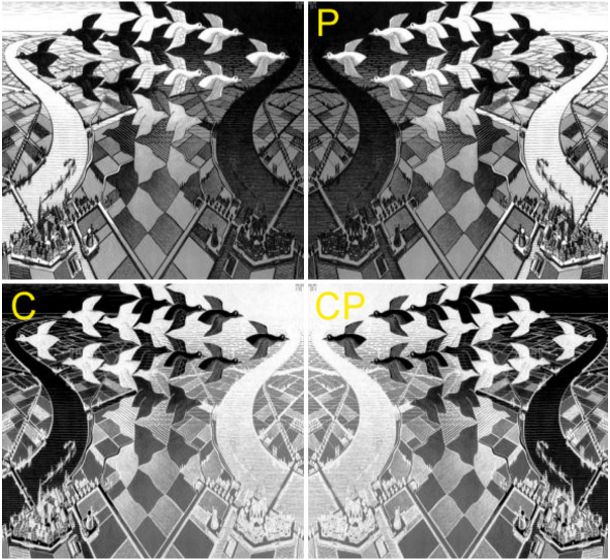
Entdeckung der CP-Verletzung im Kaonzerfall

Jorrit Lion

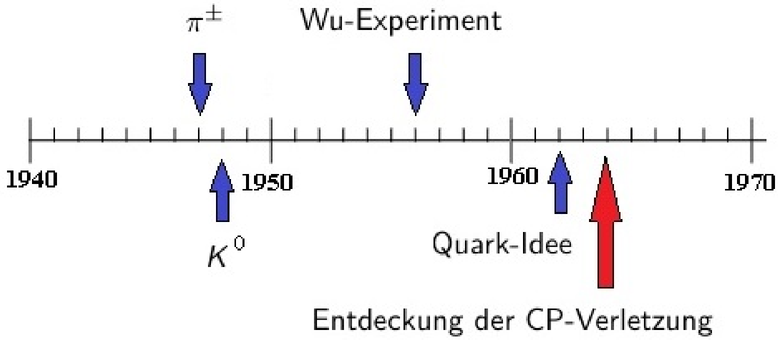
09.01.2015

Veranschaulichung



Inhaltsverzeichnis

Historische Einordnung



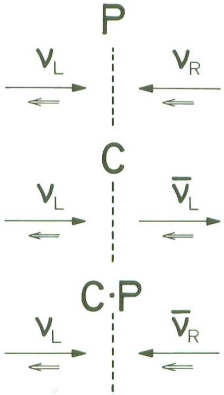
1964, Princeton: J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay

P Verletzung und CP-Erhaltung

- Wu-Experiment 1956
  $\rightarrow$P-Verletzung

P Verletzung und CP-Erhaltung

- Wu-Experiment 1956
  $\rightarrow$P-Verletzung
- CP-Erhaltung



Das Kaon

- 1950 in der kosmischen Höhenstrahlung entdeckt

Das Kaon

- 1950 in der kosmischen Höhenstrahlung entdeckt
- Strangeness: 1 bzw. -1

Das Kaon

- 1950 in der kosmischen Höhenstrahlung entdeckt
- Strangeness: 1 bzw. -1
- $K^0 = |d\bar{s}\rangle$, $\overline{K^0} = |\bar{d}s\rangle$

Das Kaon

- 1950 in der kosmischen Höhenstrahlung entdeckt
- Strangeness: 1 bzw. -1
- $K^0 = |d\bar{s}\rangle$, $\overline{K^0} = |\bar{d}s\rangle$
- $K^+ = |u\bar{s}\rangle$, $K^- = |\bar{u}s\rangle$

Das Kaon

- 1950 in der kosmischen Höhenstrahlung entdeckt
- Strangeness: 1 bzw. -1
- $K^0 = |d\bar{s}\rangle$, $\overline{K^0} = |\bar{d}s\rangle$
- $K^+ = |u\bar{s}\rangle$, $K^- = |\bar{u}s\rangle$
- Masse:
  K^0, $\overline{K^0}$: 498 MeV
  K^+,K^-: 494 MeV

Das Kaon

- 1950 in der kosmischen Höhenstrahlung entdeckt
- Strangeness: 1 bzw. -1
- $K^0 = |d\bar{s}\rangle$, $\overline{K^0} = |\bar{d}s\rangle$
- $K^+ = |u\bar{s}\rangle$, $K^- = |\bar{u}s\rangle$
- Masse:
  K^0, $\overline{K^0}$: 498 MeV
  K^+,K^-: 494 MeV
- Zerfall in 2π und in 3π möglich

Die intrinsische Parität des Kaons

- Parität ist Eigenwert des Paritätsoperators

Die intrinsische Parität des Kaons

- Parität ist Eigenwert des Paritätsoperators
- $P(Fermionen) = -P(Antifermion)$

Die intrinsische Parität des Kaons

- Parität ist Eigenwert des Paritätsoperators
- $P(Fermionen) = -P(Antifermion)$
- $P(Fermionen) = +1$, per Definition

Die intrinsische Parität des Kaons

- Parität ist Eigenwert des Paritätsoperators
- $P(Fermionen) = -P(Antifermion)$
- $P(Fermionen) = +1$, per Definition

$$P : \vec{r} \to -\vec{r}$$
$$P : (r, \theta, \phi) \to (r, \pi - \theta, \pi + \phi)$$
$$P(Y_{lm}(\theta, \phi)) = Y_{lm}(\pi - \theta, \pi + \phi)) = (-1)^l Y_{lm}(\theta, \phi)$$
$$P = P_a \; P_b \; (-1)^l$$

- für Mesonen mit $l = 0$: $P_a = +1$, $P_b = -1 \to P = -1$

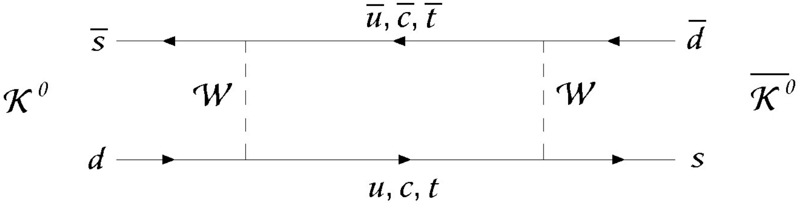
Die intrinsische Parität des Kaons

- Parität ist Eigenwert des Paritätsoperators
- $P(Fermionen) = -P(Antifermion)$
- $P(Fermionen) = +1$, per Definition

$$P : \vec{r} \rightarrow -\vec{r}$$
$$P : (r, \theta, \phi) \rightarrow (r, \pi - \theta, \pi + \phi)$$
$$P(Y_{lm}(\theta, \phi)) = Y_{lm}(\pi - \theta, \pi + \phi)) = (-1)^l Y_{lm}(\theta, \phi)$$
$$P = P_a \; P_b \; (-1)^l$$

- für Mesonen mit $l = 0$: $P_a = +1$, $P_b = -1 \rightarrow P = -1$
- $P \left| K^0 \right\rangle = - \left| K^0 \right\rangle$

Übergänge im Kaonsystem



Wie zeigt man CP-Verletzung?

- C-Operator: Teilchen $\rightarrow$ Antiteilchen

Wie zeigt man CP-Verletzung?

- C-Operator: Teilchen $\rightarrow$ Antiteilchen
- P-Operator: Raumumkehr: $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$

Wie zeigt man CP-Verletzung?

- C-Operator: Teilchen $\rightarrow$ Antiteilchen
- P-Operator: Raumumkehr: $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$
- $\boxed{K^0 \rightarrow \overline{K^0}} \quad \overset{CP}{\rightarrow} \quad \boxed{\overline{K^0} \rightarrow K^0}$

Wie zeigt man CP-Verletzung?

- C-Operator: Teilchen $\rightarrow$ Antiteilchen
- P-Operator: Raumumkehr: $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$
- $\boxed{K^0 \rightarrow \overline{K^0}} \quad \stackrel{\text{CP}}{\rightarrow} \quad \boxed{\overline{K^0} \rightarrow K^0}$

Für CP-Verletzung: Vergleich von Wahrscheinlichkeiten.

Wie zeigt man CP-Verletzung?

- C-Operator: Teilchen $\rightarrow$ Antiteilchen
- P-Operator: Raumumkehr: $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$
- $\boxed{K^0 \rightarrow \overline{K^0}} \quad \stackrel{CP}{\rightarrow} \quad \boxed{\overline{K^0} \rightarrow K^0}$

Für CP-Verletzung: Vergleich von Wahrscheinlichkeiten.
Zeige:

$$P(K^0 \rightarrow \overline{K^0}) \neq P(\overline{K^0} \rightarrow K^0)$$

Die Massen-Eigenzustände

- K^0 und $\overline{K^0}$ können ineinander übergehen

Die Massen-Eigenzustände

- K^0 und $\overline{K^0}$ können ineinander übergehen
- K^0 und $\overline{K^0}$ keine EZ von $\mathcal{H}$

Die Massen-Eigenzustände

- K^0 und $\overline{K^0}$ können ineinander übergehen
- K^0 und $\overline{K^0}$ keine EZ von $\mathcal{H}$

$$i\frac{d}{dt}\left|\Psi(t)\right\rangle = \mathcal{H}\left|\Psi(t)\right\rangle = (m - \frac{i}{2}\Gamma)\left|\Psi(t)\right\rangle$$

$$i\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} K^0 \\ \overline{K^0} \end{pmatrix} = \mathcal{H}\begin{pmatrix} K^0 \\ \overline{K^0} \end{pmatrix} = (m - \frac{i}{2}\Gamma)\begin{pmatrix} K^0 \\ \overline{K^0} \end{pmatrix}$$

Die Massen-Eigenzustände

- K^0 und $\overline{K^0}$ können ineinander übergehen
- K^0 und $\overline{K^0}$ keine EZ von $\mathcal{H}$

$$i\frac{d}{dt}\left|\Psi(t)\right\rangle = \mathcal{H}\left|\Psi(t)\right\rangle = (m - \frac{i}{2}\Gamma)\left|\Psi(t)\right\rangle$$

$$i\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} K^0 \\ \overline{K^0} \end{pmatrix} = \mathcal{H}\begin{pmatrix} K^0 \\ \overline{K^0} \end{pmatrix} = (m - \frac{i}{2}\Gamma)\begin{pmatrix} K^0 \\ \overline{K^0} \end{pmatrix}$$

Diagonalisieren mit Massen-Eigenzuständen:
$\left|K_L\right\rangle := p\left|K^0\right\rangle + q\left|\overline{K^0}\right\rangle$ (L: Langlebiges Kaon)
$\left|K_S\right\rangle := p\left|K^0\right\rangle - q\left|\overline{K^0}\right\rangle$ (S: Kurzlebiges Kaon)
$|p|^2 + |q|^2 = 1$

Die Massen-Eigenzustände

- K^0 und $\overline{K^0}$ können ineinander übergehen
- K^0 und $\overline{K^0}$ keine EZ von $\mathcal{H}$

$$i\frac{d}{dt}\left|\Psi(t)\right\rangle = \mathcal{H}\left|\Psi(t)\right\rangle = (m - \frac{i}{2}\Gamma)\left|\Psi(t)\right\rangle$$
$$i\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} K^0 \\ \overline{K^0} \end{pmatrix} = \mathcal{H}\begin{pmatrix} K^0 \\ \overline{K^0} \end{pmatrix} = (m - \frac{i}{2}\Gamma)\begin{pmatrix} K^0 \\ \overline{K^0} \end{pmatrix}$$

Diagonalisieren mit Massen-Eigenzuständen:
$\left|K_L\right\rangle := p\left|K^0\right\rangle + q\left|\overline{K^0}\right\rangle$ (L: Langlebiges Kaon)
$\left|K_S\right\rangle := p\left|K^0\right\rangle - q\left|\overline{K^0}\right\rangle$ (S: Kurzlebiges Kaon)
$|p|^2 + |q|^2 = 1$
$\rightarrow$klar def. Masse, klar def. Lebensdauer

$P(K^0 \to \overline{K^0}) \neq P(\overline{K^0} \to K^0)$

$P(K^0 \to \overline{K^0}) \neq P(\overline{K^0} \to K^0)$

K^0 und $\overline{K^0}$ in der Zeitentwicklung:

$$|K^0(t)\rangle = f_+(t)\,|K^0\rangle - \frac{q}{p} f_-(t)\,|\overline{K^0}\rangle$$
$$|\overline{K^0(t)}\rangle = f_+(t)\,|\overline{K^0}\rangle + \frac{p}{q} f_-(t)\,|K^0\rangle$$

mit q und p in $|K_L\rangle := p\,|K^0\rangle + q\,|\overline{K^0}\rangle$, $|K_S\rangle := p\,|K^0\rangle - q\,|\overline{K^0}\rangle$

$P(K^0 \to \overline{K^0}) \neq P(\overline{K^0} \to K^0)$

K^0 und $\overline{K^0}$ in der Zeitentwicklung:

$$
\begin{aligned}
|K^0(t)\rangle &= f_+(t)\,|K^0\rangle - \frac{q}{p} f_-(t)\,|\overline{K^0}\rangle \\
|\overline{K^0(t)}\rangle &= f_+(t)\,|\overline{K^0}\rangle + \frac{p}{q} f_-(t)\,|K^0\rangle
\end{aligned}
$$

mit q und p in $|K_L\rangle := p\,|K^0\rangle + q\,|\overline{K^0}\rangle$, $|K_S\rangle := p\,|K^0\rangle - q\,|\overline{K^0}\rangle$

$P(K^0 \to \overline{K^0}) = |\frac{q}{p}|^2 |f_-(t)|^2$
$P(\overline{K^0} \to K^0) = |\frac{p}{q}|^2 |f_-(t)|^2$

$P(K^0 \to \overline{K^0}) \neq P(\overline{K^0} \to K^0)$

K^0 und $\overline{K^0}$ in der Zeitentwicklung:

$$|K^0(t)\rangle = f_+(t)\,|K^0\rangle - \frac{q}{p} f_-(t)\,|\overline{K^0}\rangle$$
$$|\overline{K^0(t)}\rangle = f_+(t)\,|\overline{K^0}\rangle + \frac{p}{q} f_-(t)\,|K^0\rangle$$

mit q und p in $|K_L\rangle := p\,|K^0\rangle + q\,|\overline{K^0}\rangle$, $|K_S\rangle := p\,|K^0\rangle - q\,|\overline{K^0}\rangle$

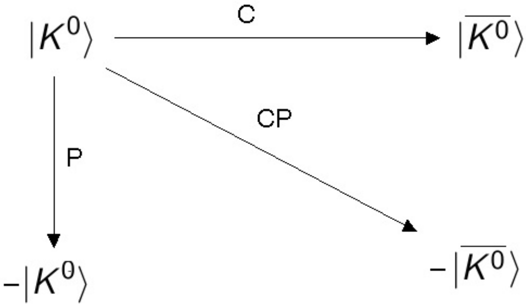
$P(K^0 \to \overline{K^0}) = |\frac{q}{p}|^2 |f_-(t)|^2$
$P(\overline{K^0} \to K^0) = |\frac{p}{q}|^2 |f_-(t)|^2$

$\boxed{\to \text{Ist } |q|=|p| \text{ ?}}$

Das Kaon unter CP-Transformation

$$
\begin{tikzcd}
|K^0\rangle \arrow[rr, "C"] \arrow[d, "P"] \arrow[drr, "CP"] & & |\overline{K^0}\rangle \\
-|K^0\rangle & & -|\overline{K^0}\rangle
\end{tikzcd}
$$

Das Kaon unter CP-Transformation



$\rightarrow$ K^0 und $\overline{K^0}$ keine CP-EZ

Konstruktion der CP Eigenzustände

Eigenzustände von CP:

$$|K_1^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\overline{K^0}\rangle)$$
$$|K_2^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\overline{K^0}\rangle)$$

Konstruktion der CP Eigenzustände

Eigenzustände von CP:

$$|K_1^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\overline{K^0}\rangle)$$
$$|K_2^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\overline{K^0}\rangle)$$

$$\Rightarrow CP\,|K_1^0\rangle = |K_1^0\rangle \text{ und } CP\,|K_2^0\rangle = -\,|K_2^0\rangle$$

Für CP-Verletzung

$$|K_1^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\overline{K^0}\rangle)$$
$$|K_2^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\overline{K^0}\rangle)$$

(CP-Eigenzustände)

$$|K_L\rangle := p\,|K^0\rangle + q\,|\overline{K^0}\rangle$$
$$|K_S\rangle := p\,|K^0\rangle - q\,|\overline{K^0}\rangle$$

(Klare Masse/Lebensdauer)

Für CP-Verletzung

$$|K_1^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\overline{K^0}\rangle)$$
$$|K_2^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\overline{K^0}\rangle)$$

(CP-Eigenzustände)

$$|K_L\rangle := p\,|K^0\rangle + q\,|\overline{K^0}\rangle$$
$$|K_S\rangle := p\,|K^0\rangle - q\,|\overline{K^0}\rangle$$

(Klare Masse/Lebensdauer)

CP Erhaltung $\Rightarrow |p| = |q| \Leftrightarrow$ Massen-EZ sind CP-EZ

Angenommen CP-Erhaltung gilt

- Massen-EZ sind CP-EZ.

Angenommen CP-Erhaltung gilt

- Massen-EZ sind CP-EZ.
- CP-EW ist erhalten bei Zerfall.

Angenommen CP-Erhaltung gilt

- Massen-EZ sind CP-EZ.
- CP-EW ist erhalten bei Zerfall.
- Insbes. bei Zerfall in $\pi^+ + \pi^-$ und in $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$

Angenommen CP-Erhaltung gilt

- Massen-EZ sind CP-EZ.
- CP-EW ist erhalten bei Zerfall.
- Insbes. bei Zerfall in $\pi^+ + \pi^-$ und in $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$

CP-EW von 2π:

$$\begin{aligned} P &= P_a \; P_b \; (-1)^l \\ P(|\pi^+ + \pi^-\rangle) &= (-1)(-1)(-1)^0 = 1 \\ C(|\pi^+\rangle) &= |\pi^-\rangle \\ C(|\pi^-\rangle) &= |\pi^+\rangle \\ CP(|\pi^+ + \pi^-\rangle) &= |\pi^+ + \pi^-\rangle \end{aligned}$$

Angenommen CP-Erhaltung gilt

- Massen-EZ sind CP-EZ.
- CP-EW ist erhalten bei Zerfall.
- Insbes. bei Zerfall in $\pi^+ + \pi^-$ und in $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$

CP-EW von 2π:

$$
\begin{aligned}
P &= P_a \ P_b \ (-1)^l \\
P(|\pi^+ + \pi^-\rangle) &= (-1)(-1)(-1)^0 = 1 \\
C(|\pi^+\rangle) &= |\pi^-\rangle \\
C(|\pi^-\rangle) &= |\pi^+\rangle \\
CP(|\pi^+ + \pi^-\rangle) &= |\pi^+ + \pi^-\rangle
\end{aligned}
$$

$\rightarrow$ CP-EW von $|2\pi\rangle$: $+1$

Angenommen CP-Erhaltung gilt

- Massen-EZ sind CP-EZ.
- CP-EW ist erhalten bei Zerfall.
- Insbes. bei Zerfall in $\pi^+ + \pi^-$ und in $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$

CP-EW von 2π:

$$P = P_a \; P_b \; (-1)^l$$
$$P(|\pi^+ + \pi^-\rangle) = (-1)(-1)(-1)^0 = 1$$
$$C(|\pi^+\rangle) = |\pi^-\rangle$$
$$C(|\pi^-\rangle) = |\pi^+\rangle$$
$$CP(|\pi^+ + \pi^-\rangle) = |\pi^+ + \pi^-\rangle$$

$\rightarrow$ CP-EW von $|2\pi\rangle$: $+1$
$\rightarrow$ CP-EW von $|3\pi\rangle$: -1, $\quad (C(|\pi^0\rangle) = |\pi^0\rangle))$

Zerfall der CP-EZ

- CP-EW von $|2\pi\rangle$: $+1$
  CP-EW von $|3\pi\rangle$: -1

Zerfall der CP-EZ

- CP-EW von $|2\pi\rangle$: $+1$
  CP-EW von $|3\pi\rangle$: -1
- CP-EW von $|K_1^0\rangle$: $+1$
  CP-EW von $|K_2^0\rangle$: -1

Zerfall der CP-EZ

- CP-EW von $|2\pi\rangle$: $+1$
  CP-EW von $|3\pi\rangle$: -1
- CP-EW von $|K_1^0\rangle$: $+1$
  CP-EW von $|K_2^0\rangle$: -1
- $|K_1^0\rangle \rightarrow |2\pi\rangle$, $|K_1^0\rangle \not\rightarrow |3\pi\rangle$
  $|K_2^0\rangle \rightarrow |3\pi\rangle$, $|K_2^0\rangle \not\rightarrow |2\pi\rangle$

Zerfall der CP-EZ

- CP-EW von $|2\pi\rangle$: $+1$
  CP-EW von $|3\pi\rangle$: -1
- CP-EW von $|K_1^0\rangle$: $+1$
  CP-EW von $|K_2^0\rangle$: -1
- $|K_1^0\rangle \to |2\pi\rangle$, $|K_1^0\rangle \nrightarrow |3\pi\rangle$
  $|K_2^0\rangle \to |3\pi\rangle$, $|K_2^0\rangle \nrightarrow |2\pi\rangle$
- Freiwerdende Energie beim 2π Zerfall größer

Zerfall der CP-EZ

- CP-EW von $|2\pi\rangle$: $+1$
  CP-EW von $|3\pi\rangle$: -1
- CP-EW von $|K_1^0\rangle$: $+1$
  CP-EW von $|K_2^0\rangle$: -1
- $|K_1^0\rangle \to |2\pi\rangle$, $|K_1^0\rangle \not\to |3\pi\rangle$
  $|K_2^0\rangle \to |3\pi\rangle$, $|K_2^0\rangle \not\to |2\pi\rangle$
- Freiwerdende Energie beim 2π Zerfall größer
- K_1^0 zerfällt schneller als K_2^0

Zerfall der CP-EZ

- CP-EW von $|2\pi\rangle$: $+1$
  CP-EW von $|3\pi\rangle$: -1
- CP-EW von $|K_1^0\rangle$: $+1$
  CP-EW von $|K_2^0\rangle$: -1
- $|K_1^0\rangle \to |2\pi\rangle$, $|K_1^0\rangle \nrightarrow |3\pi\rangle$
  $|K_2^0\rangle \to |3\pi\rangle$, $|K_2^0\rangle \nrightarrow |2\pi\rangle$
- Freiwerdende Energie beim 2π Zerfall größer
- K_1^0 zerfällt schneller als K_2^0
- Also $K_1^0{=}K_S^0$ und $K_2^0{=}K_L^0$ (wenn CP erhalten ist!)

Folgerung

$$|K_L^0\rangle \rightarrow |3\pi\rangle,\ |K_L^0\rangle \nrightarrow |2\pi\rangle$$

Das Experiment von Cronin und Fitch

- 1964 am Brookhaven AGS, New York
- Proton-Beschleunigerring mit 33 GeV Energie
- Intention:
  Tiefe Schranke für $K_L^0 \to 2\pi$ Zerfall (bisher: $<1/300$)

Problemstellung

1. Erzeugung eines reinen K_L^0-Strahls
2. Unterscheidung der 2π Zerfälle von 3π Zerfällen

Problem 1: Reiner K_L^0-Strahl

- Lebensdauern: $10^{-10}s$ vs $10^{-8}s$

Problem 1: Reiner K_L^0-Strahl

- Lebensdauern: $10^{-10}s$ vs $10^{-8}s$
- Lange Wegstrecken, damit kurzlebiger K_S^0 Anteil zefällt (ca. 17m)

Problem 1: Reiner K_L^0-Strahl

- Lebensdauern: $10^{-10}s$ vs $10^{-8}s$
- Lange Wegstrecken, damit kurzlebiger K_S^0 Anteil zefällt (ca. 17m)
- Phänomen des "Regenerators":

$$\overline{K^0} + p \rightarrow \pi^+ + \Lambda^0, \ \overline{K^0} + n \rightarrow \pi^0 + \Lambda^0, \ (Starke\ WW)$$

Für K^0 wegen Erhaltung von Strangeness nicht möglich!

Problem 1: Reiner K_L^0-Strahl

- Lebensdauern: $10^{-10}s$ vs $10^{-8}s$
- Lange Wegstrecken, damit kurzlebiger K_S^0 Anteil zefällt (ca. 17m)
- Phänomen des "Regenerators":

$$\overline{K^0} + p \to \pi^+ + \Lambda^0, \ \overline{K^0} + n \to \pi^0 + \Lambda^0, \ (Starke\ WW)$$

  Für K^0 wegen Erhaltung von Strangeness nicht möglich!
- WW mit Materie:

$$|vorher\rangle = |K_2^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\overline{K^0}\rangle)$$

$$|nachher\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(f\,|K^0\rangle + \bar{f}\,|\overline{K^0}\rangle) = \frac{1}{2}(f-\bar{f})\,|K_1^0\rangle + \frac{1}{2}(f+\bar{f})\,|\overline{K_2^0}\rangle$$

Problem 1: Reiner K_L^0-Strahl

- Lebensdauern: $10^{-10}s$ vs $10^{-8}s$
- Lange Wegstrecken, damit kurzlebiger K_S^0 Anteil zefällt (ca. 17m)
- Phänomen des "Regenerators":

$$\overline{K^0} + p \rightarrow \pi^+ + \Lambda^0, \ \overline{K^0} + n \rightarrow \pi^0 + \Lambda^0, \ (Starke\ WW)$$

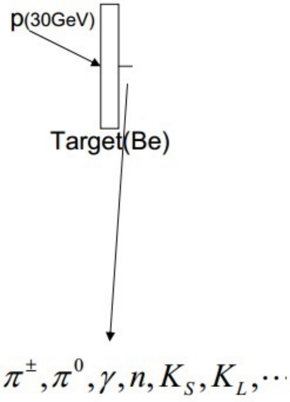
  Für K^0 wegen Erhaltung von Strangeness nicht möglich!
- WW mit Materie:

$$|vorher\rangle = |K_2^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\overline{K^0}\rangle)$$

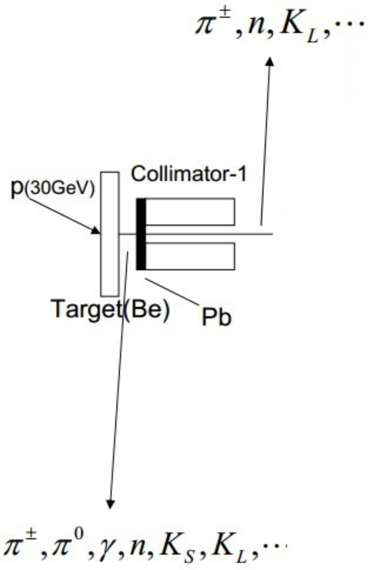
$$|nachher\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(f\,|K^0\rangle + \bar{f}\,|\overline{K^0}\rangle) = \frac{1}{2}(f - \bar{f})\,|K_1^0\rangle + \frac{1}{2}(f + \bar{f})\,|\overline{K_2^0}\rangle$$

$\rightarrow$WW mit Materie vermeiden!

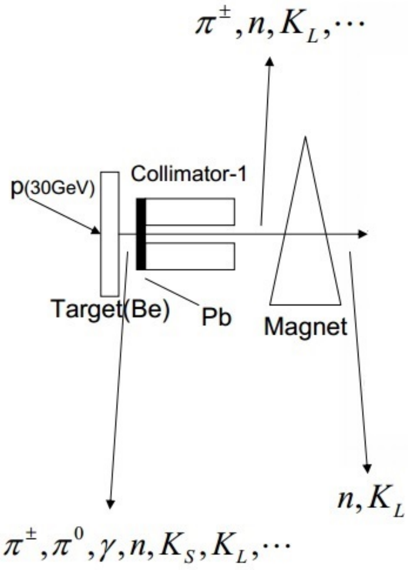
Umsetzung: Reiner K_L^0-Strahl



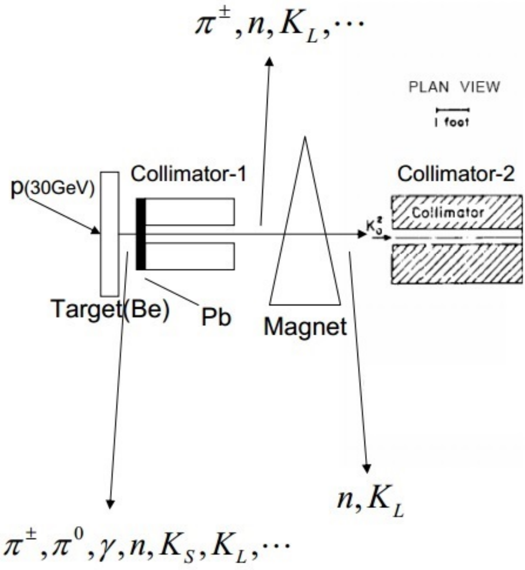
Umsetzung: Reiner K_L^0-Strahl



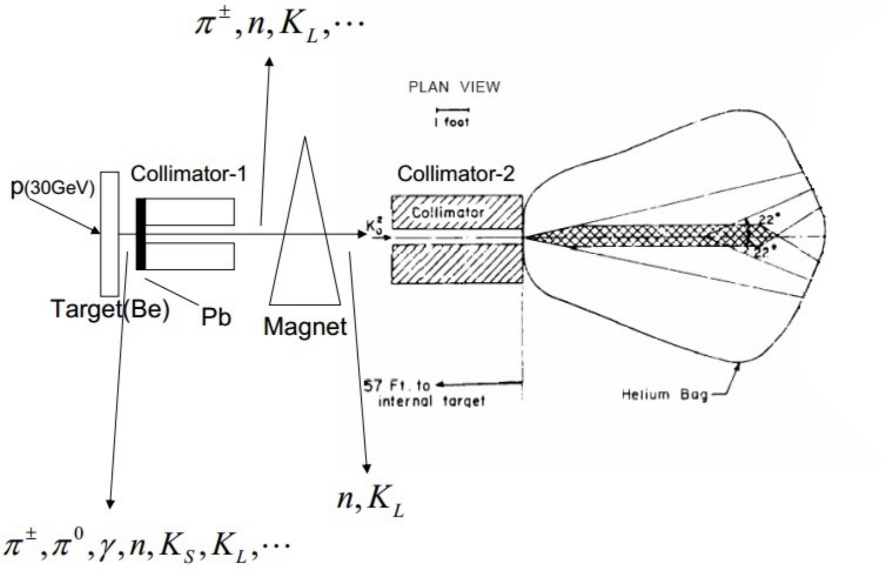
Umsetzung: Reiner K_L^0-Strahl



Umsetzung: Reiner K_L^0-Strahl



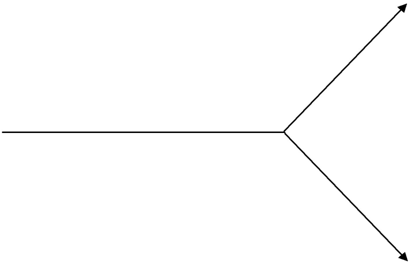
Umsetzung: Reiner K_L^0-Strahl



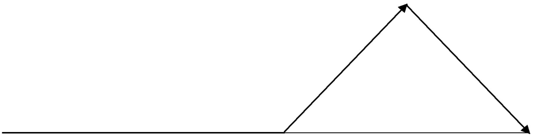
Problem 2: 2π Zerfall $\leftrightarrow$ 3π Zerfall

- Nachweis zweier koinzidenter Teilchen
- Berechnung invarianter Masse
- Messung Winkel zum K_L^0-Strahl

Winkel zum K_L^0-Strahl

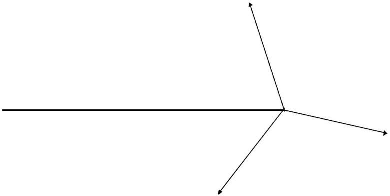


Winkel zum K_L^0-Strahl

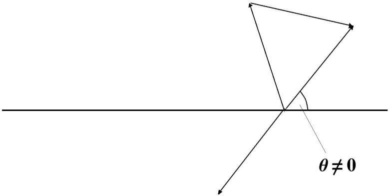


$\theta = 0$

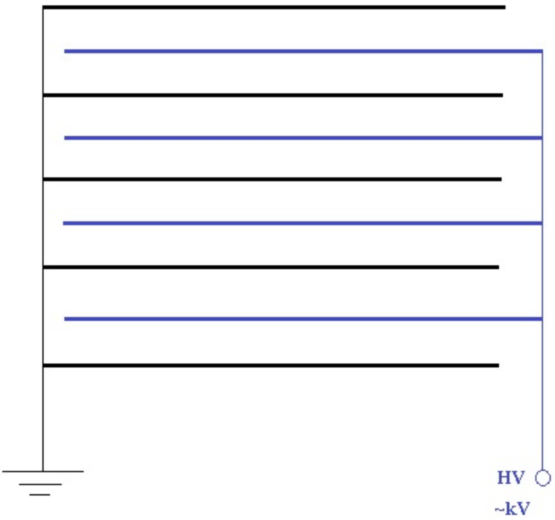
Winkel zum K_L^0-Strahl



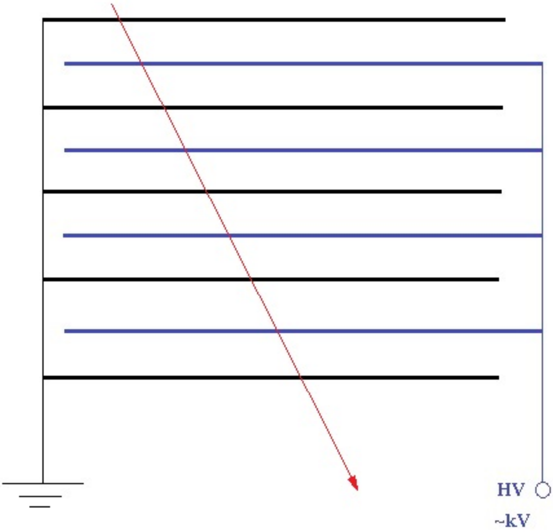
Winkel zum K_L^0-Strahl



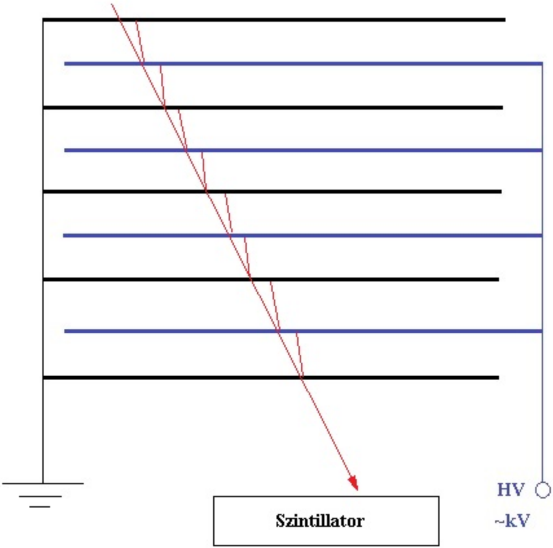
Messinstrument: Funkenkammer



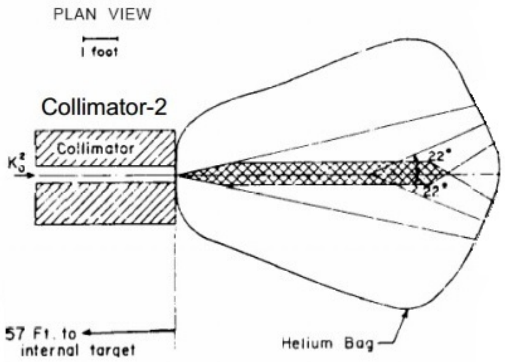
Messinstrument: Funkenkammer



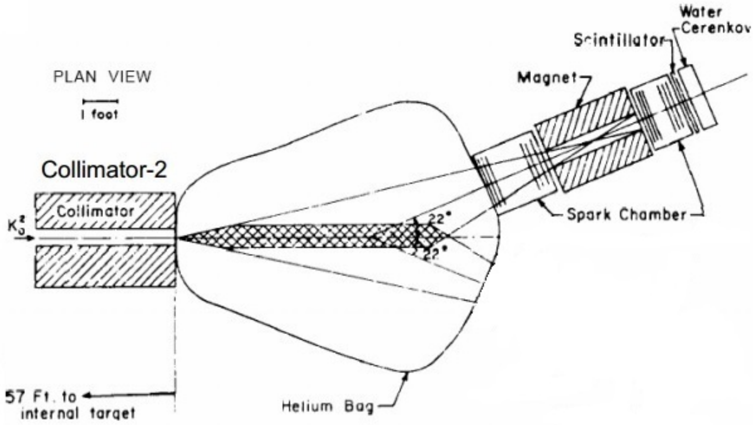
Messinstrument: Funkenkammer



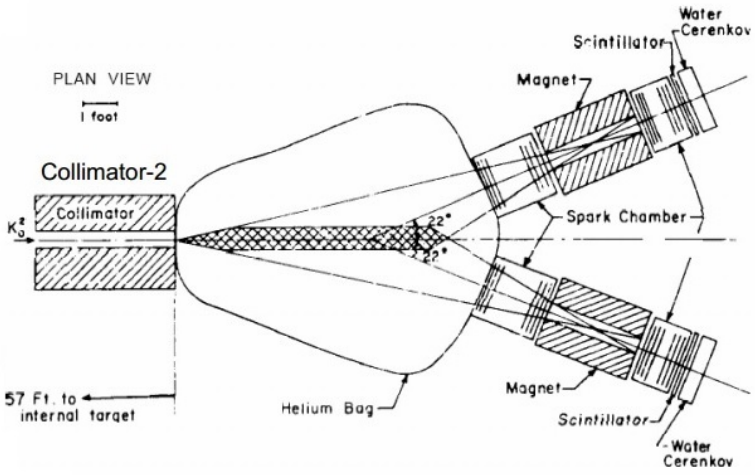
Umsetzung: 2π Zerfall $\leftrightarrow$ 3π Zerfall



Umsetzung: 2π Zerfall $\leftrightarrow$ 3π Zerfall



Umsetzung: 2π Zerfall $\leftrightarrow$ 3π Zerfall

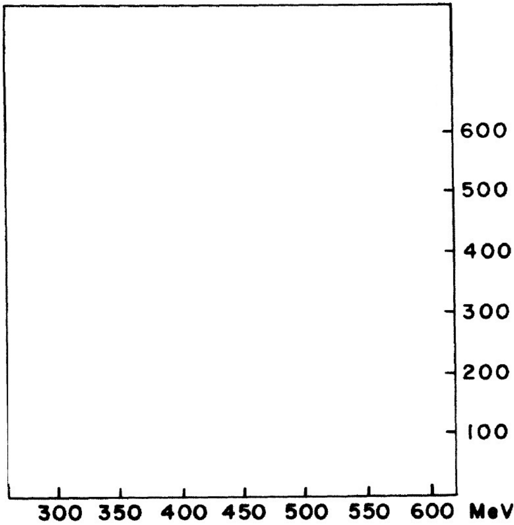


Messung

Energieverteilung

Messung mit
Wolfram-Regenerator:
Peak bei $498,1 \pm 0,4$ MeV

Allen gemessenen Teilchen wird
Masse des Pions zugeordnet

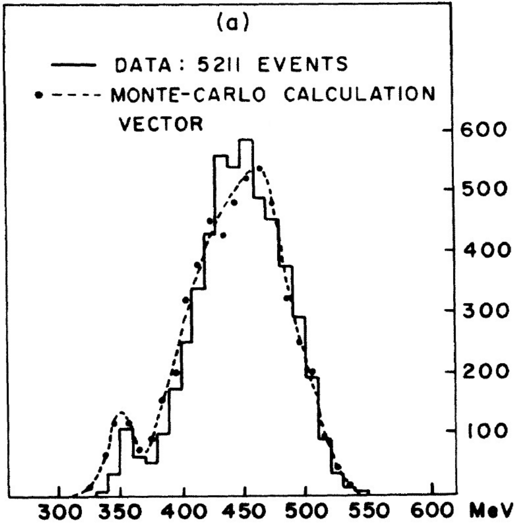


Messung

Energieverteilung

Messung mit
Wolfram-Regenerator:
Peak bei $498,1 \pm 0,4$ MeV

Allen gemessenen Teilchen wird
Masse des Pions zugeordnet

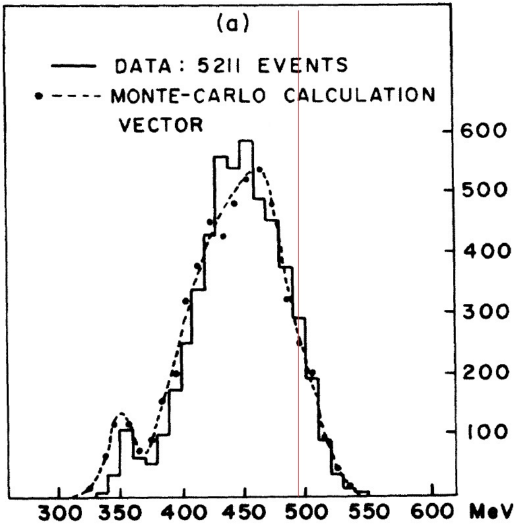


Messung

Energieverteilung

Messung mit
Wolfram-Regenerator:
Peak bei $498,1 \pm 0,4$ MeV

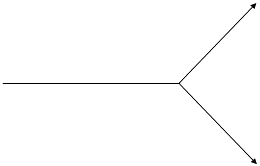
Allen gemessenen Teilchen wird
Masse des Pions zugeordnet

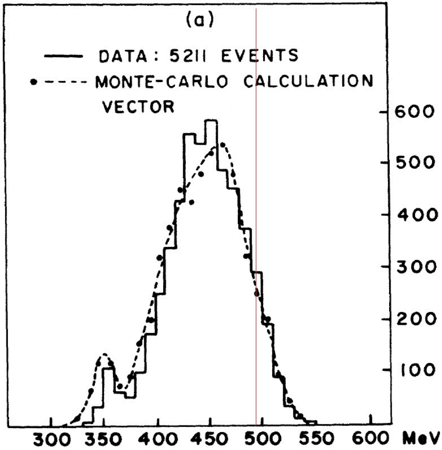


Messung

Untergrund

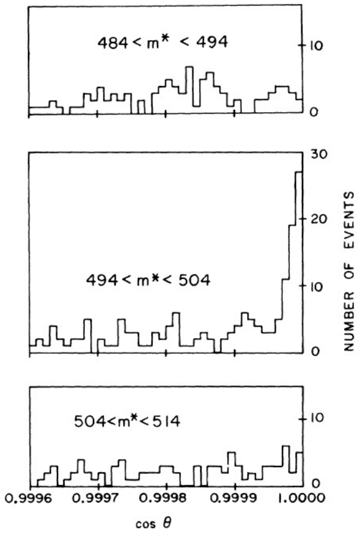
$$K_L^0 \to \pi^\pm + e^\mp + \nu_e$$
$$K_L^0 \to \pi^\pm + \mu^\mp + \nu_\mu$$
$$K_L^0 \to \pi^- + \pi^+ + \pi^0$$





Messung

Winkelverteilung

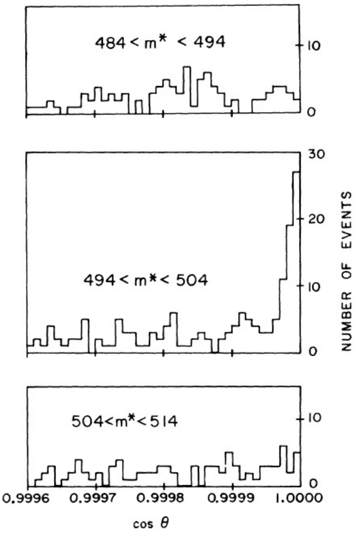


Angular distribution in three mass ranges for events with $\cos\theta > 0.9995$.

Messung

Winkelverteilung

- 45 ± 10 Ereignisse

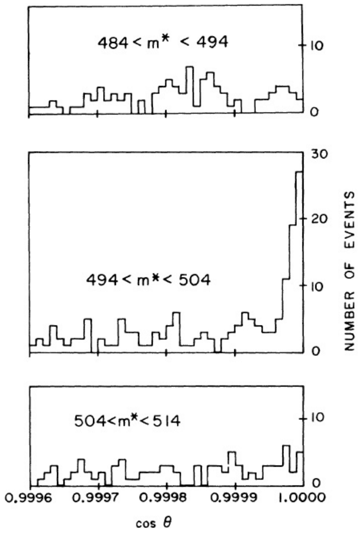


Angular distribution in three mass ranges for events with $\cos\theta > 0.9995$.

Messung

Winkelverteilung

- 45 $\pm$ 10 Ereignisse
- Durch Regeneration im Helium verursacht: $\sim$10 Ereignisse

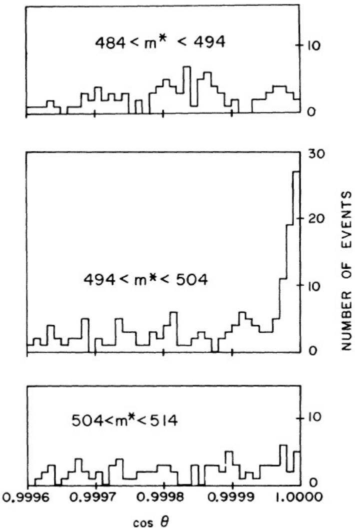


Angular distribution in three mass ranges for events with $\cos\theta > 0.9995$.

Messung

Winkelverteilung

- 45 ± 10 Ereignisse
- Durch Regeneration im Helium verursacht: $\sim$10 Ereignisse
- Mittelwert Masse mit $cos\theta > 0,99999$: $499,1 \pm 0,8 MeV$

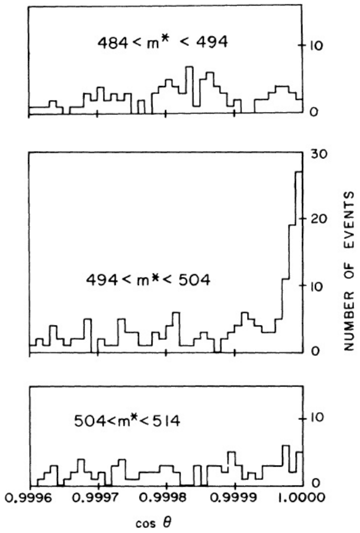


Angular distribution in three mass ranges for events with $\cos\theta > 0.9995$.

Messung

Winkelverteilung

- 45 ± 10 Ereignisse
- Durch Regeneration im Helium verursacht: $\sim$10 Ereignisse
- Mittelwert Masse mit $cos\theta > 0,99999$: $499,1 \pm 0,8 MeV$
- Vgl. $498,1 \pm 0,4$ $\rightarrow \Delta m = 1,0 \pm 0,9 MeV$



Angular distribution in three mass ranges for events with cosθ > 0.9995.

Zusammenfassung

- Zerfall des langlebigen Kaons in $\pi^+ + \pi^-$

Zusammenfassung

- Zerfall des langlebigen Kaons in $\pi^{+} + \pi^{-}$
- Zerfallswahrscheinlichkeit:

$$R = \frac{K_L^0 \rightarrow \pi^{+} + \pi^{-}}{K_L^0 \rightarrow all\ charged\ modes} = (2,0 \pm 0,4) \times 10^{-3}$$

Zusammenfassung

- Zerfall des langlebigen Kaons in $\pi^{+}+\pi^{-}$
- Zerfallswahrscheinlichkeit:

$$R = \frac{K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-}{K_L^0 \rightarrow all\ charged\ modes} = (2,0 \pm 0,4) \times 10^{-3}$$

- Regeneration im Helium konnte ausgeschlossen werden

Zusammenfassung

- Zerfall des langlebigen Kaons in $\pi^+ + \pi^-$
- Zerfallswahrscheinlichkeit:

$$R = \frac{K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-}{K_L^0 \rightarrow \textit{all charged modes}} = (2,0 \pm 0,4) \times 10^{-3}$$

- Regeneration im Helium konnte ausgeschlossen werden

Interpretation

$K_L^0 \to 2\pi$

Interpretation

$$K_L^0 \to 2\pi$$
$$\Rightarrow K_L^0 \neq K_2^0$$

Interpretation

$$K_L^0 \to 2\pi$$
$$\Rightarrow K_L^0 \neq K_2^0$$

(oder: $K_2^0 \to 2\pi$ (CP-EW -1 $\to$ CP-EW $+1$))

Interpretation

$$\begin{aligned} & K_L^0 \to 2\pi \\ \Rightarrow\ & K_L^0 \neq K_2^0 \\ \Rightarrow\ & |q| \neq |p| \end{aligned}$$

(oder: $K_2^0 \to 2\pi$ (CP-EW -1 $\to$ CP-EW $+1$))

Interpretation

$$
\begin{aligned}
& K_L^0 \to 2\pi \\
\Rightarrow\ & K_L^0 \neq K_2^0 \qquad \text{(oder: } K_2^0 \to 2\pi \text{ (CP-EW -1} \to \text{CP-EW +1))} \\
\Rightarrow\ & |q| \neq |p| \\
\Rightarrow\ & P(K^0 \to \overline{K^0}) \neq P(\overline{K^0} \to K^0)
\end{aligned}
$$

Interpretation

$$K_L^0 \to 2\pi$$
$$\Rightarrow K_L^0 \neq K_2^0$$ (oder: $K_2^0 \to 2\pi$ (CP-EW -1 $\to$ CP-EW $+1$))
$$\Rightarrow |q| \neq |p|$$
$$\Rightarrow P(K^0 \to \overline{K^0}) \neq P(\overline{K^0} \to K^0)$$

$\Rightarrow$ **CP-Verletzung!**

Kein EZ von CP

- $K_L^0 \neq K_2^0$, $K_S^0 \neq K_1^0$

Kein EZ von CP

- $K_L^0 \neq K_2^0$, $K_S^0 \neq K_1^0$
- Folgerung:

$$|K_L^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}}(|K_2^0\rangle + \epsilon\,|K_1^0\rangle)$$
$$|K_S^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}}(|K_1^0\rangle + \epsilon\,|K_2^0\rangle)$$

Kein EZ von CP

- $K_L^0 \neq K_2^0$, $K_S^0 \neq K_1^0$
- Folgerung:

$$|K_L^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}}(|K_2^0\rangle + \epsilon\,|K_1^0\rangle)$$
$$|K_S^0\rangle := \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}}(|K_1^0\rangle + \epsilon\,|K_2^0\rangle)$$

- Aus Experiment: $|\epsilon| = 2,3 \times 10^{-3}$

Auswirkungen

- Aus QFT: CPT-Erhaltung
  (1952-1954, Schwinger und Lüders)

Auswirkungen

- Aus QFT: CPT-Erhaltung
  (1952-1954, Schwinger und Lüders)
- Also CPT-Theorem falsch oder T
  nicht erhalten

Auswirkungen

- Aus QFT: CPT-Erhaltung
  (1952-1954, Schwinger und Lüders)
- Also CPT-Theorem falsch oder T
  nicht erhalten
- Invarianz der Zeitumkehr verletzt
  im Kaonsystem

Auswirkungen

- Aus QFT: CPT-Erhaltung (1952-1954, Schwinger und Lüders)
- Also CPT-Theorem falsch oder T nicht erhalten
- Invarianz der Zeitumkehr verletzt im Kaonsystem
- CP-Verletzung notwendig für Materie-Antimaterie-Ungleichgewicht.

Auswirkungen

- Aus QFT: CPT-Erhaltung (1952-1954, Schwinger und Lüders)
- Also CPT-Theorem falsch oder T nicht erhalten
- Invarianz der Zeitumkehr verletzt im Kaonsystem
- CP-Verletzung notwendig für Materie-Antimaterie-Ungleichgewicht.
- Nobelpreis für Cronin und Fitch 1980

Quellen

Griffiths, David
Introduction to Elementary Particles.
Klein-Verlag, 1990.

Frauenfelder, Hans
Nuclear and Particle Physics.
Addison-Wesley Pub Co, 1975.

Christenson, J. and Cronin, J. and Fitch, V. und Turlay, R.
Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson
Phys. Rev. Lett., 1964

Hansmann-Menzemer, Stephanie
Particle Physics WS 2012/13
Universität Heidelberg, 2013

Jun Nian
Messung der direkten CP Verletzung im Kaonzerfall.
http://www.physi.uni-heidelberg.de/ uwer/lectures/Seminar/KeyExp/2007/DirekteCPV.pdf, 23.10.2014