026
- Vetomechanismen ähnlich zu KOTO
- Upgrade der Strahlproduktionen und Detektion im Vergleich zu NA62