

# CP-Verletzung im neutralen Kaon-Zerfall

Dennis Sauter

27. November 2015

# Inhaltsangabe

## ① Was ist CP überhaupt?

## ② Theorie

Historisches  
Hintergrund

## ③ Experiment

Beteiligte  
Aufbau  
Funkenkammer  
Resultate  
Folgen

## ④ heutiges Verständnis "Anwendung "

# Was ist CP überhaupt?

- C: Charge conjugation
- Teilchen  $\Leftrightarrow$  Antiteilchen
- z.B.  $|e^{-}\rangle = \hat{C} |e^{+}\rangle$
- P: Parity
- Spiegelung des Ortes  $x \Leftrightarrow -x$
- Teilchen (linkshändig)  $\rightarrow$  Teilchen (rechtshändig)  $\rightarrow$  Antiteilchen (rechtshändig)

$\Rightarrow$  gleiches Verhalten unter schwacher Wechselwirkung

# Theorie damalige Kenntnisse/Annahmen

- Jahr: 1964
- Annahme: CP ist eine Erhaltungsgröße
- 10 Jahre zuvor: Paritätsverletzung bestätigt
- Frage: CP ebenfalls verletzt?
- Up-/ Down-/ Strange-Quark bekannt (mathematisches Konstrukt)
- Charm-/ Bottom-/ Top-Quark unbekannt
- Schwache Wechselwirkung nicht auf Quarkniveau, stattdessen Fermi-Theorie

⇒ Fundamentale Theorie zum Verständnis nicht vorhanden, lediglich Beobachtung des Vorgangs

# Theorie damalige Kenntnisse/Annahmen

- Beobachtung zweier neutraler Kaonen
- $K_S$  und  $K_L$
- Unterscheiden sich in Lebensdauer
$$\tau(K_S) = 0,9 \times 10^{-10} \text{ s} \quad , \quad \tau(K_L) = 0,5 \times 10^{-7} \text{ s}$$
$$\frac{\tau(K_S)}{\tau(K_L)} \approx 0,002$$
$$c\tau(K_S) = 2,7 \text{ cm} \quad , \quad c\tau(K_L) = 15 \text{ m}$$

Damals  $K_1$  und  $K_2$  genannt

# Theorie Hintergrund

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

$$\hat{P}|K^0\rangle = -|K^0\rangle \quad , \quad \hat{P}|\bar{K}^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle$$

$$\hat{C}|K^0\rangle = e^{i\xi}|\bar{K}^0\rangle \quad , \quad \hat{C}|\bar{K}^0\rangle = e^{i\xi}|K^0\rangle$$

Wähle  $\xi = \pi$

$$\rightarrow \hat{C}|K^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle \quad , \quad \hat{C}|\bar{K}^0\rangle = -|K^0\rangle$$

$$\Rightarrow \hat{C}\hat{P}|K^0\rangle = +|\bar{K}^0\rangle \quad , \quad \hat{C}\hat{P}|\bar{K}^0\rangle = +|K^0\rangle$$

# Theorie Hintergrund

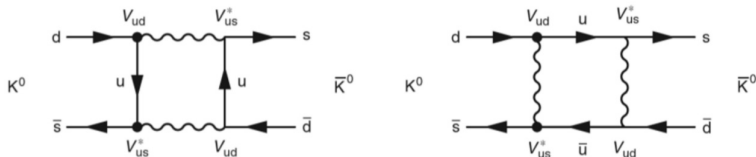


Abbildung: 2 von 18 möglichen Diagrammen zur Kaon-Oszillation

Oszillationen zwischen Kaon und Anti-Kaon

Getrennte Betrachtung nicht möglich

"Kaon-Zustände" = Stationäre Zustände des *gemeinsamen* Hamiltonoperators

# Theorie Hintergrund

mögliche Linearkombinationen:

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

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

$$\hat{C}\hat{P}|K_1\rangle = + |K_1\rangle \quad , \quad \hat{C}\hat{P}|K_2\rangle = - |K_2\rangle$$

# Theorie Hintergrund

Untersuchte Zerfallskanäle:

$$K^0 \rightarrow \pi\pi \quad , \quad K^0 \rightarrow \pi\pi\pi$$

$$\hat{C}\hat{P}(\pi^0\pi^0) = +1 \quad , \quad \hat{C}\hat{P}(\pi^+\pi^-) = +1$$

$$\hat{C}\hat{P}(\pi^0\pi^0\pi^0) = -1 \quad , \quad \hat{C}\hat{P}(\pi^+\pi^-\pi^0) = -1$$

$$\Rightarrow K_1 \rightarrow \pi\pi \quad , \quad K_2 \rightarrow \pi\pi\pi$$

unter Annahme von CP-Erhaltung theoretisch einzig  
beobachtbare Zerfälle

# Experiment Beteiligte

J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay

Brookhaven, New York, USA

keine Neuentdeckung, lediglich Überprüfung

# Aufbau

CP-Verletzung  
im neutralen  
Kaon-Zerfall

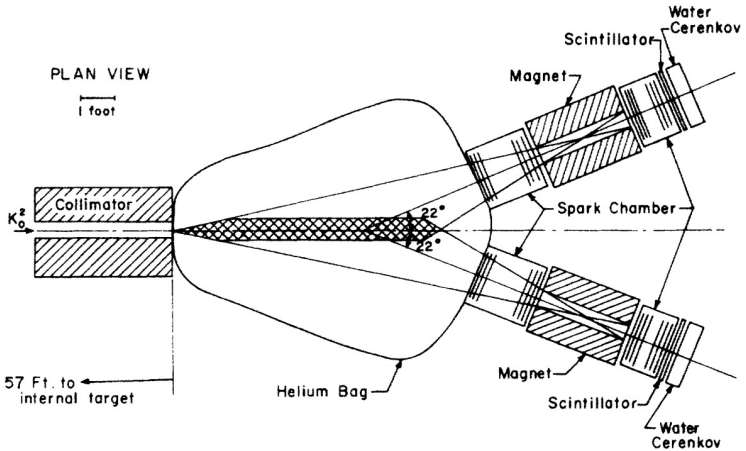
Dennis Sauter

Was ist CP  
überhaupt?

Theorie  
Historisches  
Hintergrund

Experiment  
Beteiligte  
Aufbau  
Funkenkammer  
Resultate  
Folgen

heutiges  
Verständnis  
"Anwendung"



## Funkenkammer



**Abbildung:** Spark chamber at Brookhaven National Laboratory

# Funkenkammer

- Edelgas gefüllte Kammer mit HV-Plattenkondensatoren
- Stoßionisation auf Teilchenbahn
- Beschleunigung durch angelegtes elektrisches Feld
- Kaskadenionisation bis Platten sich entladen
- Funke entspricht der Teilchenbahn
- Kondensatorladezeit = Totzeit  $\tau \sim 1\text{ s}$

# Funkenkammer

## Vorteile der Funkenkammer

- kein manueller Wiederaufbau nach jedem Bild
- schnelle Datensammlung mit einem Bild pro Zeit  $\tau$
- verhältnismäßig lange Speicherzeit im Detektor
- fast ausschließlich Bilder verwertbarer Daten

## Resultate

Aus 22700 Zerfällen konnten  $35 \pm 10$  dem Zerfall zu 2 Pionen nachgewiesen werden (1,5 ‰)

| mögliche Erklärung                                                                                       | Grund des Scheiterns                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Regeneration in Aufbau<br>(Helium, Kollimator)                                                           | abschätzbar und<br>um Faktor $10^{-6}$ zu schwach                                                            |
| "unsichtbare" Leptonische Zerfälle<br>$\rightarrow \pi + e + \nu_e$<br>$\rightarrow \pi + \mu + \nu_\mu$ | Aus Impulserhaltung:<br>$\overline{E_{\nu_e}} = 17 \text{ MeV}$<br>$\overline{E_{\nu_\mu}} = 39 \text{ MeV}$ |
| Zusätzliches Aussenden<br>eines Photons                                                                  | Aus Impulserhaltung:<br>$\overline{E_\gamma} = 1 \text{ MeV}$ aus 209 MeV<br>verfügbarer Energie             |

## Resultate

The presence of a two-pion decay mode implies that the  $K_2^0$  meson is not a pure eigenstate of  $CP$ . Expressed as  $K_2^0 = 2^{-1/2}[(K_0 - \bar{K}_0) + \epsilon(K_0 + \bar{K}_0)]$  then  $|\epsilon|^2 \cong R_T \tau_1 \tau_2$  where  $\tau_1$  and  $\tau_2$  are the  $K_1^0$  and  $K_2^0$  mean lives and  $R_T$  is the branching ratio including decay to two  $\pi^0$ . Using  $R_T = \frac{3}{2}R$  and the branching ratio quoted above,  $|\epsilon| \cong 2.3 \times 10^{-3}$ .

$$K_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \underbrace{K_2}_{\rightarrow \pi\pi\pi} + \epsilon \underbrace{K_1}_{\rightarrow \pi\pi} \right)$$

$$\underbrace{K_L}_{\text{Masse-EZ}} \neq \underbrace{K_2}_{\text{CP-EZ}}$$

- Anpassung aktueller Theorien
- " *Baryogenese* "  
⇒ heute: Kein ausreichend starker Effekt
- Suche nach weiteren Vorgängen (B-Mesonen)
- Neue Frage: nächstgrößere Symmetrie CPT ebenfalls verletzt?

## heutiges Verständnis

CP-Verletzung entspricht "Interferenzeffekten" aufgrund von komplexer Phase in der CKM-Matrix (Cabibbo-Kobayashi-Masukawa-Matrix)

- mindestens 2 Feynman-Diagramme beschreiben die Interaktion mit Amplitude A
- "starke Phase" und "schwache Phase" benötigt
- schwache Phase wechselt Vorzeichen unter CP-Transformation
- starke Phase behält Vorzeichen unter CP-Transformation

$$A_1 = A_1, \quad A_2 = A_2 e^{i\Phi_W} e^{i\Phi_S}$$

$$|A_1 + A_2|^2 = A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 (e^{i\Phi_W} e^{i\Phi_S} + e^{-i\Phi_W} e^{-i\Phi_S})$$

$$|A_1^{CP} + A_2^{CP}|^2 = A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 (e^{-i\Phi_W} e^{i\Phi_S} + e^{i\Phi_W} e^{-i\Phi_S})$$

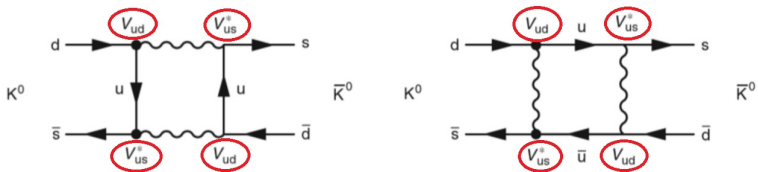
$$|A_1 + A_2|^2 - |A_1^{CP} + A_2^{CP}|^2 = -4A_1 A_2 \sin(\Phi_S) \sin(\Phi_W) \neq 0$$

# heutiges Verständnis

$$\begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.974 & 0.225 & 0.004 \\ 0.225 & 0.973 & 0.041 \\ 0.009 & 0.040 & 0.999 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

Rechts: Wolfenstein-Parametrisierung mit Parametern  $\lambda, \rho$  &  $\eta$

Zur Erinnerung:



$V_{ij}$  entsprechen Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen  
Up-Type und Down-Type Quarks

# "Anwendung"

Unterscheidung zwischen Materie und Antimaterie möglich.

$$\delta = \frac{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e) - \Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e) + \Gamma(K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e)} = 0,327 \pm 0,012 \%$$

In Worten: Im Mittel entstehen beim Zerfall 0,66 % mehr Positronen als Elektronen