Schlüsselexperimente der Kern- und Teilchenphysik

Messung der direkten CP Verletzung im Kaonzerfall

Jun Nian

01.06.2007

Übersicht

- Motivation
- Grundbegriffe
- Phänomenologische Beschreibung (einschl. Experiment von Cronin und Fitch)
- Experimente (NA48, KTeV)
- Zusammenfassung und Referenzen

Motivation

- Materie-Antimaterie Asymmetrie
- Wo ist Antimaterie?
- Mögliche Erklärung:

  CP Verletzung im Quark-Sektor

  (K , B , D)

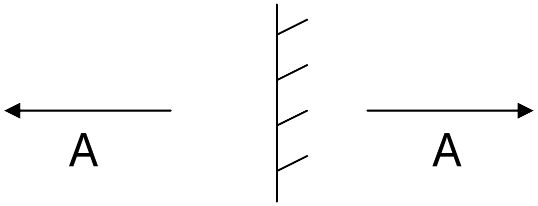
  Aber nicht genug ...
- CP Verletzung im Lepton-Sektor?

Operatoren

Für ein Teilchen:

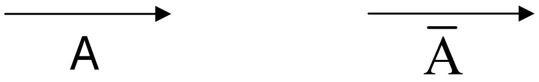
P Operator:

$$P\psi(\vec{x}) = \psi(-\vec{x})$$



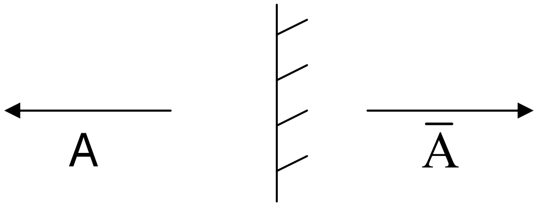
C Operator:

$$C\left|A\right\rangle = \eta_C \left|\bar{A}\right\rangle$$



CP Operator:

$$CP\left|A(\vec{x})\right\rangle = \eta_C \left|\bar{A}(-\vec{x})\right\rangle$$



CP-Eigenwerte von 2π und 3π

Für ein System A,B,... :

A, B, ... sind Eigenzustände von CP-Operator.

$$\eta_{CP}(A,B,\cdots) = \eta_{CP}(A)\cdot\eta_{CP}(B)\cdot\cdots\cdot(-1)^L$$

$$\boxed{J^P(\pi^\pm) = 0^- \qquad J^{PC}(\pi^0) = 0^{-+}}$$

$$\boxed{\begin{aligned} K(L=0) &\rightarrow 2\pi(\pi^0\pi^0,\pi^+\pi^-) \quad \Longrightarrow \quad CP\left|2\pi\right\rangle = +\left|2\pi\right\rangle \\ K(L=0) &\rightarrow 2\pi(\pi^0\pi^0\pi^0,\pi^+\pi^-\pi^0) \quad \Longrightarrow \quad CP\left|3\pi\right\rangle = -\left|3\pi\right\rangle \end{aligned}}$$

Eigenzustände von Kaonen

Zur Beschreibung des neutralen K-Systems:

Flavor-Eigenzustände

$$\begin{cases} |K^0\rangle = |d\bar{s}\rangle & \Longrightarrow \quad S|K^0\rangle = +|K^0\rangle \\ |\bar{K}^0\rangle = |\bar{d}s\rangle & \Longrightarrow \quad S|\bar{K}^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \quad CP|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle, CP|\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle$$

CP-Eigenzustände:

$$|K_1\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \qquad CP = +1$$

$$|K_2\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \qquad CP = -1$$

Frage: Sind K_1 und K_2 identisch mit beobachteten K_S und K_L ?

$K_L = K_2$?

Frage: Sind K_1 und K_2 identisch mit beobachteten K_S und K_L ?

⇒ Frage: Sind K_S und K_L auch CP-Eigenzustände?

$$K_1(CP=+1) \rightarrow 2\pi(CP=+1)$$
$$K_2(CP=-1) \rightarrow 3\pi(CP=-1)$$

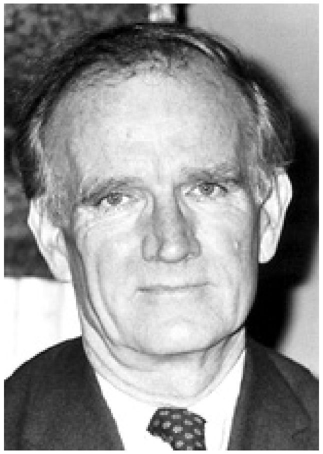
$$K_S \rightarrow 2\pi(CP=+1)$$
$$K_L \rightarrow 3\pi(CP=-1)$$

⇒ Frage: Gibt es den Zerfall $K_L \rightarrow 2\pi$?

Suche man das!

Experiment von Cronin & Fitch (1963, Brookhaven, AGS)

James Watson Cronin



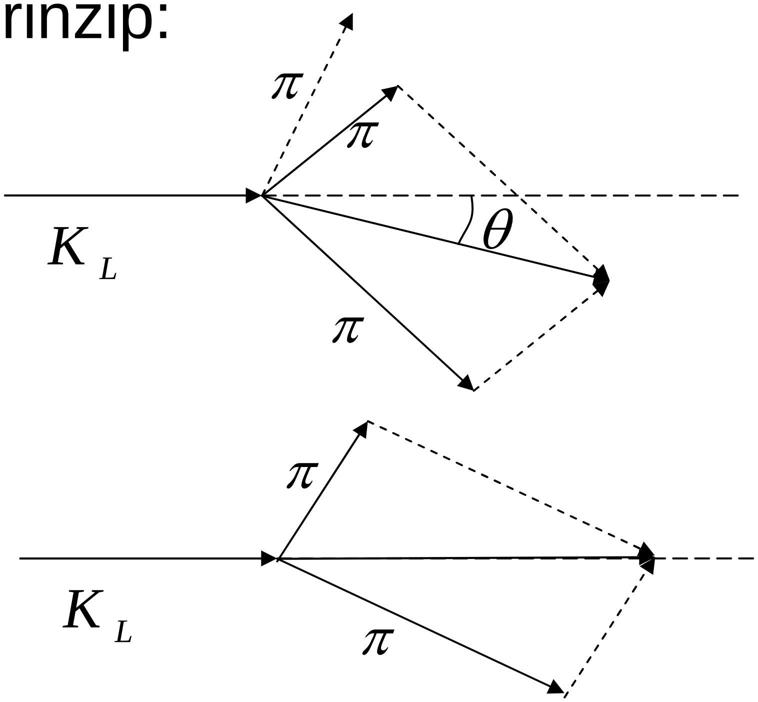
Val Logsdon Fitch

(1980 Nobelpreisträger)

CP Verletzung:

$$K_L \rightarrow \pi\pi$$

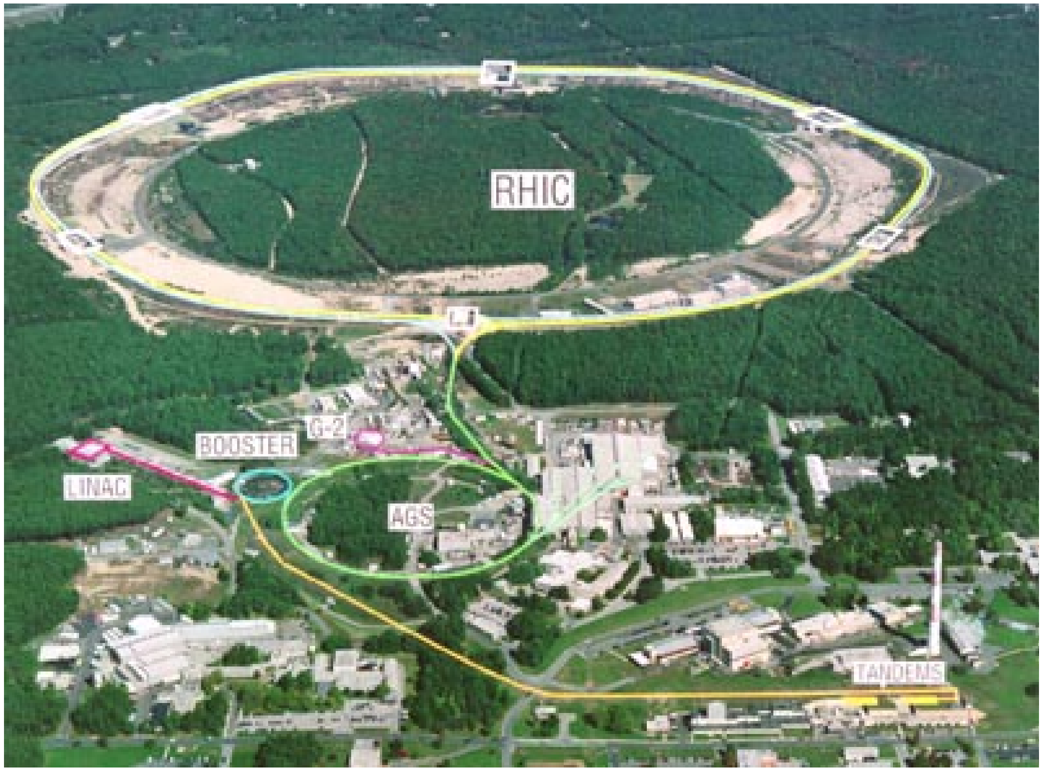
Prinzip:



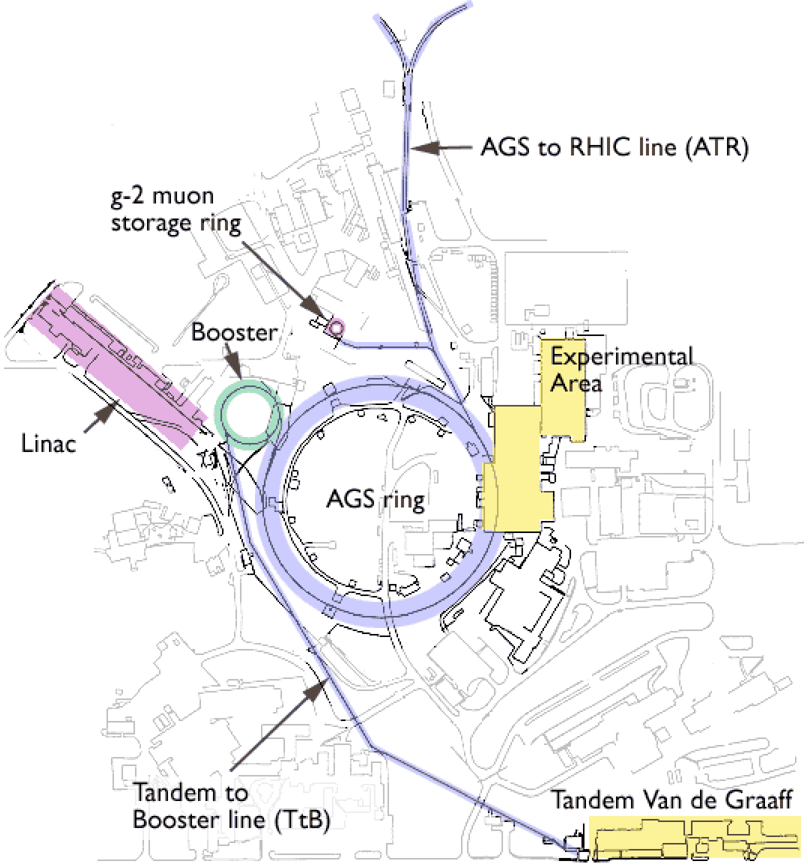
$K_L \rightarrow \pi\pi$ ➡ Nur zwei Produkte

➡ $\theta = 0$ ➡ $\cos\theta = 1$

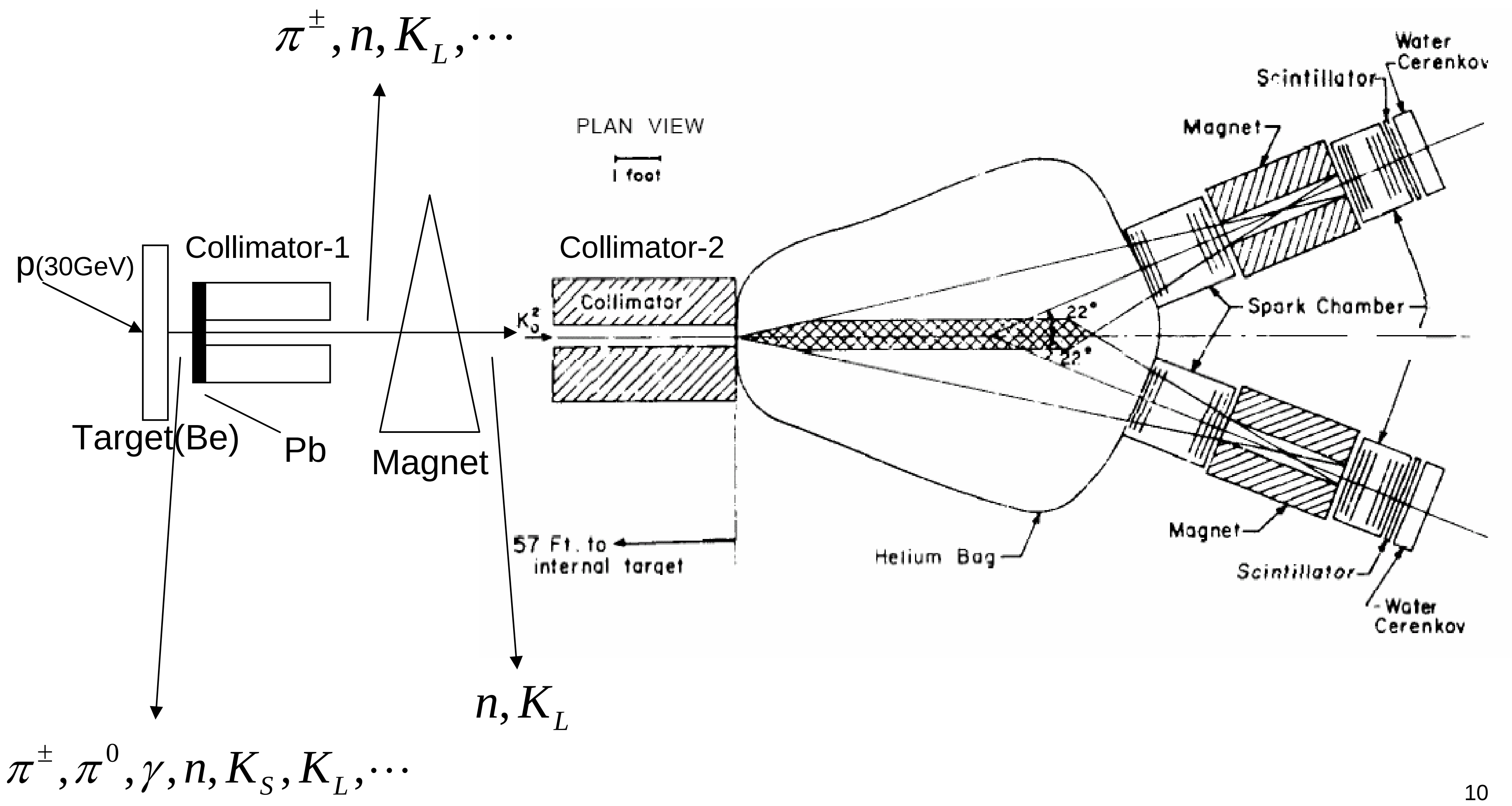
Experiment von Cronin & Fitch (Brookhaven, AGS, 1963)


RHIC
BOOSTER
G-2
LINAC
AGS
TANDEMS

Brookhaven: RHIC+AGS


AGS to RHIC line (ATR)
g-2 muon storage ring
Booster
Experimental Area
Linac
AGS ring
Tandem to Booster line (TtB)
Tandem Van de Graaff

Aufbau des Experimentes von Cronin & Fitch



$\pi^{\pm}, n, K_L, \cdots$

p(30GeV)

Collimator-1

Target(Be)

Pb

Magnet

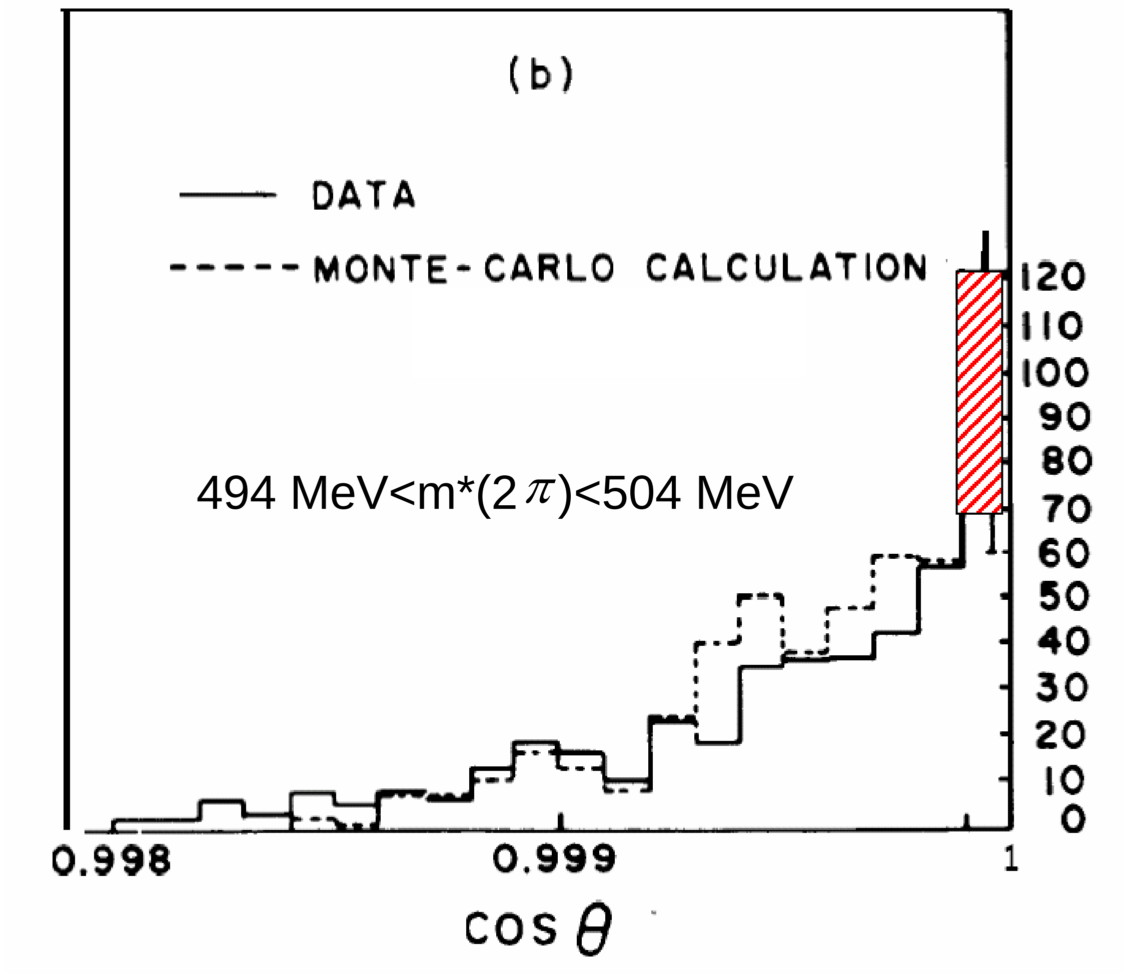
Collimator-2

n, K_L

$\pi^{\pm}, \pi^{0}, \gamma, n, K_S, K_L, \cdots$

PLAN VIEW
1 foot
Collimator
K_2^0
57 Ft. to internal target
Helium Bag
22°
22°
Spark Chamber
Magnet
Scintillator
Water Cerenkov
Magnet
Scintillator
Water Cerenkov

Ergebnis des Experimentes von Cronin & Fitch



- Ergebnis:

45 ± 9 2π -Ereignisse

aus 22700 K_L Zerfällen

⇨ $\Gamma(K_L \rightarrow 2\pi) \approx 10^{-3}$

⇨ K_L kein CP-Eigenzustand

⇨ CP Verletzung in schwacher WW

Analyse des Zerfalls $K_L \to 2\pi$

$(CP = -1)$ $(CP = +1)$

$$|K_L\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon|^2}}(|K_2\rangle + \varepsilon |K_1\rangle) \to 2\pi(CP = +1)$$

ε: Indirekte CP Verletzung

dominant in Cronin-Fitch-Exp.

ε': Direkte CP Verletzung

$2\pi(CP = +1)$ $2\pi(CP = +1)$

$\varepsilon \neq 0 \Rightarrow$ Indirekte CP Verletzung

$\varepsilon' \neq 0 \Rightarrow$ Direkte CP Verletzung

Frage: Wie misst man ε'?

Amplitude-Verhältnisse und Doppelverhältnis

Amplitude-Verhältnisse:

$$\eta_{00} := \frac{\left\langle \pi^0 \pi^0 \middle| T \middle| K_L \right\rangle}{\left\langle \pi^0 \pi^0 \middle| T \middle| K_S \right\rangle} \quad \eta_{+-} := \frac{\left\langle \pi^+ \pi^- \middle| T \middle| K_L \right\rangle}{\left\langle \pi^+ \pi^- \middle| T \middle| K_S \right\rangle}$$

➡ Komplexe Größen ➡ Nicht zu messen!

Zu messende Größe:

Doppelverhältnis:

$$R := \frac{\Gamma(K_L \to \pi^0 \pi^0) / \Gamma(K_S \to \pi^0 \pi^0)}{\Gamma(K_L \to \pi^+ \pi^-) / \Gamma(K_S \to \pi^+ \pi^-)} = \left| \frac{\eta_{00}}{\eta_{+-}} \right|^2$$

Vereinfachungen

1. Durch Isospin-Betrachtung: $\eta_{00} \approx \varepsilon - 2\varepsilon' \quad \eta_{+-} \approx \varepsilon + \varepsilon'$

2. $Arg(\eta_{00}) \approx Arg(\eta_{+-}) \qquad Arg(\varepsilon) \approx Arg(\varepsilon')$

⇒ $$R := \frac{\Gamma(K_L \to \pi^0\pi^0)/\Gamma(K_S \to \pi^0\pi^0)}{\Gamma(K_L \to \pi^+\pi^-)/\Gamma(K_S \to \pi^+\pi^-)} = \left|\frac{\eta_{00}}{\eta_{+-}}\right|^2 \approx 1 - 6\cdot\mathrm{Re}\underbrace{\left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}\right)}_{}$$

$\square\ 10^{-6}/10^{-3} = 10^{-3}$

Sehr genaue Messung!

Zurück zur Frage: Wie misst man ε' ? Man misst ε' nicht !

$R \neq 1$ ⇒ $\varepsilon' \neq 0$ ⇒ Direkte CP Verletzung

Experimente zur direkten CP Verletzung

Direkte CP Verletzung: $R \neq 1$ oder $\mathrm{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) \neq 0$

NA31(CERN, 1988): $\mathrm{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) = (23.0 \pm 6.5) \times 10^{-4}$

E731(FNAL, 1989): $\mathrm{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) = (7.4 \pm 5.9) \times 10^{-4}$

⇒ stimmen nicht überein!

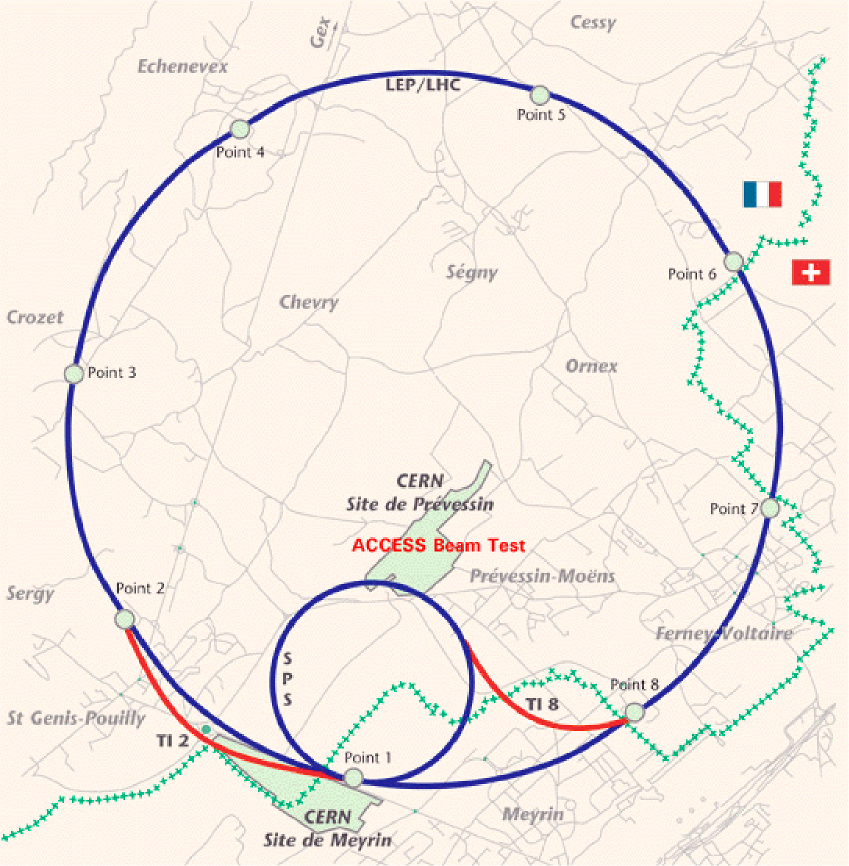
Neue Experimente:

CERN: NA48; FNAL: KTeV

⇒ um Fehler zu verringern

NA48(CERN, SPS, 1997-1999)

CERN: LHC/LEP+SPS

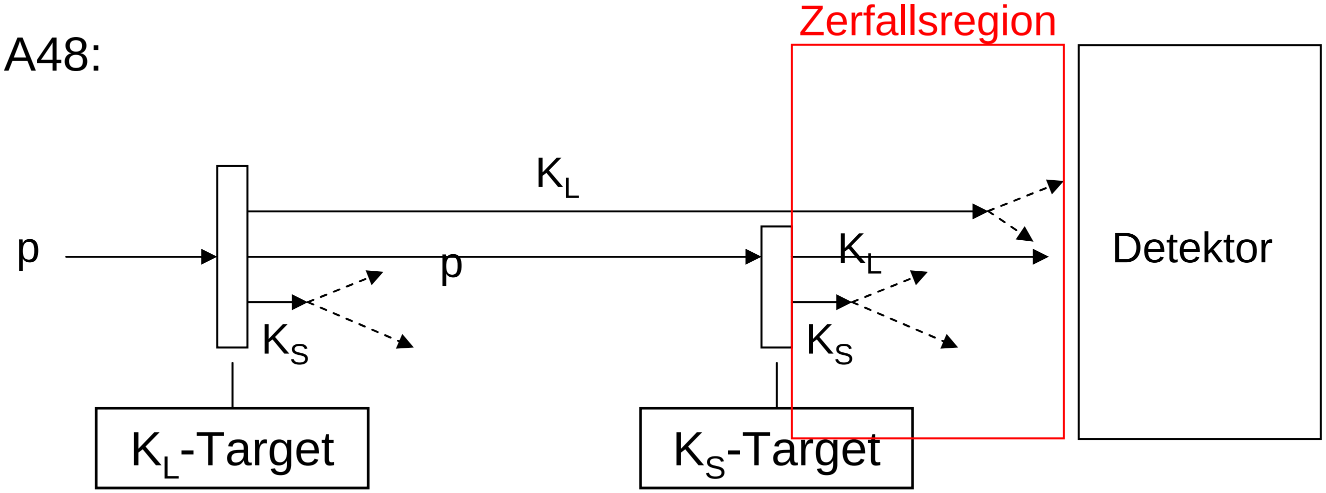

Cessy
Gex
Echenevex
LEP/LHC
Point 5
Point 4
Ségny
Point 6
Chevry
Crozet
Ornex
Point 3
CERN
Site de Prévessin
Point 7
ACCESS Beam Test
Prévessin-Moëns
Sergy
Point 2
Ferney-Voltaire
S
P
S
Point 8
TI 8
St Genis-Pouilly
TI 2
Point 1
CERN
Site de Meyrin
Meyrin

Prinzip der Strahlen-Erzeugung

$$R := \frac{\Gamma(K_L \to \pi^0\pi^0)/\Gamma(K_S \to \pi^0\pi^0)}{\Gamma(K_L \to \pi^+\pi^-)/\Gamma(K_S \to \pi^+\pi^-)}$$

K_S und K_L Strahlen
- Gleichzeitig erzeugt
- Gleiche Zerfallsregion

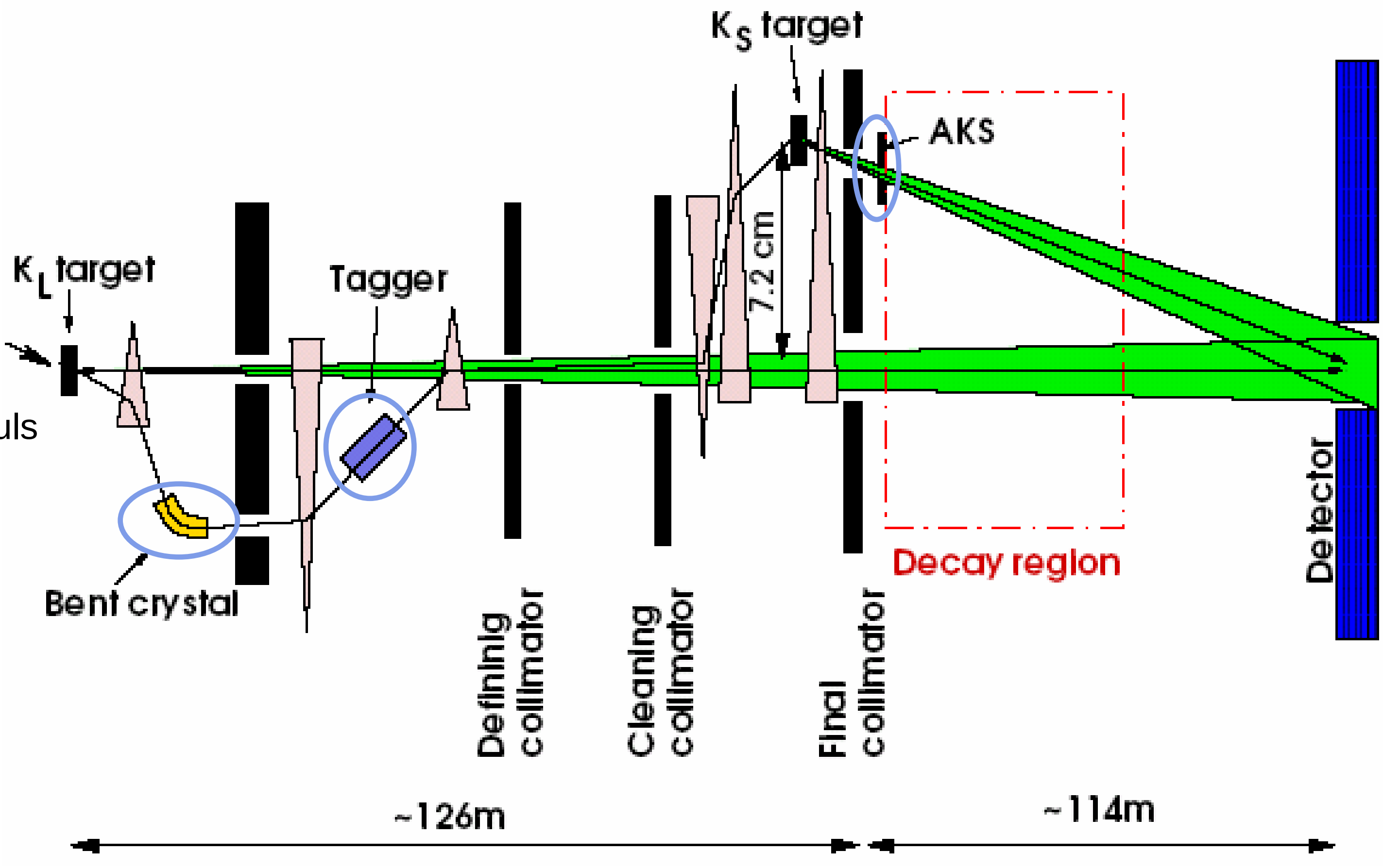
NA48:



Zerfallsregion
p
K_L
p
K_S
K_L
K_S
Detektor
K_L-Target
K_S-Target

Strahlen-Erzeugung von NA48

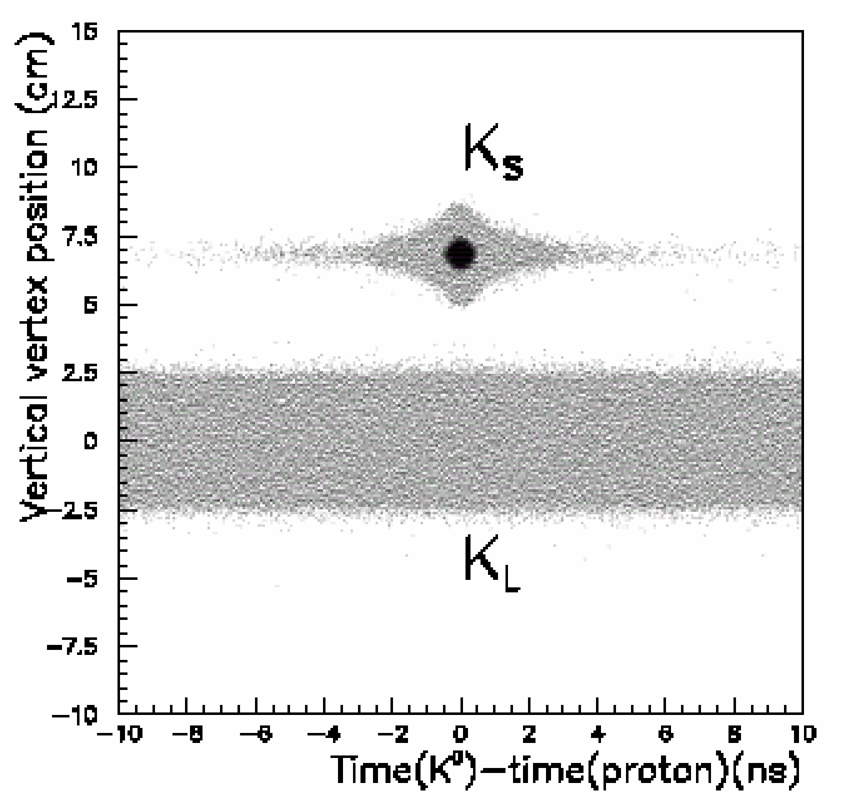
Proton
~1.5×10^{12}
Protonen / Puls



K_L target
Tagger
K_S target
AKS
7.2 cm
Bent crystal
Defining collimator
Cleaning collimator
Final collimator
Decay region
Detector
~126m
~114m

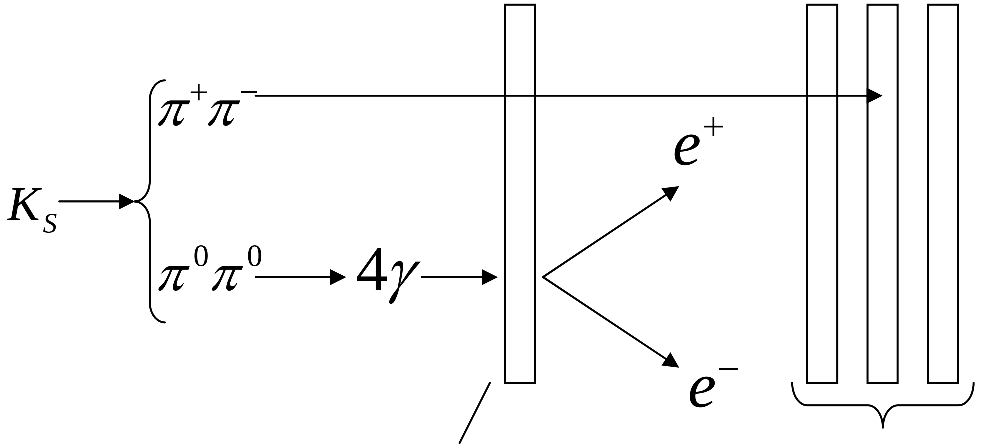
- Kristall
- Tagger
- AKS

Rekonstruktion von $\pi^+\pi^-$ & K_S Anti-Counter (AKS)



Rekonstruktion von $\pi^+\pi^-$

K_S Anti-Counter (AKS)


K_S
$\pi^+\pi^-$
$\pi^0\pi^0$
4γ
e^+
e^-

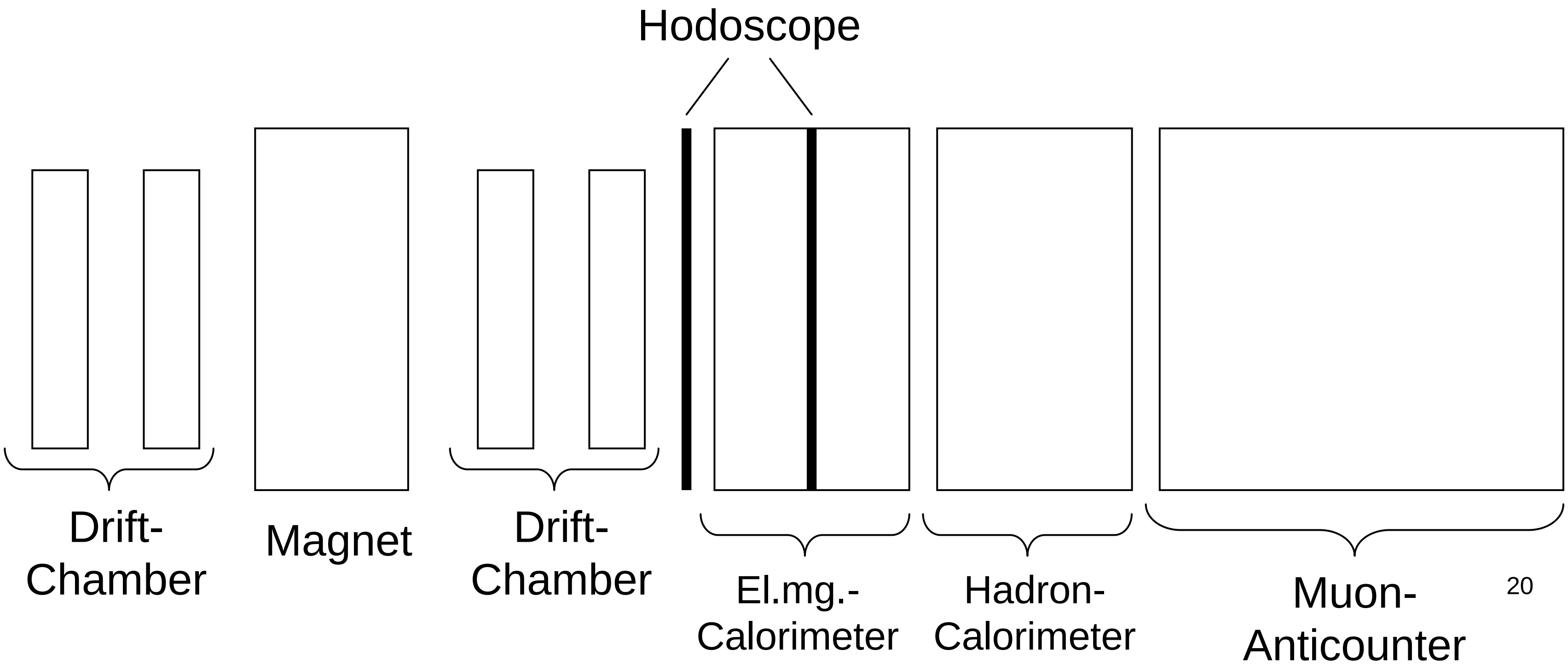
Photon-Converter (Iridium Kristall)

3 Szintillator

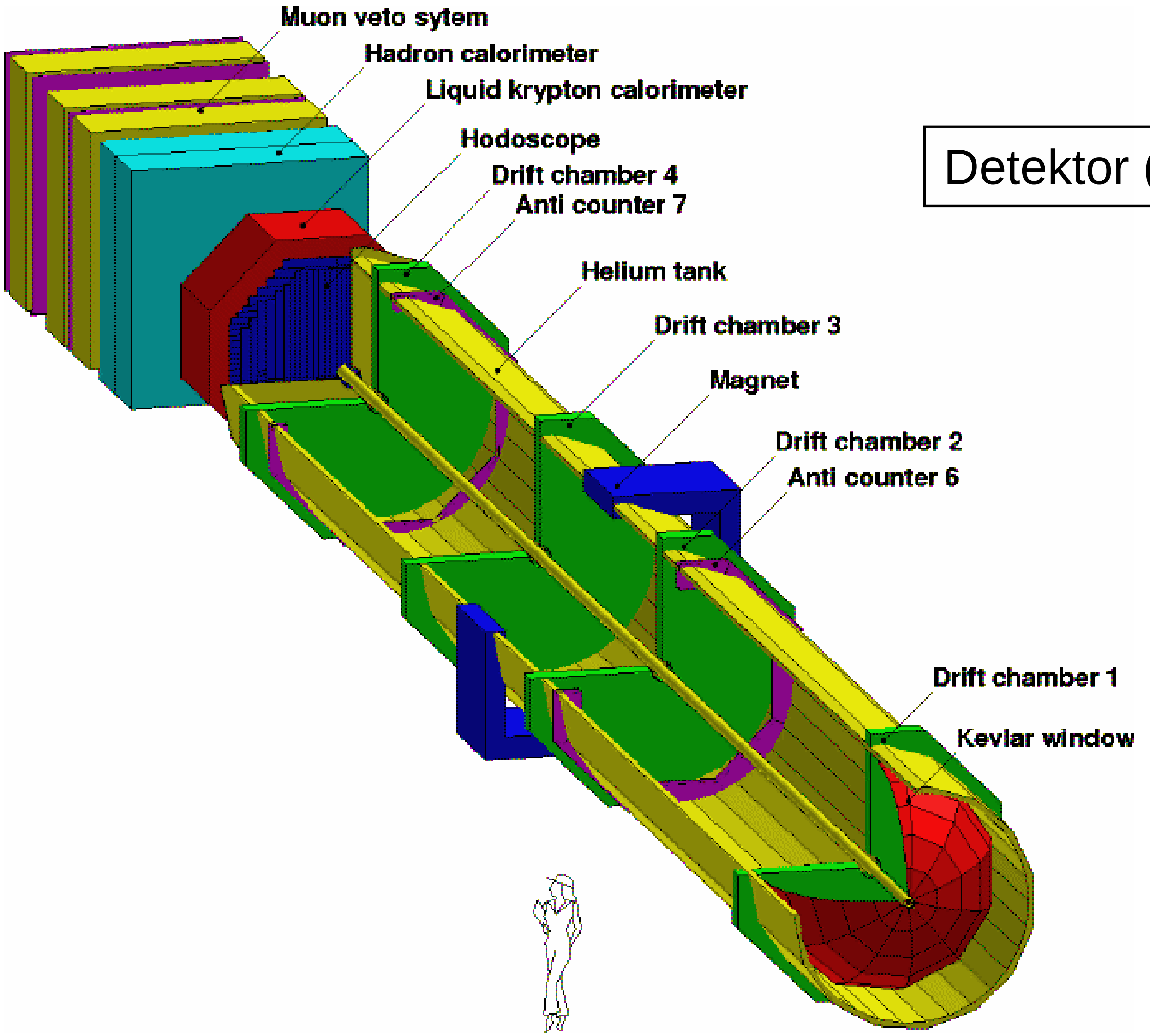
Prinzip des Detektors

$$\left.\begin{matrix}K_L\\K_S\end{matrix}\right\}\longrightarrow\left\{\begin{matrix}\pi^0\pi^0\longrightarrow 4\gamma & \text{: Elektromagnetischer Calorimeter (E)}\\ \pi^+\pi^- & \text{: Spektrometer (}\vec{p}\text{) , Hadron-Calorimeter (E)}\end{matrix}\right.$$

Außerdem: Hodoscope (t) , Muon-Anticounter ($K_L \rightarrow \pi\mu\upsilon$)

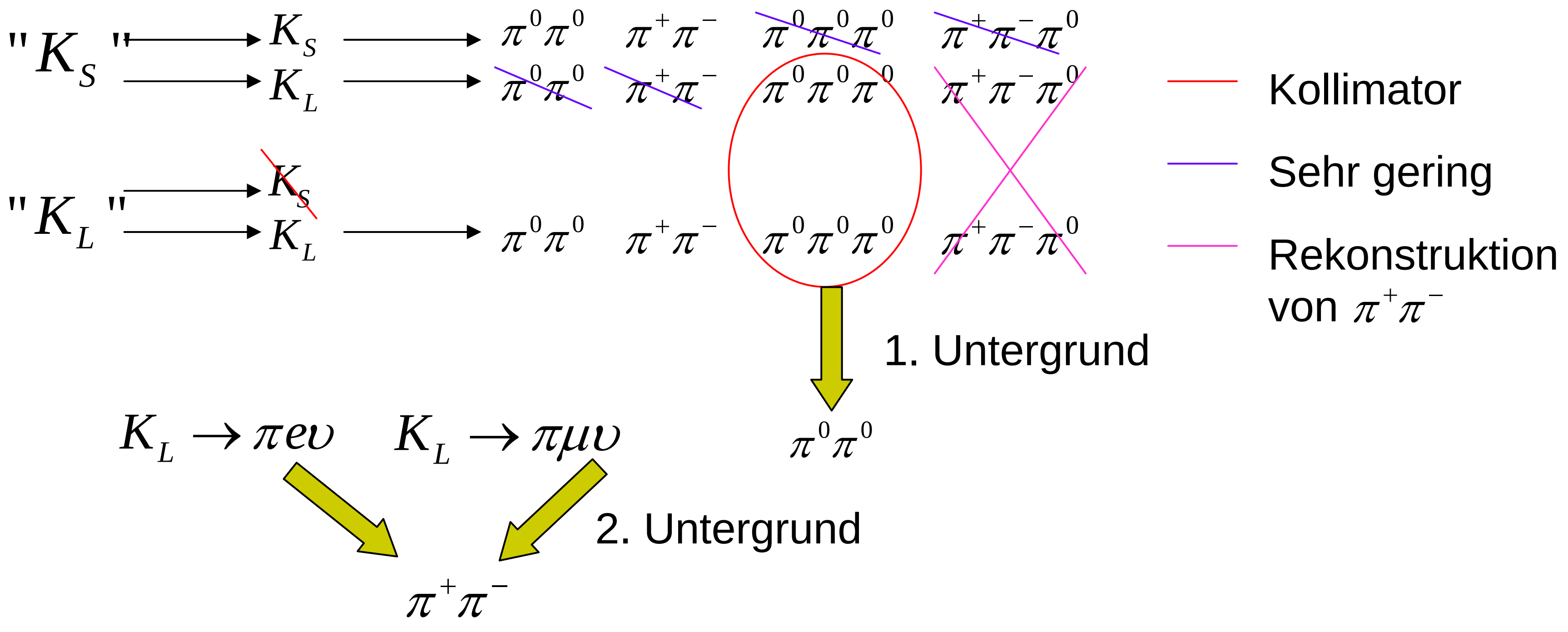

Hodoscope
Drift-
Chamber
Magnet
Drift-
Chamber
El.mg.-
Calorimeter
Hadron-
Calorimeter
Muon-
Anticounter

Detektor von NA48


Muon veto sytem
Hadron calorimeter
Liquid krypton calorimeter
Hodoscope
Drift chamber 4
Anti counter 7
Helium tank
Drift chamber 3
Magnet
Drift chamber 2
Anti counter 6
Drift chamber 1
Kevlar window

Detektor (3-dim)

Untergrund-Korrekturen



$$"K_S" \to K_S \to \pi^0\pi^0 \quad \pi^+\pi^- \quad \cancel{\pi^0\pi^0\pi^0} \quad \cancel{\pi^+\pi^-\pi^0}$$

$$"K_S" \to K_L \to \cancel{\pi^0\pi^0} \quad \cancel{\pi^+\pi^-} \quad \pi^0\pi^0\pi^0 \quad \xcancel{\pi^+\pi^-\pi^0}$$

$$"K_L" \to \cancel{K_S}$$

$$"K_L" \to K_L \to \pi^0\pi^0 \quad \pi^+\pi^- \quad \pi^0\pi^0\pi^0 \quad \xcancel{\pi^+\pi^-\pi^0}$$

Kollimator

Sehr gering

Rekonstruktion von $\pi^+\pi^-$

$$\pi^0\pi^0\pi^0 \to \pi^0\pi^0$$

1. Untergrund

$$K_L \to \pi e \upsilon \quad K_L \to \pi \mu \upsilon \quad \to \pi^+\pi^-$$

2. Untergrund

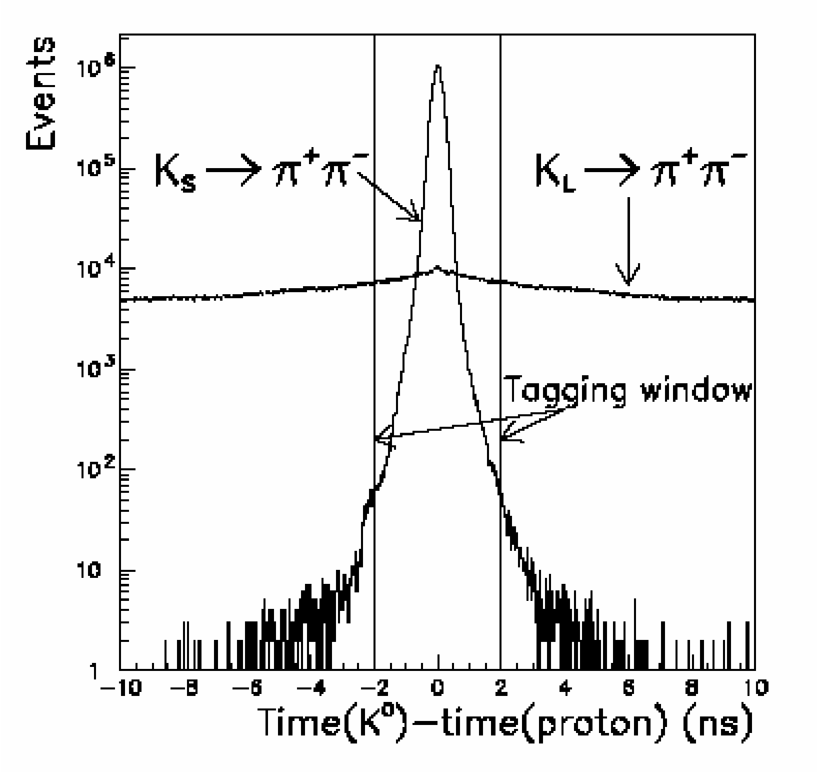
→ Untergrund-Korrekturen

Korrekturen α_{SL} und α_{LS}

α_{SL} : Wahrscheinlichkeit, K_S als K_L misidentifiziert

α_{LS} : Wahrscheinlichkeit, K_L als K_S misidentifiziert

Zur Bestimmung von α_{SL}^{+-} und α_{LS}^{+-} :



Aus dem Diagramm kann man bestimmen:

$$\alpha_{SL}^{+-} = (1.63 \pm 0.03) \times 10^{-4}$$

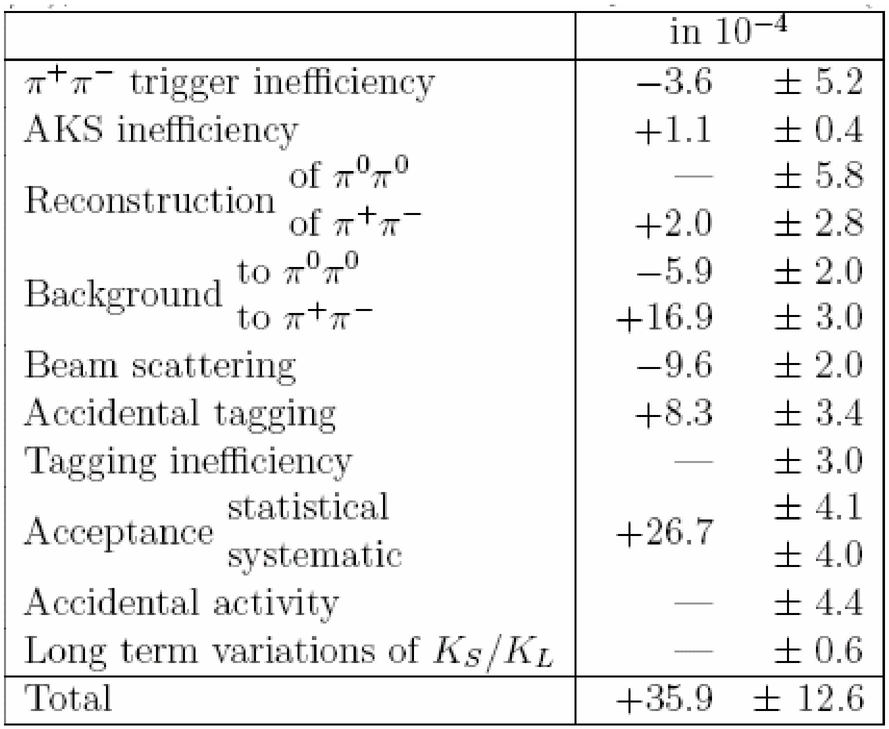
$$\alpha_{LS}^{+-} = (10.649 \pm 0.008)\%$$

Mit anderen Methoden kann man bestimmen:

$$\Delta\alpha_{LS} := \alpha_{LS}^{00} - \alpha_{LS}^{+-} = (4.3 \pm 1.8) \times 10^{-4}$$

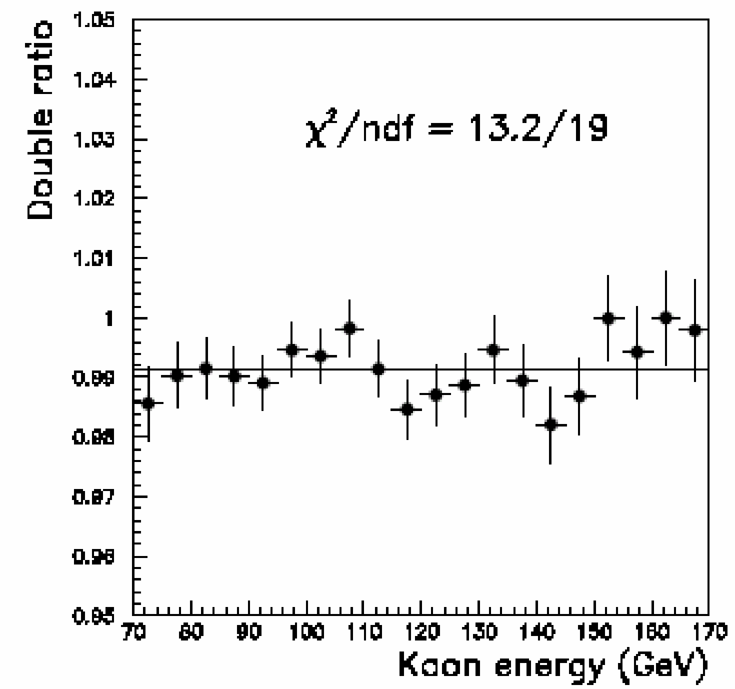
$$\Delta\alpha_{SL} := \alpha_{SL}^{00} - \alpha_{SL}^{+-} = (0.0 \pm 0.5) \times 10^{-4}$$

Korrekturen und Ergebnis von NA48



		in 10^{-4}	
$\pi^+\pi^-$ trigger inefficiency		-3.6	$\pm$ 5.2
AKS inefficiency		$+1.1$	$\pm$ 0.4
Reconstruction	of $\pi^0\pi^0$	—	$\pm$ 5.8
	of $\pi^+\pi^-$	$+2.0$	$\pm$ 2.8
Background	to $\pi^0\pi^0$	-5.9	$\pm$ 2.0
	to $\pi^+\pi^-$	$+16.9$	$\pm$ 3.0
Beam scattering		-9.6	$\pm$ 2.0
Accidental tagging		$+8.3$	$\pm$ 3.4
Tagging inefficiency		—	$\pm$ 3.0
Acceptance	statistical	$+26.7$	$\pm$ 4.1
	systematic		$\pm$ 4.0
Accidental activity		—	$\pm$ 4.4
Long term variations of K_S/K_L		—	$\pm$ 0.6
Total		$+35.9$	$\pm$ 12.6

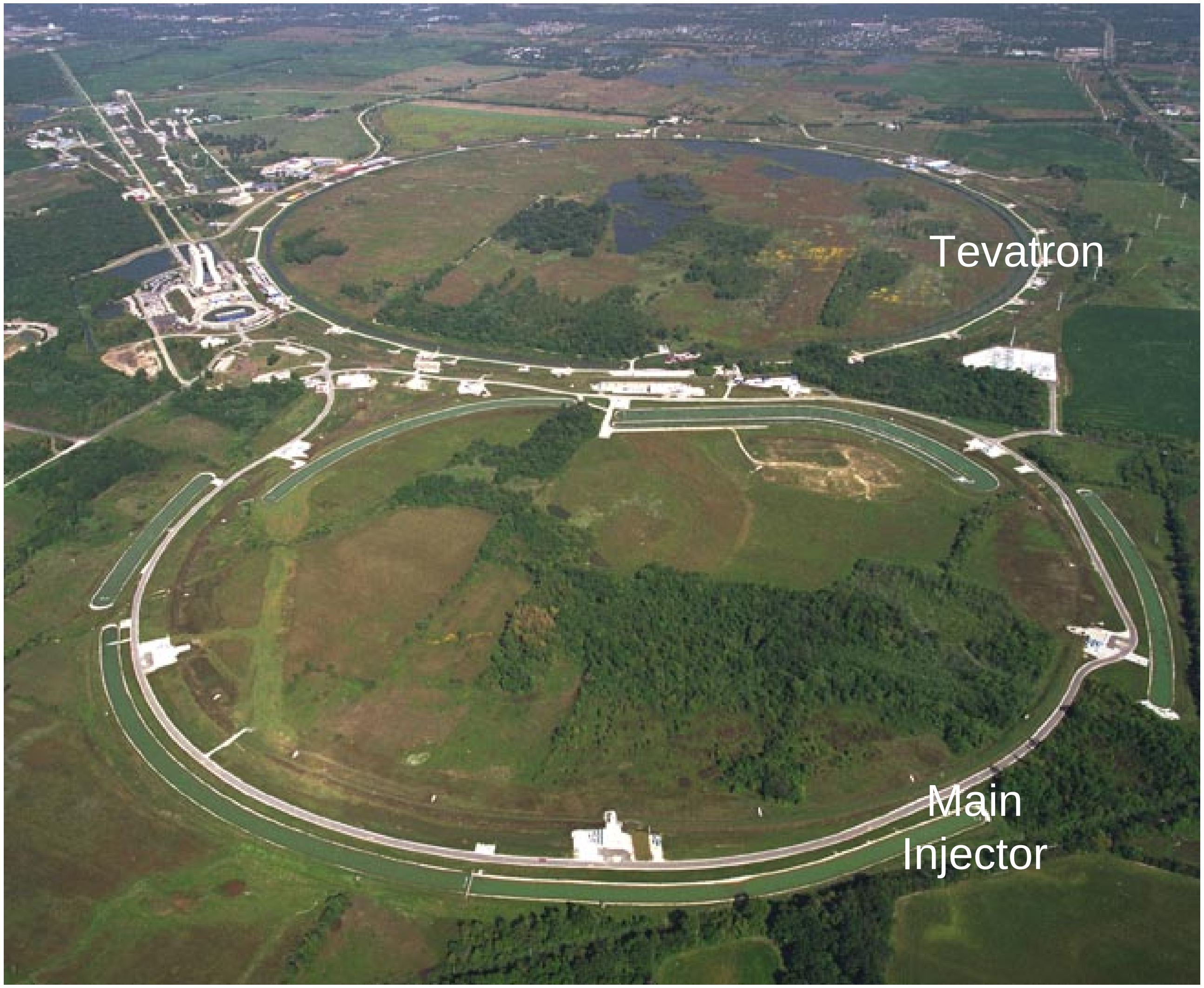
Korrekturen und Fehler von R



R als eine Funktion von Kaonenergie

$$\mathrm{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) = (15.0 \pm 1.7(stat) \pm 2.1(sys)) \times 10^{-4}$$

KTeV(FNAL, Tevatron, 1996-1997)

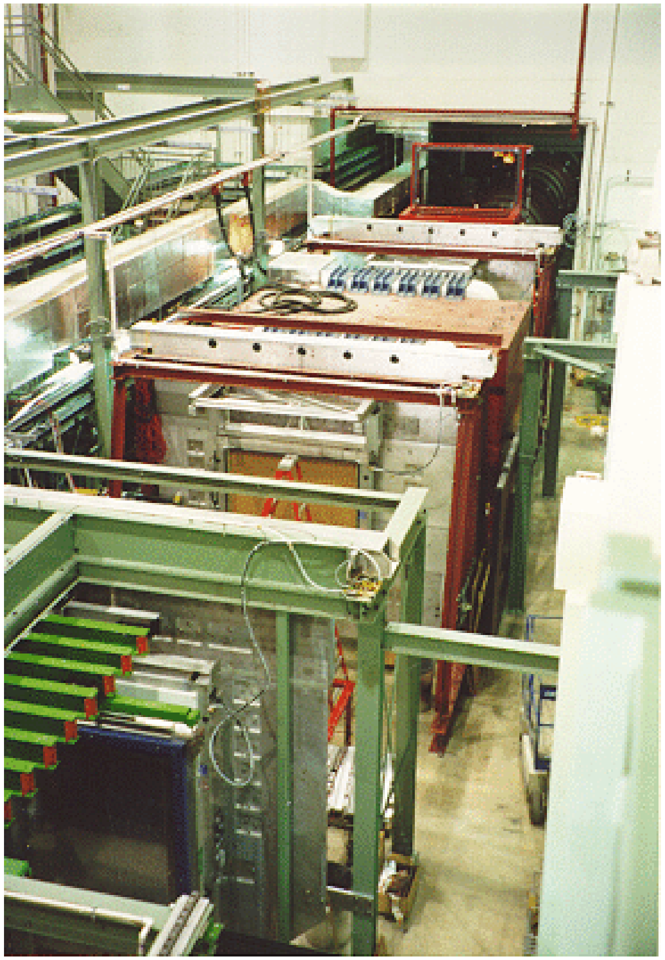

Tevatron
Main Injector

KTeV (Kaon Experiment at Tevatron):

E799 + E832

Zerfallsregion und Magnet von KTeV

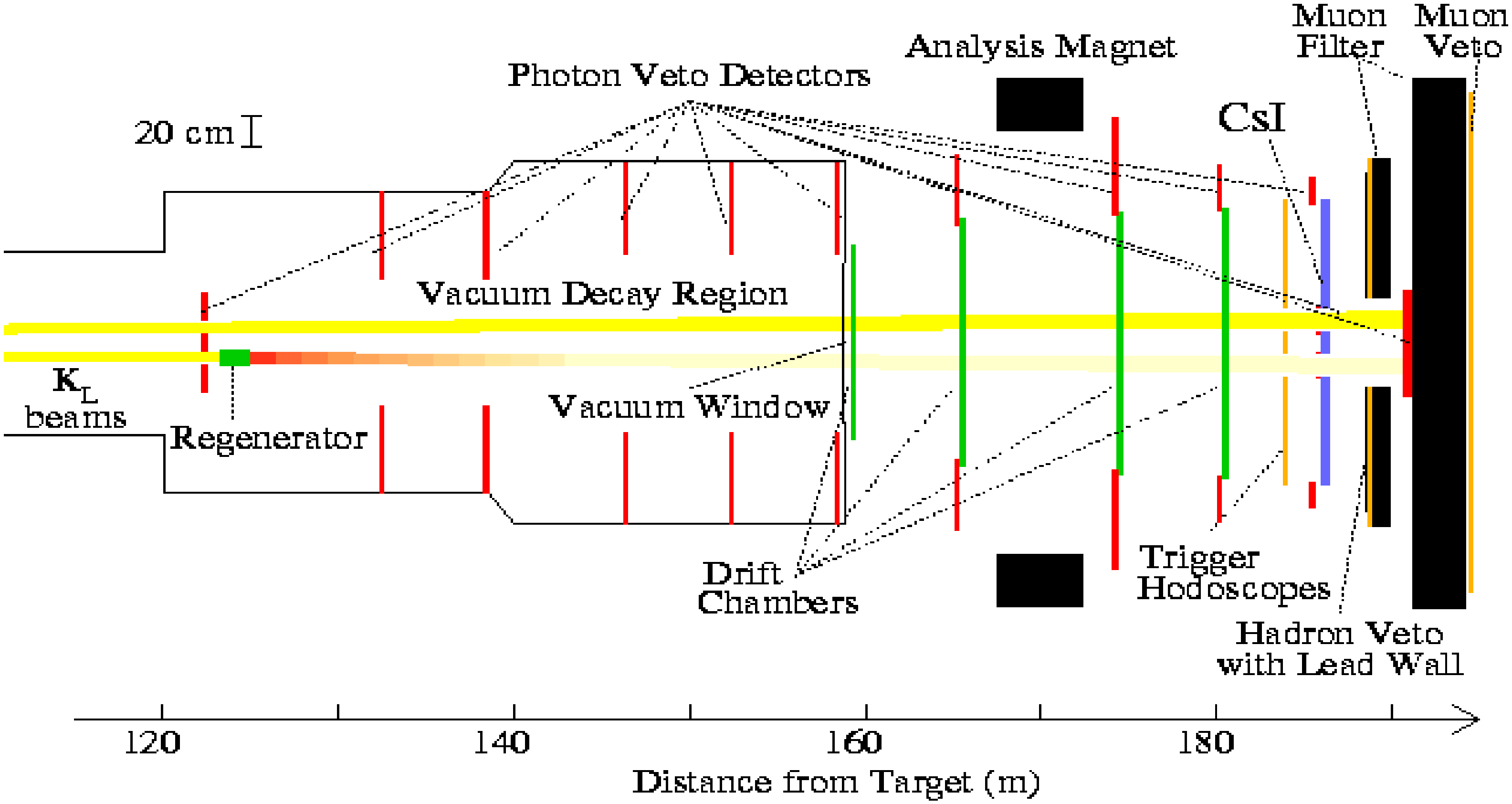
Zerfallsregion



Magnet

Detektor und Ergebnis von KTeV

Detektor (2-dim)


Muon Filter
Muon Veto
Analysis Magnet
Photon Veto Detectors
CsI
20 cm
Vacuum Decay Region
K_L beams
Regenerator
Vacuum Window
Drift Chambers
Trigger Hodoscopes
Hadron Veto with Lead Wall
120
140
160
180
Distance from Target (m)

$$\mathrm{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) = (23.2 \pm 3.0(stat) \pm 3.2(sys) \pm 0.7(MC)) \times 10^{-4}$$

Zusammenfassung

- Drei Basen vom Kaon-System:

$$\{|K^0\rangle, |\bar{K}^0\rangle\},\ \{|K_1\rangle, |K_2\rangle\},\ \{|K_S\rangle, |K_L\rangle\}$$

- Zwei Arten von CP Verletzung:

$\varepsilon \neq 0$ ⇒ Indirekte CP Verletzung

$\varepsilon' \neq 0$ ⇒ Direkte CP Verletzung

- Drei Experimente:

Indirekte CP Verletzung: Cronin, Fitch, 1963

Direkte CP Verletzung: NA48 & KTeV

Referenzen

- CP Violation and K^0 Decays, K.Kleinknecht, 1976. Ann. Rev. Nul. Sci. 26:1-50
- A Precise Measurement of the Direct CP Violation Parameter Re(ε'/ε), A.Lai et al., hep-ex/0110019v1
- Measurements of Direct CP Violation, CPT Symmetry, and Other Parameters in the Neutral Kaon System, A. Alavi-Harati et al., hep-ex/0208007v1
- Webseite von NA48:

  http://na48.web.cern.ch/NA48/
- Webseite von KTeV:

  http://kpasa.fnal.gov:8080/public/ktev.html