

Ein gutes und erfolgreiches neues Jahr !!!!

342

Zusammenfassung: QCD-Potential, $c\bar{c}$ -, $b\bar{b}$ -Bindungszustände, $J^{PC}(q\bar{q})$ (VL2, KW 51)

- **Confinement - Potential ($c\bar{c}, b\bar{b}$)**

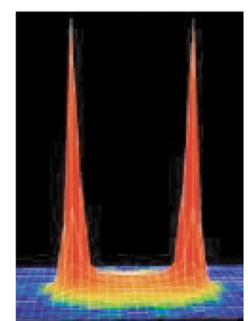
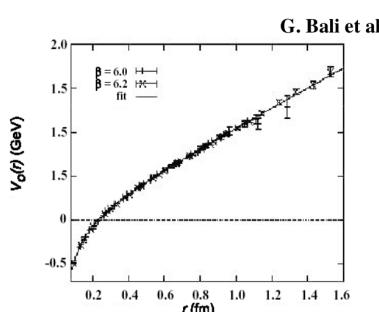
$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$$

⇓

- **$c\bar{c}$ - bzw. $b\bar{b}$ -Bindungszustände**

Beobachtung:

- Sehr schmale Resonanzen unterhalb der open-charm bzw. open-bottom Schwelle
 \leftrightarrow OZI-Regel
- Oberhalb der open-charm bzw. open-bottom Schwelle:
 Zerfälle in Mesonen mit c/\bar{c} - bzw. b/\bar{b} -Quarks möglich z.B. $\Psi \rightarrow D\bar{D}$ bzw. $\Upsilon \rightarrow B\bar{B}$
- + Überraschung:
 Beobachtung unerwarteter Zustände
 Natur = ?
 Moleküle? / kompakte Multiquark-Zustände? / ...



- **$q\bar{q}$ -Zustände - Quantenzahlen $I^G(J^{PC})$:**

Parität: $P = (-1)^{L+1}$, C-Parität: $C = (-1)^{L+S}$, G-Parität: $G = (-1)^{L+S+I}$

(S: Spin des $q\bar{q}$ -Systems, L: Bahndrehimpuls, I: Isospin)

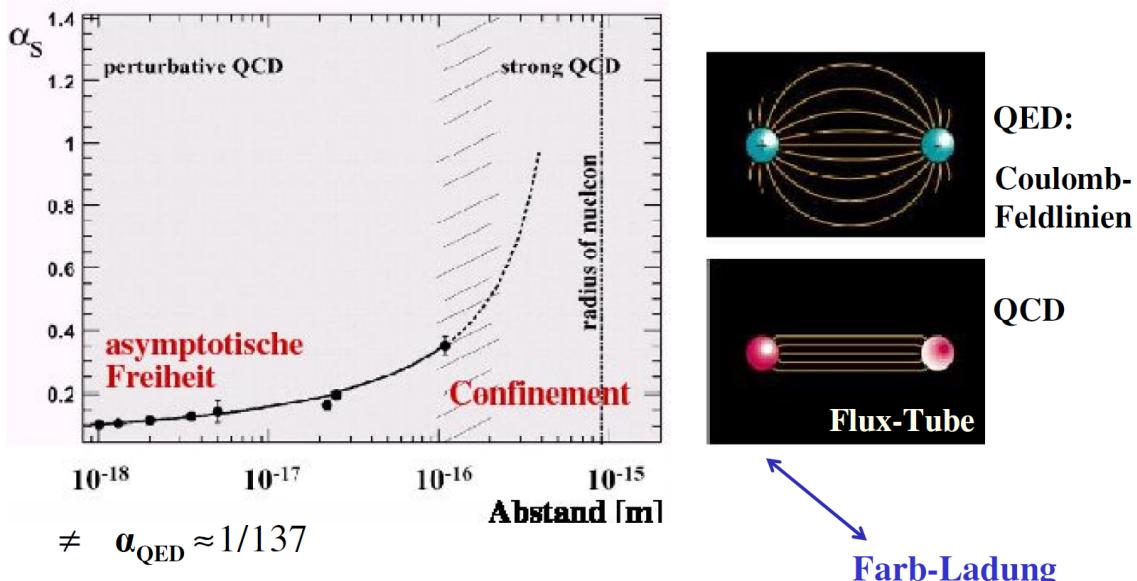
Achtung: C nur für neutrale Mesonen

343

Wiederholung: Hadronen als farbneutrale Objekte

- Es existieren nur farblose Hadronen \Leftrightarrow keine freien Quarks
(Quarks tragen Farbe)
- Quarks sind in Hadronen eingesperrt (= Confinement)**

\Leftrightarrow Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung α_s



344

Wiederholung: Kopplungskonstante der Starken Wechselwirkung α_s

QCD:

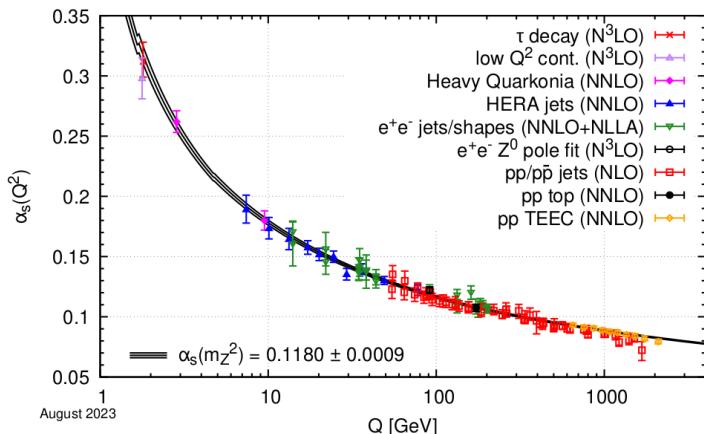
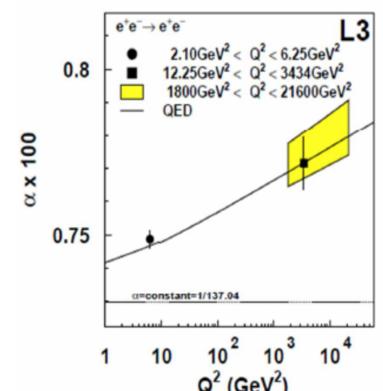


Figure 9.5: Summary of determinations of α_s as a function of the energy scale Q compared to the running of the coupling computed at five loops taking as an input the current PDG average, $\alpha_s(m_Z^2) = 0.1180 \pm 0.0009$. Compared to the previous edition, numerous points have been updated or added.

zum Vergleich:

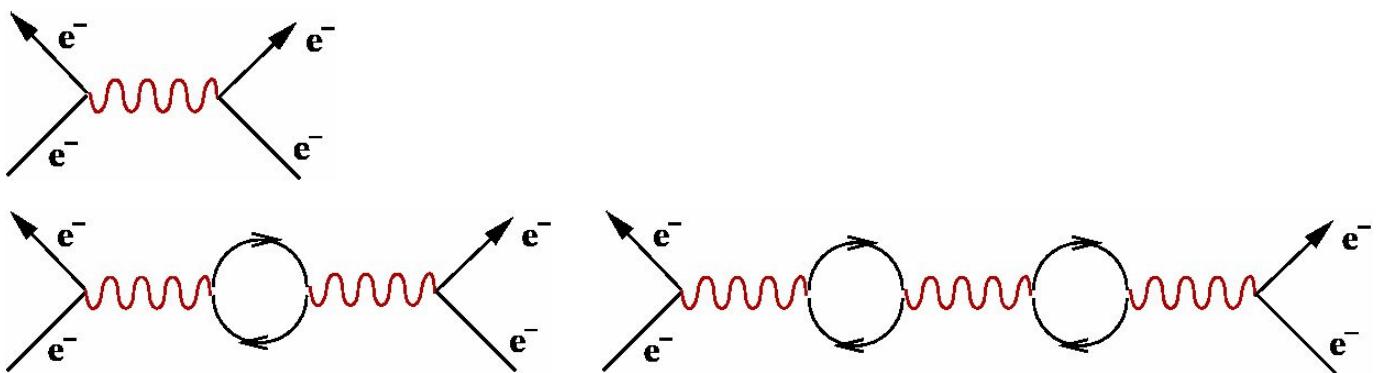
QED



...dazu später mehr ... \Leftrightarrow jetzt ...

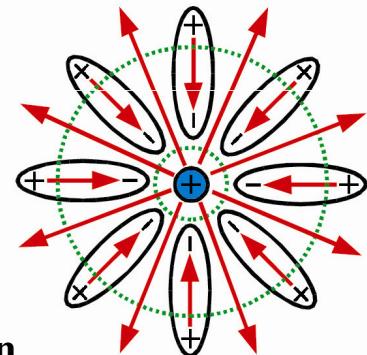
345

Die laufende Kopplungskonstante der QED



\Leftrightarrow Vakuumpolarisation

Statisches Modell der Vakuumpolarisation \Leftrightarrow

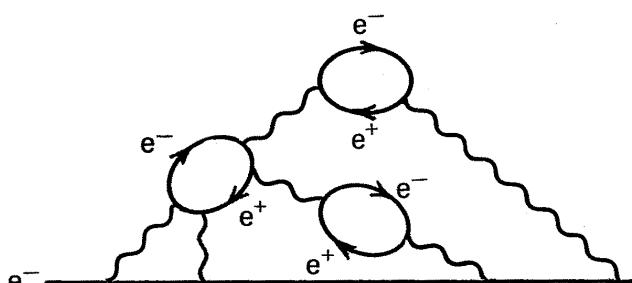


\Leftrightarrow Abschirmung schwächer bei sehr kleinen Abständen

\Leftrightarrow vollständige unabgeschirmte Ladung beobachtet

346

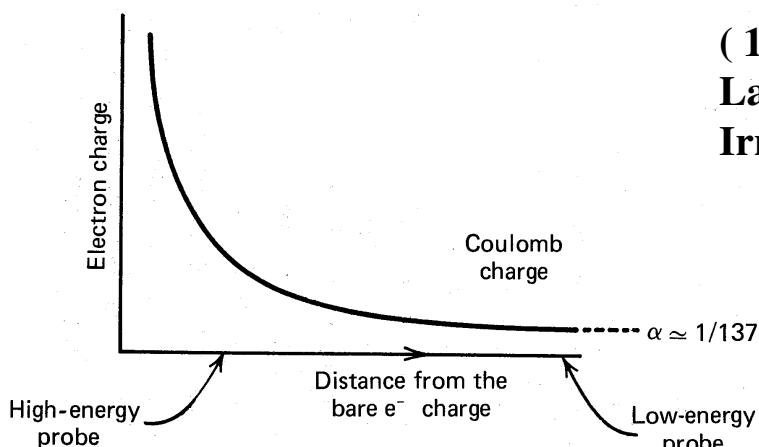
QED



quantitativ (Näherung) :

$$\alpha(Q^2) = \frac{\alpha(m_e^2)}{1 - [\alpha(m_e^2)/3\pi] \cdot \ln[|q^2|/m_e^2]}$$

$$\alpha(m_e^2) = 1/137.03599976(50)$$



(1-x) im Nenner:

Landau-Pol $\Leftrightarrow E=10^{277} \text{ GeV}$

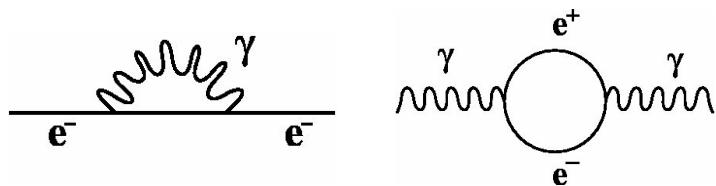
Irrelevant (andere Effekte spielen längst eine Rolle, QED beschreibt die Natur nicht mehr alleine ("Quantengravitation" ...))

347

QED - Beispiel -

- $|q^2| = 1000 \text{ GeV}^2$
 $\Rightarrow \delta\alpha/\alpha \approx 2\%$
- $e^+e^- \rightarrow Z^0$ **Quark und Lepton-Loops**
 $|q^2| = 8100 \text{ GeV}^2 \leftrightarrow m_Z \approx 90 \text{ GeV}$
 $\Rightarrow \delta\alpha/\alpha \approx 7\%$

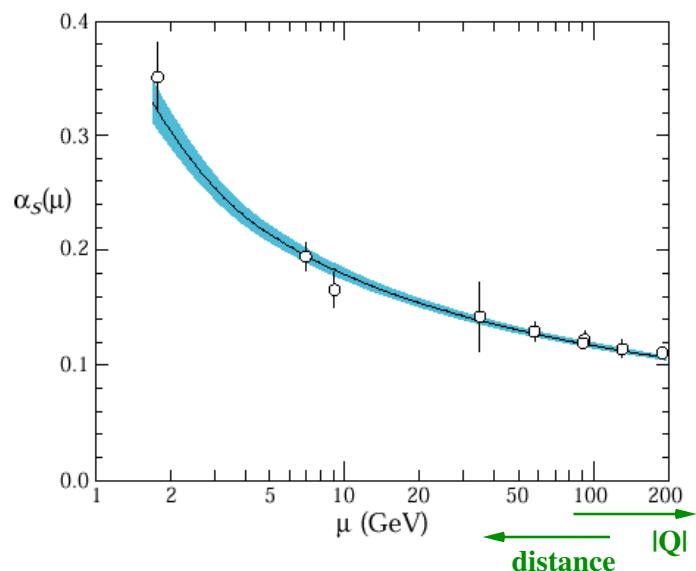
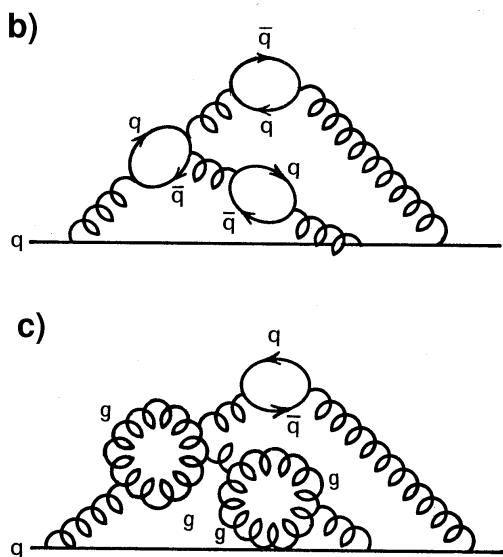
QED: Quantenfluktuationen ändern die Wechselwirkung



Lamb-Shift: $2s_{1/2}, 2p_{1/2}$ - Niveaus nicht entartet !

348

QCD - Anti-Screening -



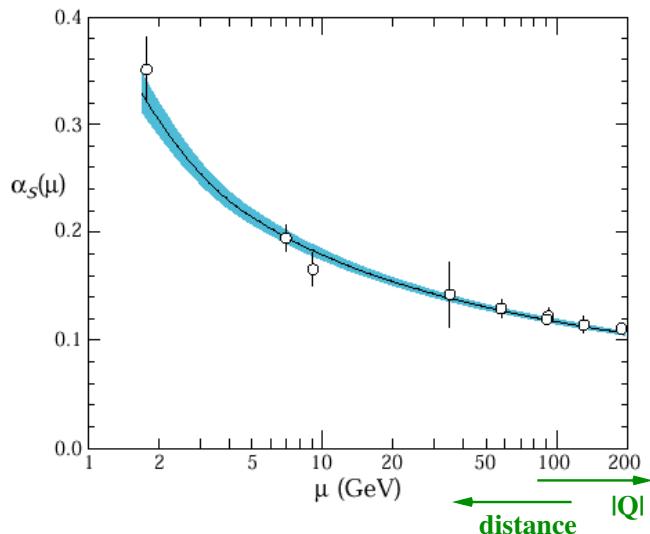
Gluon Selbstwechselwirkung

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{\alpha_s(Q_0^2)}{1 + \alpha_s(Q_0^2) \cdot \frac{(11n_c - 2n_f)}{12\pi} \cdot \ln(Q^2/Q_0^2)}$$

$(\mu^2 = Q^2)$

n_f Anzahl der Flavour unterhalb einer Masse μ
 n_c Anzahl der Farben

349



$$\alpha_s(Q^2) = \frac{12\pi}{(11n_c - 2n_f) \ln(Q^2/\Lambda^2)} \cdot (1 + \dots)$$

n_f Anzahl der Flavour unterhalb einer Masse μ

$Q \rightarrow \infty, n_f = 6 \Rightarrow \alpha_s \rightarrow 0$: **asymptotische Freiheit**

$Q \rightarrow \Lambda \Rightarrow \alpha_s \rightarrow \infty$: **infrared slavery**

\leftrightarrow **Confinement**

– Kleine Abstände (hoher Impulsübertrag)

α_s klein \Rightarrow Störungstheorie anwendbar

– Große Abstände (kleiner Impulsübertrag)

α_s large \Rightarrow Störungstheorie nicht anwendbar

Besseres Verständnis dieses Bereiches - Hadronenphysik:

z.B. durch Untersuchung des Anregungsspektrums der Hadronen

(Massen/Eigenschaften der angeregten Zustände) \leftrightarrow VL Hadronenphysik 350

Schwere Quarks

Charmonium-Zustände \Rightarrow Evidenz für **c-Quarks**

J/ψ, ψ – Zustände

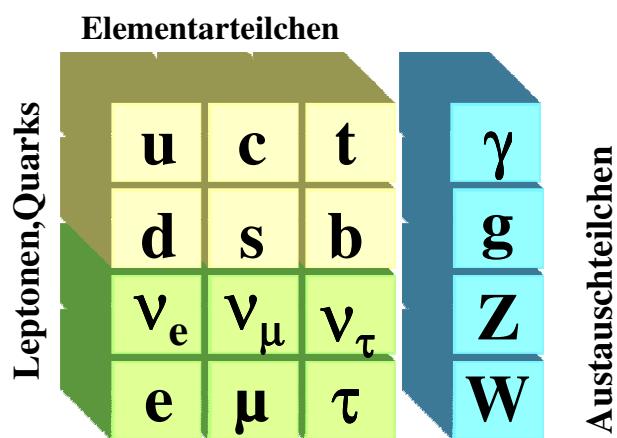
Erwartung, dass c-Quark existiert
 \Leftrightarrow schwache Wechselwirkung - Cabibbo-Theorie
 \Rightarrow jetzt

Analog hierzu Bottomonium –Zustände \Rightarrow Evidenz für **b-Quarks**
 Ypsilon-Zustände

.....Überraschung

t-Quark

...später



↔ Vorhersage des c-Quarks

- Allgemeine Vorbemerkungen - Schwache Wechselwirkung
- Vorhersage des c-Quarks
GIM-Mechanismus, Cabibbo - Theorie
- Cabibbo-Kobayashi-Maskawa -Matrix
- Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung
-
-

352

Vorbemerkungen - Schwache Wechselwirkung

Standardmodell:

3 Generationen

Quarks:
$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} Q = 2/3 \\ Q = -1/3 \end{matrix} \quad \downarrow \quad \Delta Q = -1$$

Leptonen:
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} Q = 0 \\ Q = -1 \end{matrix} \quad \downarrow \quad \Delta Q = -1$$

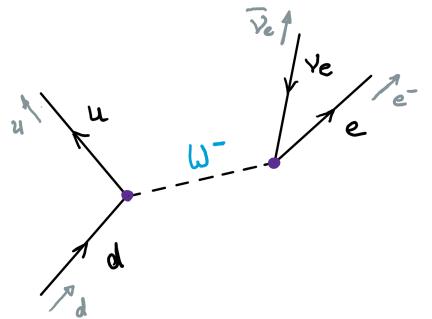
Sonderrolle der schwachen Wechselwirkung:

- Es gibt keine durch die schwache WW gebundene Systeme
- Quarks und Leptonen tragen “schwache Ladung” und unterliegen daher der schwachen WW
- Schwache Ladung gleich für Quarks und Leptonen ...
- Umwandlung von Quarks untereinander und Leptonen untereinander durch “geladene” schwache Ströme: W^\pm

353

Beispiele:

β -Zerfall des Neutrons:

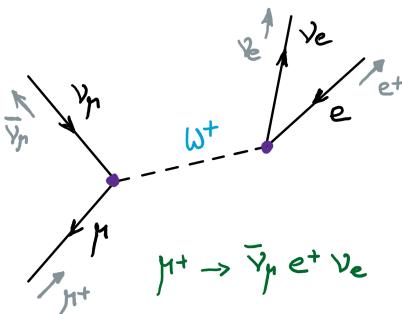
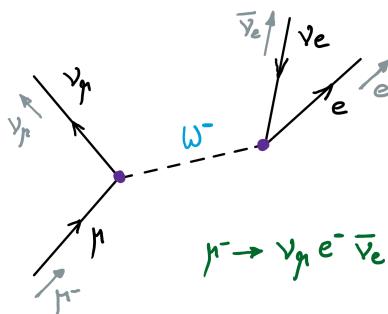


$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Umwandlung: $d \rightarrow u$

μ -Zerfall: $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$

μ -Zerfall: $\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e$



Umwandlung: $\mu \rightarrow \nu_\mu$

354

Experimentell:

- $\mu^- \not\rightarrow e^- \gamma$
- **Antineutrinos aus $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$:**
 $\Rightarrow \bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ aber $\bar{\nu}_e + n \not\rightarrow p + e^-$
 $\Rightarrow \bar{\nu}_e \neq \nu_e$
- **Neutrinos, Antineutrinos aus $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$:**
 $\Rightarrow \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ erzeugen keine Reaktionen bei denen Elektronen entstehen
 $\Rightarrow \bar{\nu}_\mu \neq \bar{\nu}_e, \nu_\mu \neq \nu_e$
 $\Rightarrow \nu_\mu$ erzeugen nur μ^- , $\bar{\nu}_\mu$ erzeugen nur μ^+
 $\Rightarrow \bar{\nu}_\mu \neq \nu_\mu$
- Bisher: keine weiteren schweren Leptonen beobachtet (e, μ, τ)
- 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)

355

Matrixelement:

$$M_{if} = \langle \Psi_f | H_W | \Psi_i \rangle$$

$$H_W = \frac{g^2}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \cdot e^{-r/R} \quad \text{zentral-symmetrisches 1-Boson-Austauschpotential}$$

$$(\alpha = \frac{g^2}{4\pi})$$

$$\Psi_i = \frac{1}{\sqrt{V}} \cdot e^{i\vec{p}_i \cdot \vec{r}}, \quad \Psi_f = \frac{1}{\sqrt{V}} \cdot e^{i\vec{p}_f \cdot \vec{r}} \quad (\text{naturliche Einheiten})$$

$$M_{if}(q) = \int e^{-i\vec{p}_f \cdot \vec{r}} H_W e^{+i\vec{p}_i \cdot \vec{r}} d^3 r = \int H_W \cdot e^{-i\vec{q} \cdot \vec{r}} d^3 r \quad \vec{p}_f - \vec{p}_i = \vec{q}$$

$$= \alpha \int \frac{1}{r} \cdot e^{-r/R} \cdot e^{-i|\vec{q}||\vec{r}| \cdot \cos\theta} r^2 dr d(\cos\theta) d\phi = \frac{4\pi\alpha}{(|\vec{q}|)^2 + (m_W)^2}$$

$$(R = \frac{1}{m}, \quad (R = \frac{\hbar}{mc} \leftrightarrow \text{Yukawa-Pot.}))$$

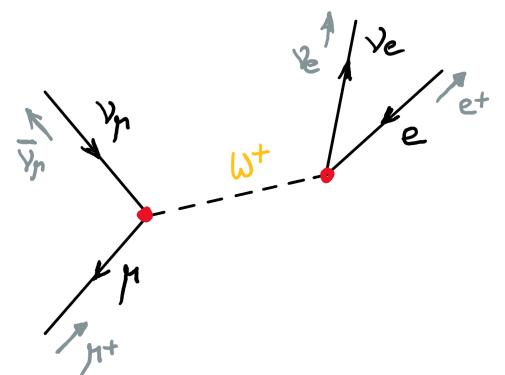
356

Schwache Wechselwirkung

Es wird nicht nur Impuls sondern auch Energie übertragen => Vierervektoren
 (\Leftrightarrow Keine Streuung am statischen Potential, wie bei Ableitung zuvor)

$$M_{if}(q) \propto 4\pi\sqrt{a} \frac{1}{(m_w)^2 - (q)^2} \sqrt{a}$$

— Propagator — Kopplungskonstante



$$M_{if}(q) \propto g \cdot \frac{1}{(q)^2 - (m_w)^2} \cdot g \quad \text{mit } a = \frac{g^2}{4\pi}$$

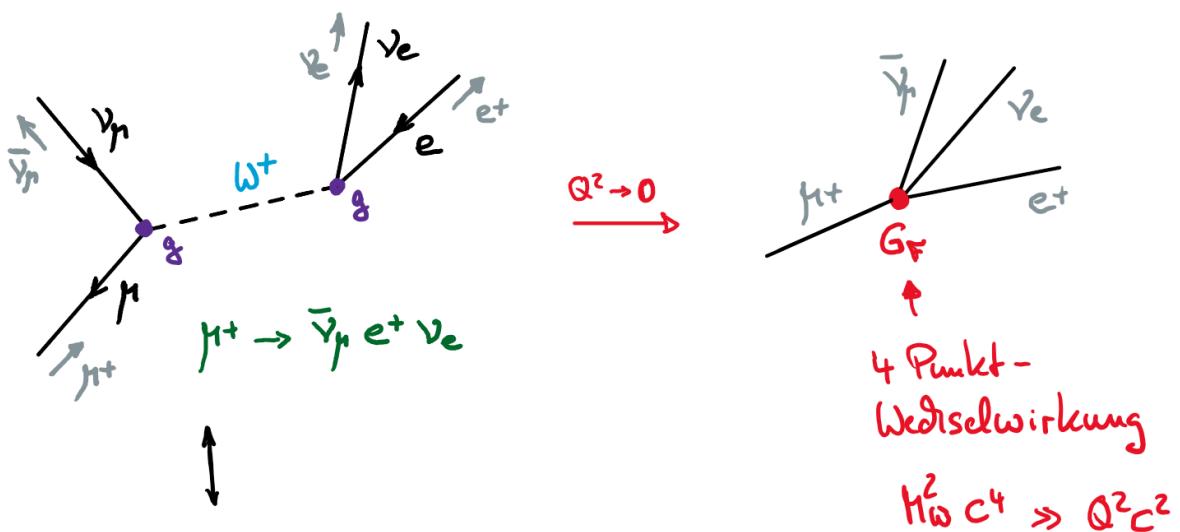
Schwache Kopplung (Ladung) g_w

$$M_{if} \propto g_w \frac{1}{Q^2 + M_w^2} g_w \quad Q^2 \rightarrow 0 \quad \frac{g_w^2}{M_w^2} \propto \frac{G_F}{\sqrt{2}}$$

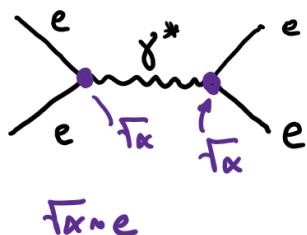
G_F : Fermi Kopplungskonstante

357

Fermi-Kopplungskonstante G_F



Analog zur el.magn. WW.



358

Schwache Wechselwirkung - Kopplungsstärke

G_F aus Lebensdauermessung des μ

(\leftrightarrow siehe auch β -Zerfall)

$$\Gamma_\mu = \frac{\hbar}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2}{192\pi^3(\hbar c)^6} \cdot (m_\mu c^2)^5 \cdot (1 + \epsilon) \quad \epsilon: \text{Strahlungskorr.} = \text{Prozesse höherer Ordnung}$$

$$m_\mu c^2 = 105.66 \text{ MeV}, \quad \tau = 2.197 \mu\text{s} \quad \Rightarrow$$

$$\frac{G_F}{(\hbar c)^3} = (1.16639 \pm 0.00002) \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

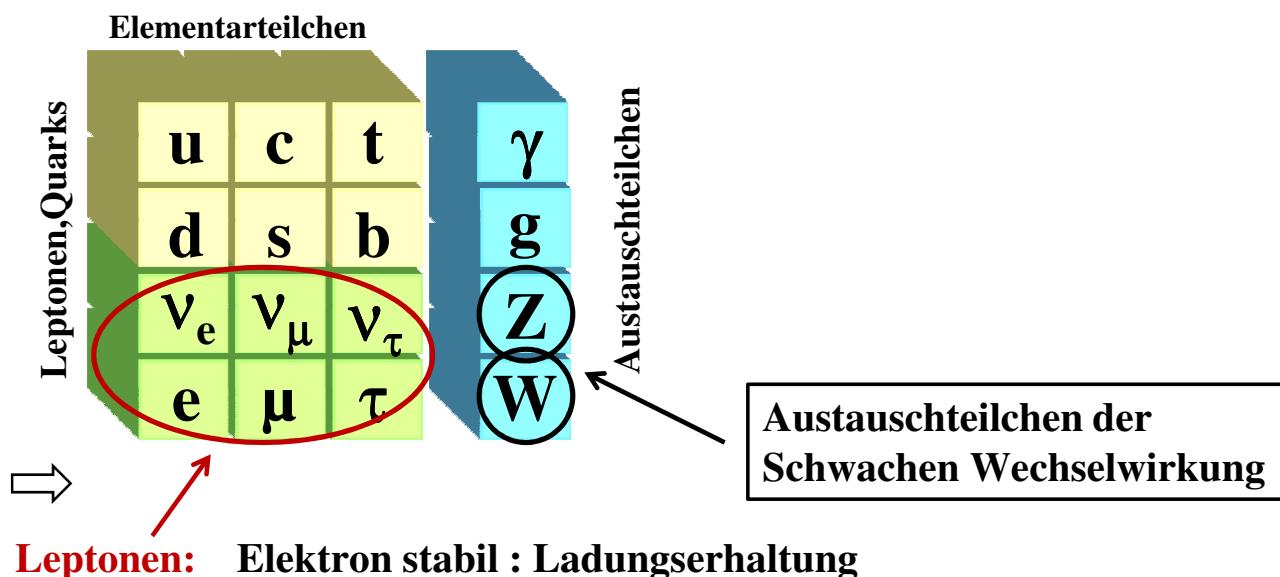
$$\frac{G_F}{(\hbar c)^3} = \frac{\sqrt{2}}{8} \left(\frac{g_W}{M_W c^2} \right)^2 \quad \Rightarrow g_W = 0.653$$

$$\alpha_W = \frac{g_W^2}{4\pi} = 1/29.5 = \text{größer als } \alpha = 1/137$$

Schwache WW nicht wegen seiner Kopplungskonstante schwach sondern wegen der großen Masse der Vektorbosonen!

359

Schwache Wechselwirkung - Leptonen -



Leptonen: Elektron stabil : Ladungserhaltung

$$\text{Muon : } \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

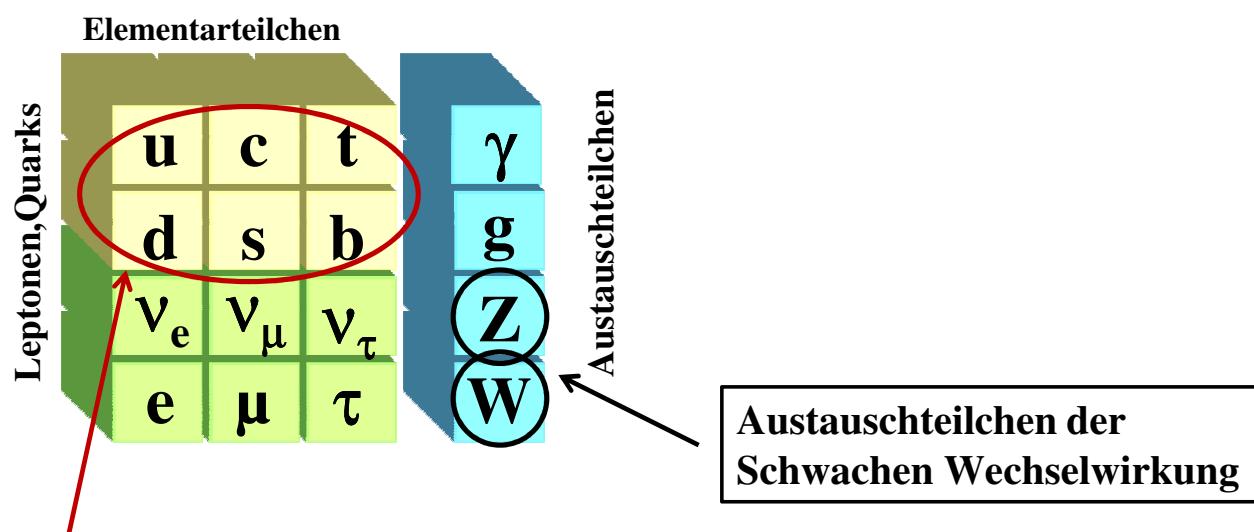
$$\mu^- \not\rightarrow e^- + \gamma \quad \Leftrightarrow \text{Leptonzahlerhaltung: } L_e, L_\mu, L_\tau$$

$$\text{Tau: } \tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau, \quad \tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + \nu_\tau \quad \Leftrightarrow \text{auch Zerfall in Hadronen } >50\%$$

360

Schwache Wechselwirkung - Quarks -



Quarks : Übergänge innerhalb einer Familie, aber auch Übergänge zwischen den Familien beobachtet

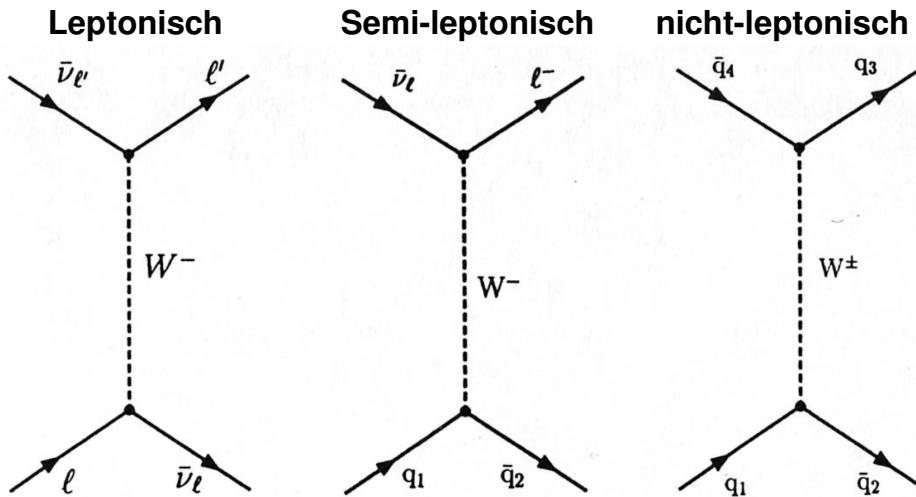
$$\Lambda \rightarrow p \pi^-, \quad s \rightarrow u$$

Nebenbemerkung:
 \Leftrightarrow Baryonzahlerhaltung :
 $B(\text{Quark}) = 1/3$
 $B(\text{Antiquark}) = -1/3$

361

Typen von Reaktionen

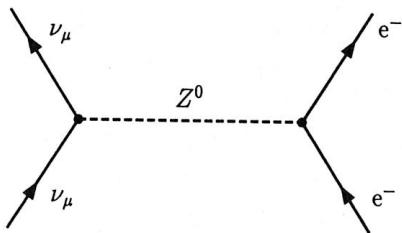
Gelandene Ströme (CC):



(Povh, Rith, Scholz, Zetsche)

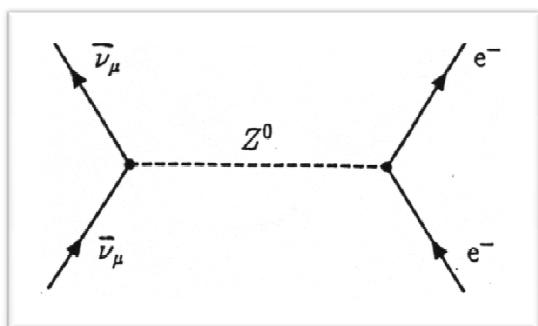
Neutrale Ströme (NC):

Bsp.:



362

Erste Beobachtung von neutralen schwachen Strömen

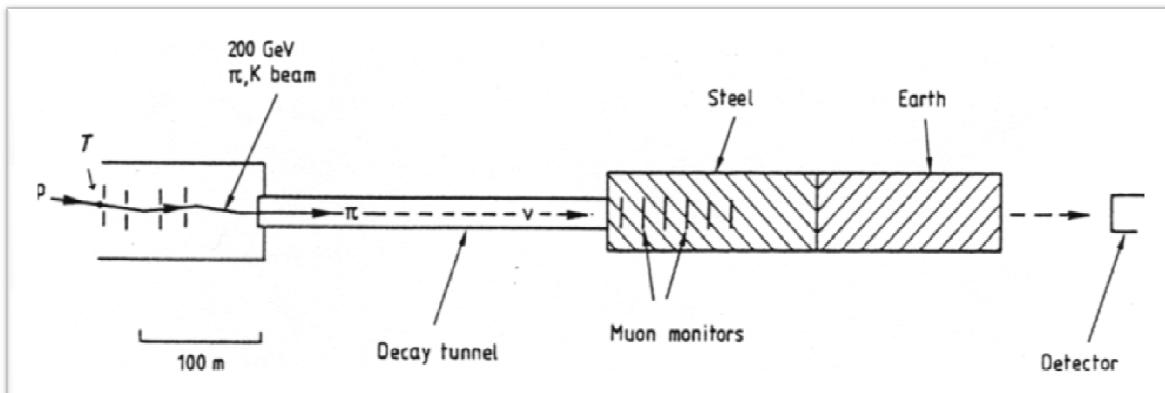


Ladung der beteiligten Fermionen unverändert

⇒ hochenergetisches Rückstoß-Elektron

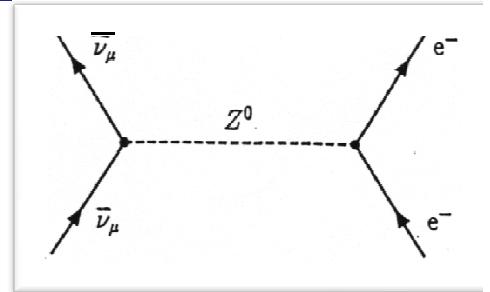
Erstmalige Beobachtung in Blasenkammer Gargamelle (CERN) 1973

Produktion des $\bar{\nu}$ - Strahls

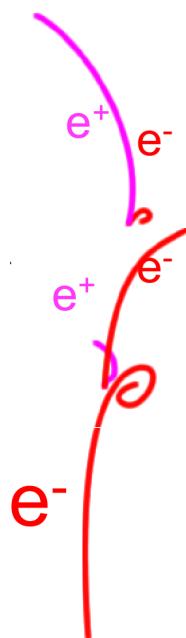


363

Erste Beobachtung von neutralen schwachen Strömen



\Leftrightarrow Elektromagnetischer Schauer



364

Schwache Wechselwirkung \rightarrow Vorhersage des c-Quarks

Vorhersage des c-Quarks \leftrightarrow GIM - Mechanismus

zunächst: Schwache Wechselwirkung:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad \tau = 2.6 \cdot 10^{-8} s$$

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \quad \tau = 2.2 \cdot 10^{-6} s$$

Starke Wechselwirkung: $\sim 10^{-23} s$

Elektromagnetische Wechselwirkung: $\sim 10^{-16} s$

Standardmodell:

3 Generationen

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

Übergänge $s \rightarrow u + W^-$ treten auf !
Keine Flavour-Erhaltung

Erhaltung der Leptonenzahl
 μ^- zerfällt nicht in $e^- \gamma$

365

Schwache WW: Cabibbo - Theorie

1963: u, d, s-Quarks

Experimentelle Bestimmung der Kopplungskonstanten
für den μ - und β -Zerfall (aus den Zerfallsbreiten)

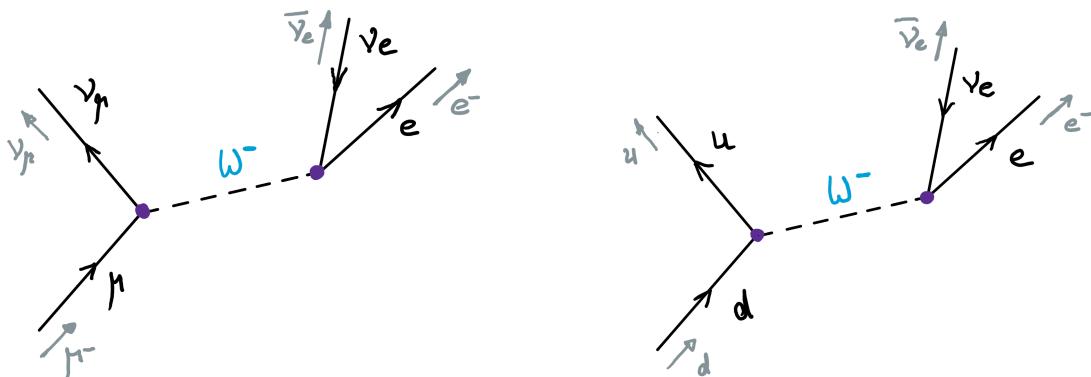
$$\frac{G(n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e)}{G(\mu^- \rightarrow \nu_\mu e^- \bar{\nu}_e)} \approx 0.974 \quad \text{fast identisch}$$

aber:

$$\frac{G(s \rightarrow u W^-)}{G(d \rightarrow u W^-)} \approx 0.23 \quad \text{sehr unterschiedlich für } \Delta S = 0, \Delta S = 1$$

keine Universalität der schwachen Kopplungskonstante

\Rightarrow Cabibbo-Theorie



366

Cabibbo - Theorie

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

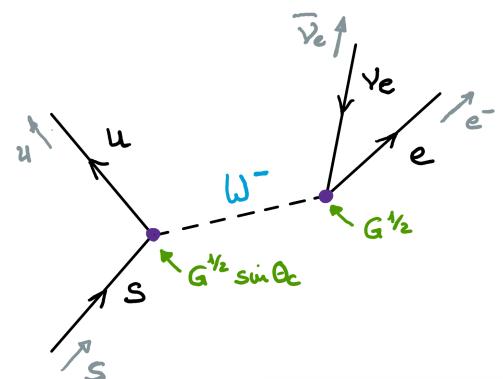
$$d' = d \cos \Theta_C + s \sin \Theta_C \quad \Theta_C = 13^\circ$$

In Analogie zu den Lepton-Doublets:

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

\Rightarrow Für diese Doublets: Schwache Wechselwirkung beschrieben durch eine Kopplungskonstante \rightarrow Universalität erhalten

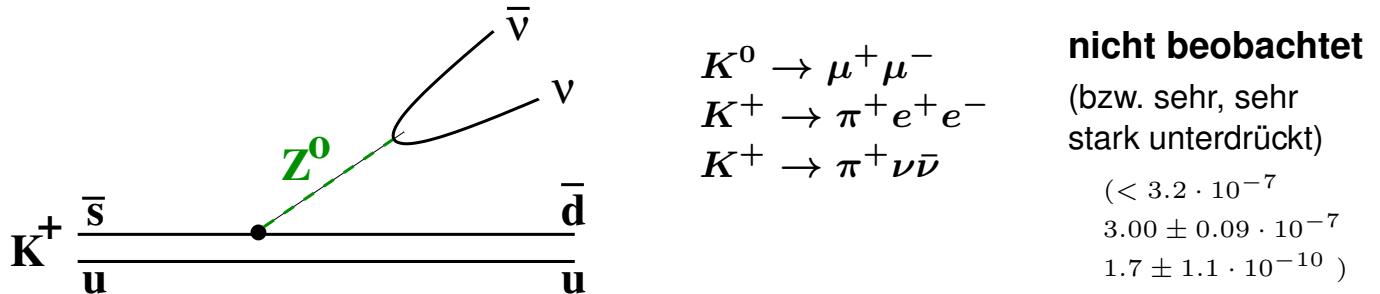
$$\begin{array}{lll} p \rightarrow n e^+ \bar{\nu}_e & u \rightarrow d e^+ \bar{\nu}_e & G^2 \cos^2 \Theta_c \\ K^0 \rightarrow \pi^0 e^- \bar{\nu}_e & s \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e & G^2 \sin^2 \Theta_c \\ \mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu & & G^2 \end{array}$$



367

Experimentelle Beobachtung - Neutrale schwache Ströme

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



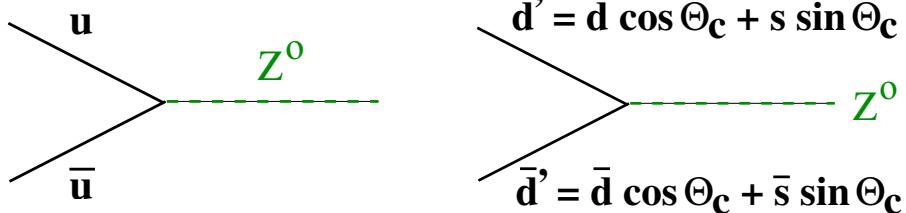
$$\frac{K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}}{K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu} < 10^{-8} \quad \Delta S = 1 \quad \leftrightarrow \frac{[\bar{s} \rightarrow \bar{d} + Z^0]}{[\bar{s} \rightarrow \bar{u} + W^+]}$$

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

368

Cabibbo - Theorie

Neutraler Strom:



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

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

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

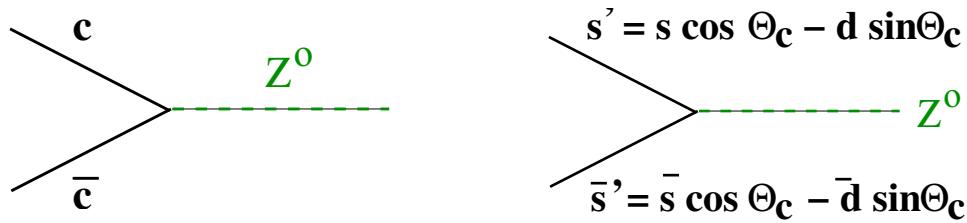
⇒ c-quark erklärt Nicht-Existenz von Flavour ändernden neutralen Ströme !

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

369

Cabibbo - Theorie

Erweiterung des neutralen Stromes durch



$$\begin{aligned} u\bar{u} + d'\bar{d}' + c\bar{c} + s'\bar{s}' &= u\bar{u} + c\bar{c} + (d\bar{d} + s\bar{s}) \cos^2 \Theta_C + (s\bar{s} + d\bar{d}) \sin^2 \Theta_C \\ &\quad + (s\bar{d} + \bar{s}d - \bar{s}d - s\bar{d}) \sin \Theta_C \cos \Theta_C \end{aligned}$$

$\Delta S = 1$ - 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

.....

370

Cabibbo - Theorie \implies CKM-Matrix

\Rightarrow c-quark erklärt Nicht-Existenz von Flavour ändernden 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 $U^+ U = 1$

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

371