Bitte beschäftigen Sie sich mit folgenden Aspekten aus dem Gebiet „Schwache Wechselwirkung“:

1) Befassen Sie sich mit

   dem B^0, $\overline{B^0}$-Zerfall
   der Möglichkeit über B^0-Zerfall die CP-Phase zu messen
   dem BarBar-Experiment
   dem BELLE Experiment
   den Besonderheiten einer Beauty-Factory
   den Besonderheiten einer asymmetrischen Beauty-Factory

Wiederholung

1

Cabibbo-Theorie

Die Eigenzustände der schwachen WW sind nicht identisch zu den Eigenzuständen der starken (oder e.m.) WW

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \longleftarrow \text{q-Eigenzustände der starken WW}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \longleftarrow \text{q-Eigenzustände der schwachen WW}$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\Theta_c & \sin\Theta_c \\ -\sin\Theta_c & \cos\Theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} j^\mu(h) &= (\bar{u}\ \bar{c})\gamma^\mu(1-\gamma^5)u\begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix} \\ &= \bar{u}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\left[d\cos\Theta_c + s\sin\Theta_c\right] \\ &\quad + \bar{c}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\left[-d\sin\Theta_c + c\cos\Theta_c\right] \end{aligned}$$

2 Cabibbo - erlaubt

Cabibbo - unterdrückt

$u \to d \quad \sim \cos\Theta_c$ $\qquad\qquad$ $u \to s \quad \sim \sin\Theta_c$

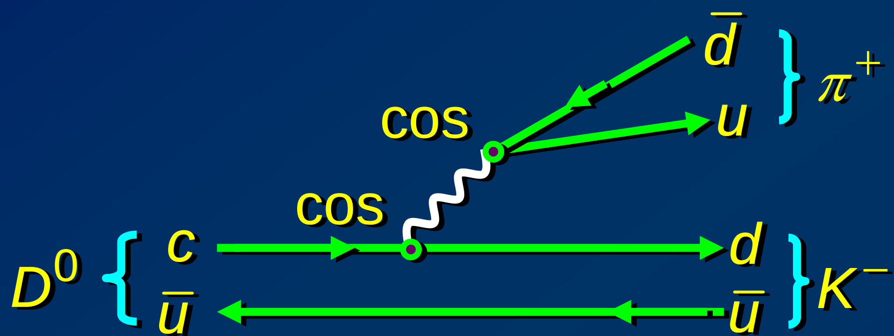
$c \to s \quad \sim \cos\Theta_c$ $\qquad\qquad$ $c \to d \quad \sim -\sin\Theta_c$

$\Theta_c \sim 13°$

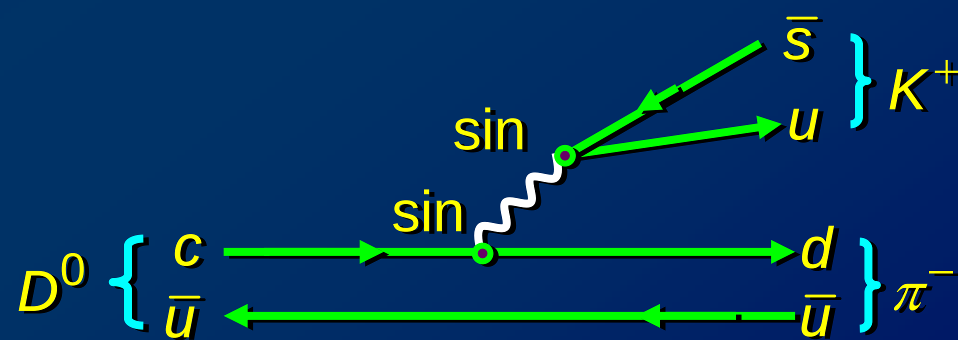
Beispiel:

$D^0 \to K^-\pi^+ \qquad (3{,}6\%)$

$D^0 \to K^+\pi^- \qquad (< 4 \cdot 10^{-4})$



$\boxed{\sim \cos^4\Theta_c}$



$\boxed{\sim \sin^4\Theta_c}$

auch:

$D \to \bar{K}^0\pi^+ \qquad \sim \cos^4\Theta_c$

$D \to K^+\pi^0 \qquad \sim \sin^4\Theta_c$

3

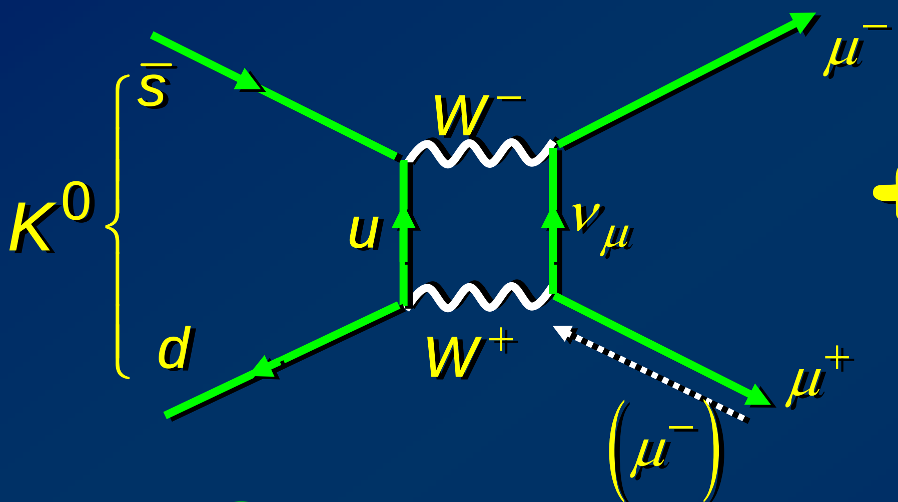
GIM - Mechanismus

(flavour – ändernde neutrale Übergänge)

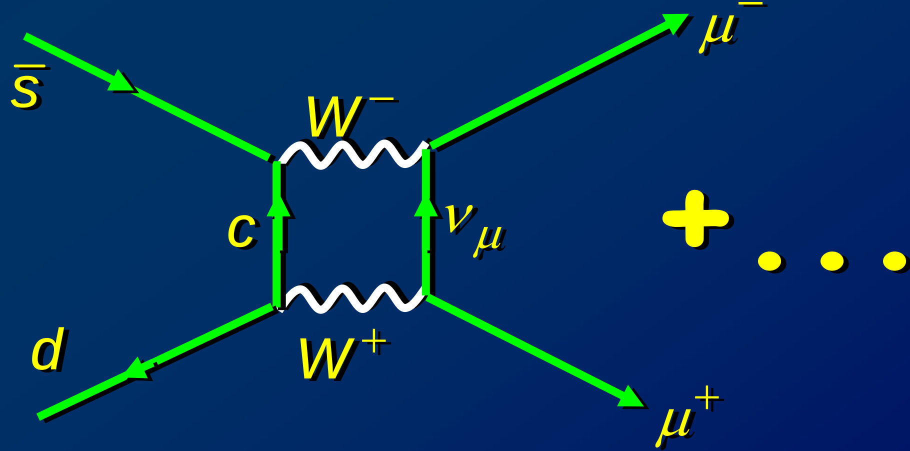
Beispiel: $K^+ \to \mu^+ \nu_\mu$ 68%

aber: $K^0 \to \mu^+ \mu^-$ $\sim 9 \cdot 10^{-9}$

BOX - Diagramme



+



+ . . .

1 $\sim \cos\Theta_c \sin\Theta_c$

2 $\sim -\cos\Theta_c \sin\Theta_c$

1 + 2 $\neq$ 0 nur für $m(u) \neq m(c)$

Verallgemeinerung auf 3 Generationen

Schwache Eigenzustände:

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = U_{CKM} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$U_{CKM} = \begin{pmatrix} U_{ud} & U_{us} & U_{ub} \\ U_{cd} & U_{cs} & U_{cb} \\ U_{td} & U_{ts} & U_{tb} \end{pmatrix}$$

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Massenmatrix

U ist eine unitäre (i.a. komplexe) 3x3 Matrix

U hat 4 zu bestimmende physikalische Parameter:

3 Rotationswinkel
1 phys. Phase

$$R_{12}(\theta,\varphi)=\begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta e^{i\varphi} & 0 \\ -\sin\theta e^{-i\varphi} & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Drehung 1,2

$$R_{23}(\theta,\varphi)=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta e^{i\varphi} \\ 0 & -\sin\theta e^{-i\varphi} & \cos\theta \end{pmatrix}$$

Drehung 2,3

$$R_{12}(\theta,\varphi)=\begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta e^{i\varphi} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta e^{-i\varphi} & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}$$

Drehung 1,3

$$U_{CKM} = R_{23}(\theta_{23},0)R_{13}(\theta_{13},-\delta)R_{12}(\theta_{12},0)$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23}-c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23}-s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23}-c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23}-s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

$c = \cos;\qquad s = \sin$

freie Parameter der CKM-Matrix

kmplx. NxN Matrix : $2N^2$ reelle Parameter.

Unitarität: $\sum_k U_{ik}U^*_{jk} = \delta_{ij}$, d.h. N^2 Bedingungen

$\rightarrow 2N^2 - N^2 = N^2$ freie Parameter.

jedes Quarkfeld: kann eine Phase absorbieren.

eine globale Phase: ist unbeobachtbar

daher: $\rightarrow N^2 - (2N-1) = (N-1)^2$ freie Parameter

davon: $N(N-1)/2$ Rotationswinkel (q-Mischungswinkel)

$(N-1)(N-2)/2$ komplexe CP-Phasen

# der q-Familien	# der Rot.-Winkel	# der physik. Phasen
2	1	0
3	3	1
4	6	3
n	$n(n-1)/2$	$\frac{1}{2}(n-1)n-2)$

Stand 2006

$$\left(\left|U_{CKM}\right|\right) = \begin{pmatrix} 0.97383 & 0.2272 & 0.00396 \\ 0.2271 & 0.97296 & 0.04221 \\ 0.00814 & 0.04161 & 0.999100 \end{pmatrix}$$

$$\sum(\rightarrow)^2 = 0.9999804$$

$$\sum(\rightarrow)^2 = 1.00000726$$

$$\sum(\rightarrow)^2 = 0.9999985$$

$$\sum(\downarrow)^2 = 0.999986$$

$$\sum(\downarrow)^2 = 1.0000024$$

$$\sum(\downarrow)^2 = 0.9999982$$

$$\left(\left|U_{CKM}\right|\right) = \begin{pmatrix} 1 & s & s^3 \\ s & 1 & s^2 \\ s^3 & s^2 & 1 \end{pmatrix} \qquad s = \sin\theta_c$$

Heutige Fragestellungen

1) Ist U_{CKM} in der 3x3 Version unitär ??

2) Welchen Wert hat die Phase δ ??

3) Ist δ alleinverantwortlich für CP Verletzung ??

Antworten liefert Studium von

$$\underbrace{B^0}_{(\bar{b}d)} \qquad \underbrace{\bar{B}^0}_{(b\bar{d})}$$

an einer Beauty-Factory (BarBar, BELLE)

K^0 -Zerfall

Erinnere: K-System ist ein Isospin-Dublett mit Strangeness

$-\frac{1}{2}$ $\quad$ $\frac{1}{2}$ $\quad$ I_3 $\qquad (I = \frac{1}{2})$

s = +1	K^0	K^+	Teilchen
s = -1	K^-	$\bar{K}^0$	Antiteilchen

Quarkinhalt:

$K^0 = (d\bar{s}) \qquad K^+ = (u\bar{s})$

$\bar{K}^0 = (\bar{d}s) \qquad K^- = (\bar{u}s)$

Merke:

- K^0 ist nicht sein eigenes Antiteilchen
- $K^0, \bar{K}^0$ unterscheiden sich durch wohldefinierte „hadronische“ Quantenzahlen
- offensichtlich: $CP(K^0) = \bar{K}^0$

  $CP(\bar{K}^0) = K^0$

bis auf Phase !!

Folge: Im hadronischen Bereich sind $K^0, \bar{K}^0$ zwei verschiedene Teilchen

($K^0, \bar{K}^0$ Eigenzustände der starken WW)

Erzeugung:

- $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$

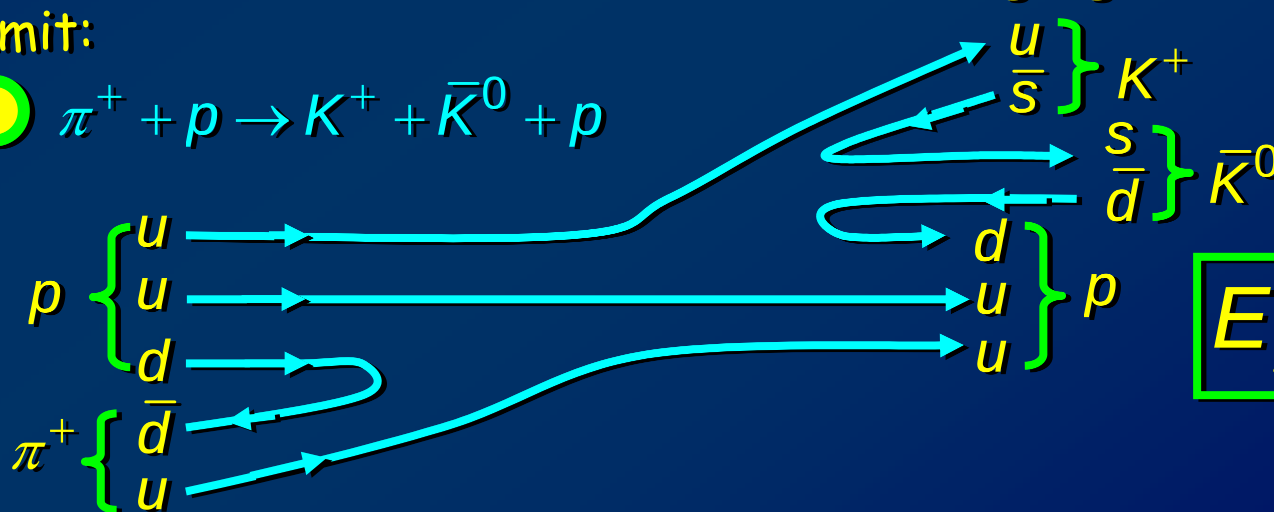
$$E_\pi > 0{,}9\ GeV$$

Es gibt aber kein $(ud\bar{s})$-Baryon

> Umdrehen der $s\bar{s}$ -Quarklinie (zur Erzeugung von $\bar{K}^0$) nicht möglich

damit:

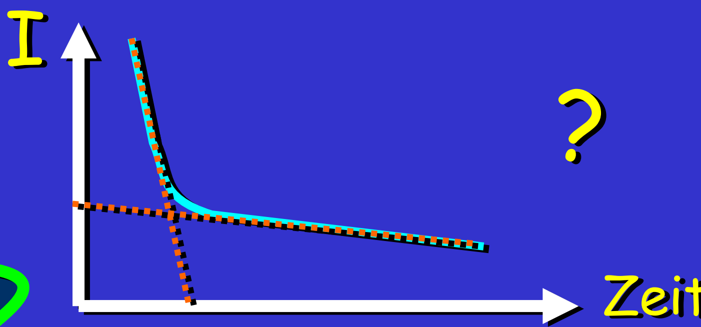
- $\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \bar{K}^0 + p$



$$E_\pi > 1{,}6\ GeV$$

experimentelle Beobachtung

Sowohl K^0 als auch $\bar{K}^0$ scheinen 2 !! Halbwertszeiten zu besitzen.



Erklärung:

K^0 und $\bar{K}^0$ unterliegen der schwachen WW.

Die schwache WW ist weder isospin- noch strangeness-erhaltend.

$$(\Delta S = 1,\ \Delta I = 1/2,\ (3/2))$$

oder:

K^0, $\bar{K}^0$ (bisher entartet) spalten auf in zwei Zustände K_1, K_2, die kein definiertes I oder S besitzen.

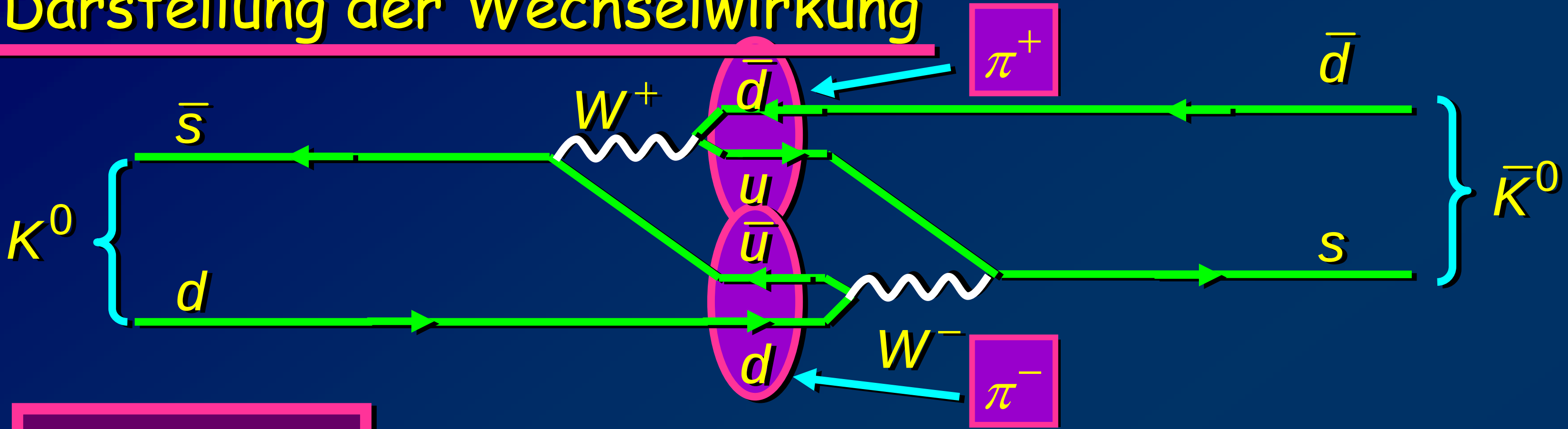
Analogie: Stark-Effekt in Atomphysik

$2s_{1/2}$ $\quad$ $2p_{1/2}$ $\quad \xrightarrow{\vec{\varepsilon}_{stat}}$

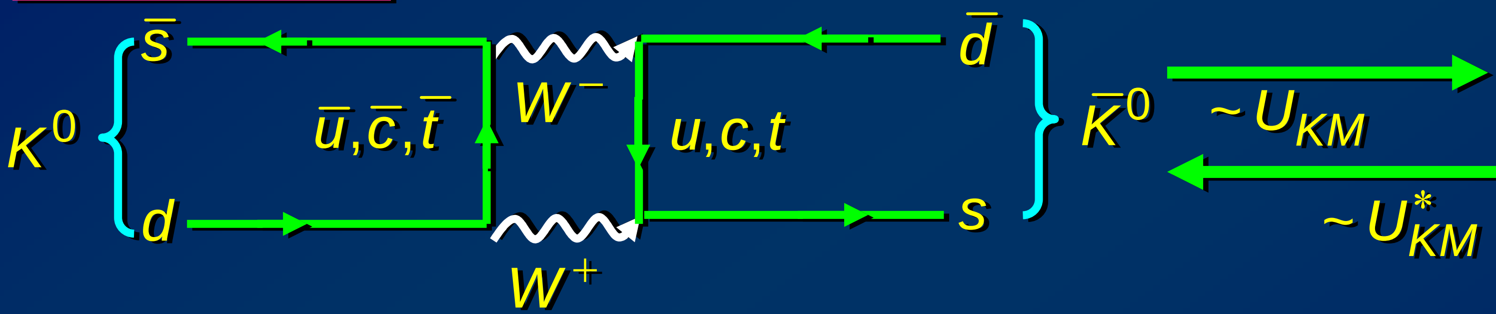
$P = "+"$ $\quad$ $P = "-"$

gemischt, kein definiertes P

Darstellung der Wechselwirkung



identisch zu:



Hinweis:
falls
$U_{KM} \neq U_{KM}^*$
> $\cancel{CP}$

Zunächst aber: schwache WW respektiert CP

da $CP\left|K^0\right\rangle = \left|\bar{K}^0\right\rangle$ bis auf Phase muss gelten:

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|K^0\right\rangle + \left|\bar{K}^0\right\rangle\right) \quad CP = \text{"}+\text{"}$$

$$K_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|K^0\right\rangle - \left|\bar{K}^0\right\rangle\right) \quad CP = \text{"}-\text{"}$$

Konsequenzen

1

Ist CP erhalten dann

$K_1 \to 2\pi$

$(\pi^+\pi^-, \pi^0\pi^0)$ $\Big\}$ $\boxed{CP = "+"}$

$K_2 \to 3\pi$

$(\pi^+\pi^-\pi^0, 3\pi^0)$ $\Big\}$ $\boxed{CP = "-"}$

Phasenraum $(K_1 \to 2\pi)$ $\succ$ Phasenraum $(K_2 \to 3\pi)$

> K_1 – Zerfall schneller !

$K_1 = K_S$ $\quad \tau_1 = 9 \cdot 10^{-11}\,\text{sec}$ $\quad \Gamma_1 = 7.3 \cdot 10^{-6}\,eV$

$K_2 = K_L$ $\quad \tau_2 = 5 \cdot 10^{-8}\,\text{sec}$ $\quad \Gamma_2 = 1.3 \cdot 10^{-8}\,eV$

$c\tau_1 = 2{,}7cm$

$c\tau_2 = 15m$

2 Strangeness-Oszillation

Experiment:

- produziere K^0-Strahl $\pi^- + p \to \Lambda + K^0$
- benutze K^0 für hadronisches Streuexperiment

Frage: Was ist der $K^0, \bar{K}^0$ -Inhalt des Strahls am Ort des Targets

Propagation K_1

$$a_1(t) = a_1(0)e^{-iE_1 t} e^{-\frac{\Gamma_1}{2}}$$

Propagation K_2

$$a_2(t) = a_2(0)e^{-iE_2 t} e^{-\frac{\Gamma_2}{2}}$$

weiterhin gilt $E = m$
(c = 1)

$$\succ a(t) = a(0)e^{-\left(\Gamma/2 + im\right)t}$$

$$I = aa^* = I(0)e^{-\Gamma t}$$

mit: $K^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K_1 + K_2)$

$$\succ I_{K^0}(t) = I_0 \left\{\frac{a_1(t) + a_2(t)}{\sqrt{2}}\right\}\left\{\frac{a_1^*(t) + a_2^*(t)}{\sqrt{2}}\right\}$$

Bitte ausrechnen

eingesetzt:

K^0

$$\frac{I_{K^0}(t)}{I_{K^0}(0)} = \frac{1}{4}\left[e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} + 2e^{-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2}t} \cos \Delta m t \right]$$

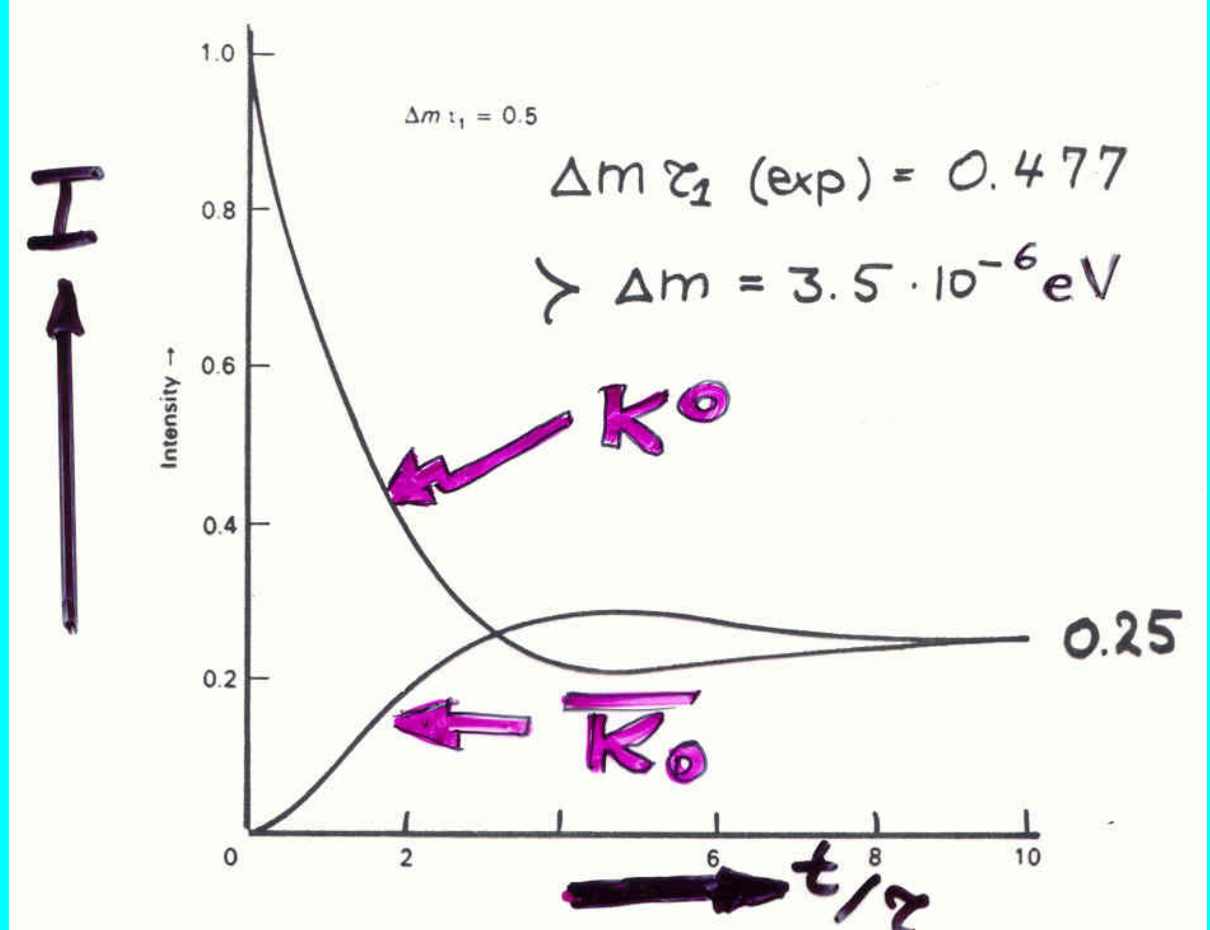
$\bar{K}^0$

$$\frac{I_{\bar{K}^0}(t)}{I_{\bar{K}^0}(0)} = \frac{1}{4}\left[e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} - 2e^{-\frac{\Gamma_1+\Gamma_2}{2}t} \cos \Delta m t \right]$$

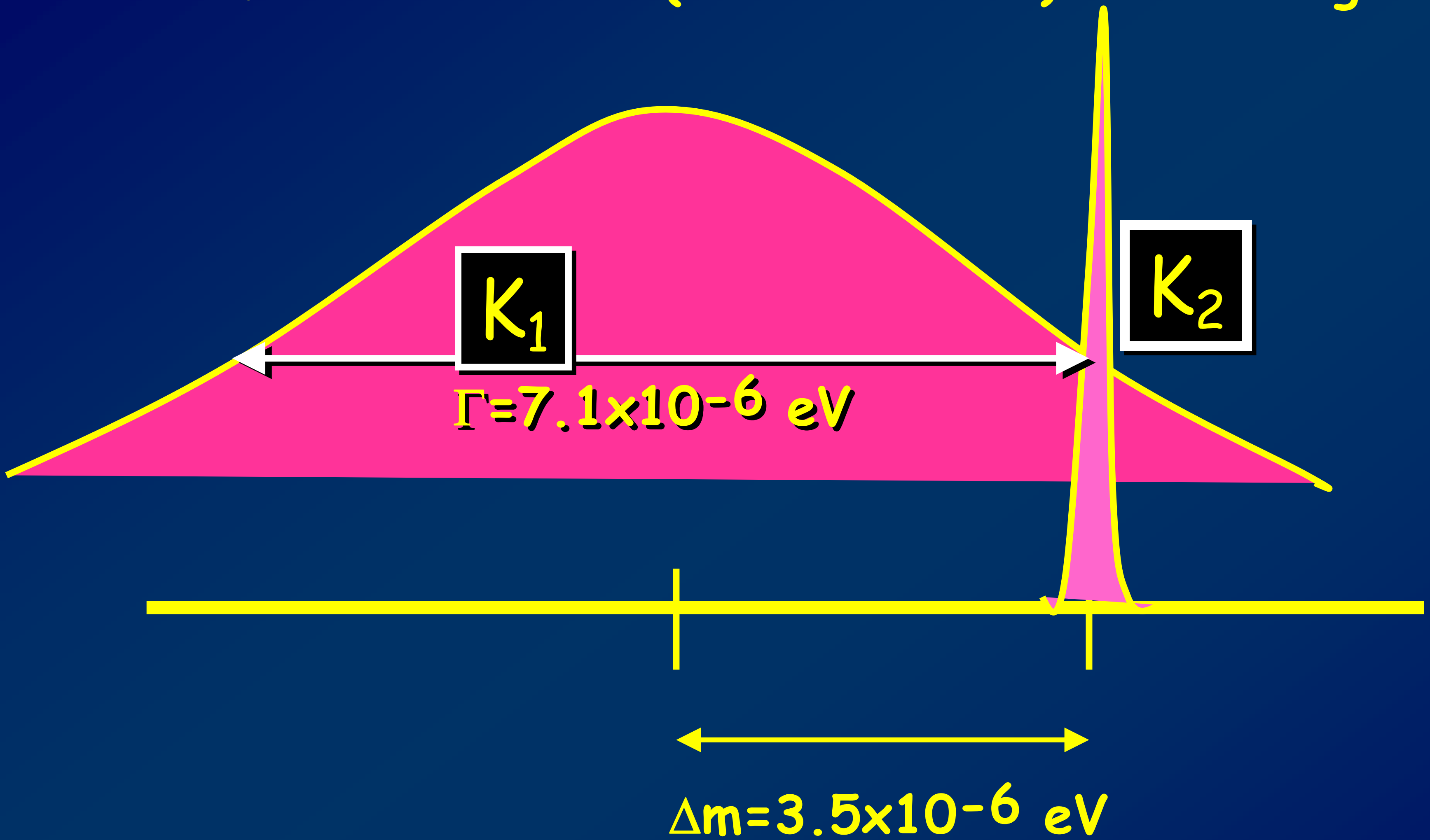
experimenteller Nachweis des $\bar{K}^0$-Inhalts

$$\bar{K}^0 + p \longrightarrow \Lambda + \pi^+$$

(nicht möglich mit K^0)



Einfache und naive (aber korrekte) Vorstellung



3 $K^0, \bar{K}^0$ - Regeneration (1955)

Experiment:

- Erzeuge K^0 oder $\bar{K}^0$ -Strahl
- lasse K_S im Strahl zerfallen

  (› K_L -Strahl)

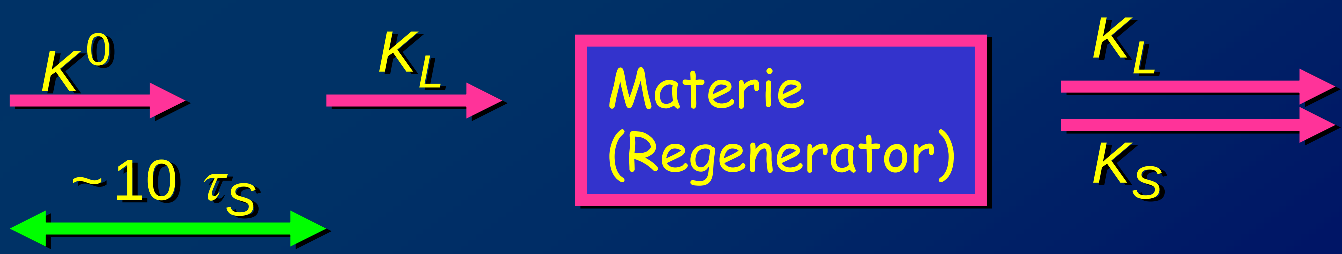
$$K_L = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|K^0\right\rangle - \left|\bar{K}^0\right\rangle\right)$$

- Streuung von K_L in Materie

  $\bar{K}^0$ wird stärker absorbiert $\left(\bar{K}^0 + p \rightarrow \Lambda + \pi^+\right)$

  › Anreicherung von $\left|K^0\right\rangle$

› K_S -Komponente wird regeneriert



1964

Christenson, Cronin, Fitch

$$K_L^0 \longrightarrow 2\pi \qquad 0{,}2\%$$

$\boxed{CP = "-"}$ $\boxed{CP = "+"}$

CP ist verletzt

(allerdings nur minimal !)

$$\succ K_L^0 = \frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{1+|\varepsilon|^2}}\left[(1+\varepsilon)\left|K^0\right\rangle - (1-\varepsilon)\left|\bar{K}^0\right\rangle\right]$$

oder

$$K_L^0 = \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon|^2}}\left[\left|K_2\right\rangle + \varepsilon\left|K_1\right\rangle\right]$$

falsche CP-Beimischung

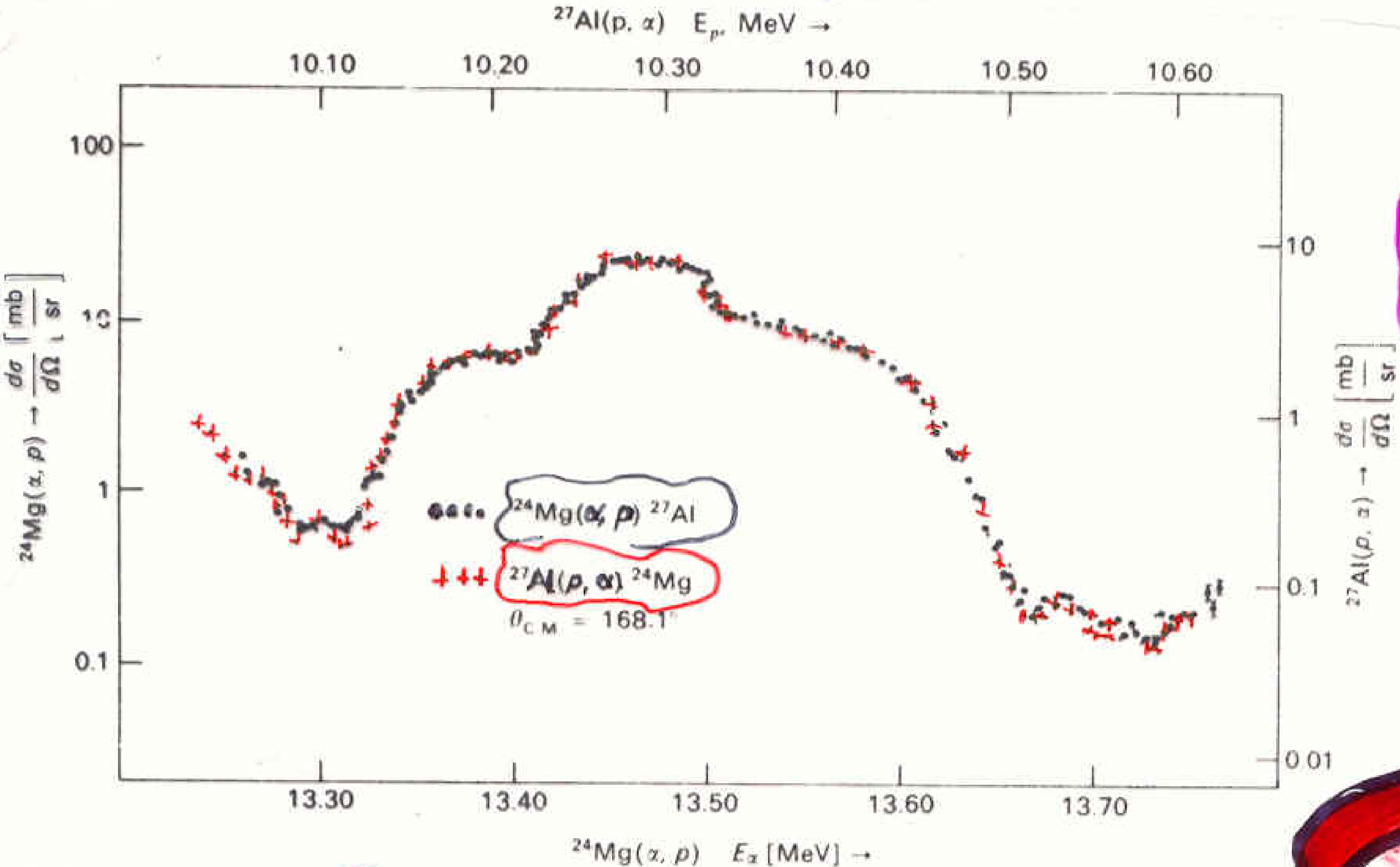
$$K_S^0 = \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon|^2}}\left[\left|K_1\right\rangle + \varepsilon\left|K_2\right\rangle\right]$$

$\boxed{mit\ |\varepsilon| \sim 0{,}00203}$

Gründe für CP - Verletzung

1

starke WW



Gründe für CP - Verletzung

1

starke WW

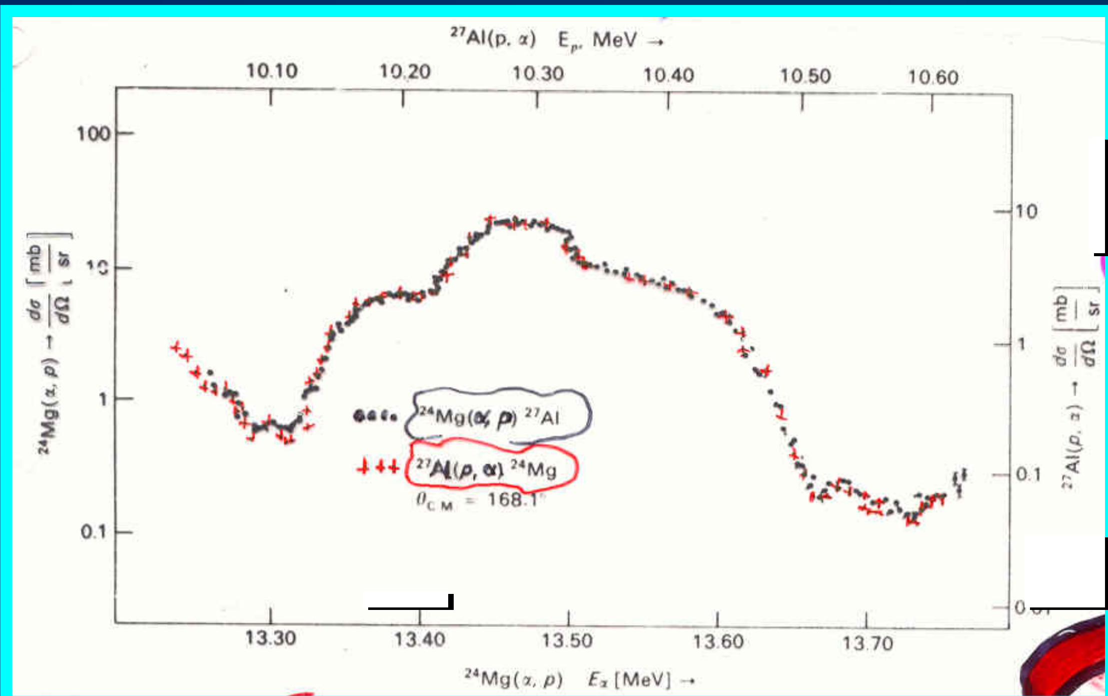
wenn „ja" dann: $K_L^0 \to 3\pi \xrightarrow{\text{hadronisch } (10^{-3})} 2\pi$

CP (schw.WW) — $\cancel{CP}$ (st.WW)

milli-weak

wegen: CPT

und: P-Erhaltung > st. WW ist $\cancel{C}, \cancel{T}$



$^{24}Mg(\alpha,p)$

$^{27}Al(p,\alpha)$

$\cancel{T} < 3\cdot10^{-3}$

OK

2

em - WW

wenn „ja“ dann:

$\cancel{CP} \rightarrow \cancel{T}$

$\succ \vec{\sigma}_e \cdot \vec{E} \xrightarrow{T} -\vec{\sigma}_e \cdot \vec{E}$

› EDM für Neutron $\neq 0$!

Abschätzung: EDM (Neutron) $\sim 10^{-23}\,ecm$

exp. Limit: EDM (Neutron) $\sim 10^{-25}\,ecm$

› $\cancel{CP}$ ist nicht em Ursprungs !!

3

schwache WW

wenn „ja“ dann:

$\cancel{CP} \rightarrow \cancel{T}$ „milliweak“

!

ausgeschlossen durch Studium von polarisierten Neutronen

4 super schwache Kraft

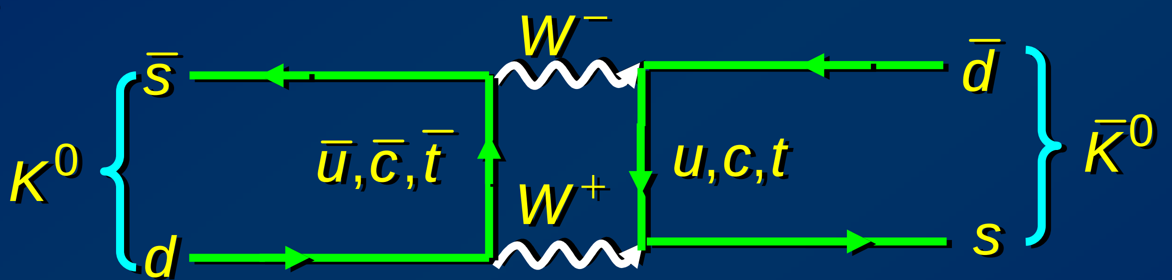
Eigenschaft: $\Delta S = 2$ Übergänge !!

damit: $\alpha \neq \beta$ in GL

Konsequenzen: $W_{Superweak} \sim 10^{-10}\, W_{Weak}$!!!

> CP – Verletzung bleibt nur im Kaon-System experimentell sichtbar

5 CP-Phase in CKM-Matrix



$\longrightarrow$ $\sim U_{KM}$

$\longleftarrow$ $\sim U^*_{KM}$

falls $U_{KM} \neq U^*_{KM}$

> $\cancel{CP}$ - Verletzung

Folge: EDM (Neutrons) $\sim 10^{-30}\, ecm$!!

C, P, T - Symmetrien

1

C-Symmetrie

Beispiel:

- $C|\pi^+\rangle = |\pi^-\rangle$ bis auf Phase
- $C|\gamma\rangle = -|\gamma\rangle$

da bewegte Ladungen unter C ihr Vorzeichen ändern

Frage: $C|\pi^0\rangle =$ „?" $|\pi^0\rangle$

Antwort: π^0 zerfällt $\rightarrow 2\pi \quad \succ C|\pi^0\rangle = +|\pi^0\rangle$

Konsequenz: $\pi^0 \rightarrow 3\gamma$ verboten

Limit: $\dfrac{\pi^0 \rightarrow 3\gamma}{\pi^0 \rightarrow 2\gamma} < 3{,}1 \cdot 10^{-8}$

- η -Zerfall beobachtet: $\eta \rightarrow 2\gamma$ (38%)

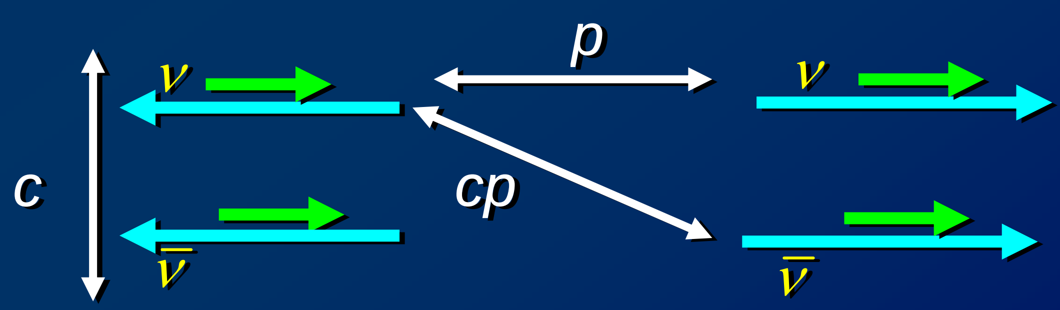
$\succ C|\eta\rangle = "+"|\eta\rangle$

$\succ \eta \rightarrow \pi^0\gamma \qquad (\pi^0 e^+ e^-)$ verboten

2 Transformationseigenschaften physikalischer Größen

Größe	T	P	
$\vec{r}$	r	$-r$	
$\vec{p}$	$-p$	$-p$	polar
σ (Spin)	$-\sigma$	σ	axial (rxp)
$\vec{E}$ ($\vec{E}-$Feld)	E	$-E$	$-\frac{\partial V}{\partial r}$
$\vec{B}$ (mag. Feld)	$-B$	B	
$\vec{\sigma}\cdot\vec{B}$	$\sigma\cdot B$	$\sigma\cdot B$	magn. Moment
$\vec{\sigma}\cdot\vec{E}$	$-\sigma\cdot E$	$-\sigma\cdot E$	elektr. Moment
$\vec{\sigma}\cdot\vec{p}$	$\sigma\cdot p$	$-\sigma\cdot p$	long. Pol.
$\vec{\sigma}\cdot(\vec{p}_1\times\vec{p}_2)$	$-\sigma\cdot(p_1\times p_2)$	$\sigma\cdot(p_1\times p_2)$	trans. Pol.

3 Noch einmal Neutrino



schwache WW
erhält CP !!

Wiederholung

1

K^0 -Zerfall

$K^0, \bar{K}^0$ sind Eigenzustände der starken WW.

Erzeugung:

K^0:

$$\pi^- + p \to \Lambda + K^0$$

CP

$$\pi^+ + \bar{p} \to \bar{\Lambda} + \bar{K}^0$$

nicht praktisch

$\bar{K}^0$:

$$\pi^+ + p \to K^+ + \bar{K}^0 + p$$

$K^0, \bar{K}^0$ sind bei Erzeugung zwei verschiedene Teilchen

K^0: $I_3 = -\frac{1}{2}; \quad S = +1 \qquad K^0 = (d\bar{s})$

$\bar{K}^0$: $I_3 = -\frac{1}{2}; \quad S = -1 \qquad \bar{K}^0 = (\bar{d}s)$

$CP(K^0) = \bar{K}^0$

$CP(\bar{K}^0) = K^0$

nicht E.F. von CP !! $K^0, \bar{K}^0$ sind Energie-entartet !!

2 ABER $K^0, \bar{K}^0$ unterliegen der schwachen WW

› I, S keine guten Quantenzahlen

K^0 $\bar{K}^0$ schw. W.W. K_1 Δm K_2

Da schwache WW CP respektiert:

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

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

jede andere Kombination

$$\tilde{K}_1 = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\left(\alpha\left|K^0\right\rangle + \beta\left|\bar{K}^0\right\rangle\right) \qquad \tilde{K}_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}\left(\alpha\left|K^0\right\rangle - \beta\left|\bar{K}^0\right\rangle\right)$$

mit $\alpha \neq \beta$ ist CP - verletzend !

3 CP – Erhaltung:

$\succ K_1 \rightarrow 2\pi \qquad CP = "+"$

$\succ K_2 \rightarrow 3\pi \qquad CP = "-"$

$K_1 = K_S^0 \qquad \tau_1 = 9\cdot 10^{-11}\,\text{sec}$

$K_2 = K_L^0 \qquad \tau_2 = 5\cdot 10^{-8}\,\text{sec}$

4 Strangeness - Oszillationen

$$K^0 \xrightarrow{t} (K^0, \bar{K}^0)$$

$\succ \Delta m_{K^0_{1,2}}$

$\succ \Delta m / m \sim 10^{-14}$!

5 Regenerations-Phänomen