

Moderne Experimentalphysik III: Teilchenphysik

Sommersemester 2018

Thomas Müller, Roger Wolf

12. Juni 2018 – VL 13

Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)

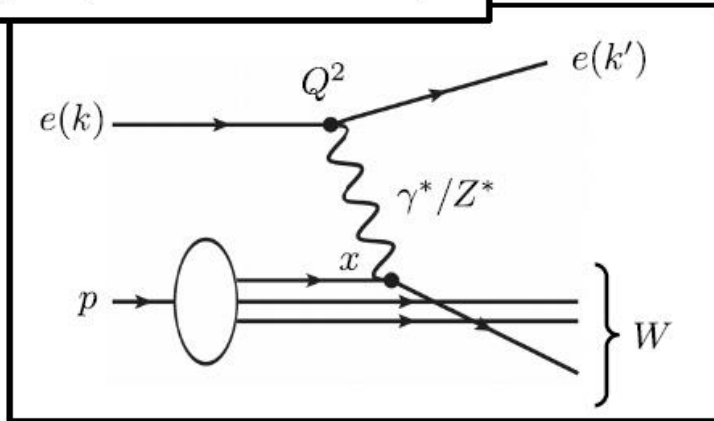


- 6.1 Vektorbosonen
- 6.2 Phänomene der Schwachen Wechselwirkung
- 6.3 Flavormischung
- 6.4 CP-Verletzung
- 6.5 Elektroschwache Vereinigung, Higgs-Mechanismus

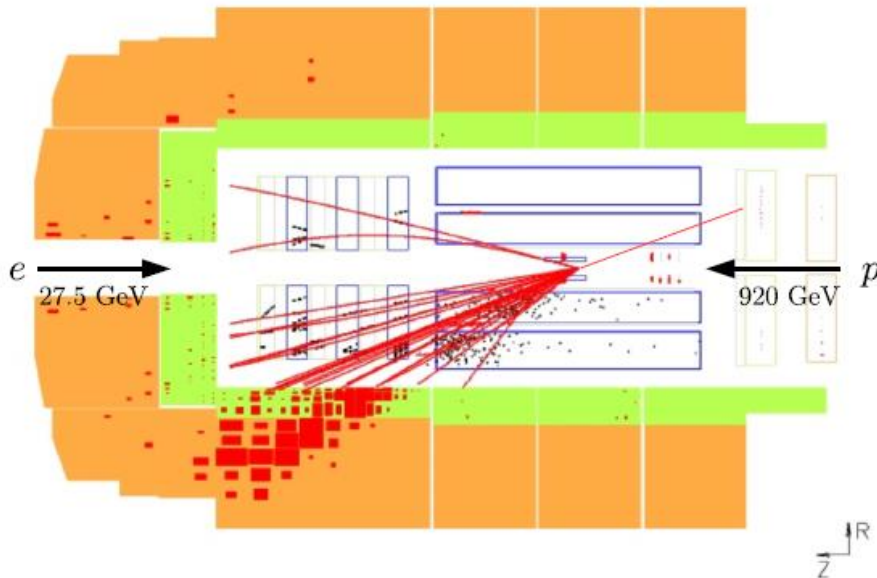
Zu 6.2: Phänomene der Schwachen Wechselwirkung

Beobachtungen am HERA-Beschleuniger

Neutraler Strom
(NC, neutral current)

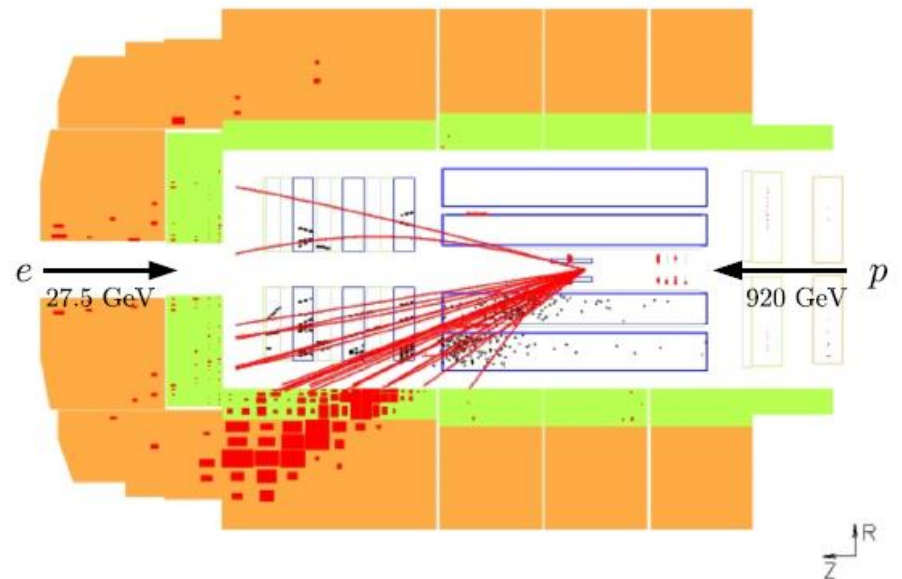
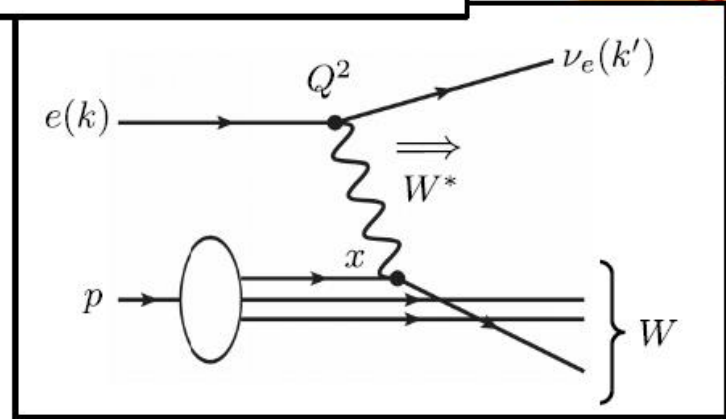
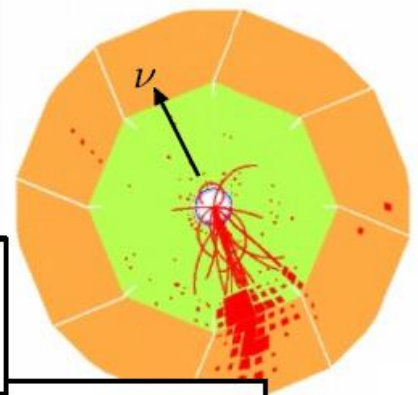


- Austausch eines **Z-Bosons** oder **Photons**
- Ladungserhaltender Austausch
- Bezeichnung als neutraler Strom (engl. neutral current)
- Existenz des Z-Bosons aus elastischer Neutrino-Streuung

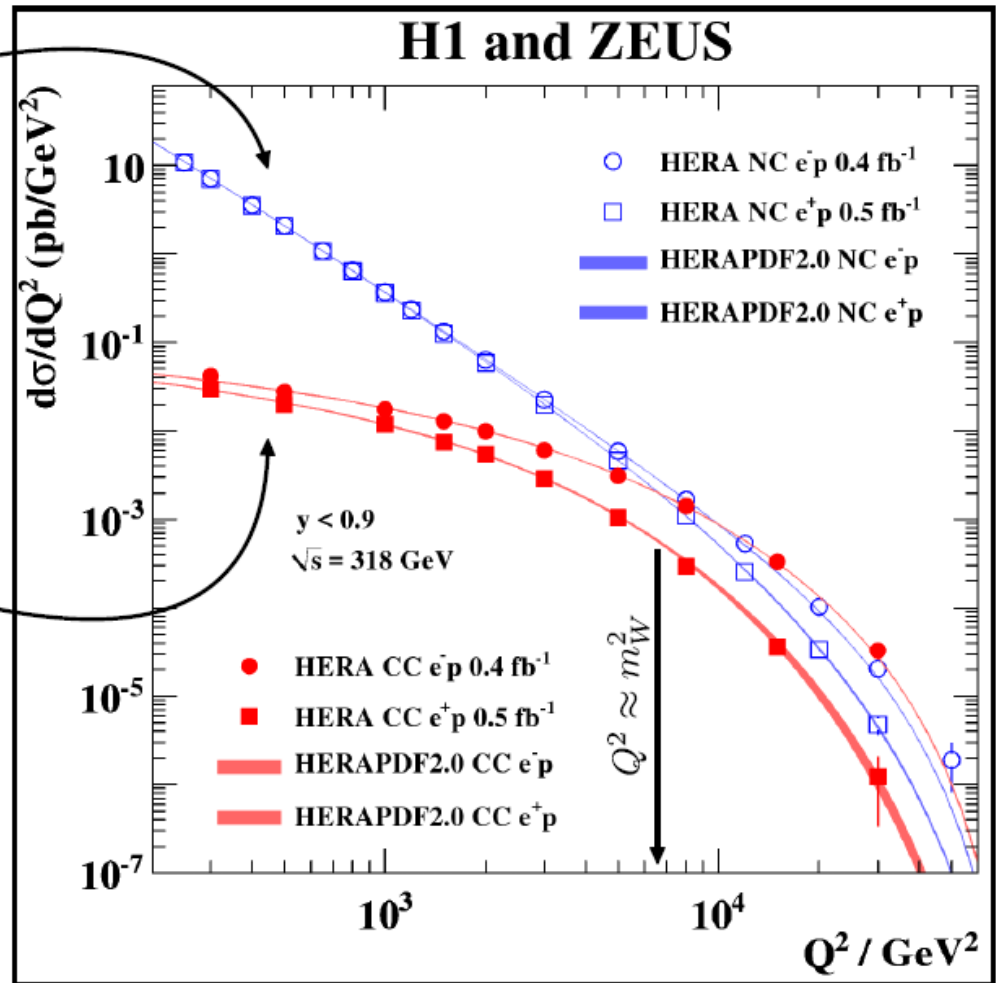
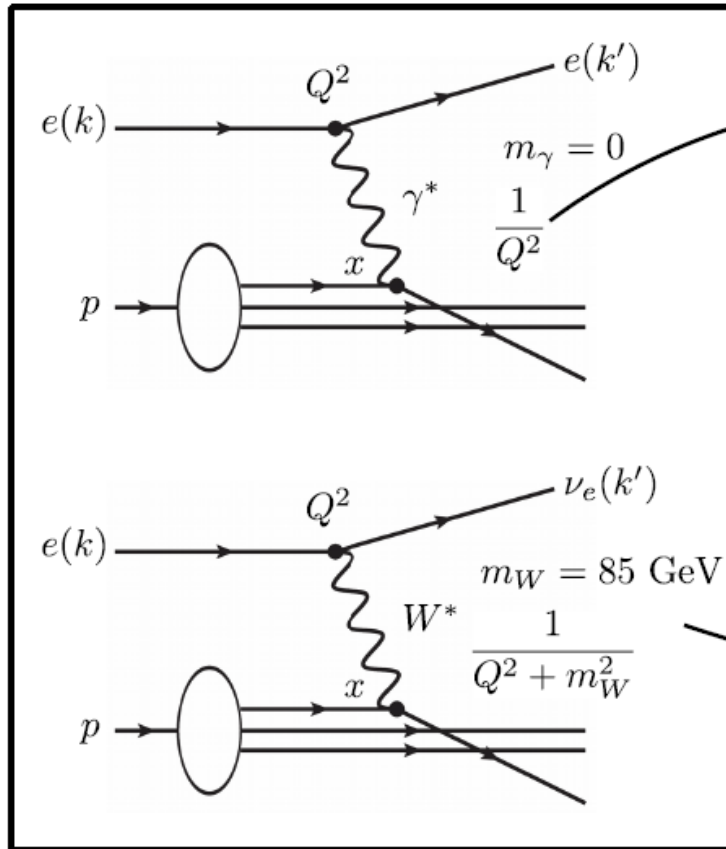


- Austausch eines W^{+-} - oder W^{-} -Bosons
- Ladungsverändernder Austausch
- Bezeichnung als geladener Strom (engl. charged current)
- Klare Signatur z.B. in tiefinelastischer Streuung

Geladener Strom
(CC, charged current)



Evidenz für massive Austauschteilchen



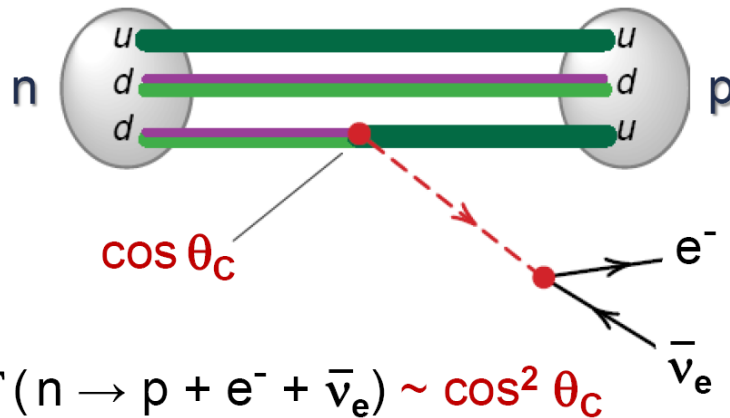
Cabbibo-Mischungswinkel

- Vergleich der β -Zerfälle von Neutron und Lambda: die 'fehlende Stärke' beim Neutron- β -Zerfall erklärt sich durch die Stärke des β -Zerfalls des Λ

Cabbibo-Winkel $\theta_C \sim 13^\circ$

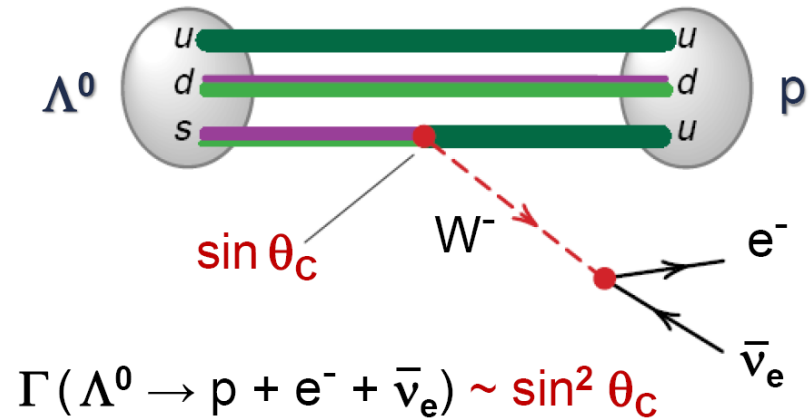
n-Zerfall $d \rightarrow u$

$$|\Delta S| = 0 \quad G_F \rightarrow G_F \cdot \cos \theta_C$$



Λ -Zerfall $s \rightarrow u$

$$|\Delta S| = 1 \quad G_F \rightarrow G_F \cdot \sin \theta_C$$



$$\Gamma(n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \text{ \& \ } \Lambda^0 \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e) \sim \cos^2 \theta_C + \sin^2 \theta_C = \Gamma(\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu)$$

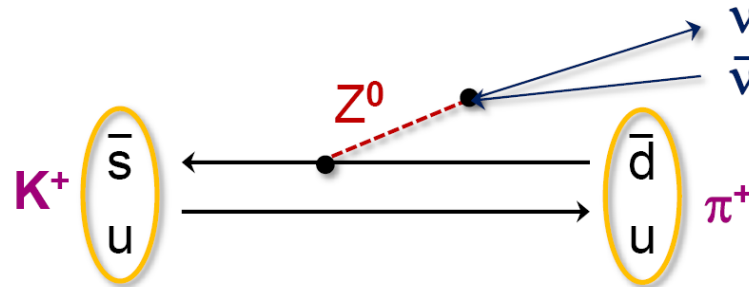
GIM-Mechanismus

- **1970 Glashow, Iliopoulos & Maiani:**

Einführung eines zweiten Quark-Dubletts (u, d') (c, s') zur Erklärung der Nichtexistenz von **Strangeness- (Flavour-) ändernden neutralen Strömen** (GIM-Mechanismus: Einführung des c-Quarks *vor* der Entdeckung des J/ψ)

- Beispiel für einen verbotenen **FCNC** (Flavour Changing Neutral Current):

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu}$$



- mit den beiden schwachen Quarkströmen ud' und cs'

$$ud' = u (d \cdot \cos \theta_C + s \cdot \sin \theta_C)$$

$$cs' = c (-d \cdot \sin \theta_C + s \cdot \cos \theta_C)$$

gibt es im neutralen Strom ($uu + cc + d'd' + s's'$) keine $|\Delta S| = 1$ Anteile !

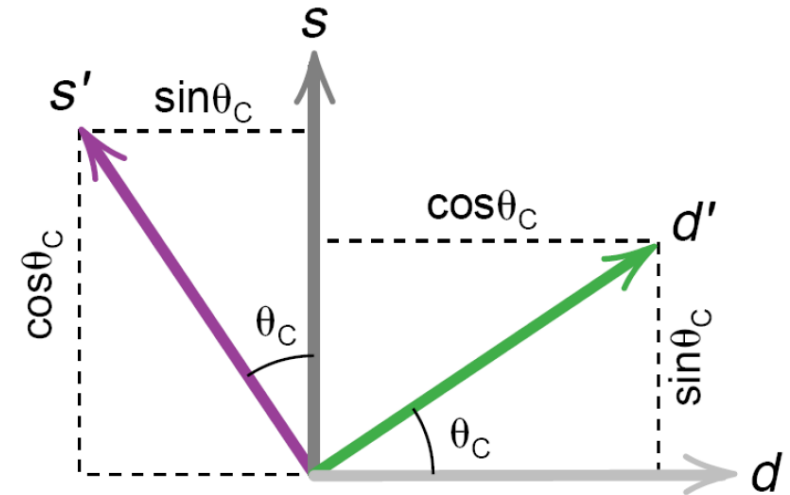
Quarkmischung – 2 Familien

- durch die **Übergänge zwischen 2 Familien** ergibt sich:
der Partner des u-Quarks beim Austausch eines W-Bosons ist das d' ,
eine **Linearkombination** von $|d\rangle$ und $|s\rangle$

$$|d'\rangle = \cos \theta_C \cdot |d\rangle + \sin \theta_C \cdot |s\rangle$$

$$|s'\rangle = \cos \theta_C \cdot |s\rangle - \sin \theta_C \cdot |d\rangle$$

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_C & \sin \theta_C \\ -\sin \theta_C & \cos \theta_C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \end{pmatrix}$$



- die **Drehung von $|d\rangle$ und $|s\rangle$ ist Konvention**, (anstatt $|u\rangle$ und $|c\rangle$)
- wichtig ist allein die Differenz der Drehwinkel

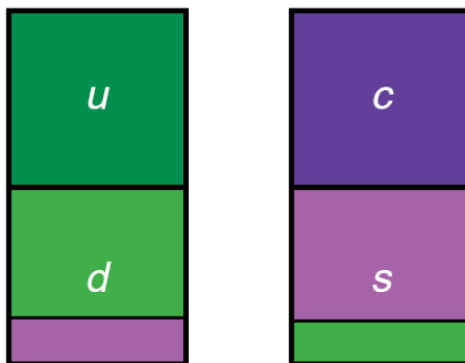
$$\cos \theta_C \sim 0.98$$

$$\sin \theta_C \sim 0.22$$

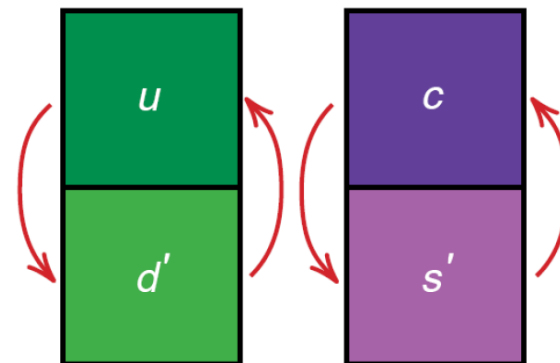
- W-Bosonen koppeln nicht an die Masseneigenzustände d , s , sondern an die „Cabibbo-gedrehten“ Quark-Flavour Zustände d' , s'
- die „Cabibbo-gedrehten“ Quark-Flavour Zustände d' , s' besitzen keine definierten Massen (besser: Massenanteile $\cos \theta_c d - \sin \theta_c s$)

$$\begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & -\sin \theta_c \\ \sin \theta_c & \cos \theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

Masseneigenzustände



Flavoureigenzustände



CKM-Matrix – 3 Familien

- 1973: M. Kobayashi & T. Maskawa - Erweiterung der 2×2 Matrix mit der Mischung von 2 Familien auf eine 3×3 Quark-Mischungs-Matrix:

Cabbibo-Kobayashi-Maskawa-Matrix (CKM – Matrix)

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}_L$$



Cabbibo Kobayashi Maskawa

- CKM-Matrix ist eine unitäre 3×3 Matrix mit 4 unabhängigen Parametern:
 - **3 reelle Winkel**
 - **1 imaginäre (CP)-Phase** (d.h. einige Matrixelemente sind komplex)
 - Übergangswahrscheinlichkeit P für qq' : **$P \sim |V_{qq'}|^2$**
 - **alle nichtdiagonalen Elemente sind klein**
- CKM-Matrix enthält einen **Phasenfaktor**, der **CP-Verletzung** ermöglicht (CP Verletzung erfordert drei Quarkgenerationen!)

- CKM Matrix ist darstellbar durch 3 Euler-Winkel θ_{ij} (θ_{12} , θ_{13} , θ_{23}), empfohlene **Parametrisierung** (mit $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$):

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

- **CP-Phase** unter Zeitumkehr $e^{i\delta} \rightarrow e^{-i\delta}$:

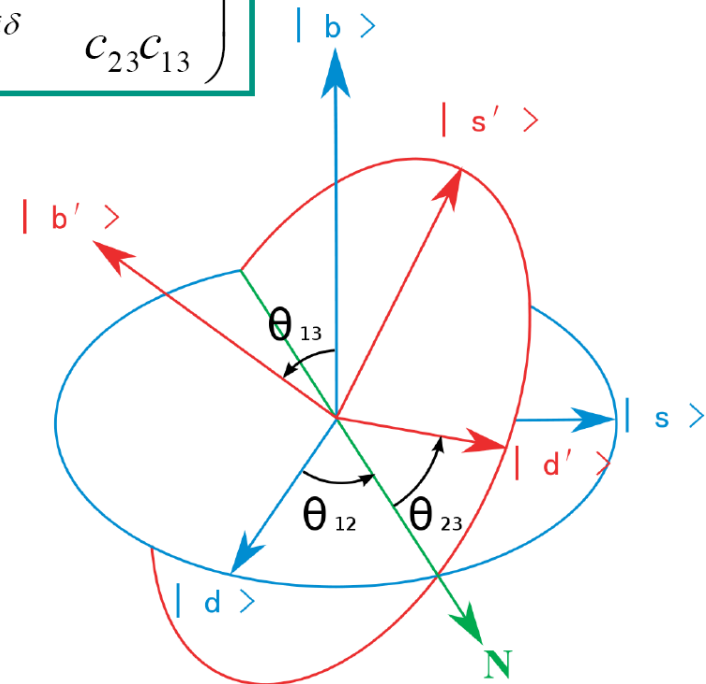
Verletzung von T bzw. von CP
 B^0 - \bar{B}^0 System: Phase $\delta \sim 60^\circ$

- Experimente zeigen:

Quarkmischungswinkel sind klein

$\sin \theta_{12} = \sin \theta_c \gg \sin \theta_{23} \gg \sin \theta_{13}$

$\theta_{12} = 13.04^\circ$, $\theta_{23} = 2.38^\circ$, $\theta_{13} = 0.201^\circ$,



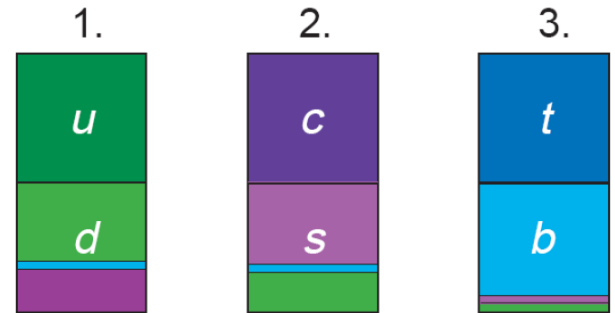
■ aktuelle experimentelle Werte der CKM Matrixelemente

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.97459 & 0.2257 & 0.00359 \\ 0.2256 & 0.97334 & 0.0415 \\ 0.00874 & 0.0407 & 0.99913 \end{pmatrix}$$

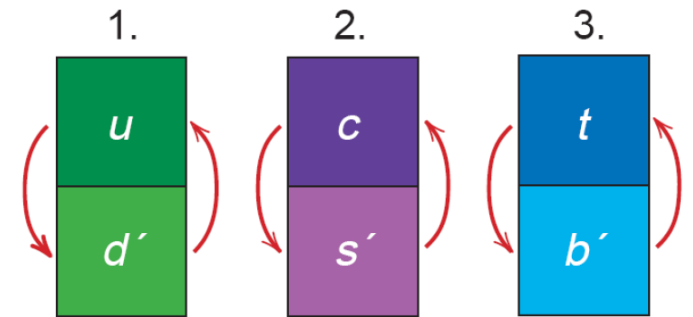
- die theoretisch erwartete Unitarität der CKM Matrix wird experimentell überprüft (Suche nach einer 4. Generation)

Massen-Eigenzustände

u, c, t keine Mischung
Mischung schwacher Zustände
d: d', s', b'



SU(2): schwache Isospin-Dubletts



Flavour-Eigenzustände

6.4 CP-Verletzung

Erstmals beobachtet bei Kaon-Zerfällen

■ Kaonen:

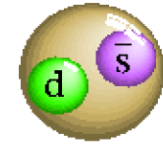
- Kaonen sind **pseudoskalare 1^1S_0 Mesonen** mit Strangeness mit Massen $M(K^+, K^-) = 493.7 \text{ MeV}$ und $M(K^0, \bar{K}^0) = 497.6 \text{ MeV}$
- 1964: im System der neutralen Kaonen entdecken Cronin und Fitch die **Verletzung der CP-Invarianz**
- seither detailliertes Studium CP-verletzender Effekte in Systemen **oszillierender neutralen Kaonen und B^0 -Mesonen**

Zustände K^0 und \bar{K}^0

- Kaonen bilden zwei starke Isospin-Dubletts:

$$\begin{pmatrix} |K^+\rangle \\ |K^0\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |u\bar{s}\rangle \\ |d\bar{s}\rangle \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} |K^-\rangle \\ |\bar{K}^0\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\bar{d}s\rangle \\ |\bar{u}s\rangle \end{pmatrix}$$



Kaon K^0

- Erzeugung von Kaonen durch die starke Wechselwirkung mit $\Delta S = 0$

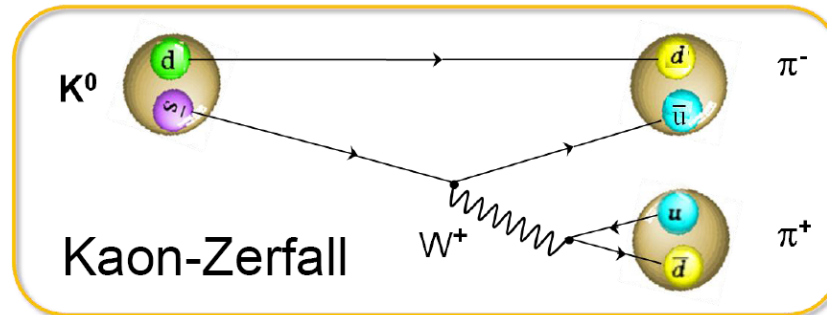


paarweise Erzeugung $\rightarrow d\bar{s} + uds$

Zerfall von Kaonen durch die schwache Wechselwirkung mit $\Delta S = \pm 1$



$\rightarrow 2\pi$, $\rightarrow 3\pi$, semileptonisch $\rightarrow \pi^- e^+ \nu_e$



Zustände K_1 und K_2

- **interne Parität P** von neutralen Kaonen $P(q\bar{q}) = (-1)^{\ell+1}$, mit $\ell=0$

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

- **Ladungskonjugation C** von neutralen Kaonen:

$$C|K^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle \quad C|\bar{K}^0\rangle = -|K^0\rangle \quad \text{Minuszeichen wird *definiert*}$$

- **CP-Eigenschaften** von neutralen Kaonen:

$$CP|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle \quad CP|\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle \quad K^0, \bar{K}^0 \text{ *keine* CP-Eigenzustände}$$

- **Linearkombinationen K_1, K_2** von neutralen Kaonen mit definiertem CP:

$$|K_1\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \quad |K_2\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$$

Kaonen: starke & schwache Wechselwirkung

■ K_1, K_2 als CP-Eigenzustände:

$$CP|K_1\rangle = +|K_1\rangle$$

$$CP|K_2\rangle = -|K_2\rangle$$

K^0 und \bar{K}^0 Mesonen sind damit **orthogonale Superpositionen** von K_1, K_2 :

$$|K^0\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|K_1\rangle + |K_2\rangle)$$

$$|\bar{K}^0\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|K_1\rangle - |K_2\rangle)$$

■ Kaon-Oszillationen:

- **starke Wechselwirkung:**

erzeugt K^0 und \bar{K}^0 mit definierter Masse

CPT-Theorem: $m(K^0) = m(\bar{K}^0)$

- **schwache Wechselwirkung:**

ermöglicht **Übergänge $K^0 \Leftrightarrow \bar{K}^0$**

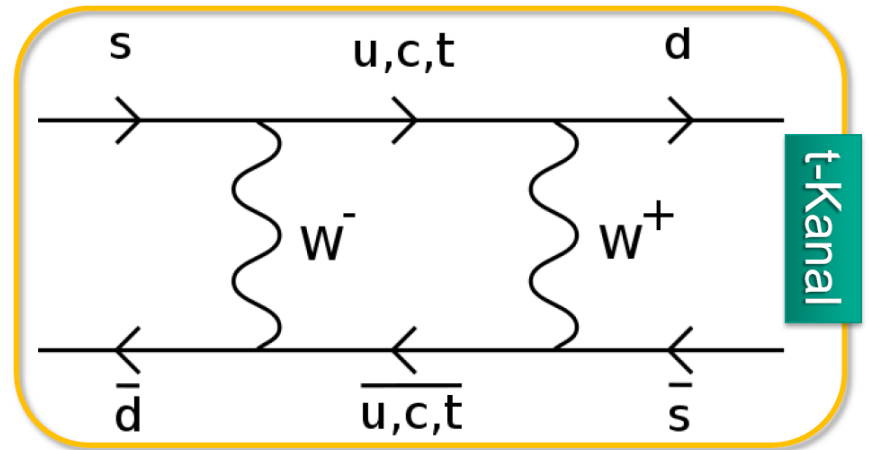
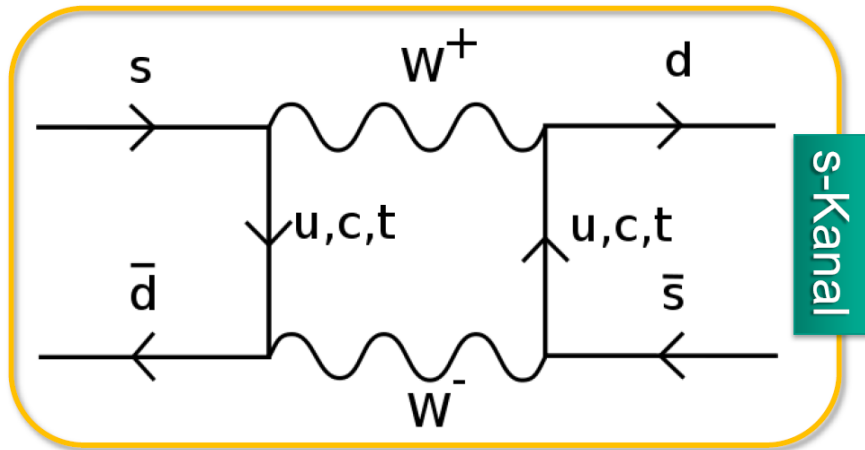
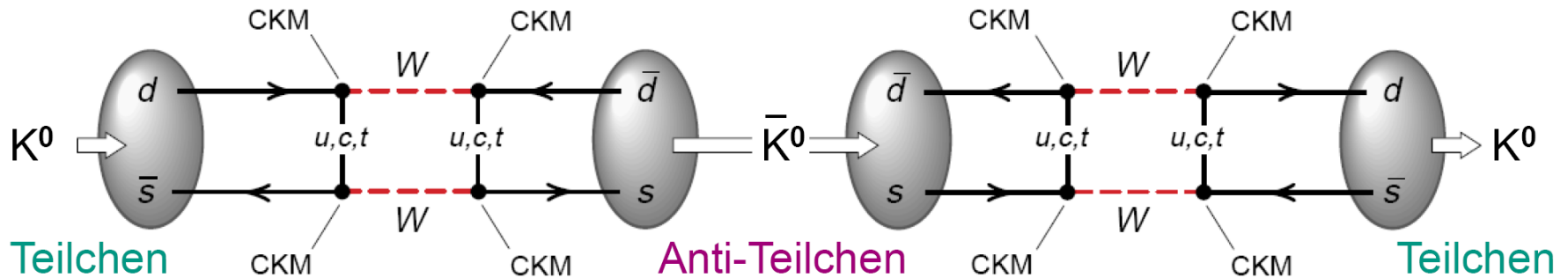
Mischung der beiden neutralen Kaonen

Entstehung der Zustände K_1 und K_2

mit unterschiedlichen Massen m & τ

Kaon-Oszillationen

- Schwache Wechselwirkung:** in 2. Ordnung Störungstheorie führen die beiden 'Boxdiagramme' zu **Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen** bei Kaonen mit $\Delta S = 2$ (L. Wolfenstein: alle CP-verletzenden Prozesse involvieren $\Delta S = 2$)



Kaon-Zerfälle & CP von 2 Pionen

■ Zerfälle von K_1 und K_2 in Pionen

die Zustände K_1 und K_2 haben **unterschiedliche**:

- **Massen** (K^0 - \bar{K}^0 Oszillationen heben die Massen-Entartung auf)
- **CP-Eigenwerte** (+1, -1) & damit Zerfallsmoden in Pionen (2π , 3π)
- **Lebensdauern** mit $\tau(K_1) \ll \tau(K_2)$

■ CP Zustände von zwei Pionen

Parität P & C-Parität von **zwei Pionen**: $(\pi^+ \pi^-)$ oder $(\pi^0 \pi^0)$

$$P|\pi^+ \pi^-\rangle = (-1)^\ell |\pi^+ \pi^-\rangle$$

Parität ist multiplikative Größe

$$C|\pi^+ \pi^-\rangle = (-1)^{\ell+s} |\pi^+ \pi^-\rangle$$

vgl. Kap. 8.2) $C|T\bar{T}\rangle = (-1)^{\ell+s} |T\bar{T}\rangle$

$$CP|\pi^+ \pi^-\rangle = +1 |\pi^+ \pi^-\rangle$$

ebenso $CP|\pi^0 \pi^0\rangle = +1 |\pi^0 \pi^0\rangle$

Kaon-Zerfälle & CP von 3 Pionen

■ CP Zustände von drei Pionen

komplexere Betrachtungen (2 Pionen als Di-Pion und 1 Pion) ergeben

$$CP \left| \pi^0 \pi^0 \pi^0 \right\rangle = -1 \left| \pi^0 \pi^0 \pi^0 \right\rangle \quad \text{Di-Pion: } \ell = \text{gerade, da identische Teilchen}$$

$$CP \left| \pi^0 \pi^+ \pi^- \right\rangle = -1^{\ell+1} \left| \pi^0 \pi^+ \pi^- \right\rangle \quad \text{kleiner Phasenraum, daher } \ell = 0$$

■ auf dem Weg zur CP Verletzung bei den Kaonen

- bisheriger Status mit Zuständen der **starken Wechselwirkung** K^0, \bar{K}^0 : definierte Masse, Strangeness
- CP-Symmetrie** K_1, K_2 : definierte CP Eigenwerte, keine definierte Masse
- **Pionen** dienen als Marker der CP-Werte
- **schwache Wechselwirkung** erzeugt Kaon-Antikaon Oszillationen
wie beeinflusst die schwache Wechselwirkung das exponent. Zerfallsgesetz?
was sind die Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung?

Kaon-Zerfälle: K_L und K_S

- bei CP-Erhaltung erwartet man die beiden Zerfallsmoden:



CP Erhaltung verbietet den Zerfall des K_2 in 2 Pionen

K_2 : durch den kleinen Phasenraum ergibt sich eine **große Lebensdauer**

$$\tau_L = (51.54 \pm 0.44) \text{ ns } (K_L = K_{\text{Long}})$$

K_1 : durch den großen Phasenraum ergibt sich eine **kurze Lebensdauer**

$$\tau_S = (89.53 \pm 0.06) \text{ ps } (K_S = K_{\text{Short}})$$

- bei CP-Erhaltung gelten die Relationen

$$K_2 = K_L$$

$$K_1 = K_S$$

die **CP Eigenzustände K_1, K_2** sind

nur bei vollständiger CP-Erhaltung

identisch mit den **Eigenzuständen**

K_S, K_L der schwachen Wechselwirkung

Zerfallsmodus	Branching ratio
$K_1 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	69 %
$K_1 \rightarrow \pi^0 \pi^0$	31 %
$K_2 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$	21 %
$K_2 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	13 %
$K_2 \rightarrow \pi^+ e^- \nu_e$	39 %
$K_2 \rightarrow \pi^+ \mu^- \nu_\mu$	27 %

Nachweis der CP-Verletzung

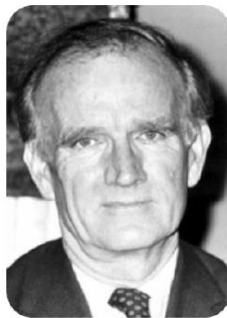
- 1964: am AGS-Beschleuniger am Brookhaven National Laboratory (BNL) weisen Cronin & Fitch **CP-Verletzung** im System der neutralen Kaonen nach
 - **K^0 Mesonen Erzeugung**: Beschuss eines Be-Targets mit 30 GeV-Protonen aus dem AGS, **am Experiment ($d = 20$ m) nur noch K_L**
 - **π^+ und π^- Impulse**: magnetische Spektrometer mit Funkenkammern
 - **Resultat**: neben dem dominanten $K_L \rightarrow 3\pi$ Zerfallsmodus beobachtet man eine kleine Rate an $K_L \rightarrow 2\pi$ Ereignissen **$R = (2.3 \pm 0.4) \times 10^{-3}$**

CP Symmetrie ist verletzt

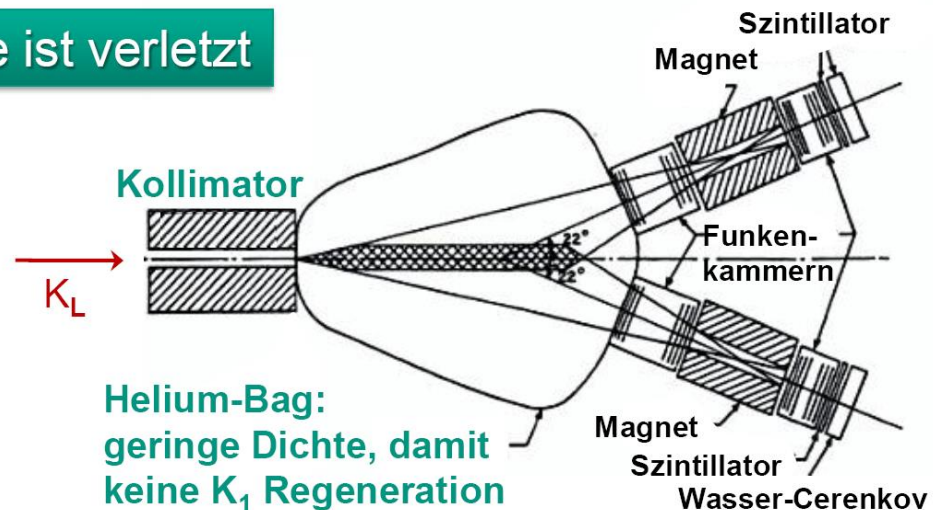
Nobelpreis
1980



James W. Cronin



Val L. Fitch



CP-Verletzung & Materie/Antimaterie

- Vernichtung von Materie – Antimaterie bei $t \sim 0.1 \text{ ms}$ ↪ Erzeugung der CMB

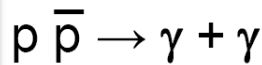
Baryon-Photon-Verhältnis $\eta \sim 10^{-9}$

kein thermisches Gleichgewicht

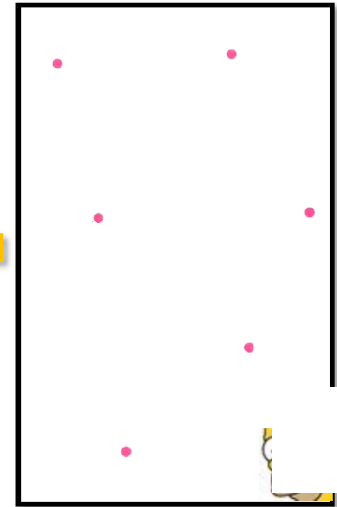
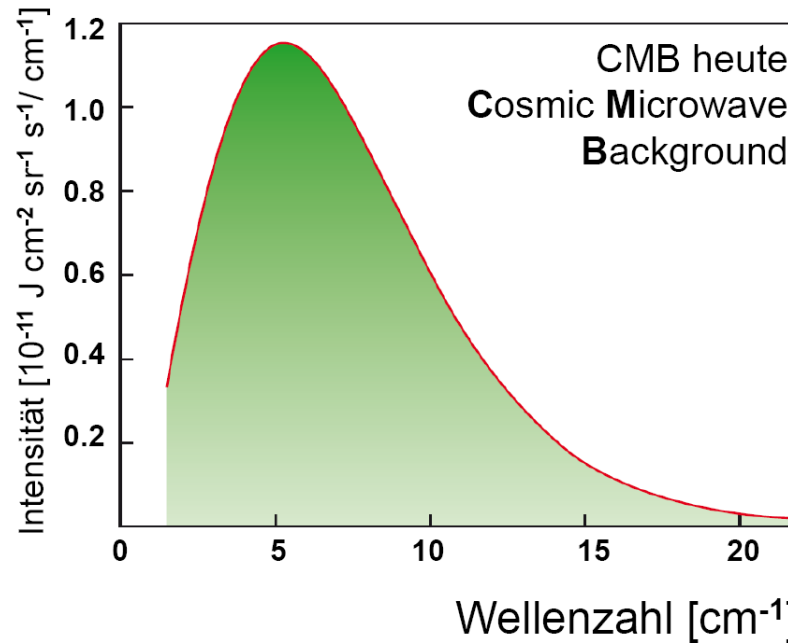
sonst wärer $\eta \sim 10^{-18}$!



Annihilation



$t < 10^{-4} \text{ s}$:
Materie-Antimaterie



$t > 10^{-4} \text{ s}$:
nur Materie