

---

# CP-Verletzung im Kaon-Sektor

---

Johannes Kollek

**14. Dezember 2018**

Experimentelle Physik 5

Fakultät Physik

## Inhalt

- 1. Motivation**
- 2. Historischer Ablauf**
- 3. Experimentelle Messung von CP-Verletzung**
- 4. Theorie**
- 5. Suche nach direkter CP-Verletzung**
- 6. Ausblick**
- 7. Quellen**
- 8. Anhang**

## Weswegen wäre CP-Verletzung wünschenswert?

- Erklärung für die Frage nach Baryonenasymmetrie

## Weswegen wäre CP-Verletzung wünschenswert?

- Erklärung für die Frage nach Baryonenasymmetrie
- "Der erste Hinweis für CP-Verletzung ist die Tatsache, dass wir existieren" [1]

## Kaonen

- entdeckt 1947 von C. Butler und G. Rochester in kosmischer Höhenstrahlung mit Cloud-Chambers
- Quarkinhalt:

$$|K^+\rangle = |u\bar{s}\rangle \quad |K^-\rangle = |\bar{u}s\rangle$$

$$|K^0\rangle = |d\bar{s}\rangle \quad |\bar{K}^0\rangle = |\bar{d}s\rangle$$

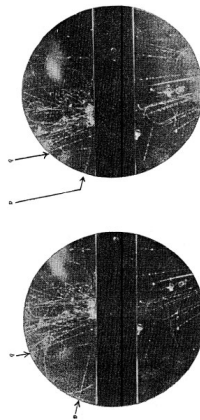


Abbildung: [2]

- Gell-Mann und Nishijima teilen die Kaonen in zwei Doubletts ein  
 $\rightarrow K^0$  und  $\bar{K}^0$  sind zwei unterschiedliche Teilchen
- Beide zerfallen jedoch in  $2\pi$

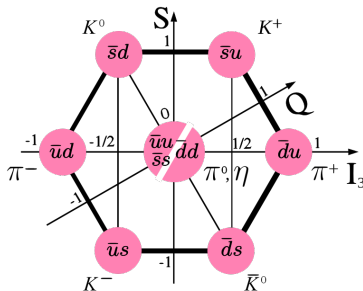


Abbildung: [3]

## Wenn $2\pi$ gemessen wurden, welches Teilchen ist der Ursprung?

## Wenn $2\pi$ gemessen wurden, welches Teilchen ist der Ursprung?

- Lösung durch Gell-Mann und Pais, 1955:  
→ Ursprung ist eine Linearkombination aus  $K^0$  und  $\bar{K}^0$



## Wenn $2\pi$ gemessen wurden, welches Teilchen ist der Ursprung?

- Lösung durch Gell-Mann und Pais, 1955:  
→ Ursprung ist eine Linearkombination aus  $K^0$  und  $\bar{K}^0$
- Wellenfunktion des  $2\pi$  Zustandes erhält C  
→ Inspiration zu  $K_1$  ( $\tau_{K_2} \approx 1000\tau_{K_1}$ )

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle \right) \rightarrow 2\pi$$

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle \right) \rightarrow 3\pi$$

- P- und C-Verletzung 1957 durch Wu et al.
- Landau postuliert darauf CP als erhaltene Symmetrie
- Keine besondere Auswirkung auf Kaon System (ersetze C durch CP)

$$|K_1\rangle \quad \eta_{CP} = +1$$

$$|K_2\rangle \quad \eta_{CP} = -1$$

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

$$CP |2\pi\rangle = + |2\pi\rangle \quad CP |3\pi\rangle = - |3\pi\rangle \quad (L = 0)$$

## Hintergrund von Val Logsdon Fitch

- \*10. März 1923
- 1948: Bachelor in Elektrotechnik an der McGill University
- 1952/53: Arbeit an myonischen Atomen, Interesse an Kaonen beginnt
- 1954: Promotion in Physik an Columbia University
- 1954, Sommer: Tritt der Princeton Cosmic Ray Group bei
- 1955: Messung der Lebenszeit von  $K^+$  am Cosmotron am BNL
- 1957: Versuch  $K_2 \rightarrow \pi l \nu$  zu messen
- 1960: Professor an Princeton University und Arbeit an Formfaktor des  $\pi$  am AGS

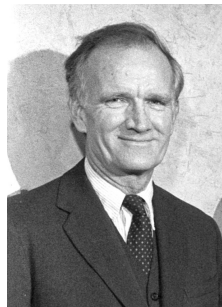


Abbildung: [4]

## Hintergrund von James Watson Cronin

- \*29. September 1931
- 1951: Bachelor in Physik und Mathematik an Southern Methodist University
- 1955: Promotion an University of Chicago und seitdem Arbeit am Cosmotron
- Arbeit an Funkenkammer und Messung von  $\rho \rightarrow 2\pi$
- 1958: Fitch bringt ihn zur Princeton University



Abbildung: [5]

## Das Adair-Experiment

- 1962, Herbst: Diskussion am BNL wegen Ergebnissen der Adair-Group
- Messung der Regeneration von  $K_1$  nach der Propagation von  $K_2$  durch Wasserstoff-Blasenkommer
- Gemessene Regenerationsrate ist viel größer als erwartet
- 1963, Frühling: Fitch bespricht mit Cronin ein Experiment zur Prüfung der Adair Ergebnisse am AGS

## Einschub: Regeneration

- Annahme: Reiner  $K_2$ -Strahl (Mischung ist 1:1)
  - $K^0$  und  $\bar{K}^0$  wechselwirken unterschiedlich mit Materie
  - z.B.  $\bar{K}^0 + p \rightarrow \Lambda \pi^+$
- Mischung ist nicht mehr 1:1 und enthält demnach wieder  $K_1$ -Anteil

## Verlauf des Experiments

- 2 seitiges Proposal:
  1. Messung der Regeneration
  2. Prüfung der CP-Invarianz
  3. Untersuchung neutraler Ströme
- Juni: Detektor wurde zum AGS gebracht und fertiggestellt
- Jim Christenson and Rene Turley schließen sich an
- Geringste Priorität auf CP-Verletzung ( $K_2 \rightarrow 2\pi$ )
- Erst Weihnachten 1963 wertet Turley auf CP-Verletzung aus  
→ Definitive Evidenz
- 27. Juli 1964, Paper: "Evidence for the  $2\pi$  Decay of the  $K_2^0$  Meson"
- Nobelpreis 1980 an Cronin und Fitch

VOLUME 13, NUMBER 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

27 JULY 1964

EVIDENCE FOR THE  $2\pi$  DECAY OF THE  $K_2^0$  MESON\*<sup>†</sup>

J. H. Christenson, J. W. Cronin,<sup>†</sup> V. L. Fitch,<sup>†</sup> and R. Turley<sup>§</sup>

Princeton University, Princeton, New Jersey

(Received 10 July 1964)

Abbildung: [6]



## Prinzip der Messung

### ■ 2 Kriterien:

1. Messe Winkel  $\Theta$  unter dem die Summe der Impulse auftreten
2. Deponierte Energie soll im Bereich der invarianten Masse des Kaons sein

■  $\pi^0$  wird durch fehlenden Beitrag identifiziert

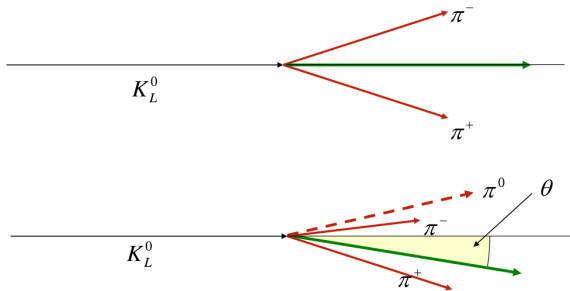


Abbildung: [7]

## Experimenteller Aufbau

- Zweiarmliges Spektrometer
- Funkenkammern vor und hinter einem Magneten
- Szintillatoren und Cherenkov-Zähler (in Koinzidenz) triggern die Funkenkammern
- Heliumgas, um Interaktionen zu verringern

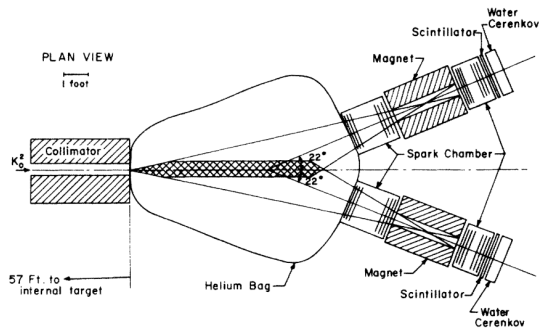


Abbildung: [6]

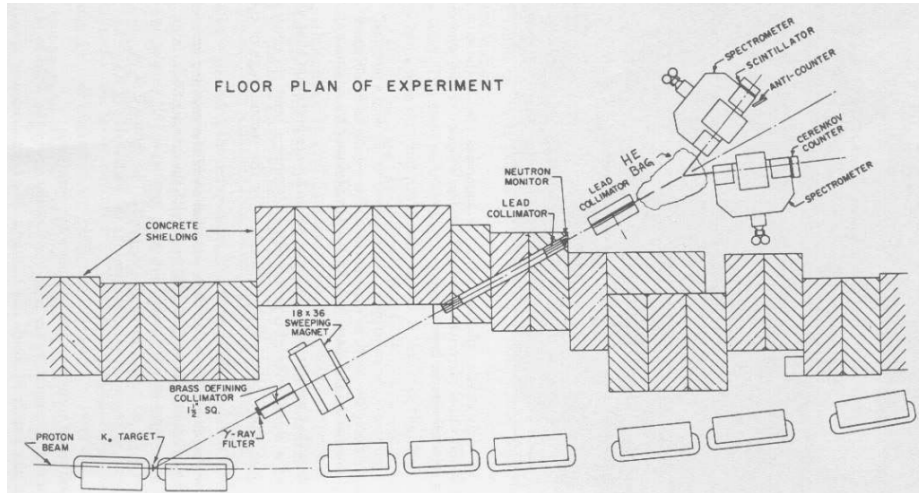


Abbildung: [8]

## Ergebnisse

- $45 \pm 9$  Events von 22700  $K_2$  Zerfällen
- Daten mit Wasserstoff-Target:  $45 \pm 10$  Events; 10 aus Regeneration
- Abschätzung:

$$R = \frac{K_2 \rightarrow \pi^+ \pi^-}{K_2 \rightarrow \text{all charged modes}}$$

$$= (2,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$$

$$\rightarrow |\epsilon|^2 \approx 2,3 \cdot 10^{-3}$$

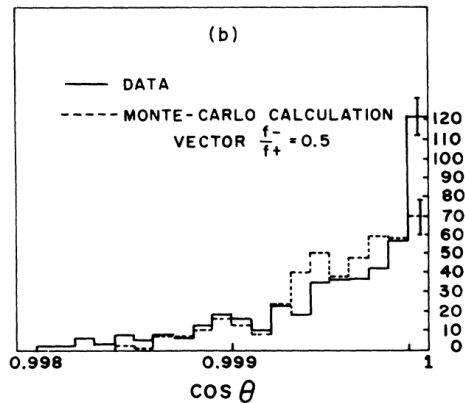


Abbildung: [6]

## Ergebnisse

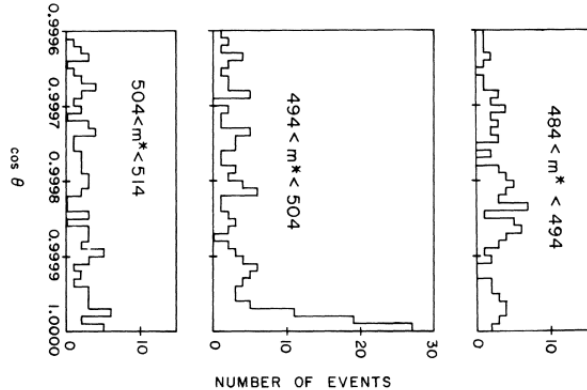


Abbildung: [6]

## Diskussion

- Wie konnte der Peak erklärt werden?
  1. Regeneration im Helium
  2.  $K_{\mu 3}$  und  $K_{e 3}$  Zerfälle
  3. Zerfall in  $\pi^+ \pi^- \gamma$
- Effekte sehr klein oder unwahrscheinlich

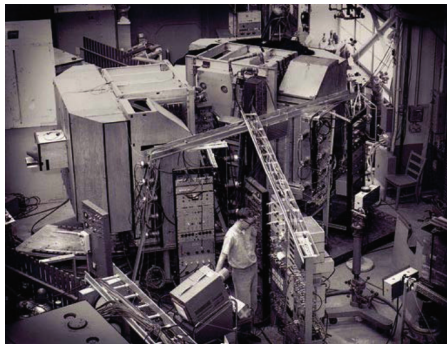


Abbildung: [9]

## Wenn man nicht weiter weiß, fragt man andere

- 1964 International Conference on High Energy Physics bei Dubna in der Soviet Union

As the session neared a close, one of my Soviet colleagues suggested that, perhaps, the effect was due to regeneration of short-lived K mesons ( $K_s$ ) in a fly unfortunately trapped in the helium bag. We did a quick “back of the envelope” estimate of the density of the fly necessary to produce the effect. The density required was far in excess of uranium.

Abbildung: [5]

- Ergebnisse wurden schnell danach am Cern und am Rutherford Laboratory bestätigt

## Beobachtete $K_1$ und $K_2$ sind nicht reine CP-Eigenzustände

- Zur Erinnerung:

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

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

- Nun aber:

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

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

- 2 CP-verletzende Parameter:  $\epsilon$  (Mischung) und  $\epsilon'$  (direkte CP-Verletzung)

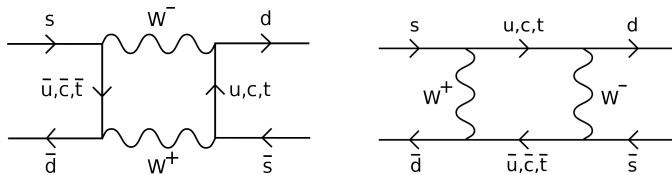


## Die $K^0\bar{K}^0$ -Oszillationen

- Zeitliche Entwicklung eines Kaons, von dem  $|K^0(t=0)\rangle = |K^0\rangle$  bekannt ist:

$$i\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} |K^0(t)\rangle \\ |\bar{K}^0(t)\rangle \end{pmatrix} = \left( M - \frac{i}{2}\Gamma \right) \begin{pmatrix} |K^0(t)\rangle \\ |\bar{K}^0(t)\rangle \end{pmatrix}$$

- $M$  und  $\Gamma$  hermitesch und wegen CPT-Invarianz  $M_{11} = M_{22}$ ,  $\Gamma_{11} = \Gamma_{22}$
- Nebendiagonalelemente resultieren aus Box-Diagrammen [10]



## Die $K^0\bar{K}^0$ -Oszillationen

- Durch Diagonalisieren des Hamiltonian ergeben sich die Eigenzustände

$$|K_S\rangle = p |K^0\rangle + q |\bar{K}^0\rangle$$

$$|K_L\rangle = p |K^0\rangle - q |\bar{K}^0\rangle$$

- Zeitliche Entwicklung mit Eigenwerten  $M_i$  und  $\Gamma_i$  lautet nun

$$|K_{S,L}(t)\rangle = \exp[-(iM_{S,L} + \Gamma_{S,L}/2)t] |K_{S,L}\rangle$$

## Die $K^0\bar{K}^0$ -Oszillationen

- Invertieren der Eigenzustände und Einsetzen der Zeitentwicklung

$$\begin{aligned}
 |K^0(t)\rangle &= g_+(t) |K^0\rangle + \frac{q}{p} g_-(t) |\bar{K}^0\rangle & \Gamma &= \frac{\Gamma_L + \Gamma_S}{2} \\
 |\bar{K}^0(t)\rangle &= \frac{p}{q} g_-(t) |K^0\rangle + g_+(t) |\bar{K}^0\rangle & \Delta\Gamma &= \Gamma_S - \Gamma_L \\
 g_+(t) &= \exp(-imt - \Gamma t/2) \left[ \cosh\left(\frac{\Delta\Gamma t}{4}\right) \cos\left(\frac{\Delta m t}{2}\right) \right. \\
 &\quad \left. - i \sinh\left(\frac{\Delta\Gamma t}{4}\right) \sin\left(\frac{\Delta m t}{2}\right) \right]
 \end{aligned}$$

## Die $K^0\bar{K}^0$ -Oszillationen

- Reiner  $|K^0\rangle$ -Zustand wird niemals wieder rein

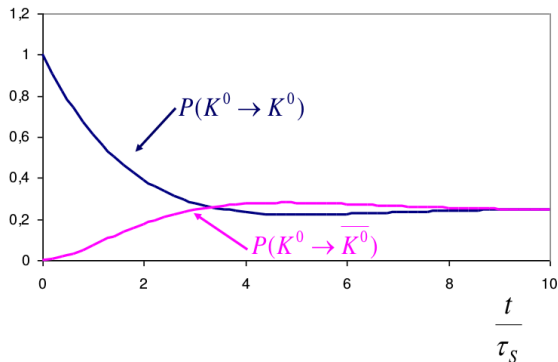


Abbildung: [7]

Theorie

## CP-Verletzung in der Mischung

- CP-Verletzung äußert sich in der Mischung durch  
 $P(K^0 \rightarrow \bar{K}^0) \neq P(\bar{K}^0 \rightarrow K^0)$ :

$$P(K^0 \rightarrow \bar{K}^0) = \frac{1}{4} \left| \frac{p}{q} \right|^2 \left[ e^{-\Gamma_s t} + e^{-\Gamma_l t} - 2e^{-(\Gamma_s + \Gamma_l)t/2} \cos(\Delta m t) \right]$$

$$P(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) = \frac{1}{4} \left| \frac{q}{p} \right|^2 \left[ e^{-\Gamma_s t} + e^{-\Gamma_l t} - 2e^{-(\Gamma_s + \Gamma_l)t/2} \cos(\Delta m t) \right]$$

- CP-Verletzung:

$$\left| \frac{q}{p} \right| \neq 1$$

## CP-Verletzung im Zerfall

- Direkte CP-Verletzung äußert sich durch  $P(A \rightarrow B) \neq P(\bar{A} \rightarrow \bar{B})$
- Messung benötigt Interferenz von 2 Feynmandiagrammen unterschiedlicher starker und schwacher Phasen

## Wie können die Parameter gemessen werden?

- Messbare Parameter:

$$|\eta_{+-}|e^{i\Phi_{+-}} = \frac{\text{amp}(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-)}{\text{amp}(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-)} \quad |\eta_{00}|e^{i\Phi_{00}} = \frac{\text{amp}(K_L \rightarrow \pi^0\pi^0)}{\text{amp}(K_S \rightarrow \pi^0\pi^0)}$$

- Zusammenhang:

$$\eta_{+-} \approx \epsilon + \epsilon' \quad \text{und} \quad \eta_{00} \approx \epsilon - 2\epsilon'$$

## Theorie der schwachen Wechselwirkung

- Super Weak Theory von Wolfenstein 1964
  1. CP-verletzender Term nur im Kaon Sektor
  2. Keine direkte CP-Verletzung ( $\epsilon' = 0$ )
  
- CKM-Matrix 1973
  1. 3. Familie als Quelle für CP-Verletzung
  2. 1973 war nicht mal das c-Quark bestätigt

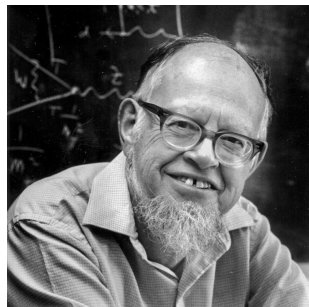


Abbildung: Lincoln  
Wolfenstein [11]



## Erste Messungen direkter CP-Verletzung? [12]

- 1988: Na31 am CERN und E731 am Fermilab messen

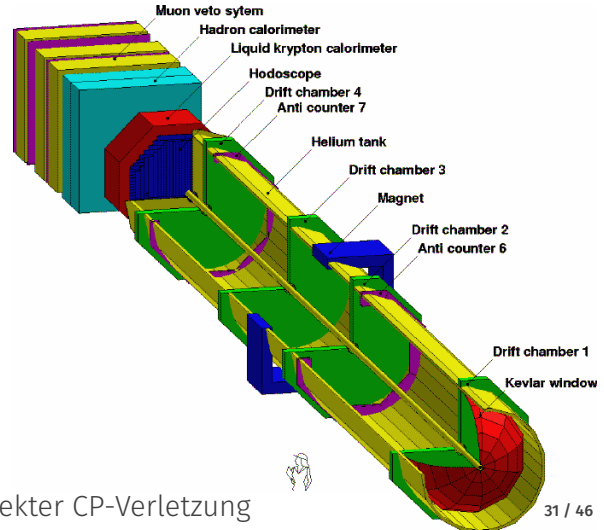
$$\frac{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-)/\Gamma(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-)}{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^0\pi^0)/\Gamma(K_S \rightarrow \pi^0\pi^0)} \cong 1 - 6Re\left(\frac{\epsilon'}{\epsilon}\right)$$

- Na31:  $Re(\epsilon'/\epsilon) = (23,0 \pm 6,5) \cdot 10^{-4}$
- E731:  $Re(\epsilon'/\epsilon) = (7,4 \pm 5,9) \cdot 10^{-4}$

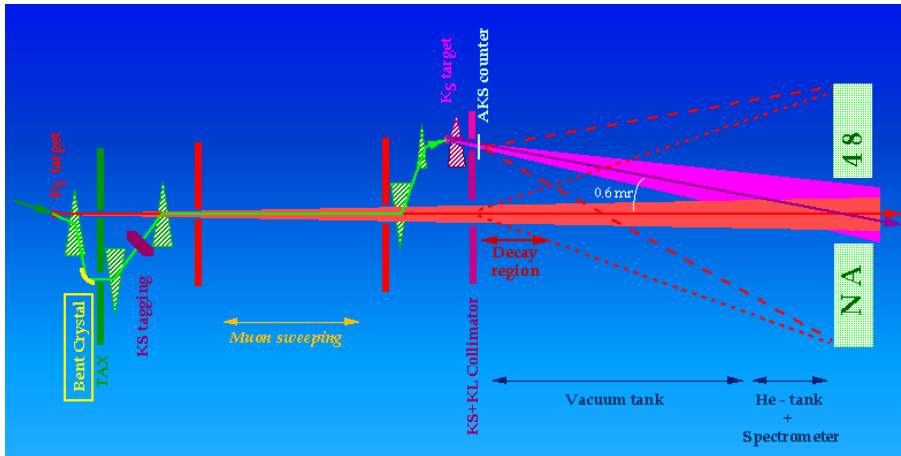
→ Kein eindeutiger Hinweis auf direkte CP-Verletzung  
→ Benötige höhere Präzision (Na48, KTeV)

## Na48 [13]

- Simultane Messung von  $K_S$  und  $K_L$
- $Re(\epsilon'/\epsilon) = (14,7 \pm 2,2) \cdot 10^{-4}$



## Na48 [13]



## Heutige Ergebnisse [14]

$$|\eta_{00}| = (2,220 \pm 0,011) \cdot 10^{-3}$$

$$|\eta_{+-}| = (2,232 \pm 0,011) \cdot 10^{-3}$$

$$|\epsilon| = (2,228 \pm 0,011) \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Re} \left( \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right) = (16,6 \pm 2,3) \cdot 10^{-4}$$

$$\Phi_{+-} = (43,51 \pm 0,05)^\circ$$

$$\Phi_{00} = (43,52 \pm 0,05)^\circ$$

## Ausblick

- Messungen im B-Sektor und D-Sektor
- Neutrinooszillationen (PMNS-Matrix)
- Starkes CP-Problem (Axion)

## Quellen I



Val L. Fitch. *Some Bits Of The History Of CP-Violation*. 1999. URL: <http://www.slac.stanford.edu/gen/meeting/ssi/1999/media/fitch.pdf>.



CERN. *Clifford Butler and George Rochester discover the kaon, first strange particle*. 2018. URL: <https://timeline.web.cern.ch/clifford-butler-and-george-rochester-discover-the-kaon-first-strange-particle>.








Wikipedia. *Eightfold Way*. Dez. 2018. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Eightfold\\_Way](https://de.wikipedia.org/wiki/Eightfold_Way).








Val L. Fitch. *The Discovery Of Charge-Conjugation Parity Asymmetry*, nobel lecture. Dez. 1980. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1980/fitch/lecture/>.

## Quellen II

-  James W. Cronin. *CP Symmetry Violation - The Search For Its Origin*, nobel lecture. Dez. 1980. URL:  
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1980/cronin/facts/>.
-  J. H. Christenson et al. "Evidence for the  $2\pi$  Decay of the  $K_2^0$  Meson". In: *Phys. Rev. Lett.* 13 (4 Juli 1964), S. 138–140. DOI:  
10.1103/PhysRevLett.13.138. URL:  
<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.138>.
-  Bernhard Spaan. *Teilchenphysik II - Vorlesung, Skript*. Aug. 2018.
-  Simon Lacoste-Julien. *Discovery of CP Violation*. Apr. 2002.
-  Pierre Piroue A. J. Stewart Smith J. W. Cronin. Val L. Fitch: *Biographical Memoirs*. 2016.

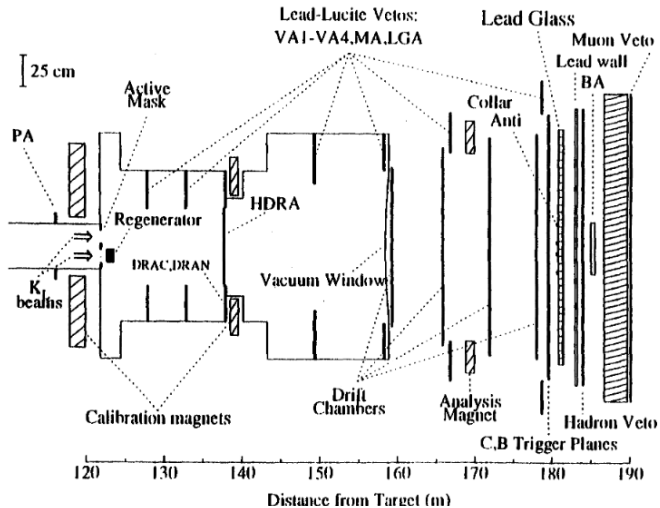
## Quellen III

-  Wikipedia. *CP violation*. Dez. 2018. URL:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/CP\\_violation](https://en.wikipedia.org/wiki/CP_violation).
-  Alchetron. *Lincoln Wolfenstein*. Dez. 2018. URL:  
<https://alchetron.com/Lincoln-Wolfenstein>.
-  Yee Bob Hsiung. “An observation of direct- CP violation -  $\epsilon'/\epsilon$  result from KTeV”. In: *Nuclear Physics B Proceedings Supplements* 86 (Juni 2000), S. 312–321. DOI: 10.1016/S0920-5632(00)00581-8.
-  CERN. *Webseite von Na48*. Dez. 2018. URL:  
<http://na48.web.cern.ch/NA48/>.
-  C. Patrignani et al. et al. “Particle Physics Booklet”. In: *Phys.Rev.* (2016).



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

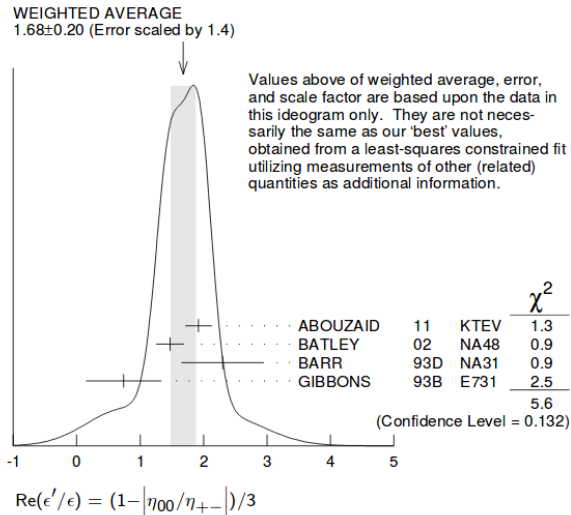
## E731

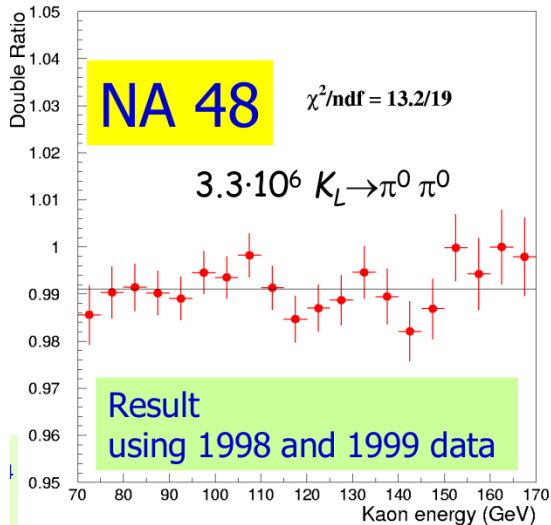


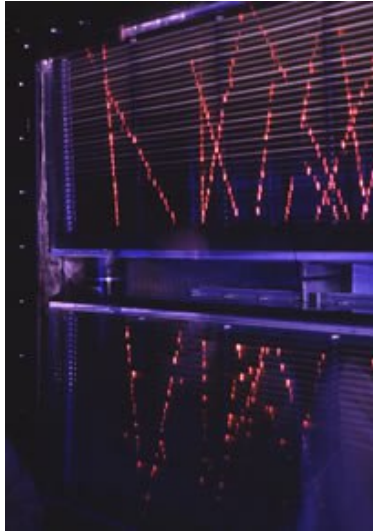
Anhang

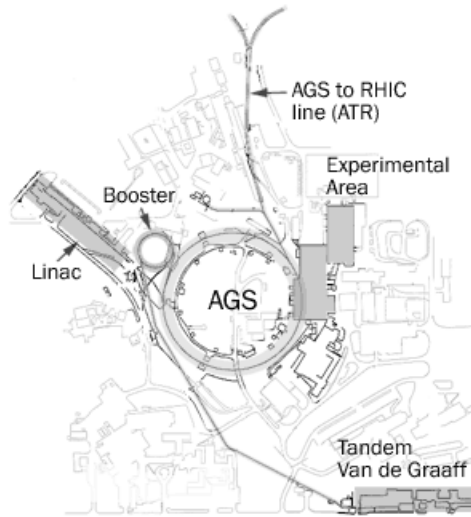
## Zusammenhänge

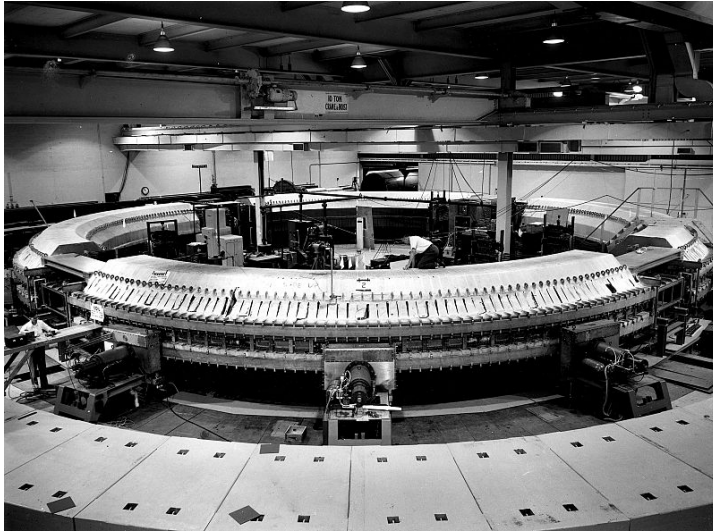
$$\frac{q}{p} = -\frac{\Delta m + i\Delta\Gamma/2}{2M_{12} - i\Gamma_{12}} = \frac{1 - \epsilon}{1 + \epsilon}$$
$$\epsilon = \frac{1}{3}(\eta_{00} + 2\eta_{+-})$$













# The Superweak Theory 35 Years Later

L. Wolfenstein\*

June 14, 1999

## Abstract

The origins, possible rationale and definition of the superweak theory are reviewed. The observation of direct CP violation in  $K_L$  decay provides the first significant evidence against the theory. The much larger direct CP violation expected in  $B$  decays should definitively kill it.