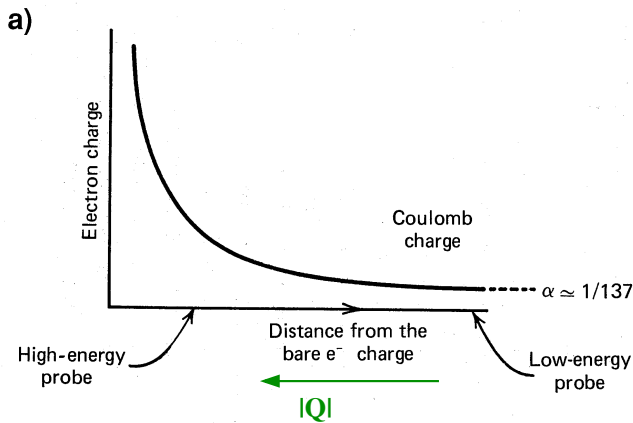
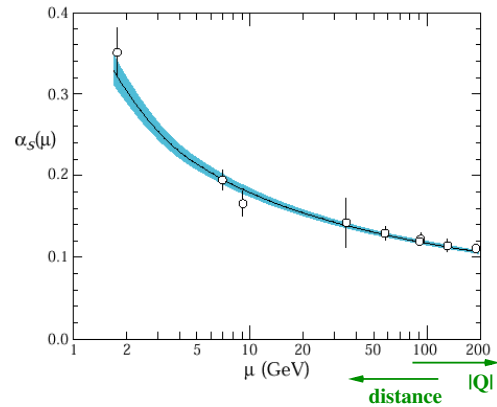


• QED and QCD - Screening und Anti-Screening



Kopplungskonstante nur näherungsweise konstant



laufende Kopplungskonstante
Confinement \leftrightarrow asymptotische Freiheit

• Schwache Wechselwirkung - Leptonenzahlerhaltung

In Reaktionen beobachtet:

- Leptonzahlerhaltung $L = L_e + L_\mu + L_\tau$, $N(\ell) - N(\bar{\ell}) + N(\nu) - N(\bar{\nu}) = \text{const}$
- L_e, L_μ, L_τ auch separat erhalten (Anmerkung: gilt nicht 100%-ig: Neutrino-Oszillationen)

368

Zusammenfassung: Schwache WW: Cabbibo-Theo., GIM-Mech.

(VL1, KW02)

• Schwache Wechselwirkung

$$M_{if}(q) \sim 4\pi\sqrt{\alpha_w} \frac{1}{m_W^2 - q^2} \sqrt{\alpha_w}$$

große Masse der Vektorbosonen \rightarrow WW schwach!

• Cabbibo-Theorie

Exp. Beobachtung:

$$\frac{G(p \rightarrow ne^+\nu)}{G(\mu^- \rightarrow \nu_\mu e^- \bar{\nu}_e)} \approx 0.974$$

sehr ähnlich

$$\frac{G(s \rightarrow uW^-)}{G(d \rightarrow uW^-)} \approx 0.23$$

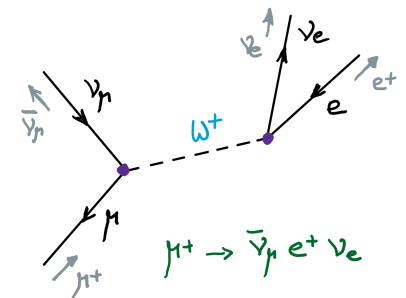
sehr unterschiedlich für $\Delta S = 0$, $\Delta S = 1$

\Leftrightarrow keine Universalität der schwachen Kopplungskonstante ?



Eigenzustand der schwachen Wechselwirkung $d' \neq d$ Eigenzustand der starken Wechselwirkung

$$d' = d \cos \Theta_C + s \sin \Theta_C \quad \Theta_C = 13^\circ$$



369

Eigenzustand der schwachen Wechselwirkung $d' \neq d$ Eigenzustand der starken Wechselwirkung

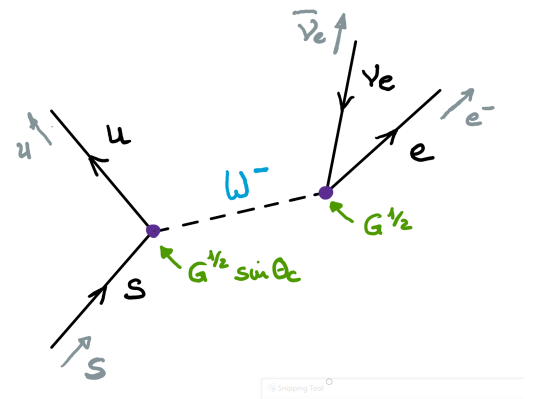
$$d' = d \cos \Theta_C + s \sin \Theta_C \quad \Theta_C = 13^\circ$$

In Analogie zu den Lepton-Doublets:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d \cos \Theta_C + s \sin \Theta_C \end{pmatrix}$$

⇒ Für diese Doublets: Schwache Wechselwirkung beschrieben durch **eine** Kopplungskonstante → **Universalität erhalten**

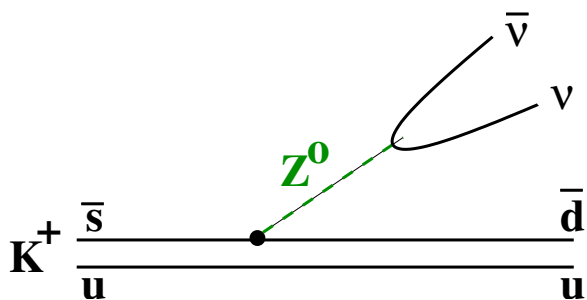
$$\begin{array}{lll} p \rightarrow n e^+ \nu_e & u \rightarrow d e^+ \nu_e & G^2 \cos^2 \Theta_c \\ K^0 \rightarrow \pi^0 e^- \bar{\nu}_e & s \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e & G^2 \sin^2 \Theta_c \\ \mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu & & G^2 \end{array}$$



370

Experimentelle Beobachtung - Neutrale schwache Ströme

Problem: Die experimentell beobachteten neutralen Ströme folgen der Auswahlregel : $\Delta S = 0$



$$\begin{array}{l} K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \\ K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^- \\ K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu} \end{array}$$

nicht beobachtet

(bzw. sehr, sehr stark unterdrückt)

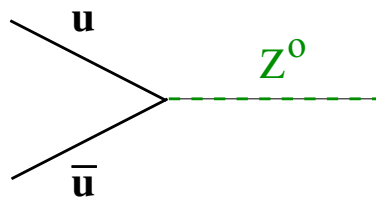
$$\begin{array}{l} (< 3.2 \cdot 10^{-7} \\ 3.00 \pm 0.09 \cdot 10^{-7} \\ 1.7 \pm 1.1 \cdot 10^{-10}) \end{array}$$

$$\frac{K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}}{K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu} < 10^{-8} \quad \Delta S = 1 \quad \leftrightarrow \quad \frac{[\bar{s} \rightarrow \bar{d} + Z^0]}{[\bar{s} \rightarrow \bar{u} + W^+]}$$

Experimentell: keine Flavor ändernden neutralen Ströme beobachtet, keine schwachen Prozesse $d \leftrightarrow s$ (bzw. sehr, sehr stark unterdrückt)

371

Neutraler Strom:



$$d' = d \cos \Theta_C + s \sin \Theta_C$$

$$\bar{d}' = \bar{d} \cos \Theta_C + \bar{s} \sin \Theta_C$$

$$u\bar{u} + d'\bar{d}' = u\bar{u} + d\bar{d} \cos^2 \Theta_C + s\bar{s} \sin^2 \Theta_C + (s\bar{d} + \bar{s}d) \sin \Theta_C \cos \Theta_C$$

$$\Delta S = 0 \qquad \Delta S = 1$$

Idee von Glashow, Iliopoulos, Maiani \leftrightarrow **GIM-Mechanismus**

definiere: Operator s' orthogonal zu d'

$$s' = s \cos \Theta_C - d \sin \Theta_C$$

Eichtheorie: s' Teil eines $SU(2)_L$ -Doublets und koppelt an: W^\pm, Z^0

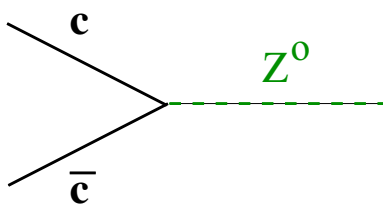
\Rightarrow **c-quark erklärt Nicht-Existenz von Flavour änderenden neutralen Ströme !**

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d \cos \Theta_C + s \sin \Theta_C \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \\ s \cos \Theta_C - d \sin \Theta_C \end{pmatrix}$$

372

Cabibbo - Theorie

Erweiterung des neutralen Stromes durch



$$s' = s \cos \Theta_C - d \sin \Theta_C$$

$$\bar{s}' = \bar{s} \cos \Theta_C - \bar{d} \sin \Theta_C$$

$$u\bar{u} + d'\bar{d}' + c\bar{c} + s'\bar{s}' = u\bar{u} + c\bar{c} + (d\bar{d} + s\bar{s}) \cos^2 \Theta_C + (s\bar{s} + d\bar{d}) \sin^2 \Theta_C$$

$$+ (s\bar{d} + \bar{s}d - \bar{s}d - s\bar{d}) \sin \Theta_C \cos \Theta_C$$

$\Delta S = 1$ - Teil = 0 !!

keine Flavour ändernden neutralen Ströme $d \leftrightarrow s, u \leftrightarrow c$ treten nicht auf

\Leftrightarrow **c-quark muss existieren !**

Erweiterung auf 3 Quark-Familien: Kobayashi-Maskawa-Matrix

.....

\Rightarrow c-quark erklärt Nicht-Existenz von Flavour änderenden neutralen Ströme !

\Rightarrow GIM-Mechanismus

s' analog zu d' Teil eines $SU(2)_L$ -Doublets und koppelt an: W^\pm, Z^0

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d \cos \Theta_C + s \sin \Theta_C \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \\ s \cos \Theta_C - d \sin \Theta_C \end{pmatrix}$$

Matrixschreibweise ($|d' \rangle, |s' \rangle \leftrightarrow |d \rangle, |s \rangle$):

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

= unitäre Matrix $U^\dagger U = 1$

- CKM-Matrix \rightarrow Erweitert Cabibbo-Theorie auf 3 Generationen \rightarrow jetzt

374

Cabibbo-Kobayaschi-Maskawa -Matrix

3. Quarkgeneration \rightarrow Cabibbo-Kobayaschi-Maskawa (CKM) - Matrix

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

4 Parameter:

3 reelle Winkel

+ 1 imaginäre Phase

Phase \Leftrightarrow Effekt in Interferenz-
termen bei schwachen Prozessen
höherer Ordnung (\Leftrightarrow CP-Verletzung)

Übergänge zwischen Familien, wie $c \leftrightarrow d$ unterdrückt gegenüber
Übergängen innerhalb der Familien, wie $c \leftrightarrow s, d \leftrightarrow u$.

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

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}, \quad c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

(V: unitär)

δ : CP-verletzende Phase: verantwortlich für alle
CP-verletzenden Prozesse in Flavour
verändernden Prozessen der schwachen WW

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa -Matrix

CKM-Matrixelemente = fundamentale Parameter des Standardmodells

= unitäre Matrix: $U^+ U = 1 = U U^+$

$$\begin{pmatrix} V_{ud}^* & V_{cd}^* & V_{td}^* \\ V_{us}^* & V_{cs}^* & V_{ts}^* \\ V_{ub}^* & V_{cb}^* & V_{tb}^* \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\sum_i V_{ij} V_{ik}^* = \delta_{jk}$$

z.B. $j=d, k=b \rightarrow$

$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0$$

Analog:

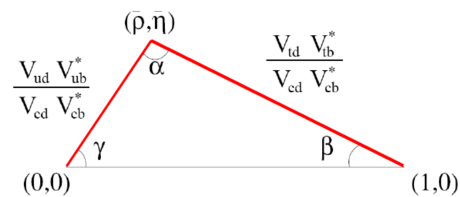
$$\sum_j V_{ij} V_{kj}^* = \delta_{ik}$$

6 verschwindende Kombinationen:

\Leftrightarrow Unitarity triangles

$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0$$

$z_1 + 1 + z_2 = 0$ (in der komplexen Ebene)



\rightarrow erfüllt ?

\rightarrow neue Physik ?

\Leftrightarrow Präzise Vermessung der verschiedenen Matrixelemente

376

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa -Matrix

Bei Erweiterung auf 3. Quarkgeneration:

\rightarrow Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) - Matrix

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

4 Parameter:

3 reelle Winkel

+ 1 imaginäre Phase

Phase \Leftrightarrow Effekt in Interferenztermen bei schwachen Prozessen höherer Ordnung (\Leftrightarrow CP-Verletzung)

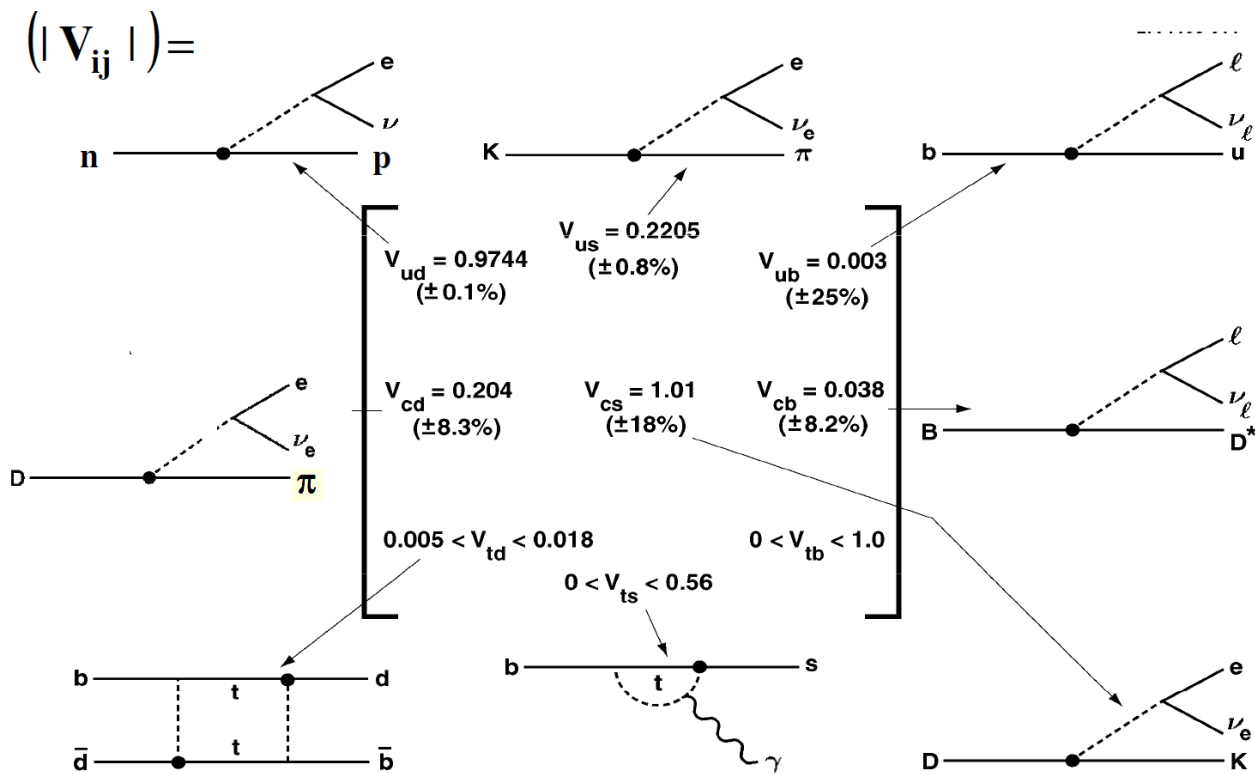
$$\frac{\sin^2(\theta)}{\cos^2(\theta)} \approx \frac{1}{20}$$

Übergänge zwischen Familien, wie $c \leftrightarrow d$ unterdrückt gegenüber Übergängen innerhalb der Familien, wie $c \leftrightarrow s, d \leftrightarrow u$.

Matrixelemente müssen experimentell bestimmt werden

377

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa -Matrix

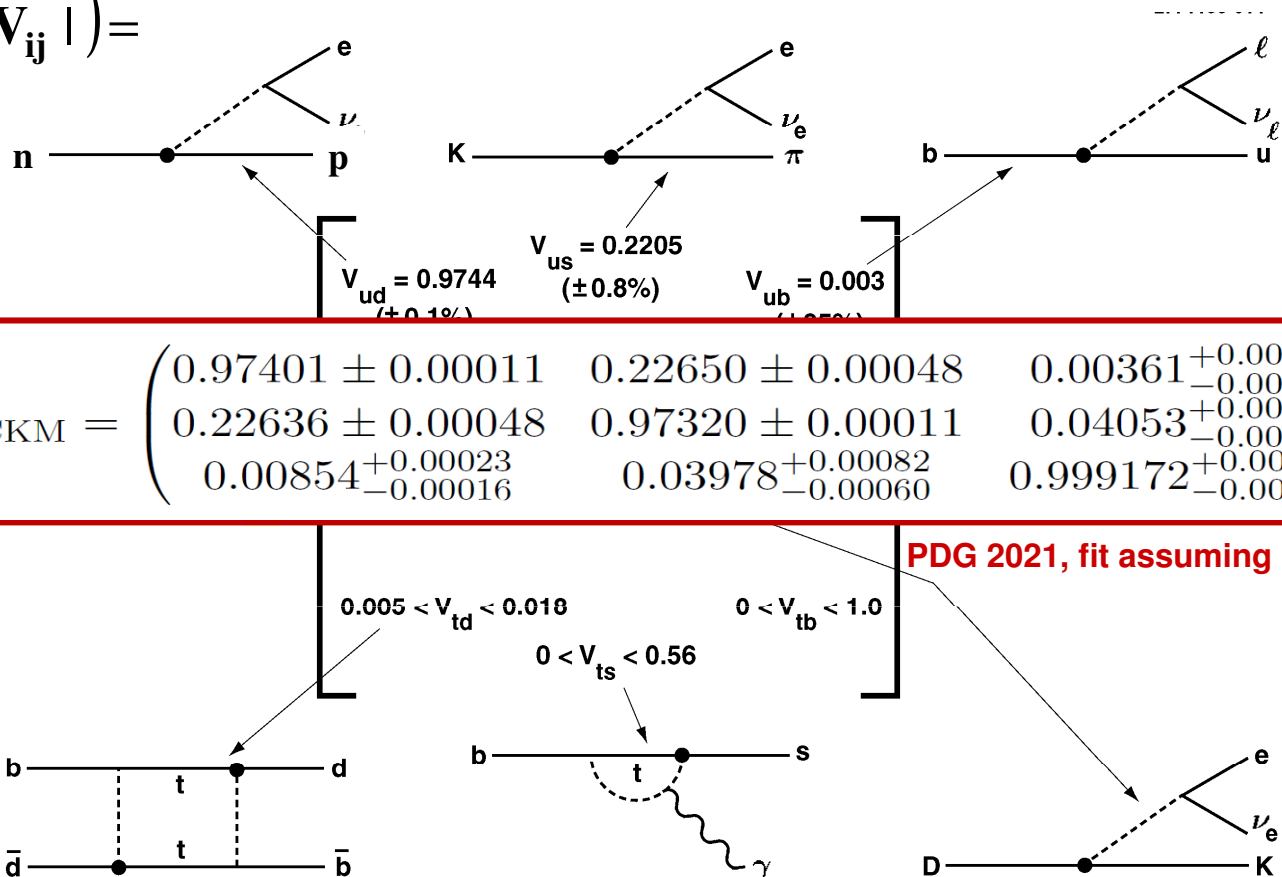


Letzte Ergebnisse (und Messmethoden) siehe <http://pdg.lbl.gov/> ↔ "Reviews, Tables & Plots"

378

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa -Matrix

$(|V_{ij}|) =$



$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 0.97401 \pm 0.00011 & 0.22650 \pm 0.00048 & 0.00361^{+0.00011}_{-0.00009} \\ 0.22636 \pm 0.00048 & 0.97320 \pm 0.00011 & 0.04053^{+0.00083}_{-0.00061} \\ 0.00854^{+0.00023}_{-0.00016} & 0.03978^{+0.00082}_{-0.00060} & 0.999172^{+0.000024}_{-0.000035} \end{pmatrix}$$

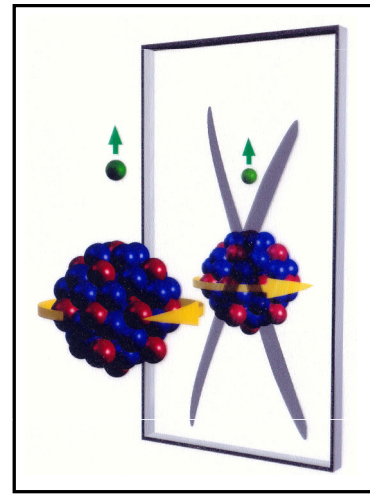
PDG 2021, fit assuming unitarity

379

Parität ist erhalten, wenn ein Prozess und sein Spiegelbild beide in der Natur beobachtet werden; d.h. die Wechselwirkung muss gegenüber der Paritätsoperation invariant sein



die Pirouette kann links – wie rechtsherum gedreht werden; der gespiegelte Vorgang wird beobachtet



die Emission des Elektrons erfolgt bevorzugt entgegen der Spinrichtung des Kernes; der gespiegelte Prozess wird nicht beobachtet

380

Parität

Paritätsoperation (Raumumkehr) ändert das Vorzeichen jedes polaren Vektors

$$\vec{p} \rightarrow -\vec{p}, \quad \vec{x} \rightarrow -\vec{x}$$

Axiale Vektoren bleiben unverändert z.B. $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$

$$\vec{J} \rightarrow \vec{J}$$

wenn $|\alpha\rangle$ ein Zustand positiver Parität ist

$$|\alpha\rangle = |\text{gerade}\rangle, \quad P \cdot |\alpha\rangle = +|\alpha\rangle$$

wenn die Parität nicht erhalten ist:

$$|\alpha\rangle = c \cdot |\text{gerade}\rangle + d \cdot |\text{ungerade}\rangle$$

$$|c|^2 + |d|^2 = 1$$

$$P \cdot |\alpha\rangle = c \cdot |\text{gerade}\rangle - d \cdot |\text{ungerade}\rangle \neq \pm |\alpha\rangle$$

$F=d/c$: Maß für die Paritätsnichterhaltung ($d \leq c$), $F=1 \rightarrow \text{max.}$

- Elektromagnetische Wechselwirkung
- Starke Wechselwirkung

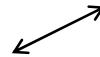
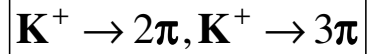


Paritätserhaltung !

- Elektromagnetische Wechselwirkung
 - Starke Wechselwirkung
- ⇒ Paritätserhaltung !

Experimentelle Beobachtung:

τ –, θ – Puzzle : 2 Zustände mit identischen Eigenschaften, aber verschiedenen Zerfällen



Lee, Yang: Paritätsverletzung in der schwachen WW.

(1956)

Endzustände haben entgegengesetzte

Parität

(..... Tafel)



Wu –Experiment

(..... Tafel)