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

1) **Befassen Sie sich mit den Kaon-Zerfällen**

2) **Berechnen Sie die Myon-HWZ aus den folgenden Angaben**

$$\Gamma_\mu = \frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G^2 m_\mu^5}{192\pi^3} \qquad G = 1{,}16632(2) \cdot 10^{-5}\,GeV^{-2}$$

3) **1s = ?? GeV^{-1} 1m = ?? GeV^{-1} 1kg= ?? GeV**
1mb = ?? GeV^{-2}

Weitere nützliche Relationen

$$\gamma_\mu \gamma^\mu = 4$$

$$\gamma_\mu \not{a} \gamma^\mu = -2\not{a}$$

$$\gamma_\mu \not{a}\not{b} \gamma^\mu = -4a \cdot b$$

$$\gamma_\mu \not{a}\not{b}\not{c} \gamma^\mu = -2\not{c}\not{b}\not{a}$$

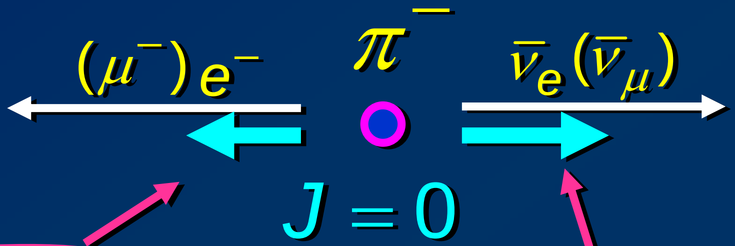
$$\gamma_\mu \not{a} \gamma^\mu = \gamma_\mu \gamma_\nu a^\nu \gamma^\mu = (2g_{\mu\nu} - \gamma_\nu \gamma_\mu) a^\nu \gamma^\mu$$

$$= 2g_{\mu\nu} a^\nu \gamma^\mu - \gamma_\nu \gamma_\mu a^\nu \gamma^\mu = 2a_\mu \gamma^\mu - \gamma_\nu \gamma^\mu \gamma_\mu a^\nu$$

$$= 2a_\mu \gamma^\mu - 4\gamma_\nu a^\nu = -2\not{a}$$

Wiederholung

1 Noch einmal π-Zerfall

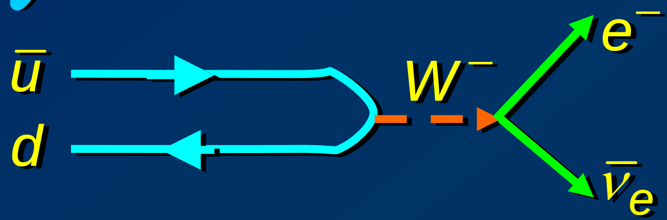


> helizitätsunterdrückt !!

erlaubt nur aufgrund endlicher Masse !!

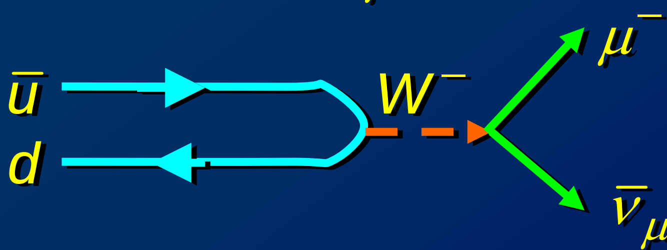
2

$\pi^- \to e^- \; \bar{\nu}_e$



$$M=\frac{G_e}{\sqrt{2}}\,j_\lambda^+(h)\,j^\lambda(e)$$

$\pi^- \to \mu^- \; \bar{\nu}_\mu$



$$M=\frac{G_\mu}{\sqrt{2}}\,j_\lambda^+(h)\,j^\lambda(\mu)$$

$G_e = G_\mu$

Vorsicht !!
richtige Theorie
enthält $\cos\Theta_c$

Bedeutung dieses Ergebnisses

a) Es setzt Grenze für rechtshändige Ströme
Die schwache WW ist rein linkshändig
(innerhalb der exp. Genauigkeit)

b) Viel wichtigeres Resultat !!

$\pi \to e\nu$ elektronischer Strom !

$\pi \to \mu\nu$ myonischer Strom !

$$G_e = G_\mu$$

Gleichheit der Kopplungskonstanten

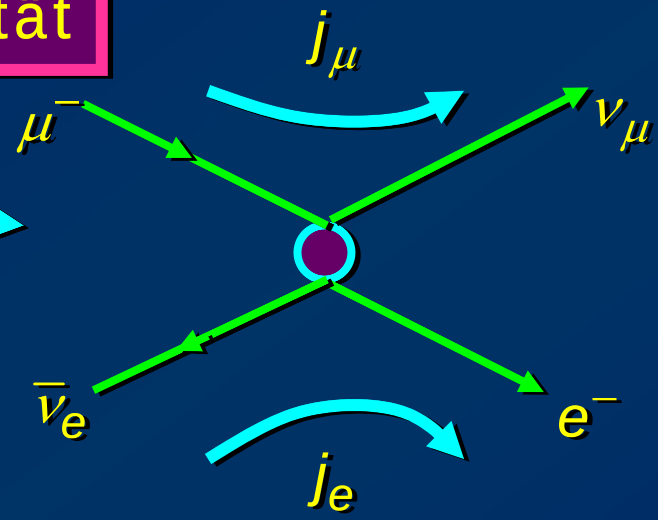
Universalität

Frage: Gilt Universalität für alle Generationen ?
Gilt Universalität auch im hadronischen Bereich ?

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Ein weiteres Beispiel für Universaltität

Der Myon-Zerfall



$$M = \frac{G}{\sqrt{2}} j_\lambda^+(\mu) j^\lambda(e)$$

> Übergangsrate

$$d\Gamma = \frac{1}{2E} \left|\bar{M}\right|^2 dQ$$

Spinor-Normierung

Spin-Mittel

Lorentz-invarianter Phasenraum

black box

$$\Gamma_\mu = \frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G^2 m_\mu^5}{192\pi^3} = (2{,}19703(4)\ \mu\text{sec})^{-1}$$

$$\succ G = 1{,}16632(2) \cdot 10^{-5}\, GeV^{-2}$$

Wenn G universell

$$\succ G_e = G_\mu = G_\tau \qquad \succ \Gamma_\tau = \frac{1}{\tau_\tau} = \frac{G^2 m_\tau^5}{192\pi^3}$$

oder $\boxed{\dfrac{\Gamma_\tau}{\Gamma_\mu} = \left(\dfrac{m_\mu}{m_\tau}\right)^5}$

Einsetzen der Werte: $m_\mu = 0{,}105\ GeV \qquad m_\tau = 1{,}785\ GeV$

$$\succ \tau_\tau = 2{,}2 \cdot 10^{-6}\,\text{sec} \cdot \left(\frac{0{,}105}{1{,}785}\right)^5 = 15{,}5 \cdot 10^{-13}\,\text{sec}$$

$$\tau_\tau(\exp) = 3{,}04 \cdot 10^{-13}\,\text{sec}$$

Was ist falsch ??

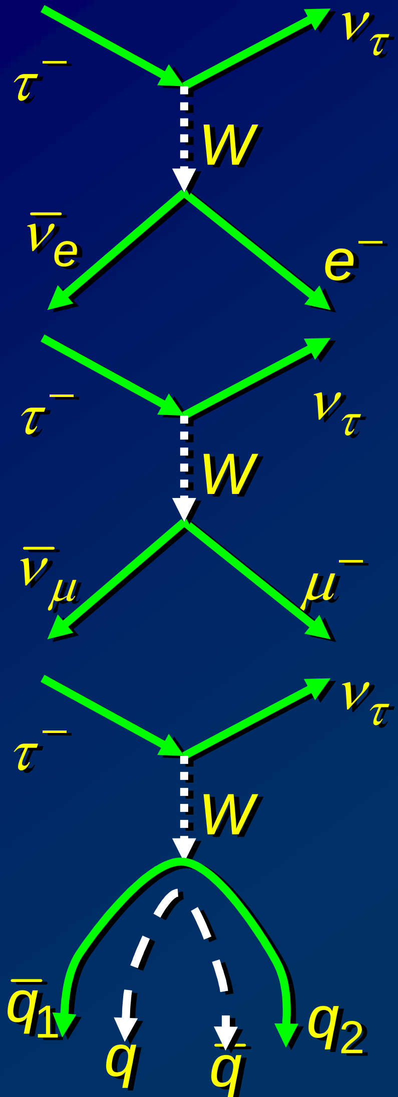
Lösung:

$\mu \to e\nu\bar{\nu}$

aber:

$\tau \to e\nu\bar{\nu}$
$\quad\ \ \mu\nu\bar{\nu}$
$\quad\ \ (q\bar{q})\nu$

nur dieselben partiellen Breiten können verglichen werden



Kopplungsstärke: **G**

Kopplungsstärke: **G**

Kopplungsstärke: **G**

aber: für jede Farbkombination !
> insgesamt: **3G**

$$\sum = 5G$$

!!

Beispiel:

$$\tau^- \to \pi^- \nu_\tau$$
$$\to \pi^- \pi^0 \nu_\tau$$
$$\to \pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$$

$$\succ (\tau \to e) : (\tau \to \mu) : (\tau \to h) = 1:1:3$$

$$\tau_\tau^{theo} = \frac{1}{5} \cdot 15{,}5 \cdot 10^{-13} = 3{,}1 \cdot 10^{-13}\ \text{sec}$$

Ergebnis:

$$\begin{pmatrix}\nu_e\\ e\end{pmatrix} \leftarrow W$$

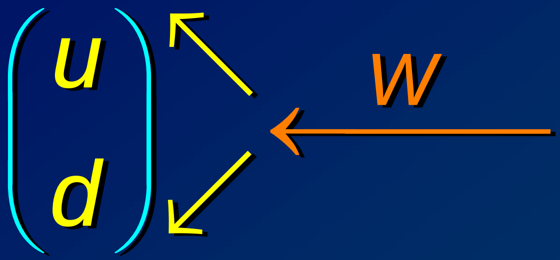
$$\begin{pmatrix}\nu_\mu\\ \mu\end{pmatrix} \leftarrow W$$

$$\begin{pmatrix}\nu_\tau\\ \tau\end{pmatrix} \leftarrow W$$

Die verschiedenen geladenen Ströme sind im Lepton-Sektor durch eine universelle Stärke (Kopplung) verknüpft

$$G = 1{,}166 \cdot 10^{-5} GeV^{-2} \qquad \left(\sim 1{,}03 \cdot \frac{10^{-5}}{m_p^2}\right) \qquad m_p = 0{,}938\ GeV$$

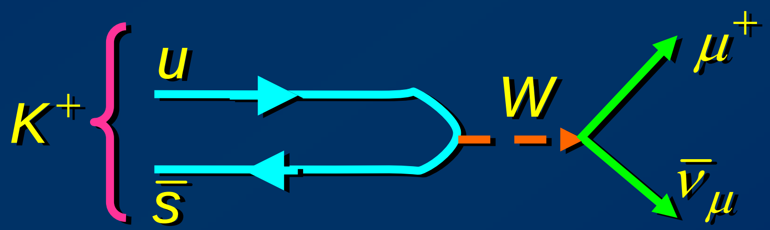
ABER:



$$G_\beta = 0{,}975\ G = 1{,}000\,\frac{10^{-5}}{m_p^2}$$

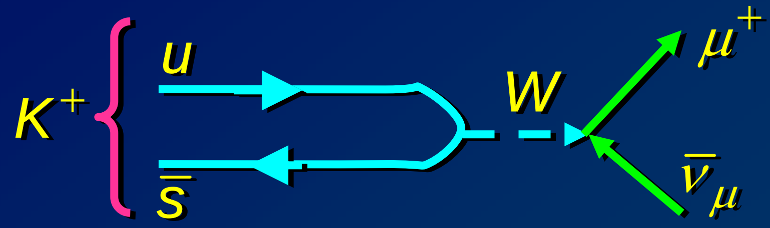
(Beispiel: β-Zerfall, π-Zerfall)

oder:

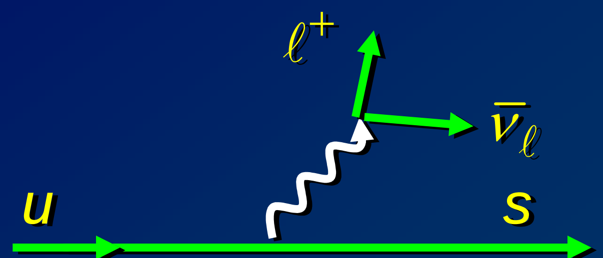


$$G_S \approx 22\%\ G$$

oder:



$G_s \sim 0{,}22G$

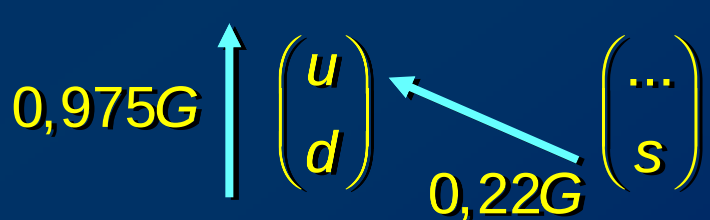


$\tau(K^+) \sim \dfrac{1}{G_s^2}$ > Faktor 20 zu langsam

insgesamt:

hadronische Übergänge mit $\Delta S = 0$ sind ~ 5% zu langsam

hadronische Übergänge mit $\Delta S = 1$ sind ~ Faktor 20 zu langsam



Cabibbo´s Vorschlag:

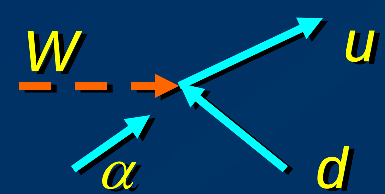
1 Die Quark-Massenzustände sind Eigenzustände der starken (aber auch der em) WW.

(Die starke WW ist universell bzgl. aller q`s)

2 Die Eigenzustände der schwachen WW sind nicht identisch zu den Eigenzuständen der starken WW.

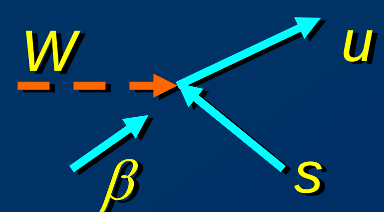
Für den Fall von nur u, d, s

1



+ Leptonpaar

2



+ Leptonpaar

$$|\text{Eigenzustand}\rangle = \alpha |\,1\,\rangle + \beta |\,2\,\rangle \qquad \alpha^2 + \beta^2 = 1$$

$$\alpha = \cos\Theta_c \quad \beta = \sin\Theta_c$$

Cabibbos Idee (f f):

oder!

ursprünglich nur für 3 Quarks (u, d, s) abgeleitet!

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} u \\ \alpha d + \beta s \end{pmatrix}$$

E.Z. starke (& em) WW

E.Z. schwache WW

$$\alpha = \cos\Theta_c \; (= 0{,}975)$$

$$\beta = \sin\Theta_c \; (= 0{,}225)$$

$$\alpha^2 + \beta^2 = 1 \quad \Theta_c = 13^0$$

heutige elegantere Formulierung (nachdem c-Quark etabliert ist):

der schwache geladene Strom koppelt zwischen rotierten Quarkzuständen

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \updownarrow W \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots$$

keine übergreifenden Terme mehr !!

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

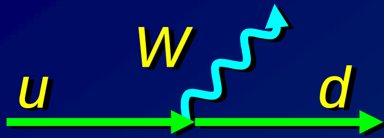
$$s' = -d\sin\Theta_c + s\cos\Theta_c$$

oder

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

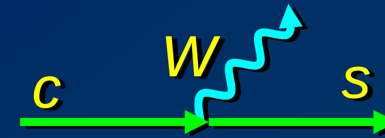
$$\succ M_h = \frac{G}{\sqrt{2}} j_\mu^+(h) j^\beta(h) \qquad j^\mu(h) = (\bar{u}\ \bar{c})\gamma^\mu(1-\gamma^5) U \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

q - Spinoren



$\cos\Theta_c$

Cabibbo-erlaubt



$\cos\Theta_c$

$\sin\Theta_c$

Cabibbo-unterdrückt

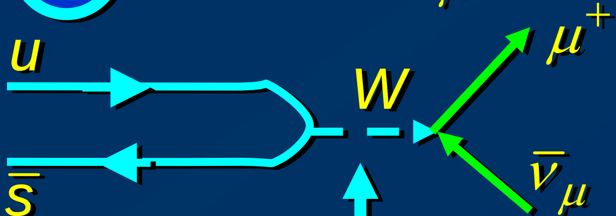
$\sin\Theta_c$

oder:

$$G_\beta = G\cos\Theta_c$$
$$G_S = G\sin\Theta_c$$

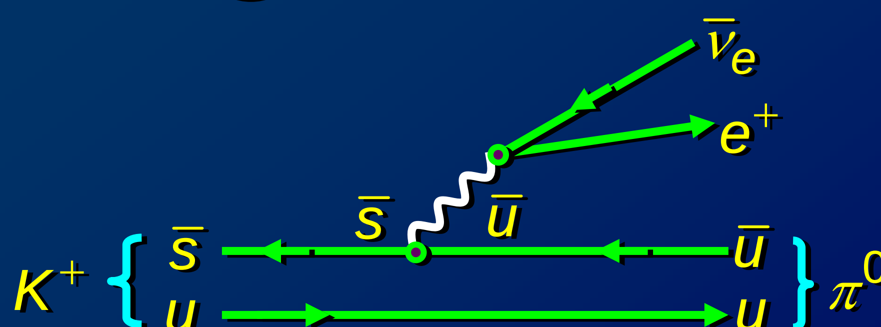
einige Beispiele

1 $K^+ \to \mu^+ \bar{\nu}_\mu$



$\sim \sin^2\Theta_c$

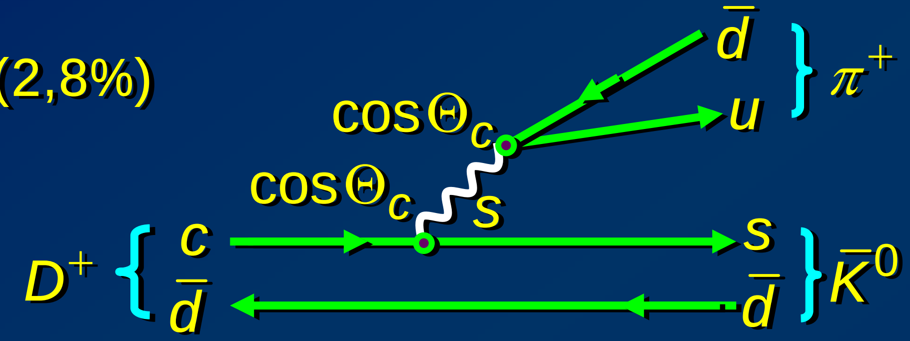
2 $K^+ \to \pi^0 e^+ \bar{\nu}_e$



$\sim \sin^2\Theta_c$

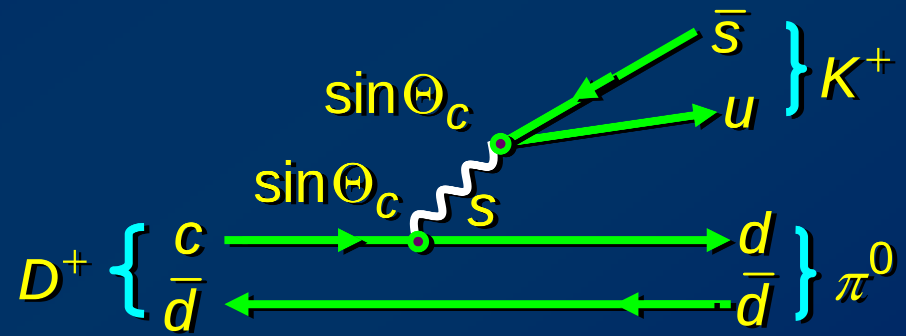
3 $D^+ \longrightarrow \bar{K}^0 \pi^+$ (2,8%)

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



4 $D^+ \longrightarrow K^+ \pi^0$ (??)

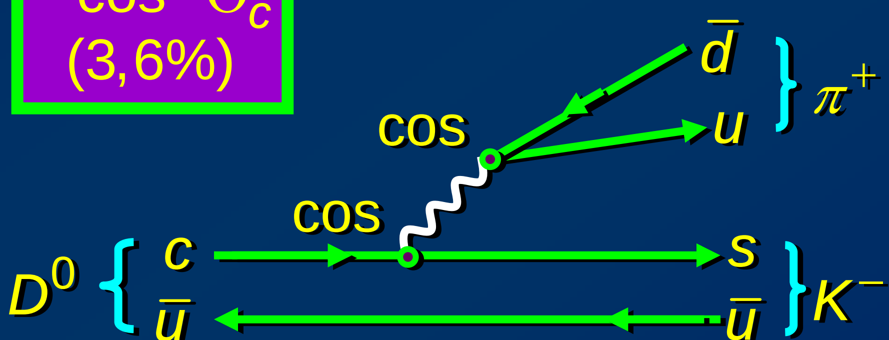
$\boxed{\sim \sin^4 \Theta_c}$



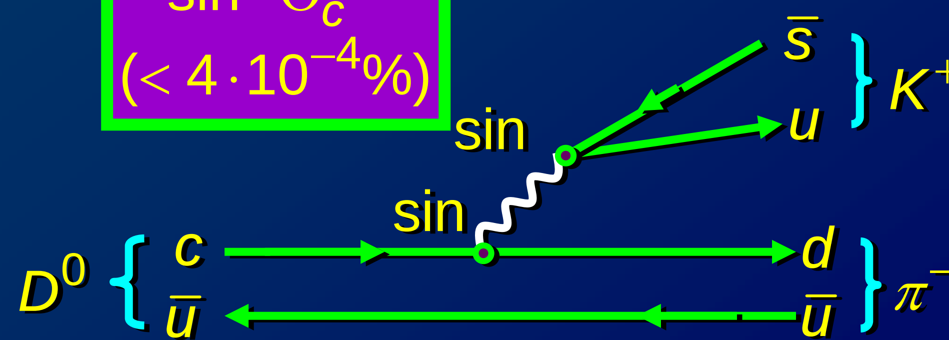
5 $D^0 \longrightarrow K^- \pi^+$

$\longrightarrow K^+ \pi^-$

$\boxed{\sim \cos^4 \Theta_c}$ (3,6%)



$\boxed{\sim \sin^4 \Theta_c}$ $(< 4 \cdot 10^{-4}\%)$



GIM und Entdeckung von c

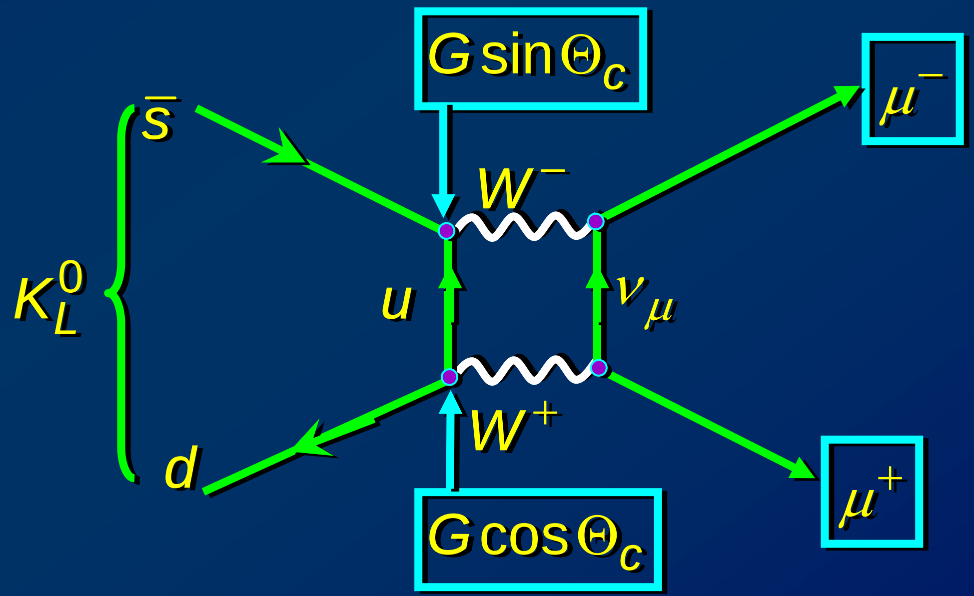
1 Es gibt keine flavour-ändernden neutralen Ströme

$$s \not\leftrightarrow d$$

Aber: es gibt Zerfall von

$K_L^0 \longrightarrow \mu^+\mu^-$ als möglichen Prozess 2. Ordnung

$M \sim G^2 \sin\Theta_c \cos\Theta_c$



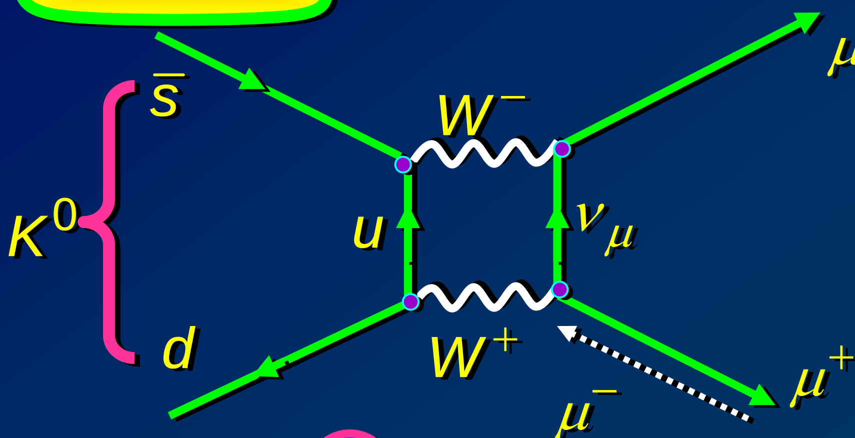
Aber: $BR(K_L^0 \longrightarrow \mu^+\mu^-) \sim 9 \cdot 10^{-9}$

erwarteter Wert: $\sim 10^{-5}$

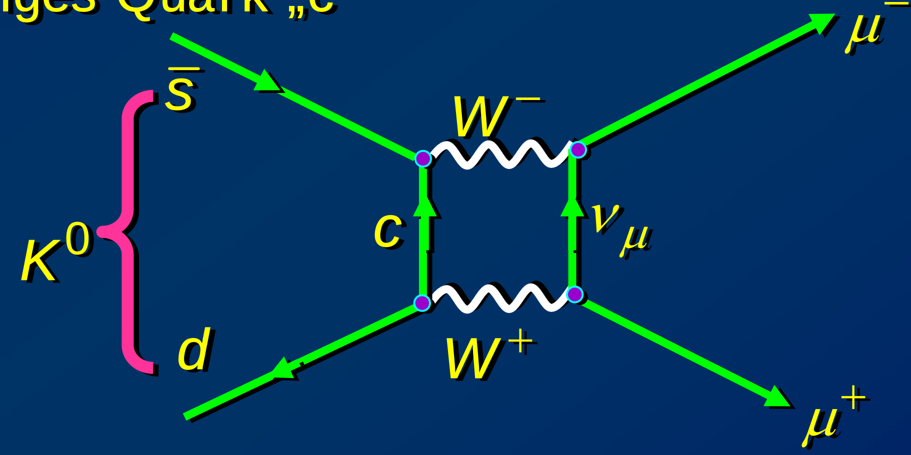
Idee von Glashow, Iliopolus, Maiani (1970)

Wenn es mehr als nur ein intermediäres Quark (hier „u“) gibt, dann führt dieses zu einer kohärenten Summe von Amplituden.

Annahme: $\exists$ ein weiteres „up“-artiges Quark „c“



$+$



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

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

erinnere:

$$\cos \updownarrow \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \text{sin} \quad \text{-sin} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \updownarrow \cos$$

$\succ \sum$ 1 $+$ 2 $= 0$!!

Insgesamt: Die Zerfallsamplitude $K_L^0 \longrightarrow \mu^+\mu^-$ verschwindet --- allerdings nur dann, wenn m(u) = m(c)

da $K_L^0 \longrightarrow \mu^+\mu^- \approx 9 \cdot 10^{-9}$ $\succ m(c) \sim 1{,}5\,GeV$

1974

Experiment in Stanford (B.Richter)

$e^+e^- \to \gamma \to c\bar{c}$ Ψ -Teilchen

3,1 GeV

Experiment in Brookhaven (S.Ting)

28 GeV $p + {}^9Be \to c\bar{c} + \text{Rest}$ J - Teilchen

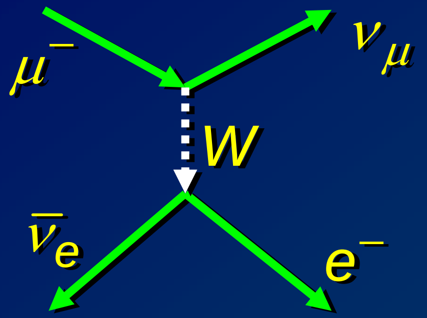
Nobelpreis: 1976 – Richter & Ting

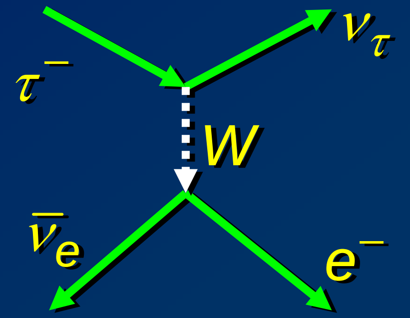
heute: J/Ψ -Teilchen

$$m = 3{,}097\ GeV$$

$$\Gamma = 64\ keV\ !!$$

3 Myon und Tau-Zerfall





$$\Gamma_\tau = \frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_\mu m_\mu^5}{192\pi^3}$$

$$\Gamma_\tau = \frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_\tau m_\tau^5}{192\pi^3} \quad *5 \text{ !!}$$

$$(= \Gamma(\tau \to e) + \Gamma(\tau \to \mu) + 3\Gamma(\tau \to h))$$

wegen Farbe

$$\Rightarrow \tau_\tau = \tau_\mu \left(\frac{m_\mu}{m_\tau}\right)^5 \cdot \frac{1}{5}$$

$$\tau_\tau = 3{,}1 \cdot 10^{-13}\ \text{sec}$$

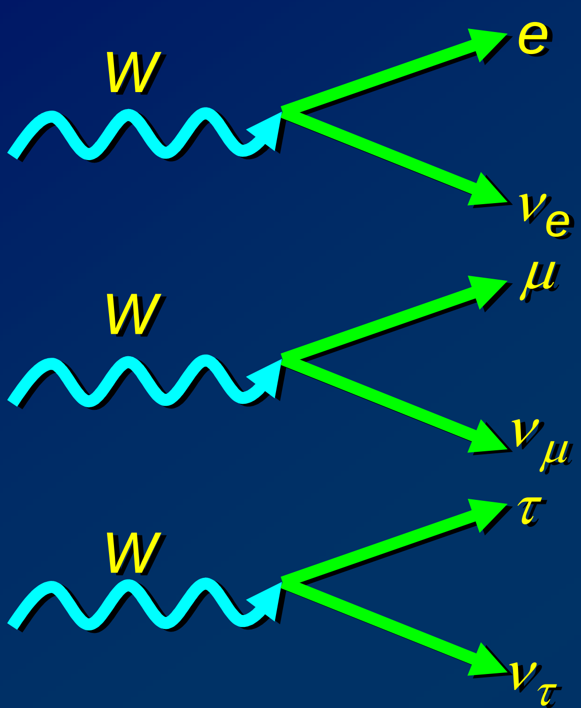
$$3{,}04 \cdot 10^{-13}\ \text{sec}$$

$$G_\mu = G_\tau$$

4

insgesamt

Das intermediäre Boson **$W^{\pm}$** koppelt mit einer universellen Stärke (Kopplungskonstante) an die verschiedenen Leptonen



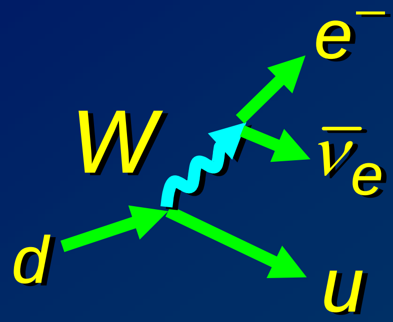
$$G = 1{,}03 \frac{1}{m_p^2} \cdot 10^{-5}\, GeV^{-2}$$

(im Limit $q^2 = 0$!!)

Universalität

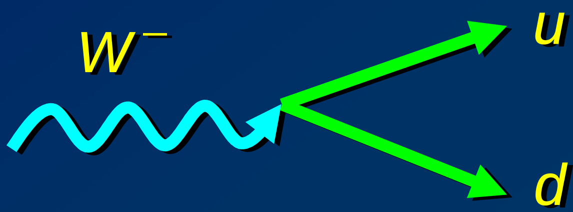
5

ABER **im hadronischen Bereich:**



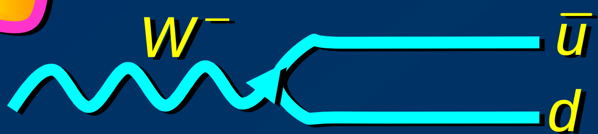
β - Zerfall

oder:



β - Zerfall

oder:

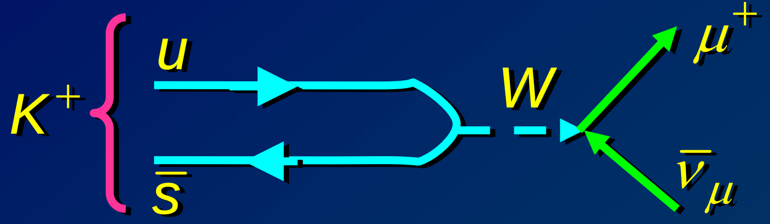


π - Zerfall

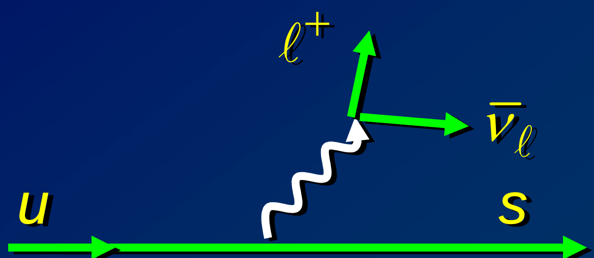
allgemein: $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \updownarrow W$ $\quad G_\beta = 0{,}975\ G\ (= 10^{-5} m_p^{-2})$

oder: da $\Gamma \sim G^2$ $\quad \succ \tau \sim \dfrac{1}{G^2}$ $\approx$ 5 % zu langsam

oder:



$G_S \sim 0{,}22G$



$$\tau(K^+) \sim \frac{1}{G_S^2}$$ > Faktor 20 zu langsam

insgesamt:

hadronische Übergänge mit $\Delta S = 0$ sind ~ 5% zu langsam

hadronische Übergänge mit $\Delta S = 1$ sind ~ Faktor 20 zu langsam

$$0{,}975G \uparrow \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \xleftarrow{0{,}22G} \begin{pmatrix} \dots \\ s \end{pmatrix}$$