

Kern- und Teilchenphysik

SS2012

Vorlesung-Website

 Johannes Blümer

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA



■ Symmetrien und Erhaltungssätze

- Einführung
- Diskrete Symmetrieeoperationen: C, P, CP, CPT
- ausführlicher: Sturz der Parität, Zeitumkehr,

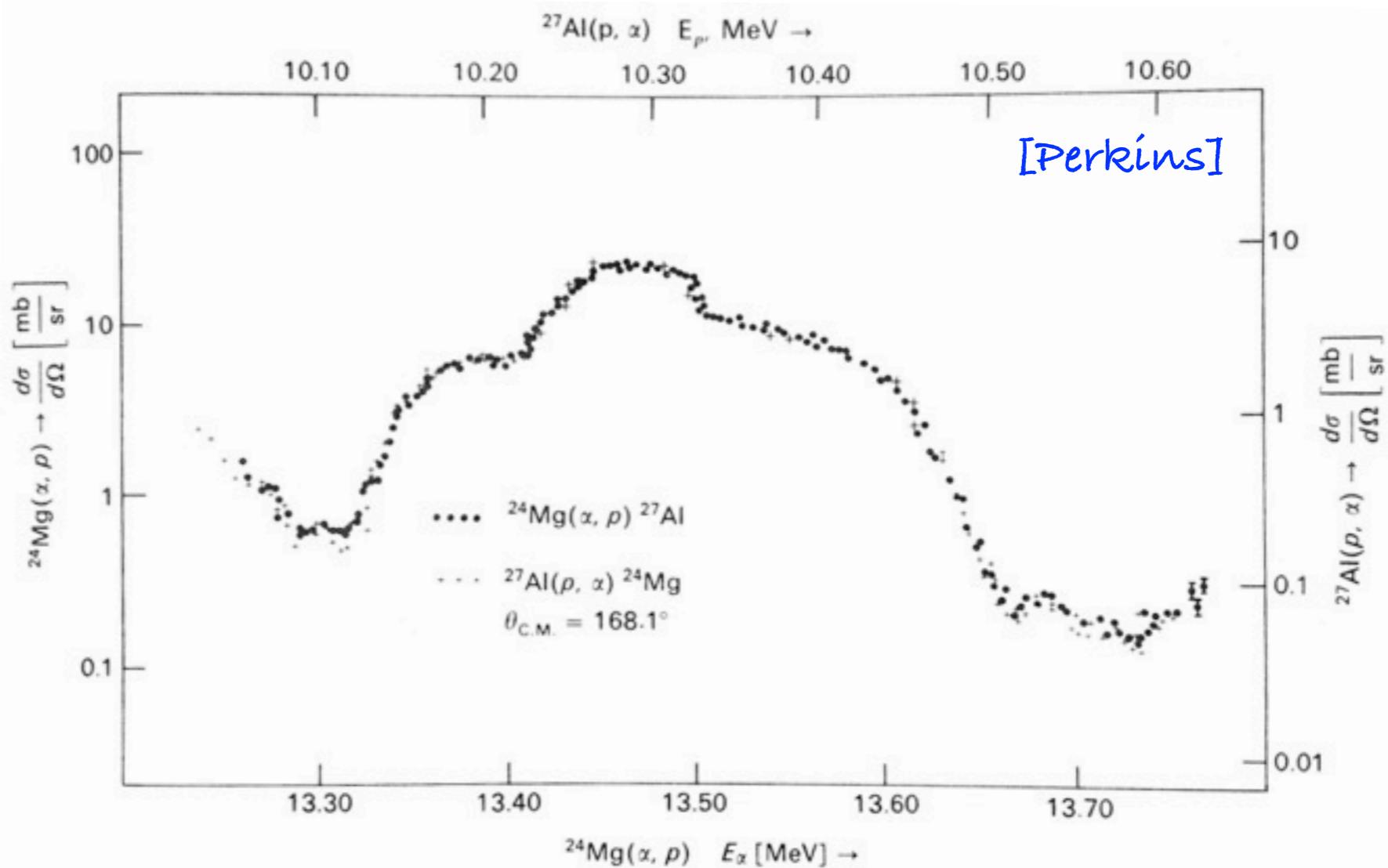
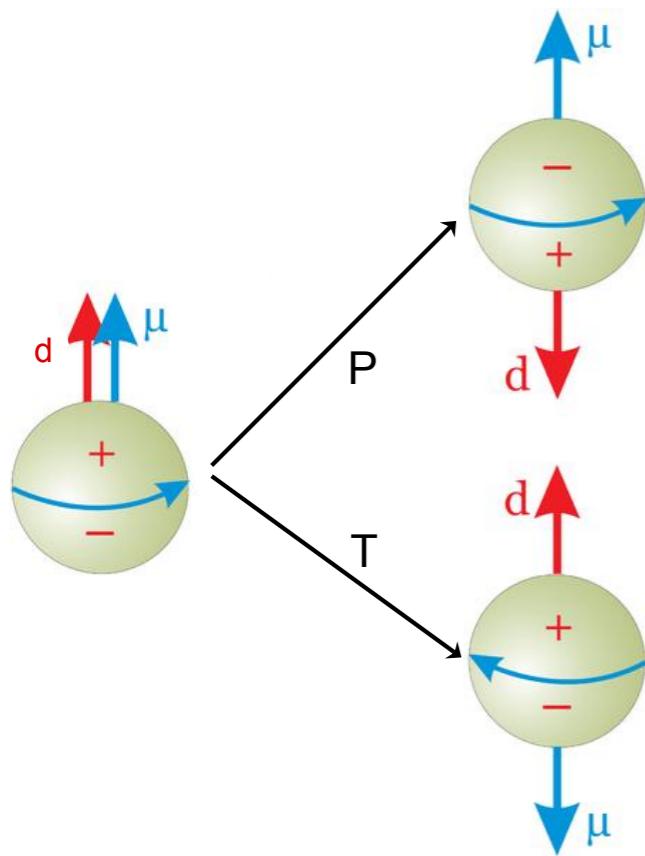
Erinnerung
an v16

CP-Verletzung

- CPT-Theorem
- Symmetrieeigenschaften der 3 Wechselwirkungen

■ Schwache Wechselwirkung

Zeitumkehr (1): in e.m. und starker WW erhalten

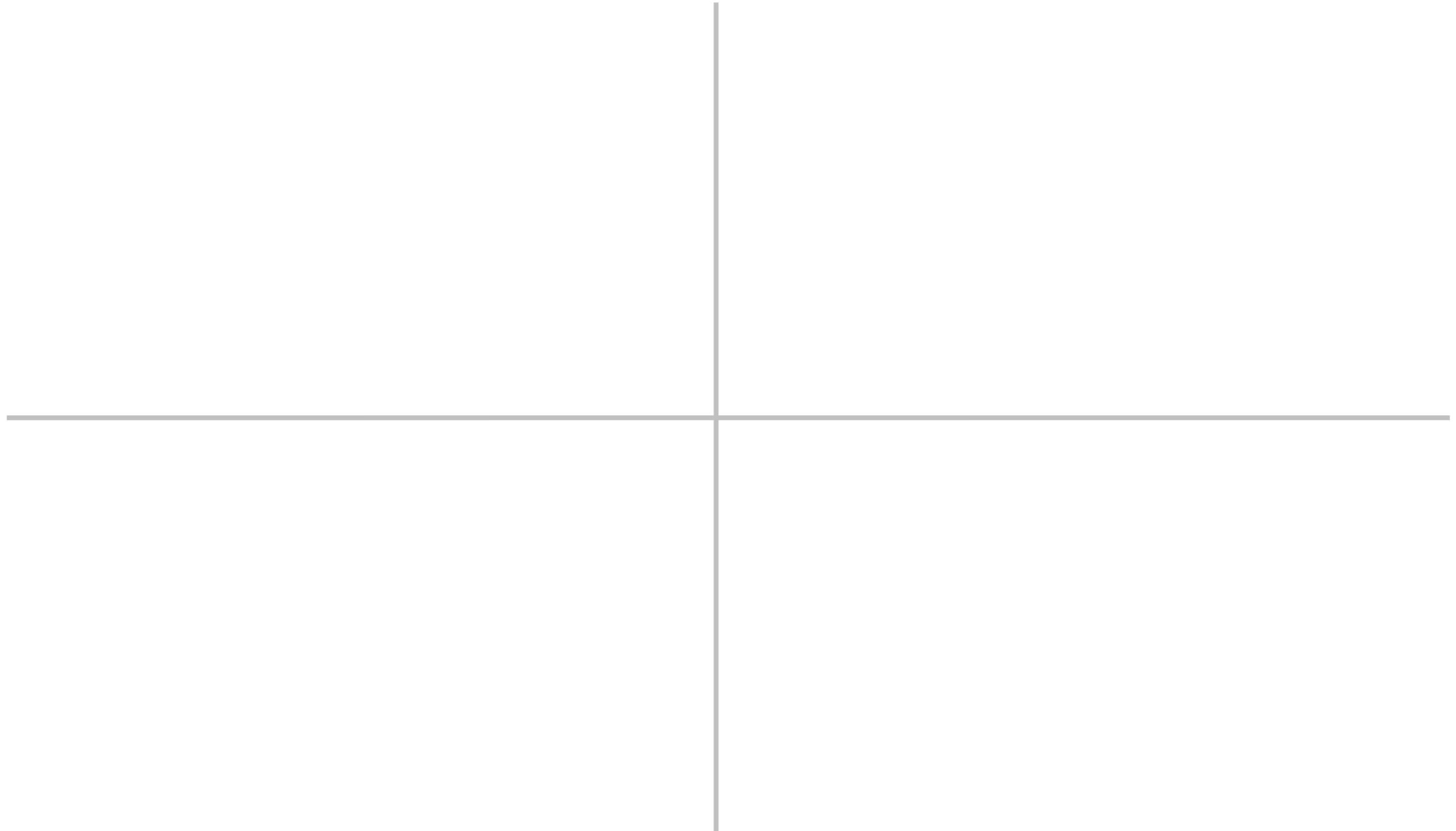


ein elektrisches Dipolmoment (EDM) eines kugelsymmetrischen Teilchens wäre T-verletzend, Limit für Neutronen < 3e–26 e cm

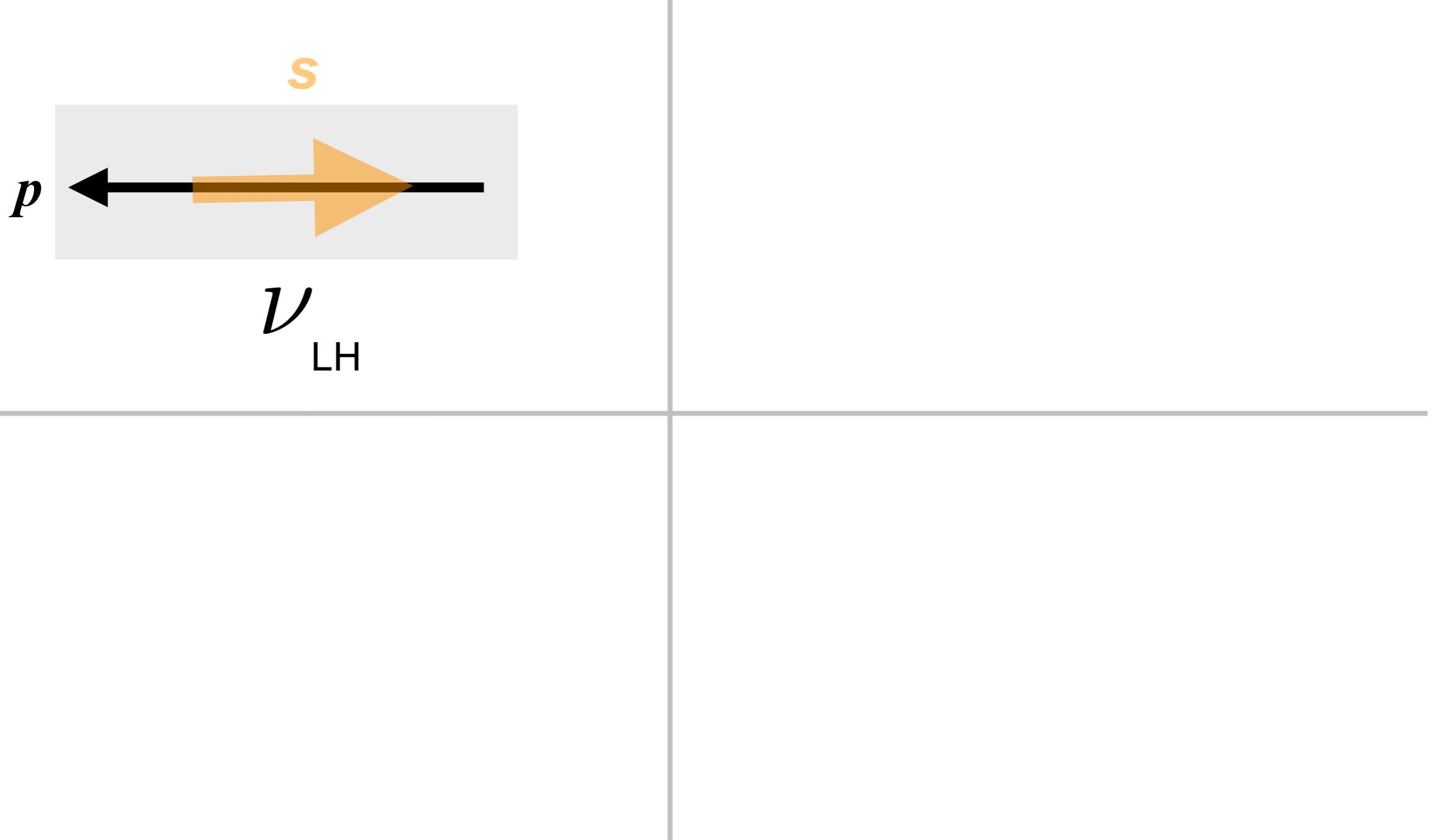
Abbildung 3.9 Der differentielle Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $^{24}\text{Mg}(\alpha, p)^{27}\text{Al}$ und die Umkehrreaktion, gemessen von Von Witsch et al., (1968).

T-verletzende-Amplitude < 0.3% der T-erhaltenden Amplitude

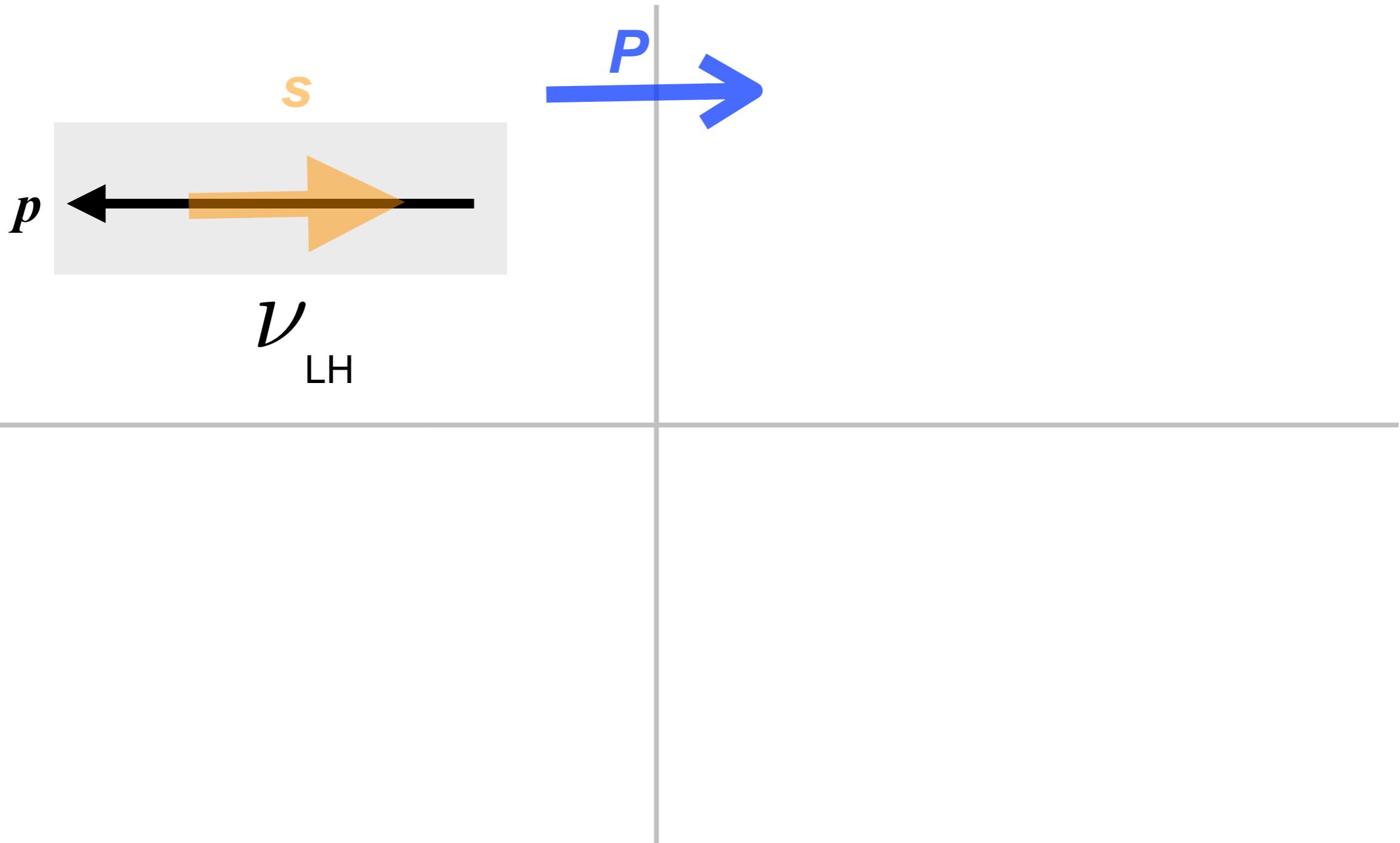
CP-Symmetrie in schw. WW erhalten?



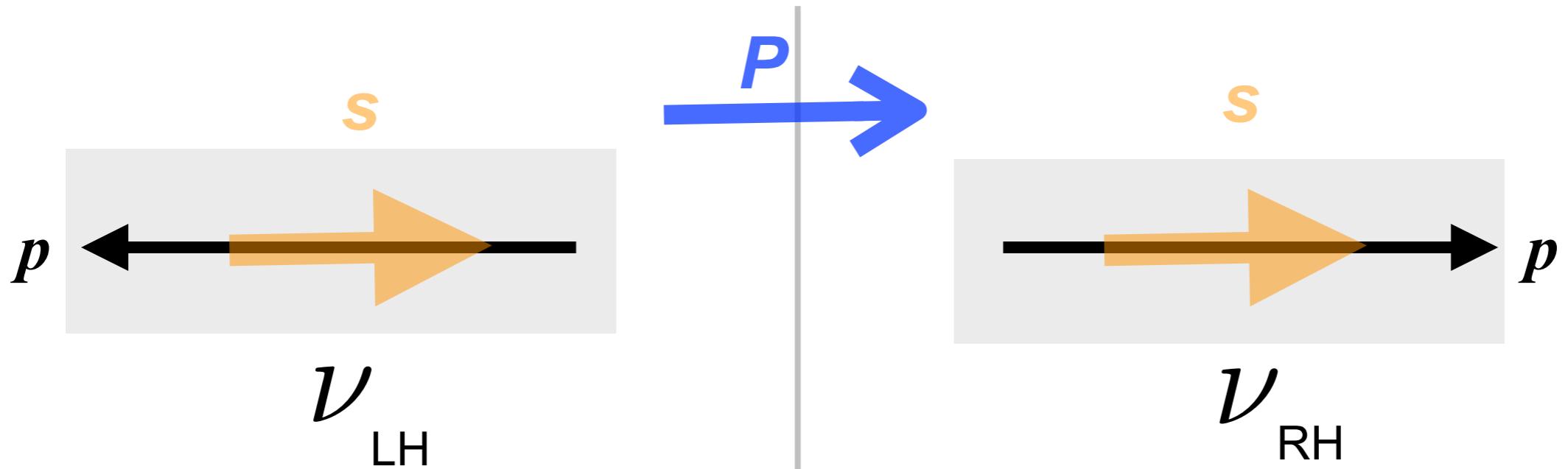
CP-Symmetrie in schw. WW erhalten?



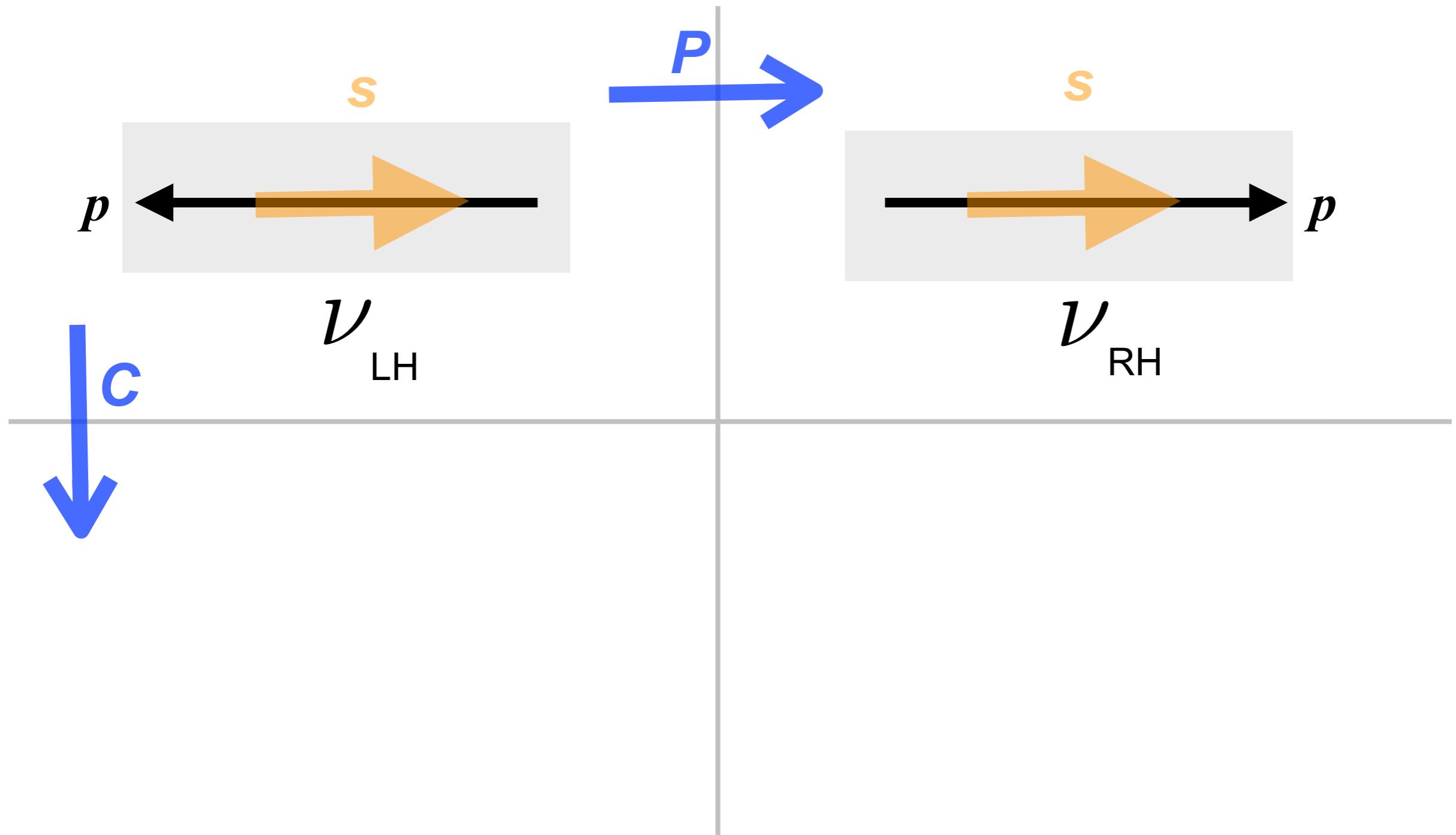
CP-Symmetrie in schw. WW erhalten?



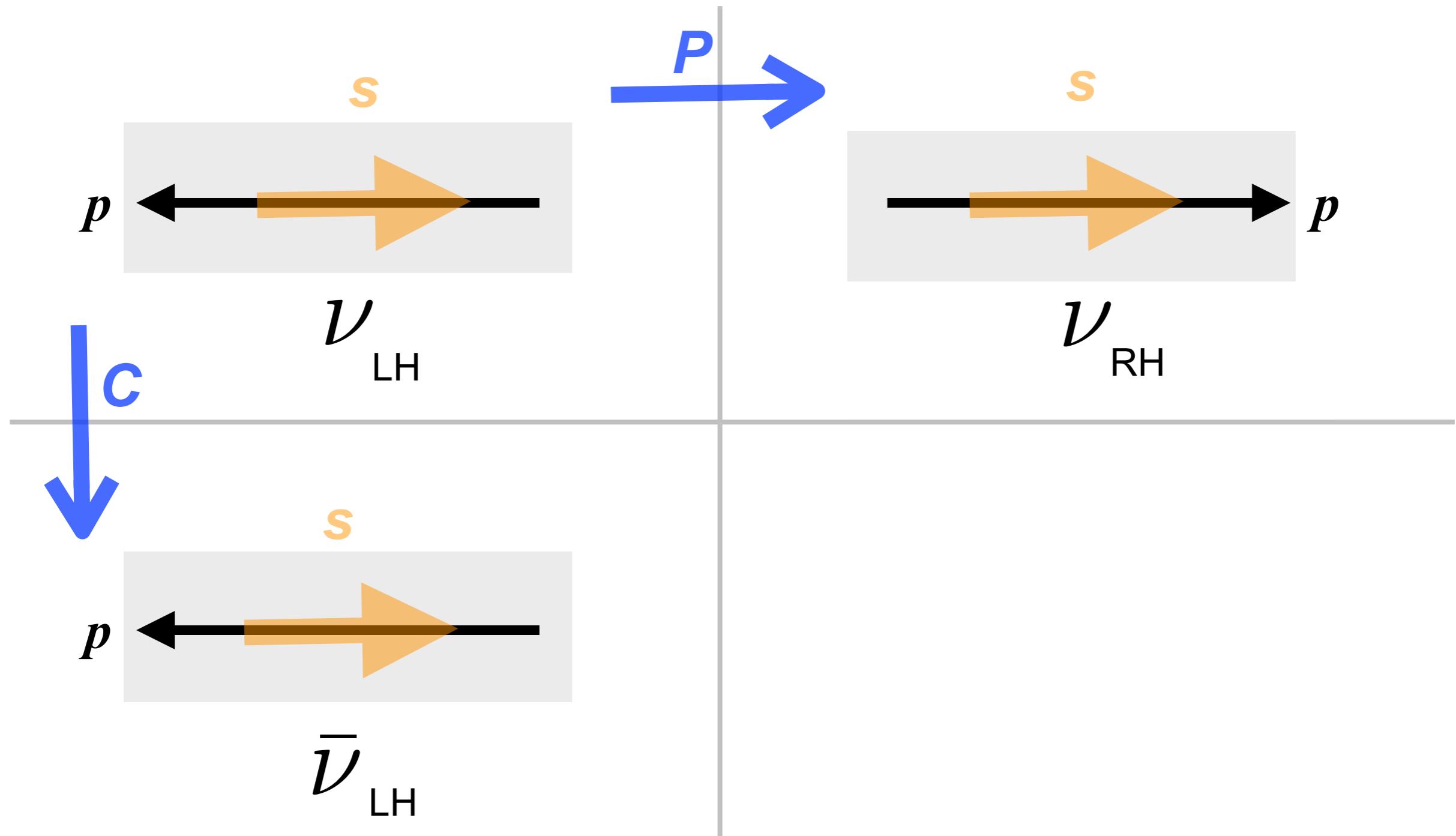
CP-Symmetrie in schw. WW erhalten?



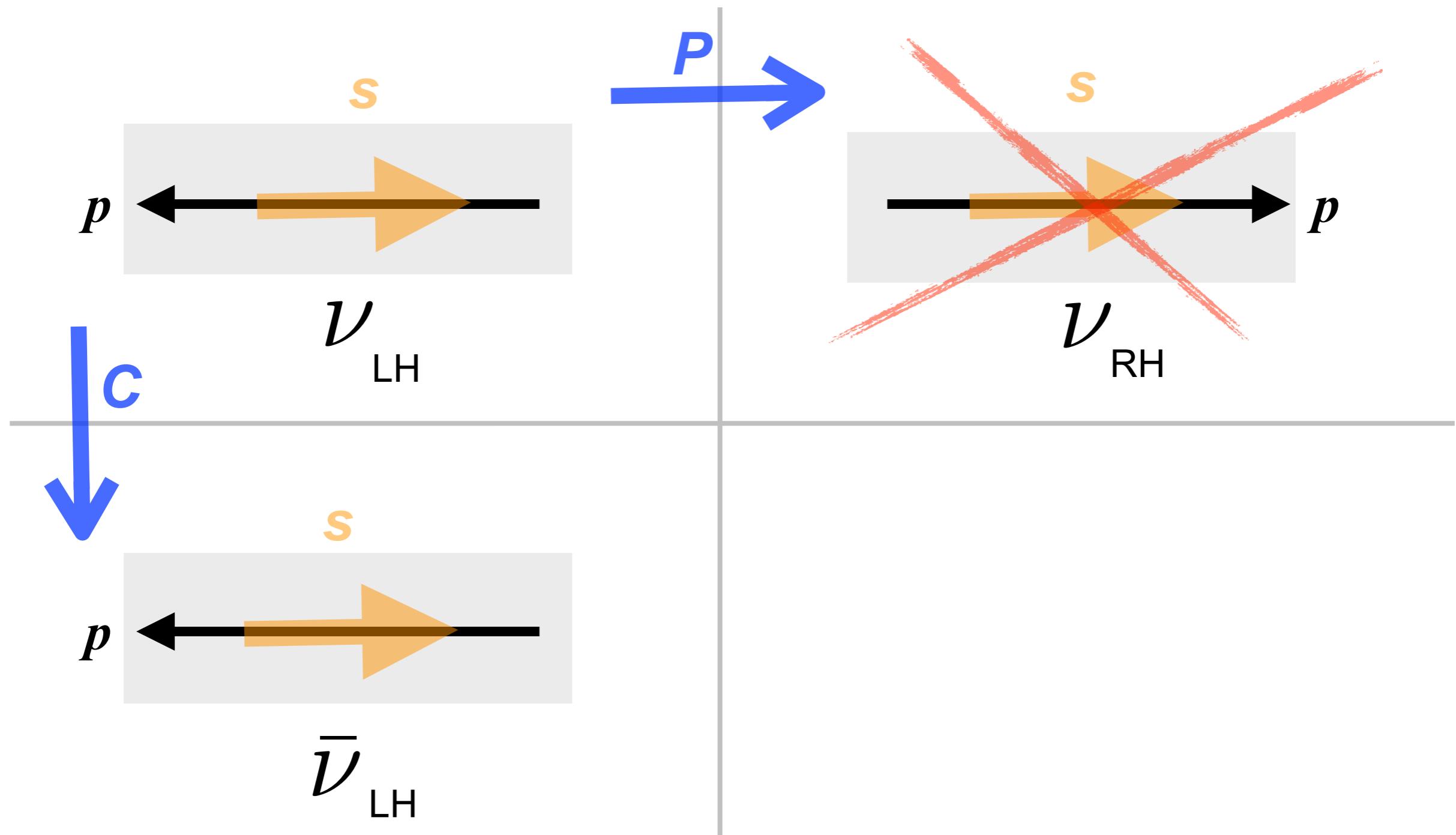
CP-Symmetrie in schw. WW erhalten?



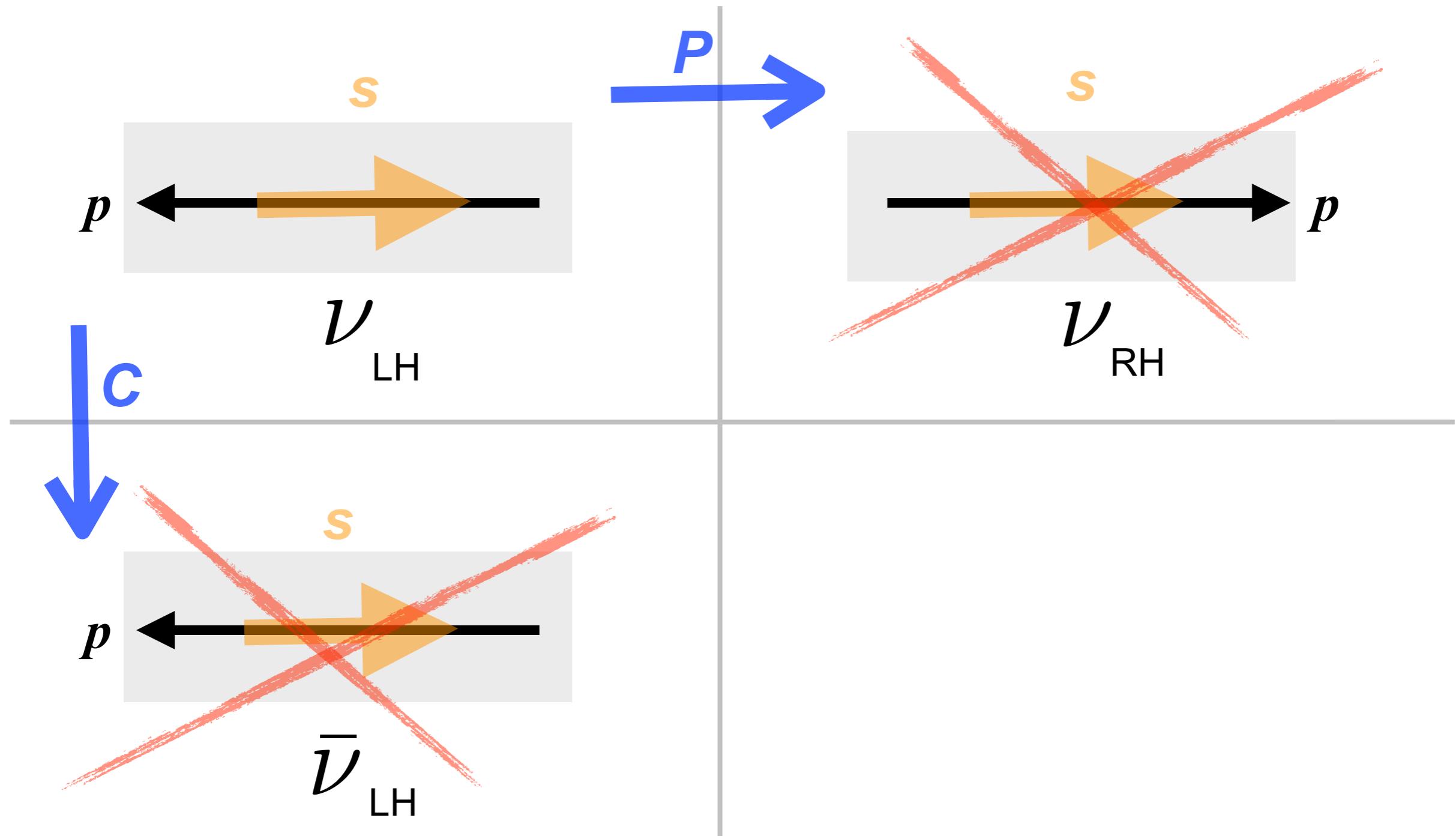
CP-Symmetrie in schw. WW erhalten?



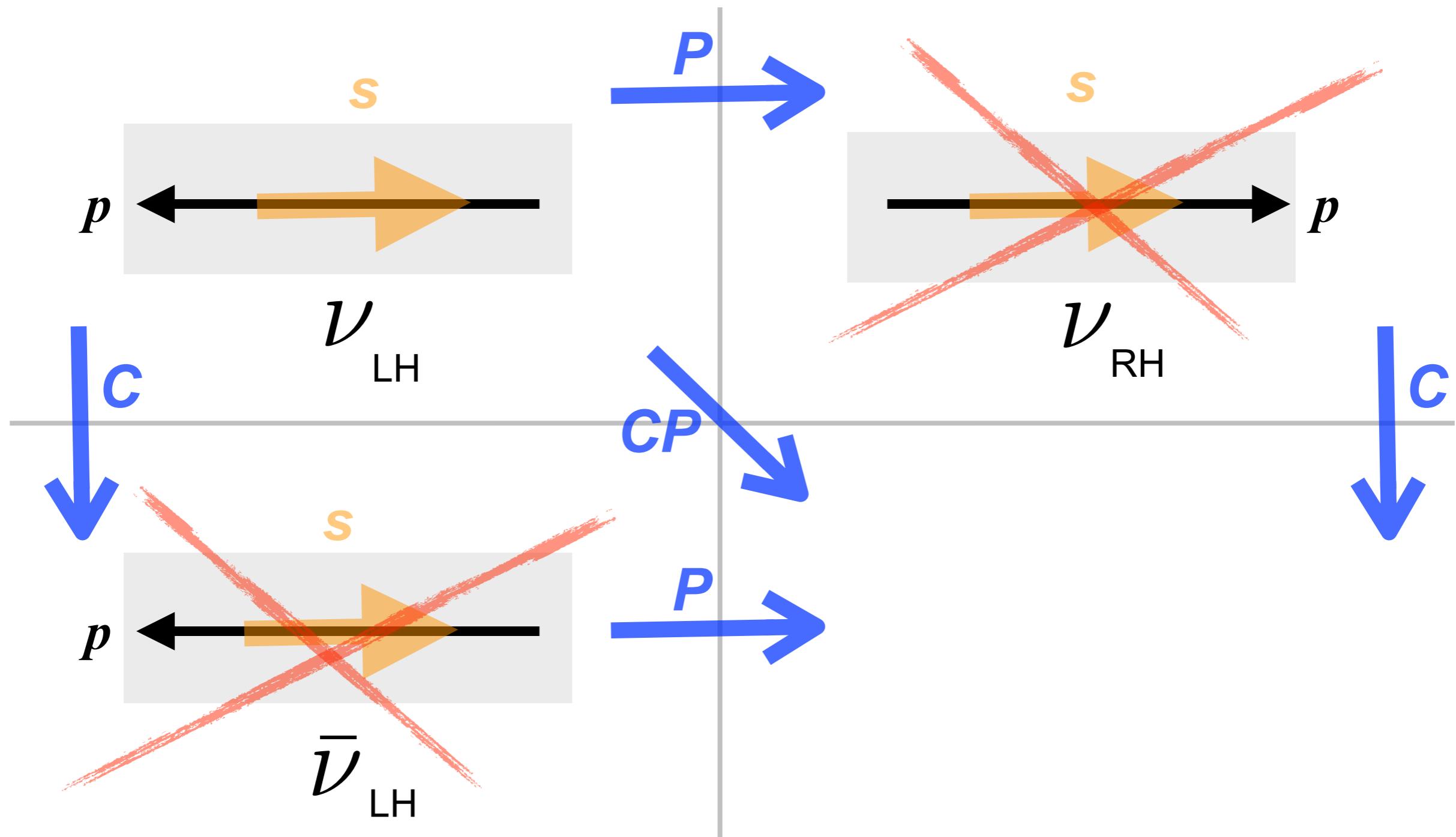
CP-Symmetrie in schw. WW erhalten?



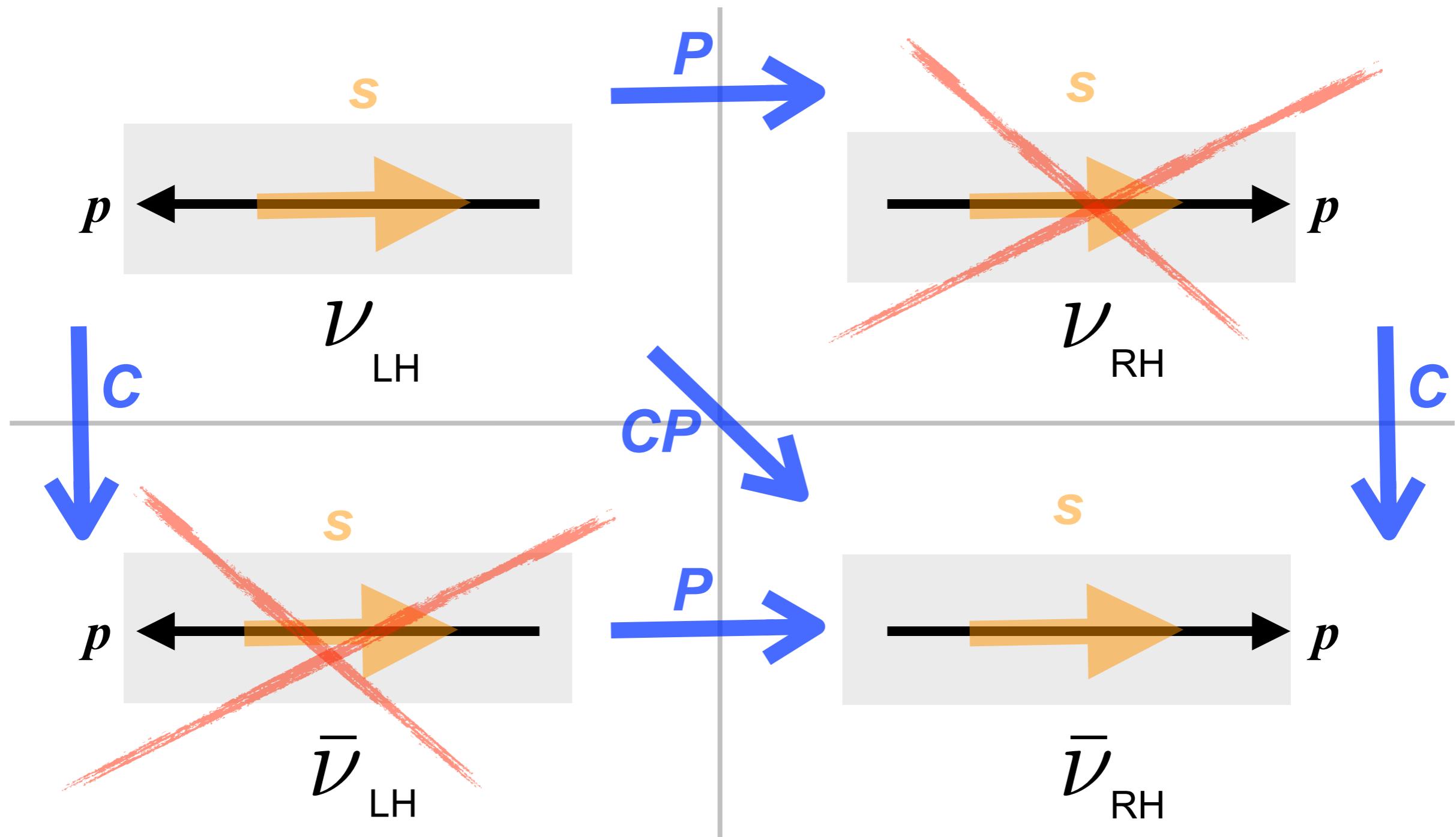
CP-Symmetrie in schw. WW erhalten?



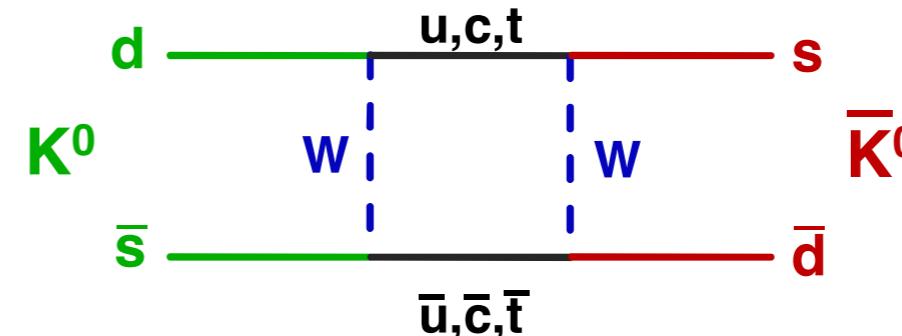
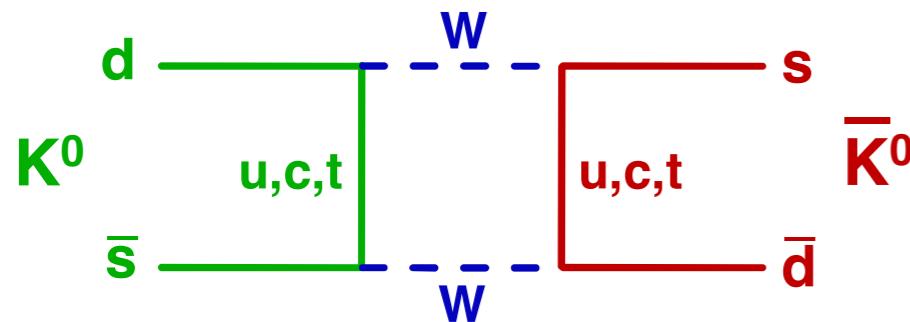
CP-Symmetrie in schw. WW erhalten?



CP-Symmetrie in schw. WW erhalten?



CP-Erhaltung bei neutralen Kaonen 1963



2π und 3π sind Eigenzustände von CP:

$$\begin{aligned} CP|\pi^0 \pi^0\rangle &= (+1) \cdot |\pi^0 \pi^0\rangle \\ CP|\pi^+ \pi^-\rangle &= (+1) \cdot |\pi^- \pi^+\rangle \\ (\text{mit } L=0:) &= (+1) \cdot |\pi^+ \pi^-\rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CP|\pi^0 \pi^0 \pi^0\rangle &= (-1) \cdot |\pi^0 \pi^0 \pi^0\rangle \\ CP|\pi^+ \pi^- \pi^0\rangle &= (-1) \cdot |\pi^- \pi^+ \pi^0\rangle \\ &= (-1) \cdot |\pi^+ \pi^- \pi^0\rangle \end{aligned}$$

K^0 und \bar{K}^0 sind keine Zustände mit definierter CP – Parität:

$$CP|K^0\rangle = (-1) \cdot |\bar{K}^0\rangle$$

$$CP|\bar{K}^0\rangle = (-1) \cdot |K^0\rangle$$

Wenn CP erhalten ist und ein Kaon in 2π (bzw. 3π) zerfällt, muss auch das Kaon eine definierte CP – Parität von +1 oder -1 haben

$$\begin{aligned} |K_1^0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \\ |K_2^0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \end{aligned}$$

mit $CP|K_1^0\rangle = (+1) \cdot |K_1^0\rangle$

mit $CP|K_2^0\rangle = (-1) \cdot |K_2^0\rangle$

$|K_1^0\rangle$ zerfällt in 2 Pionen ($\tau = 8.9 \cdot 10^{-11}$ s)

$|K_2^0\rangle$ zerfällt in 3 Pionen ($\tau = 5.2 \cdot 10^{-8}$ s) (lebt viel länger, weil der Phasenraum viel kleiner ist)

Stärke der CP-Verletzung

C, P im schw. WW "maximal verletzt" [→ formale Struktur des WW-Op.? "V-A"]

K^0, \bar{K}^0 definierte Strangeness (± 1), E-Zust. zu starken WW (assoz. Prod. !)

$K^0 < \frac{2\pi}{3\pi} > \bar{K}^0$ keine Eizust. zu CP ... → postulierte Zustandsmischung

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 - \bar{K}^0), \quad K_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 + \bar{K}^0)$$

$$\begin{array}{c} CP = +1 \\ \hookrightarrow 2\pi \end{array}$$

$$\begin{array}{c} CP = -1 \\ \hookrightarrow 3\pi \end{array}$$

$$\tau_s \approx 90 \text{ ps} \quad , \quad \text{"} K_L \text{"} \tau \approx 600 \tau_s \quad \text{w. Phasenturm}$$

$$K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0$$

$$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0$$

$$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0 \text{ existiert mit } BR \approx 2 \times 10^{-3}$$

"CP-Verletzung ist klein"

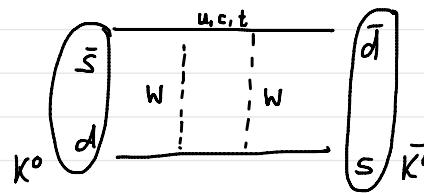
Beschreibung der Situation:

"CP-Verletzung durch Zustandsmischung"

$$K_L = K_1 + \varepsilon K_2$$

$$K_S = K_1 + \varepsilon K_2$$

Boxdiagramm:



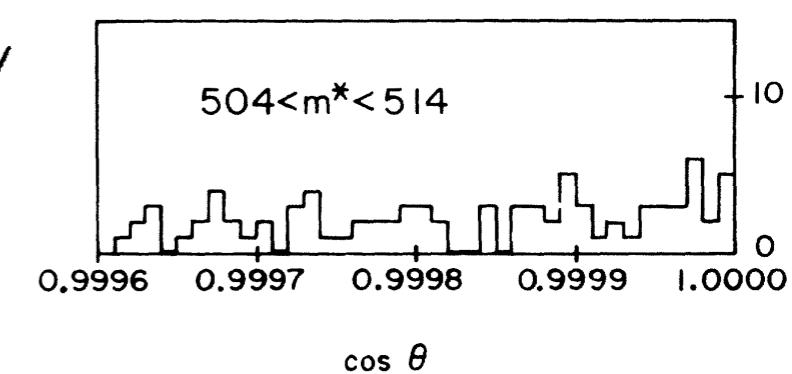
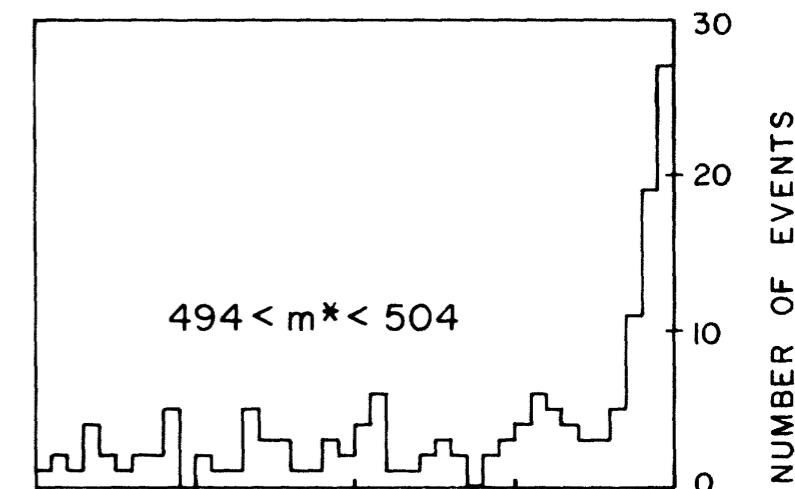
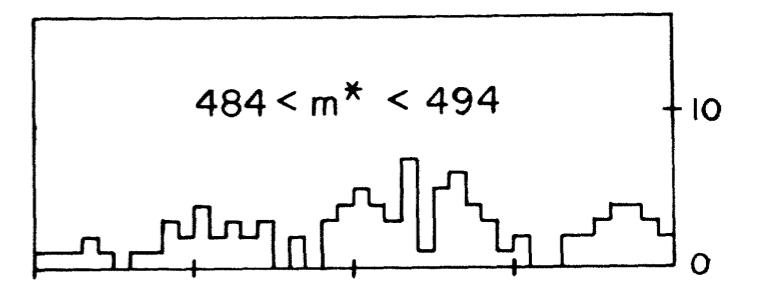
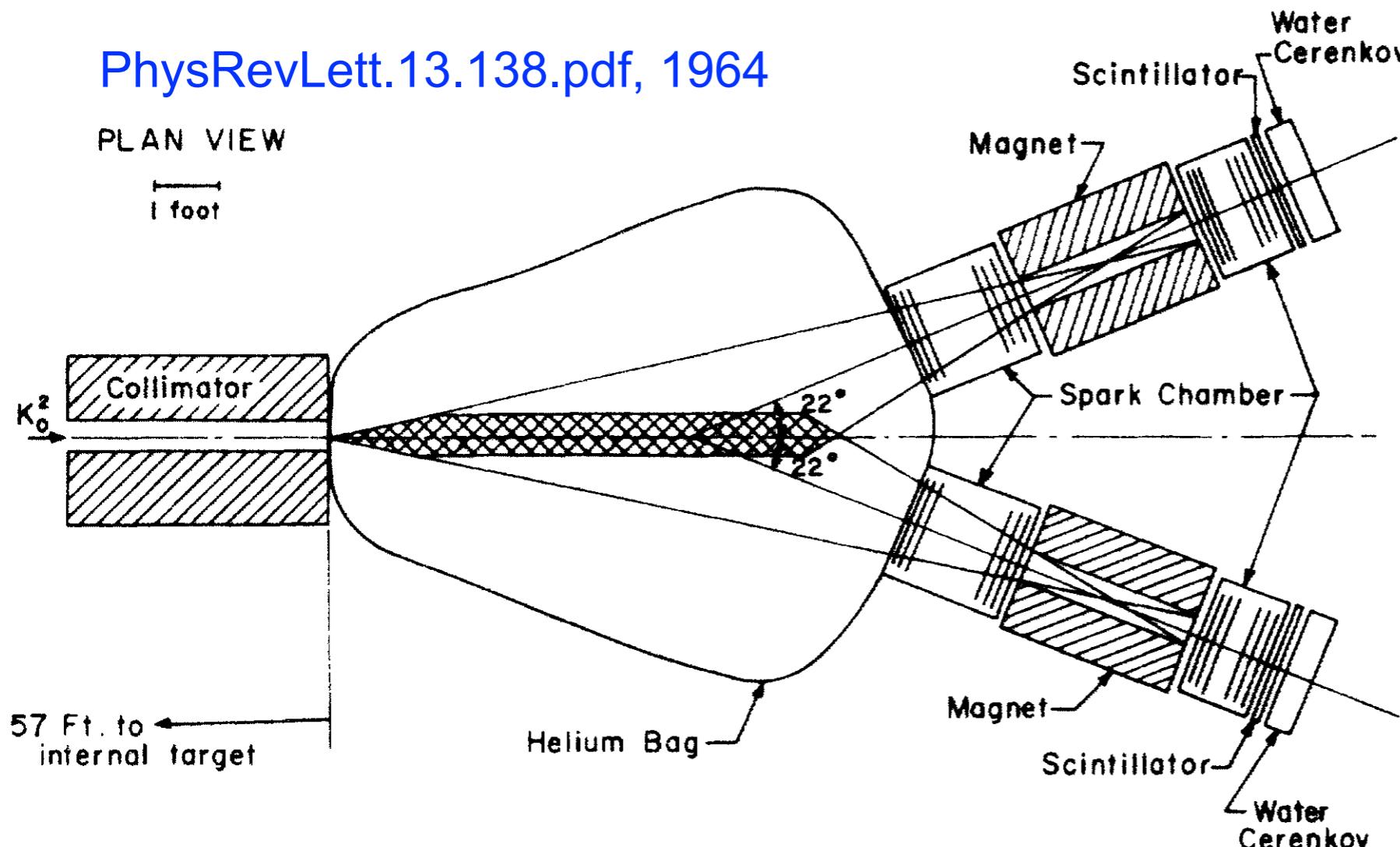
nicht die einzige Mögl.,
Es auch CPV in der Zerfallsamplitude!

CP-Verletzung bei neutralen Kaonen 1964

PhysRevLett.13.138.pdf, 1964



PLAN VIEW



We would conclude therefore that K_2^0 decays to two pions with a branching ratio $R = (K_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-) / (K_2^0 \rightarrow \text{all charged modes}) = (2.0 \pm 0.4) \times 10^{-3}$ where the error is the standard deviation.

CP-Verletzung bei neutralen Kaonen ist ein kleiner Effekt, aber eindeutig vorhanden...

1964

Damit CPT-Symmetrie gilt, muss eine T-Verletzung vorhanden sein, die die CP-Verletzung genau kompensiert...



erste direkte Messung von T-Verletzung:

Kabir-asymmetry:

$$\frac{R_{\bar{K}_{t=0}^0 \rightarrow K_t^0} - R_{K_{t=0}^0 \rightarrow \bar{K}_t^0}}{R_{\bar{K}_{t=0}^0 \rightarrow K_t^0} + R_{K_{t=0}^0 \rightarrow \bar{K}_t^0}}(t)$$

1998

Zeitumkehr (2): Erste direkte Messung einer Verletzung

http://inpa.lbl.gov/pbar/talks/F6_Tauscher.pdf

Kabir-Theorem (Kabir, PR D2 (1970) 540)

Time reversal invariance is violated, if the transformation rate

$$R_{\bar{K}_{t=0}^0 \rightarrow K_t^0}(t) \neq R_{K_{t=0}^0 \rightarrow \bar{K}_t^0}(t)$$

Kabir-asymmetry:

$$\frac{R_{\bar{K}_{t=0}^0 \rightarrow K_t^0} - R_{K_{t=0}^0 \rightarrow \bar{K}_t^0}}{R_{\bar{K}_{t=0}^0 \rightarrow K_t^0} + R_{K_{t=0}^0 \rightarrow \bar{K}_t^0}}(t) \xrightarrow{\text{CPLEAR}} A_T^{\exp}(t) = \frac{R_{\bar{K}_{t=0}^0 \rightarrow e^+ \pi^- \nu} - R_{K_{t=0}^0 \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu}}}{R_{\bar{K}_{t=0}^0 \rightarrow e^+ \pi^- \nu} + R_{K_{t=0}^0 \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu}}}(t) = \frac{\bar{R}^+ - R^-}{\bar{R}^+ + R^-}(t)$$

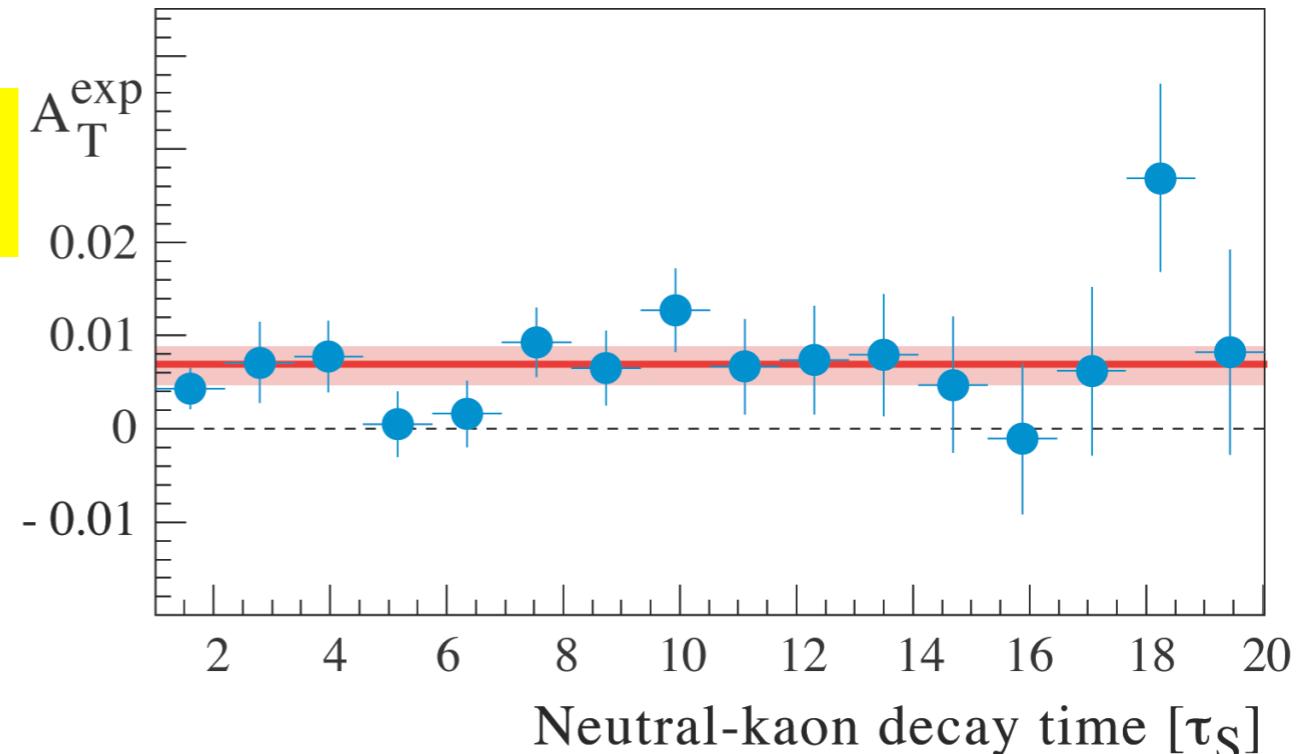
$$\langle A_T \rangle_{\text{average}} = (6.6 \pm 1.3_{\text{stat}} \pm 1.0_{\text{syst}}) \times 10^{-3}$$

Ref.: Angelopoulos et al, PL B444 (1998) 43

$$A_T(t) = 4 \operatorname{Re}(\varepsilon) - 2 \operatorname{Re}(y + x_-)$$

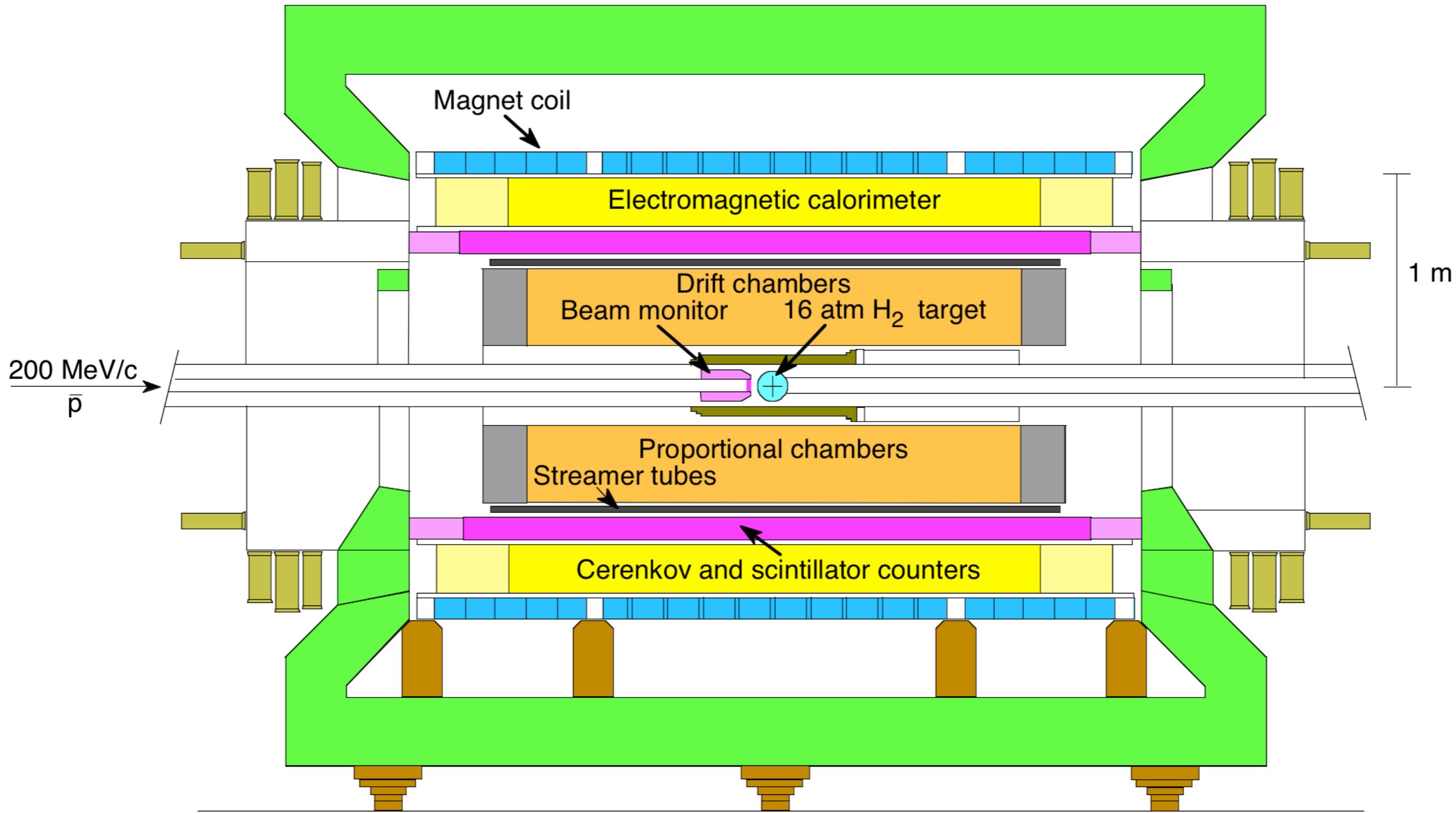
$$+ 2 \frac{\operatorname{Re} x_- \left(e^{-\frac{1}{2}\Delta\gamma t} - \cos(\Delta m t) \right) + \operatorname{Im} x_+ \sin(\Delta m t)}{\cosh\left(\frac{1}{2}\Delta\gamma t\right) - \cos(\Delta m t)}$$

$$\xrightarrow{t \gg \tau_s} 4 \operatorname{Re}(\varepsilon) - 2 \operatorname{Re}(y + x_-)$$



First ever measured T-reversal violation through rate comparison
Arrow of time: antikaons disappear faster than kaons ($\operatorname{Re}\varepsilon > 0$)

CLEAR-Detektor



CPT-Theorem (Lüders & Pauli 1954)

Die **physikalischen Größen** sind **invariant unter C-P-T-Transformation**

Voraussetzungen:

- Lorentz-Invarianz
 - Lokalität
 - Quantenmechanik
- }
- Wahrscheinlichkeitserhaltung
 - es gibt einen Zustand niedrigster Energie
 - endliche Zahl elementarer Teilchen
- lokale, relativistische
Quantenfeldtheorie**



Gerhart Lüders



Wolfgang Pauli

Konsequenzen:

- Masse von Teilchen und Antiteilchen sind gleich
- Lebensdauer von Teilchen und Antiteilchen sind gleich
- Betrag des magn. Moments von Teilchen und Antiteilchen sind gleich

CPT-Theorem (Lüders & Pauli 1954)

Die **physikalischen Größen** sind **invariant unter C-P-T-Transformation**

Voraussetzungen:

- Lorentz-Invarianz
 - Lokalität
 - Quantenmechanik
- }
- Wahrscheinlichkeitserhaltung
 - es gibt einen Zustand niedrigster Energie
 - endliche Zahl elementarer Teilchen
- lokale, relativistische
Quantenfeldtheorie**



Gerhart Lüders



Wolfgang Pauli

Konsequenzen:

- Masse von Teilchen und Antiteilchen sind gleich
- Lebensdauer von Teilchen und Antiteilchen sind gleich
- Betrag des magn. Moments von Teilchen und Antiteilchen sind gleich

CPT-Theorem ist parameterfrei – es gibt keine 'geringen' Abweichungen

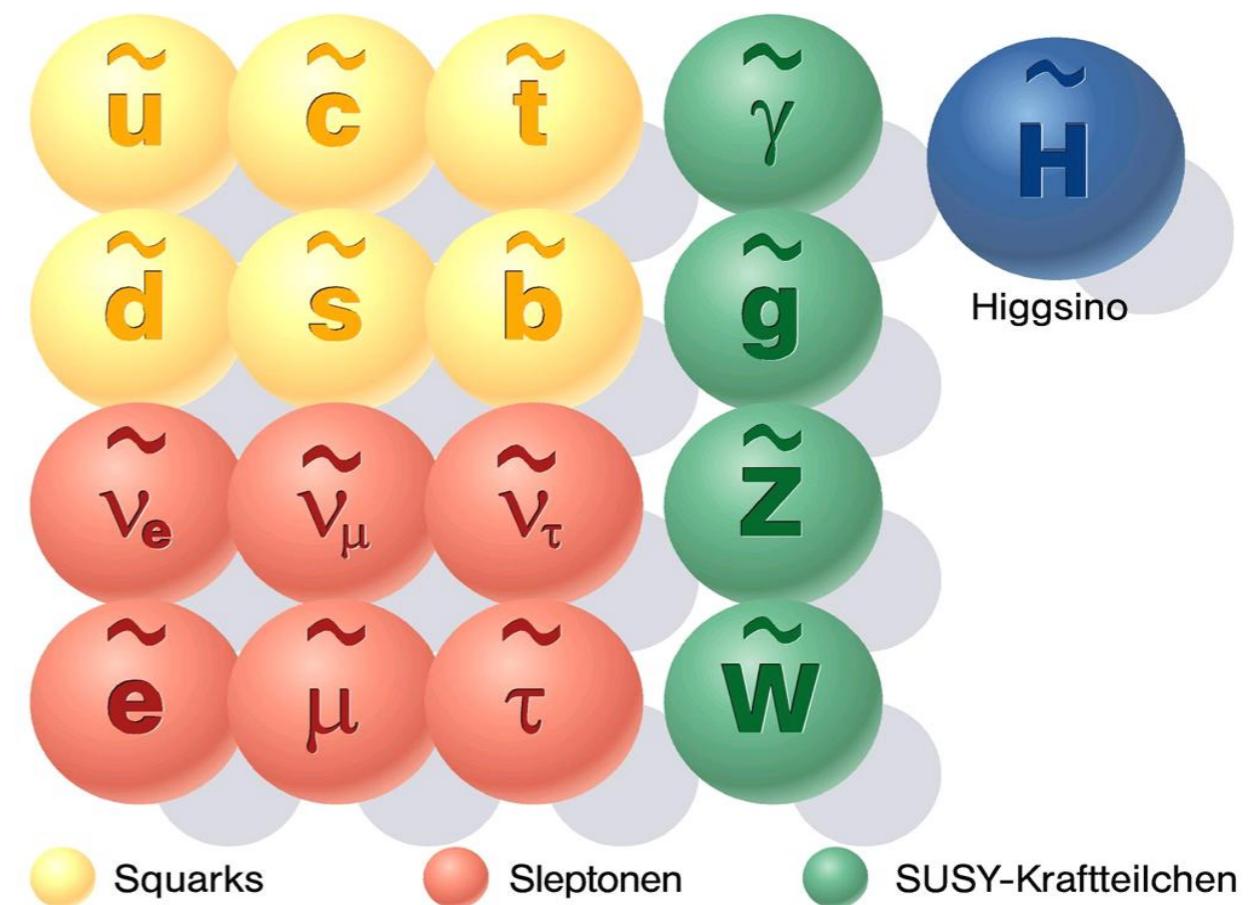
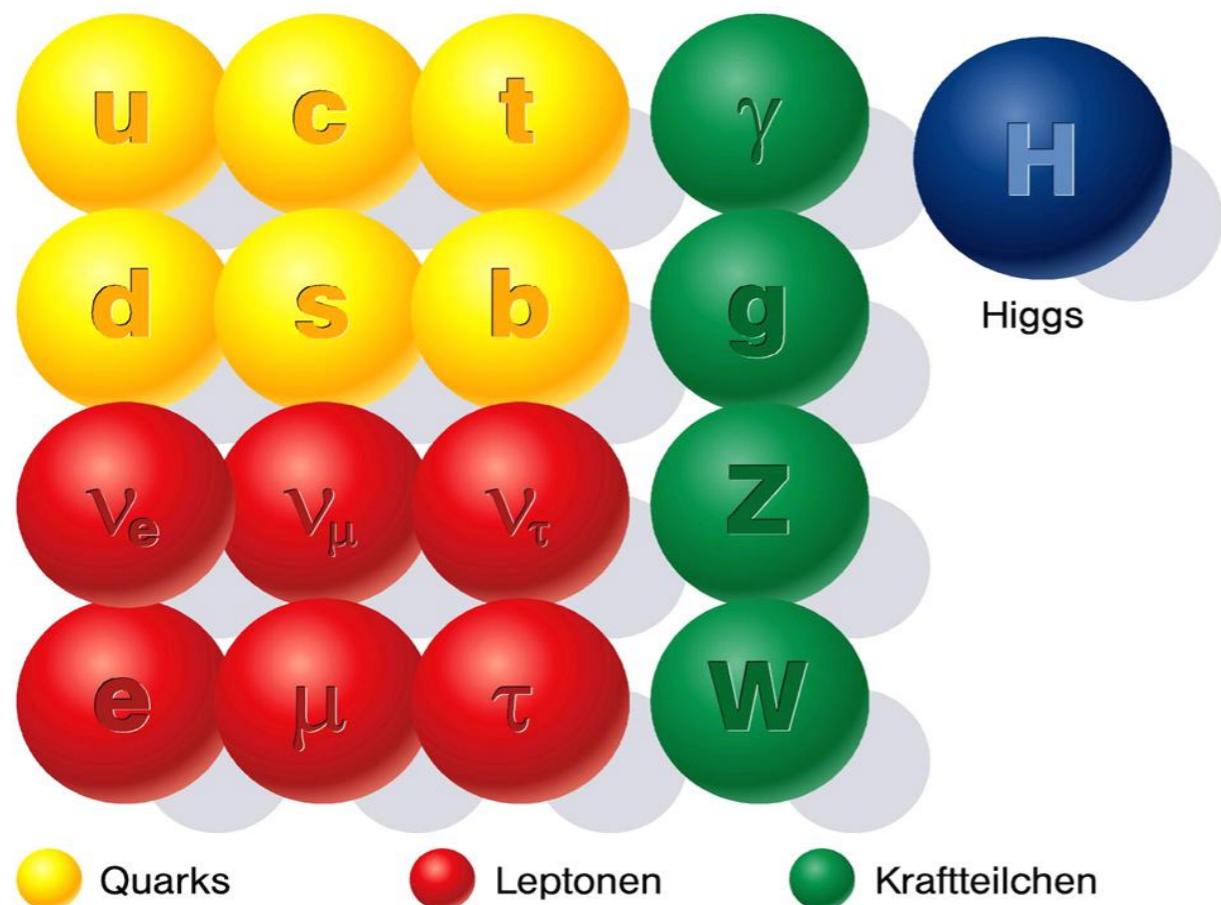
Expt. Tests von CPT-Symmetrie

$(m_{W^+} - m_{W^-}) / m_{\text{average}}$	-0.002 ± 0.007
$(m_{e^+} - m_{e^-}) / m_{\text{average}}$	$< 8 \times 10^{-9}$, CL = 90%
$ q_{e^+} + q_{e^-} /e$	$< 4 \times 10^{-8}$
$(g_{e^+} - g_{e^-}) / g_{\text{average}}$	$(-0.5 \pm 2.1) \times 10^{-12}$
$(\tau_{\mu^+} - \tau_{\mu^-}) / \tau_{\text{average}}$	$(2 \pm 8) \times 10^{-5}$
$(g_{\mu^+} - g_{\mu^-}) / g_{\text{average}}$	$(-0.11 \pm 0.12) \times 10^{-8}$
$(m_{\tau^+} - m_{\tau^-}) / m_{\text{average}}$	$< 2.8 \times 10^{-4}$, CL = 90%
$2(m_t - m_{\bar{t}}) / (m_t + m_{\bar{t}})$	0.022 ± 0.022
$(m_{\pi^+} - m_{\pi^-}) / m_{\text{average}}$	$(2 \pm 5) \times 10^{-4}$
$(\tau_{\pi^+} - \tau_{\pi^-}) / \tau_{\text{average}}$	$(6 \pm 7) \times 10^{-4}$
$(m_{K^+} - m_{K^-}) / m_{\text{average}}$	$(-0.6 \pm 1.8) \times 10^{-4}$
$(\tau_{K^+} - \tau_{K^-}) / \tau_{\text{average}}$	$(0.10 \pm 0.09)\% \ (S = 1.2)$
$K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ rate difference/average	$(-0.5 \pm 0.4)\%$
$K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ rate difference/average	$(0.8 \pm 1.2)\%$
δ in $K^0 - \bar{K}^0$ mixing	
real part of δ	$(2.3 \pm 2.7) \times 10^{-4}$
imaginary part of δ	$(0.4 \pm 2.1) \times 10^{-5}$
$\text{Re}(y)$, K_{e3} parameter	$(0.4 \pm 2.5) \times 10^{-3}$
$\text{Re}(x_-)$, K_{e3} parameter	$(-2.9 \pm 2.0) \times 10^{-3}$
$ m_{K^0} - m_{\bar{K}^0} / m_{\text{average}}$	$< 8 \times 10^{-19}$, CL = 90%
$(\Gamma_{K^0} - \Gamma_{\bar{K}^0}) / m_{\text{average}}$	$(8 \pm 8) \times 10^{-18}$

Erhaltungssätze und Wechselwirkungen

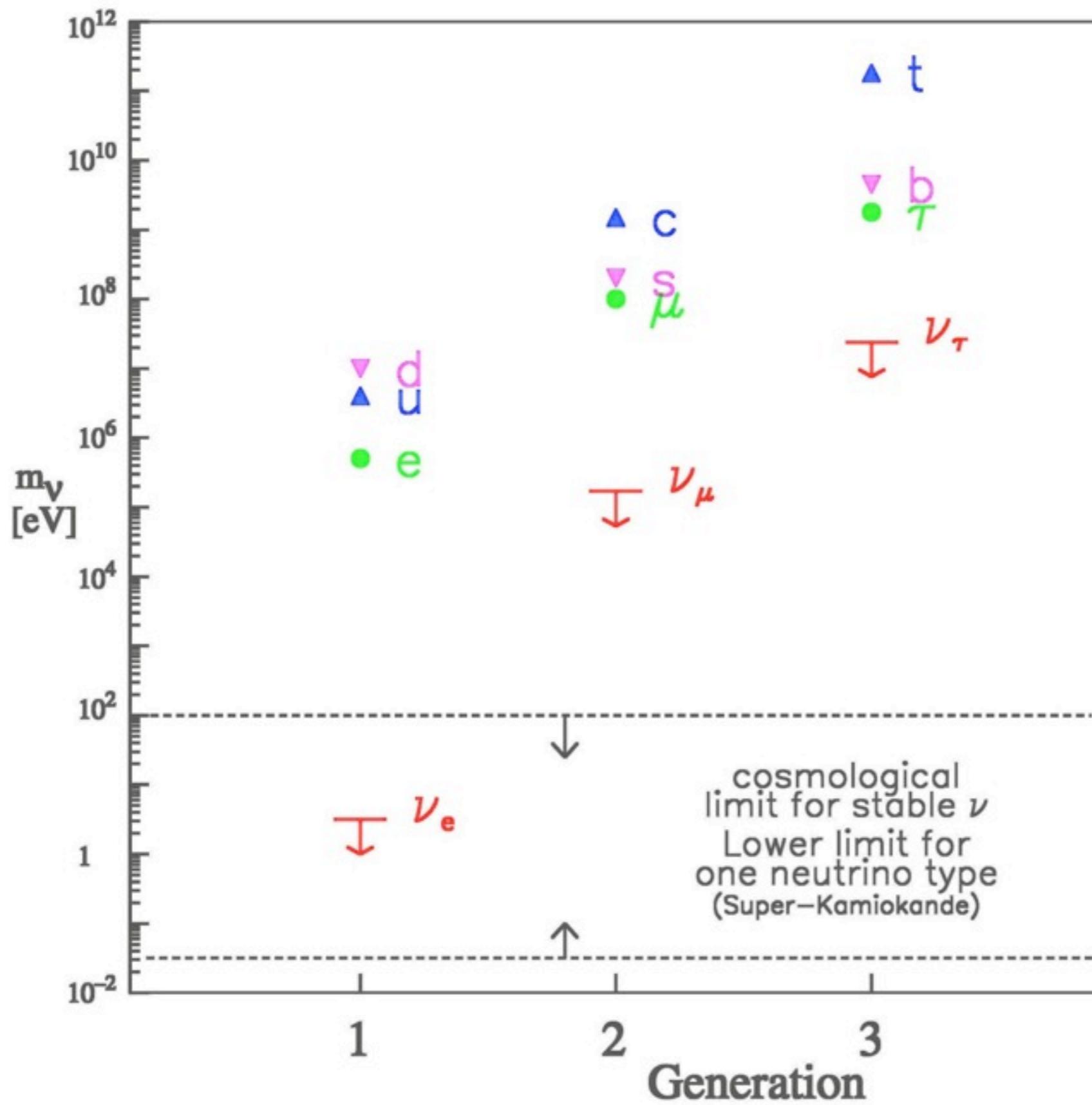
Symmetrie	Starke WW	e.m. WW	schw. WW	Bem.
Zeittranslation	✓	✓	✓	Energieerhaltung
Ortstranslation	✓	✓	✓	Impulserhaltung
Drehimpuls	✓	✓	✓	Drehimpulserhaltung
Baryonenzahl	✓	✓	✓	Protonzerfall
Strangeness	✓	✓	–	<i>Sonderfall von Flavour</i>
Flavour	✓	✓	–	keine FCNC
Farbe	✓	✓ Hadr.	✓ Hadr.	nur für Hadronen
Leptonenzahl	n.a.	✓	✓	indiv. LZ in ν-Oszill verletzt
Isospin I	✓	–	–	
Isospin I ₃	✓	✓	–	
P	✓	✓	–	
C	✓	✓	–	
T	✓	✓	–	verl. f. neutr. Mesonen
CP	✓	✓	–	verl. f. neutr. Mesonen
CPT	✓	✓	✓	
G-Parität	✓	–	–	nützl. Größe; G = C e ^{iπl²}

Supersymmetrie



- Schwache Wechselwirkung
 - Leptonfamilien
 - geladene und neutrale Ströme
 - von der Fermitheorie zu massiven Austauschbosonen
 - Universalität der schwachen Kopplungskonstante
 - Quarkmischung

Leptonfamilien



	e	μ	T	
m	0.5	105	1 777	MeV
T	∞	$2 \mu\text{s}$	0.3 ps	

$$\begin{aligned}
 &\rightarrow e^+ \bar{\nu}_e \bar{\nu}_\tau \\
 &\rightarrow \mu^+ \bar{\nu}_\mu \bar{\nu}_\tau \\
 &\rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau \\
 &\rightarrow \rho^+ \bar{\nu}_\tau \\
 &\rightarrow a_1^+ \bar{\nu}_\tau
 \end{aligned}$$

Wie identifiziert man die Neutrinos?

Wie stark ist die schwache WW? Ist die Kopplung universell?

Wieso massive Austauschteilchen?

Die zweite Neutrino-generation

OBSERVATION OF HIGH-ENERGY NEUTRINO REACTIONS AND THE EXISTENCE OF TWO KINDS OF NEUTRINOS*

G. Danby, J-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry,
M. Schwartz,† and J. Steinberger†

Columbia University, New York, New York and Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

(Received June 15, 1962)

In the course of an experiment at the Brookhaven AGS, we have observed the interaction of high-energy neutrinos with matter. These neutrinos were produced primarily as the result of the decay of the pion:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + (\nu/\bar{\nu}). \quad (1)$$

It is the purpose of this Letter to report some of the results of this experiment including (1) demonstration that the neutrinos we have used pro-

duce μ mesons but do not produce electrons, and hence are very likely different from the neutrinos involved in β decay and (2) approximate cross sections.

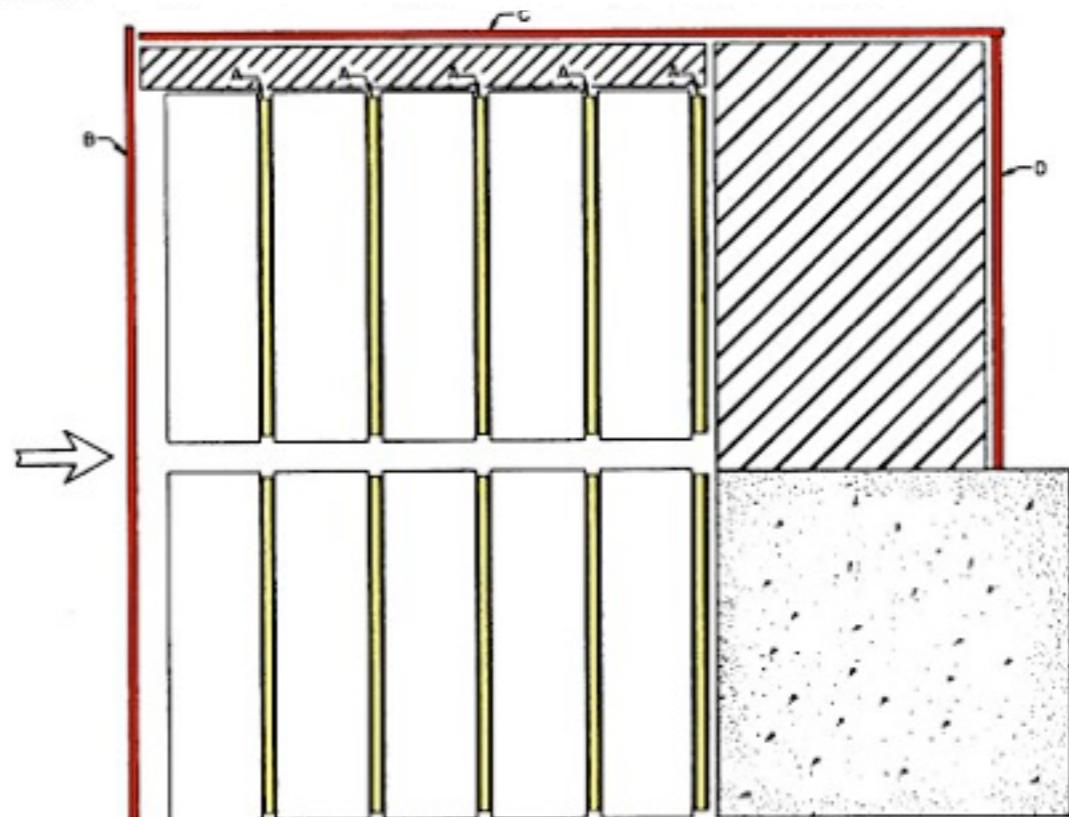
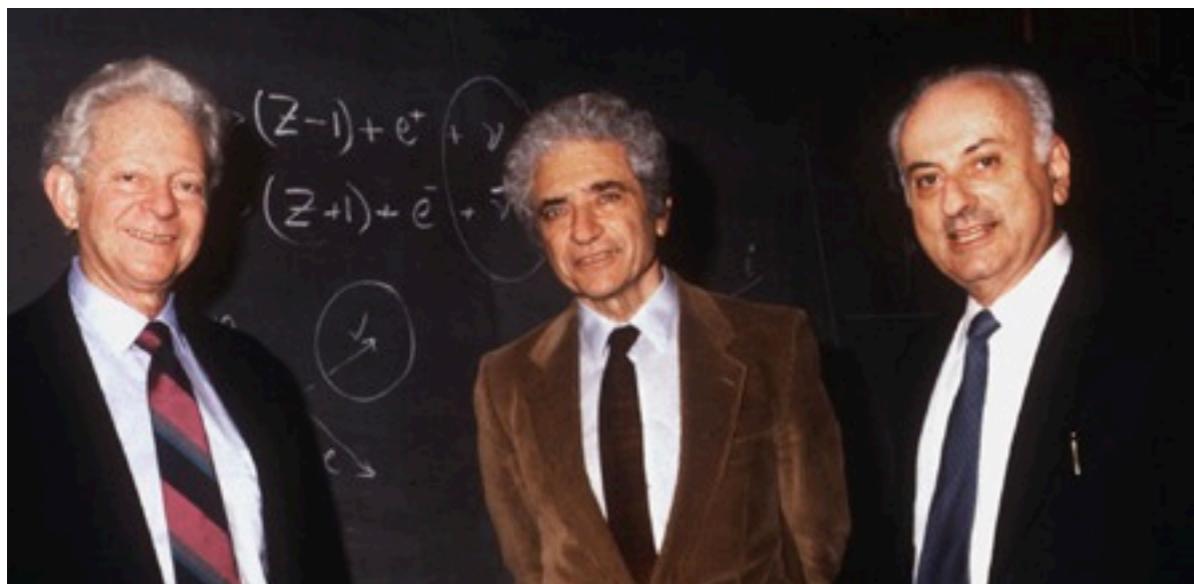
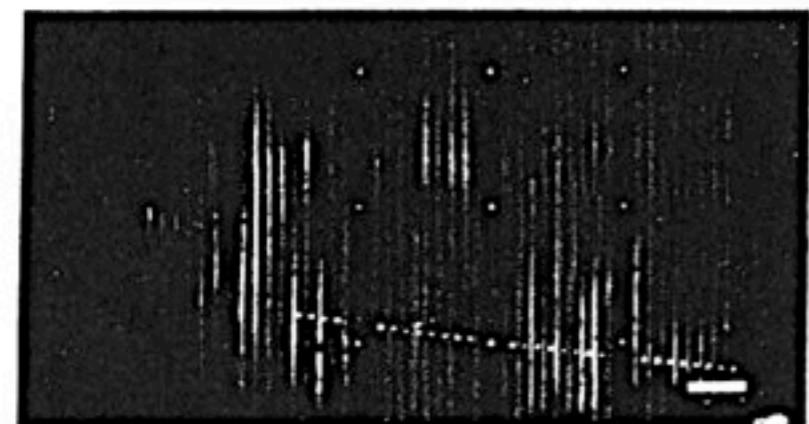
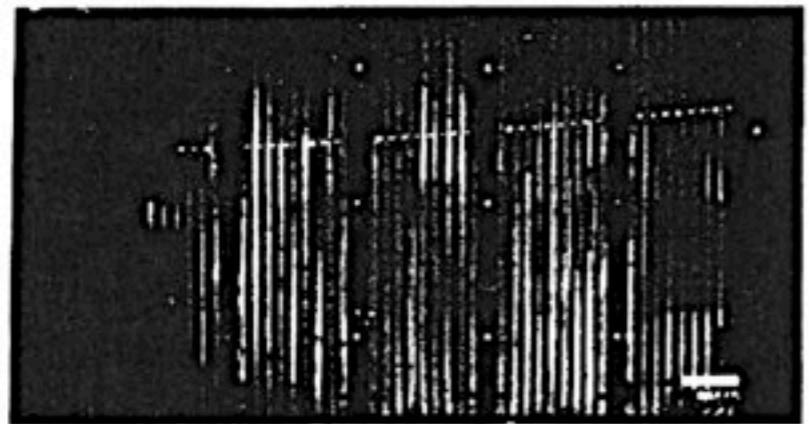


FIG. 3. Spark chamber and counter arrangement. *A* are the triggering slabs; *B*, *C*, and *D* are anticoincidence slabs. This is the front view seen by the four-camera stereo system.

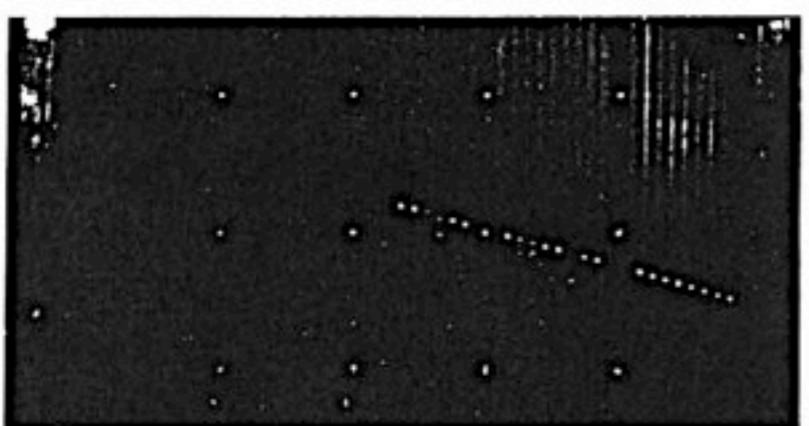




A



B



C

FIG. 5. Single muon events. (A) $p_\mu > 540$ MeV and δ ray indicating direction of motion (neutrino beam incident from left); (B) $p_\mu > 700$ MeV/c; (C) $p_\mu > 440$ with δ ray.

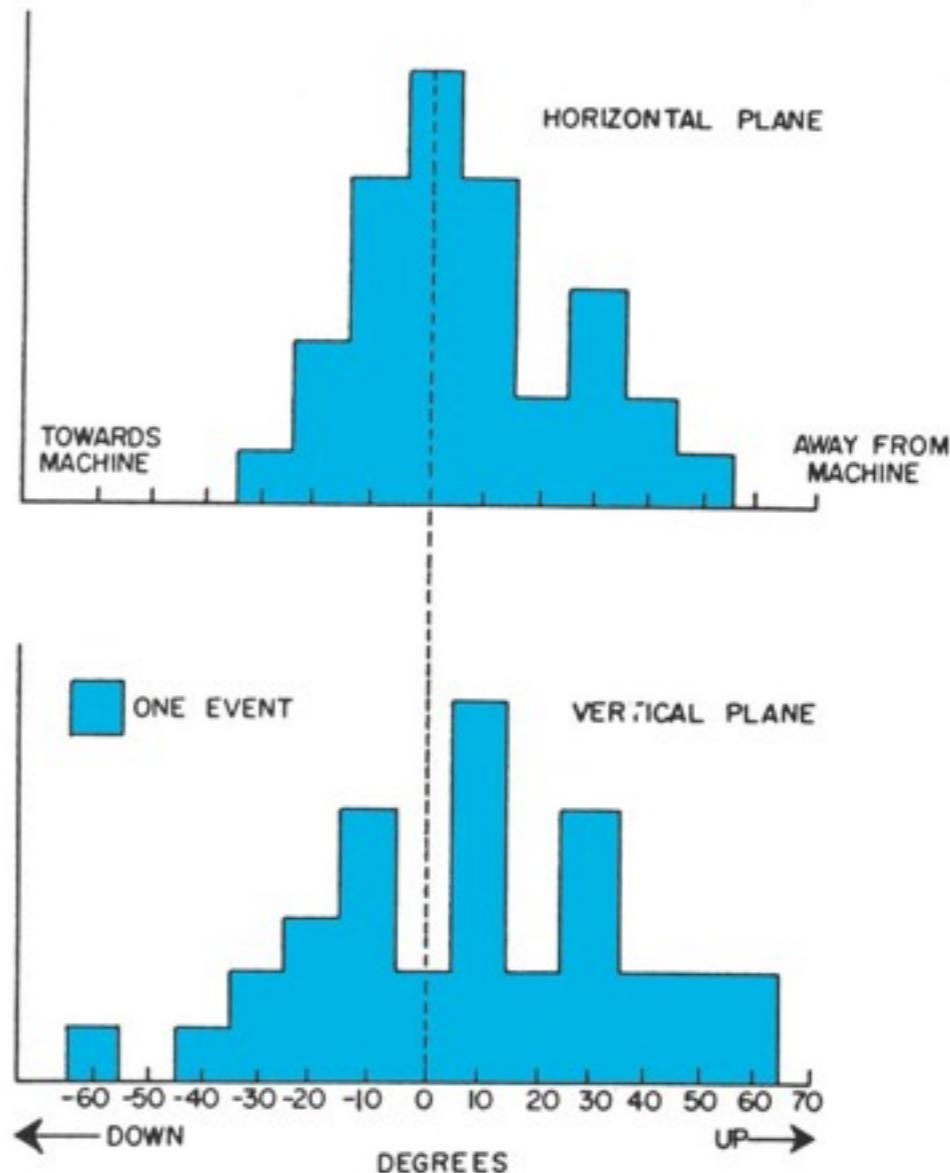
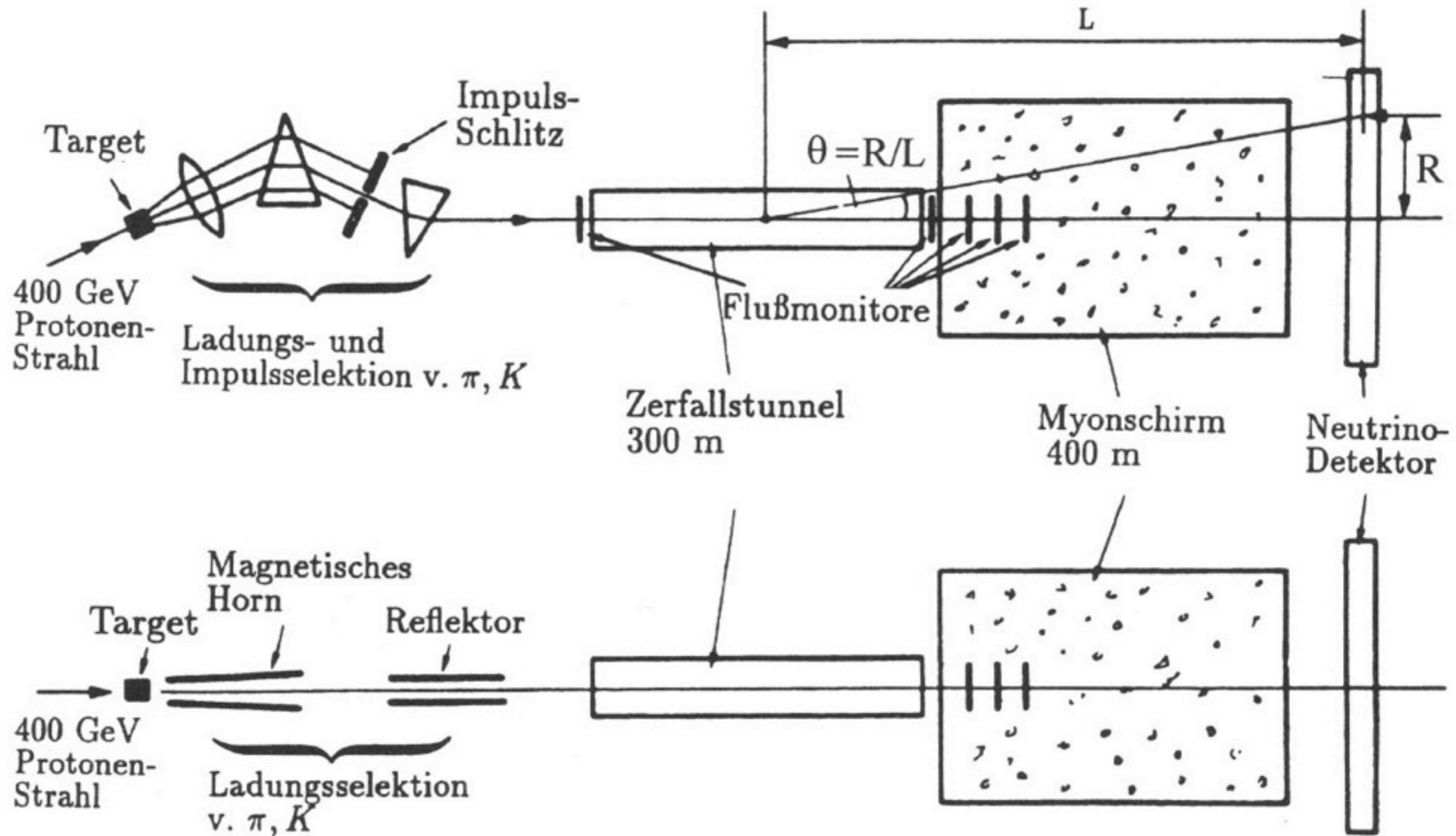


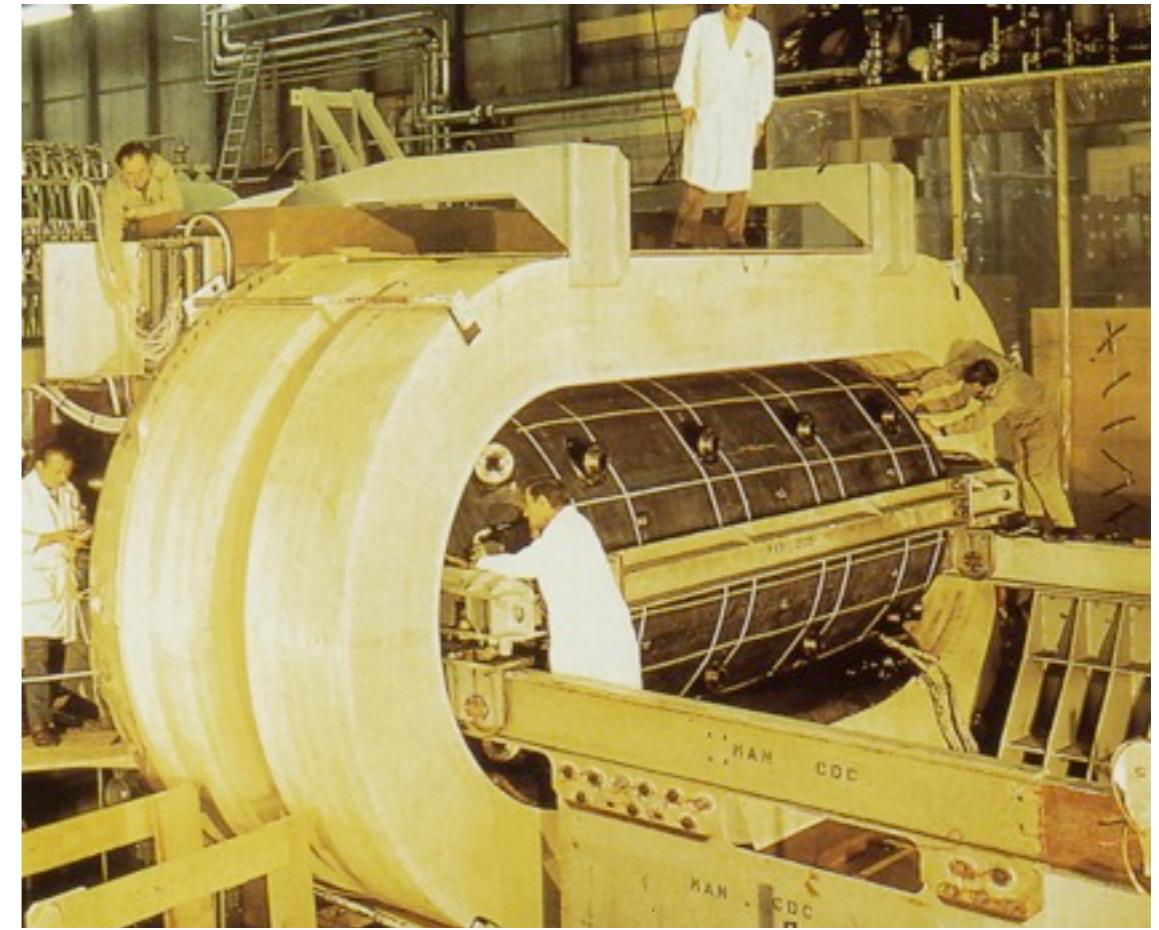
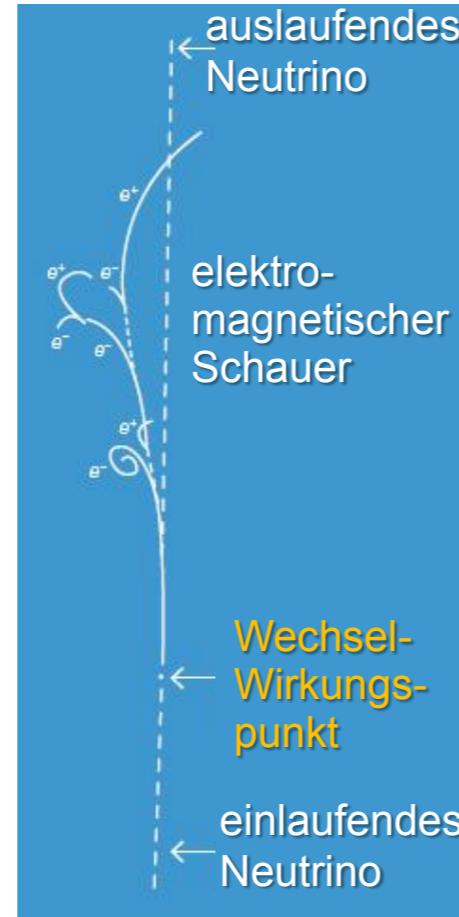
FIG. 7. Projected angular distributions of single track events. Zero degree is defined as the neutrino direction.

34 Ereignisse = 29 v's + 5 „cosmics“:

- nicht kosmische Strahlung
- nicht Neutron-induziert
- keine Kern-WW, daher Myonen
- Neutrino-induziert (Test: π -Zerfall durch Bleiblock unterdrücken!)
- „Schauer-Ereignisse“ nicht wie normale Elektronschauer



Neutrale Ströme 1973++



OBSERVATION OF NEUTRINO-LIKE INTERACTIONS
WITHOUT MUON OR ELECTRON IN THE
GARGAMELLE NEUTRINO EXPERIMENT

$$\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$$

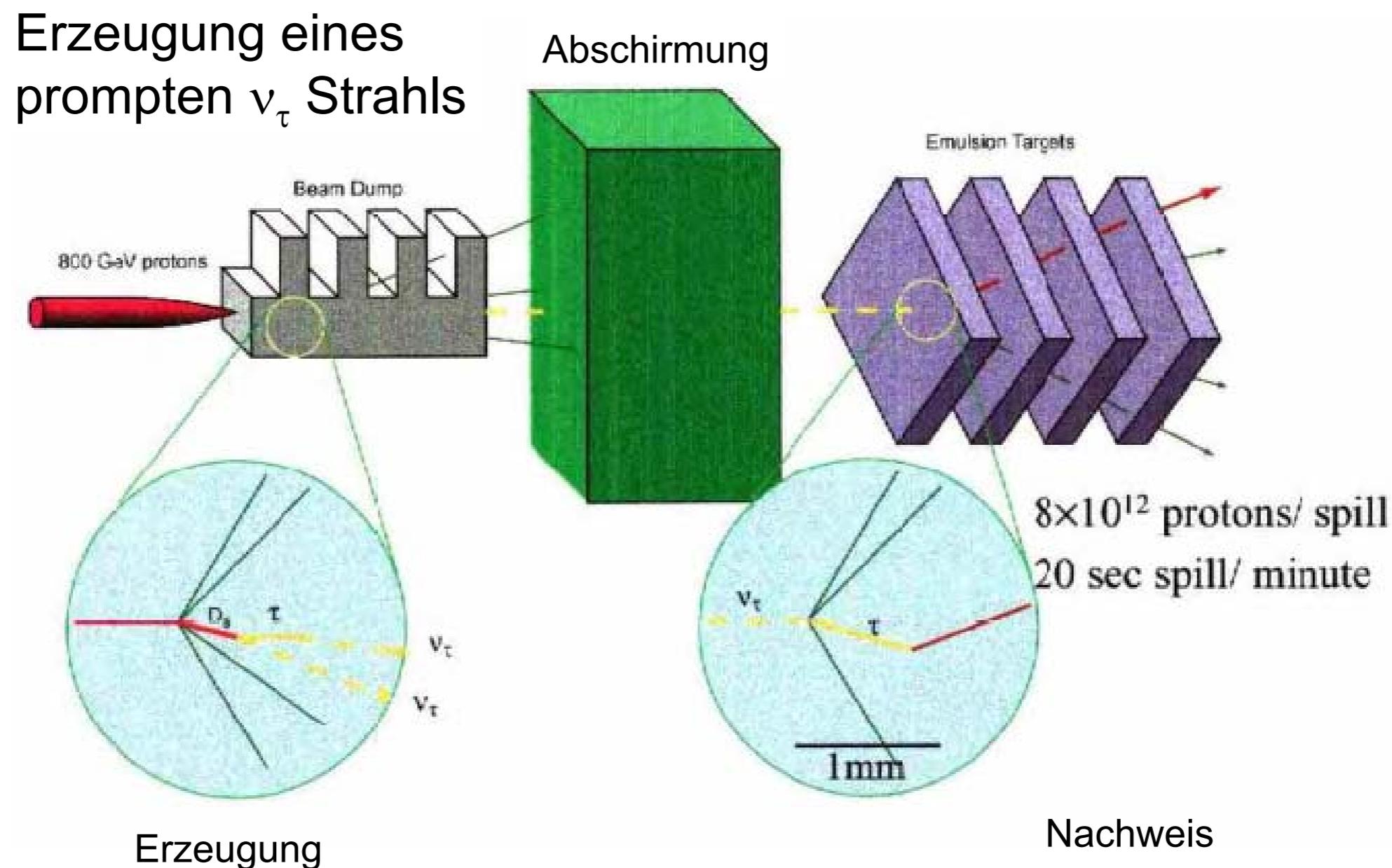
Abstract. Events induced by neutral particles and producing only hadrons, but no muon or electron, have been observed in the heavy liquid bubble chamber Gargamelle exposed to neutrino (ν) and antineutrino ($\bar{\nu}$) beams at CERN. A study of the various sources which could give rise to such events reveals that less than 20% could be attributed to neutrons or K_L^0 . The events behave as expected if they arise from neutral current processes induced by neutrinos and antineutrinos. The ratio of the number of these events to the number of corresponding events with charged lepton is 0.22 ± 0.04 for ν and 0.43 ± 0.12 for $\bar{\nu}$.

Hasert Gargamelle 1974 NPB73

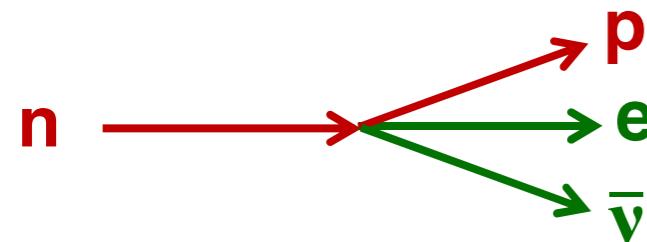
Das dritte Neutrino: DONUT

PHYSICAL REVIEW D 78, 052002 (2008)

The DONuT experiment collected data in 1997 and published first results in 2000 based on four observed ν_τ charged-current (CC) interactions. The final analysis of the data collected in the experiment is presented in this paper, based on 3.6×10^{17} protons on target using the 800 GeV Tevatron beam at Fermilab. The number of observed ν_τ CC events is 9 with an estimated background of 1.5 events, from a total of 578 observed neutrino interactions. We calculate the ν_τ CC cross section as a function of one

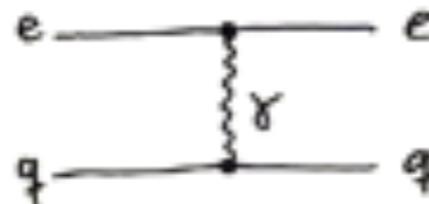


Von der Fermitheorie zu den W und Z-Bosonen

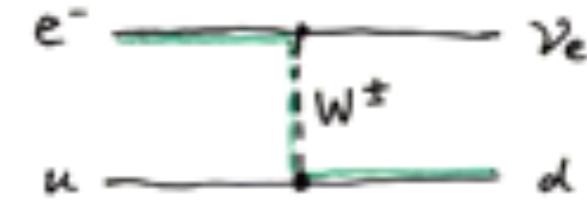


Fermi:
punktformige 4-
Fermion-
Wechselwirkung

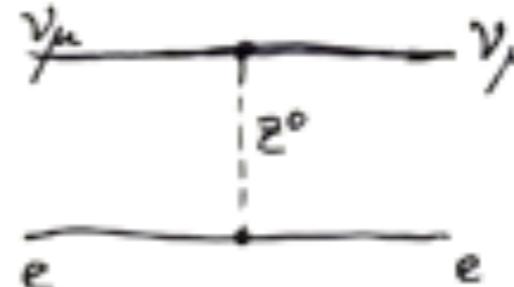
Universalität der
schwachen Ladung?



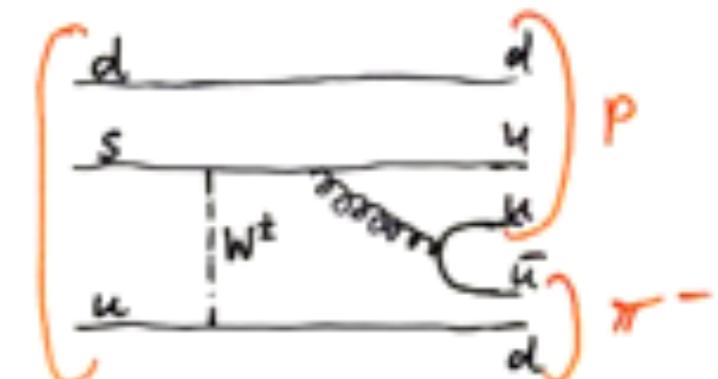
Quark-lepton-WW



„geladener Strom“ (CC)



„neutraler Strom“
(NC)
elastische νe -Streuung!



Λ -Hyperon
nicht-leptonischer schwacher
Zerfall

W-Austausch ändert den Quarkflavor!



$\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$



Myonzerfall