

Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III
Vorlesung 10

MICHAEL FEINDT
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

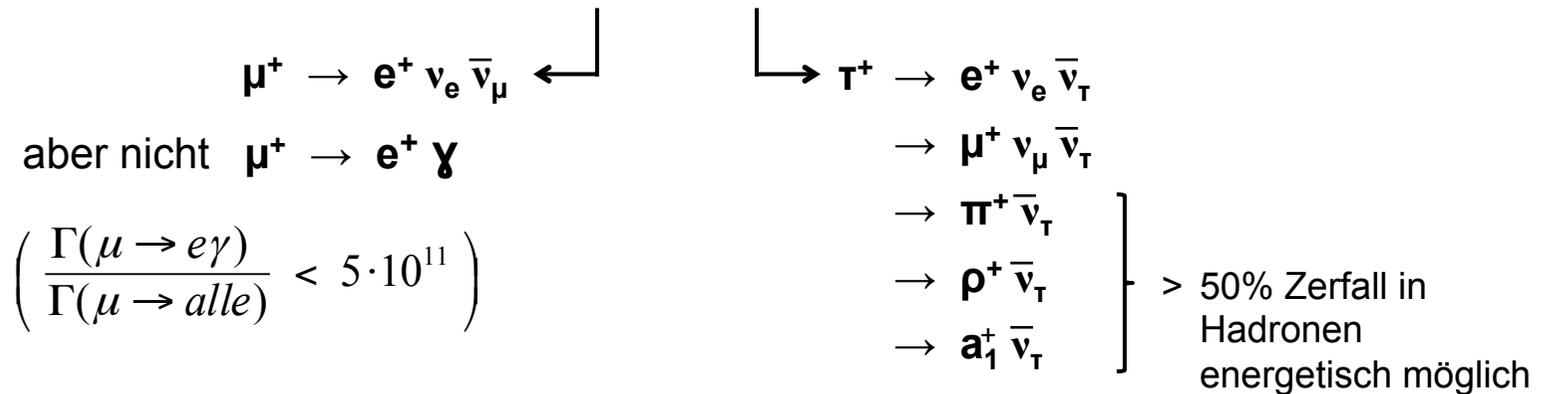
Schwache Wechselwirkung

Inhalt

- Leptonfamilien
- schwache Prozesse
- geladene und neutrale Ströme
- Quarkmischung
- Paritätserletzung (\rightarrow 11. Symmetrien)

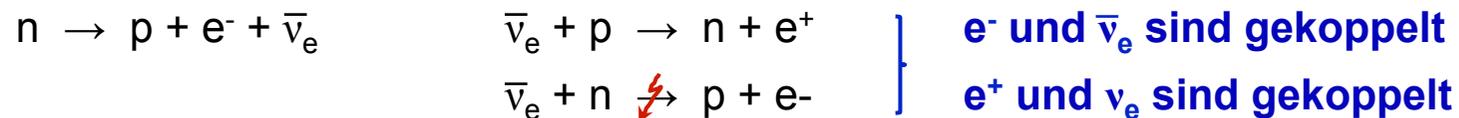
Leptonfamilien

geladene Leptonen	e ⁺	μ ⁺	τ ⁺	
Masse	0.5	105	1777	MeV
Lebensdauer	∞	2 μs	0.3 ps	

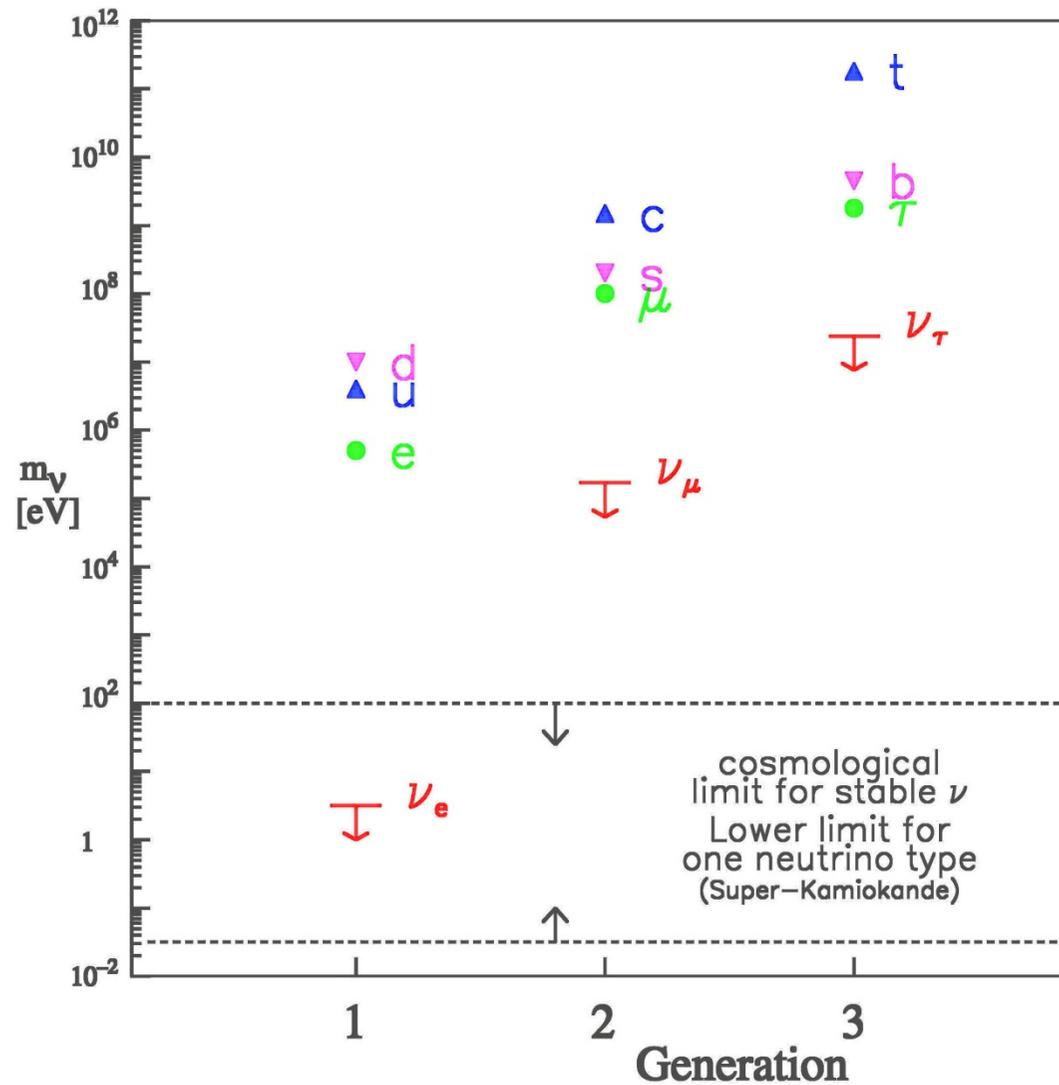


■ Identität des Neutrinos:

über Kopplung an geladene Leptonen:

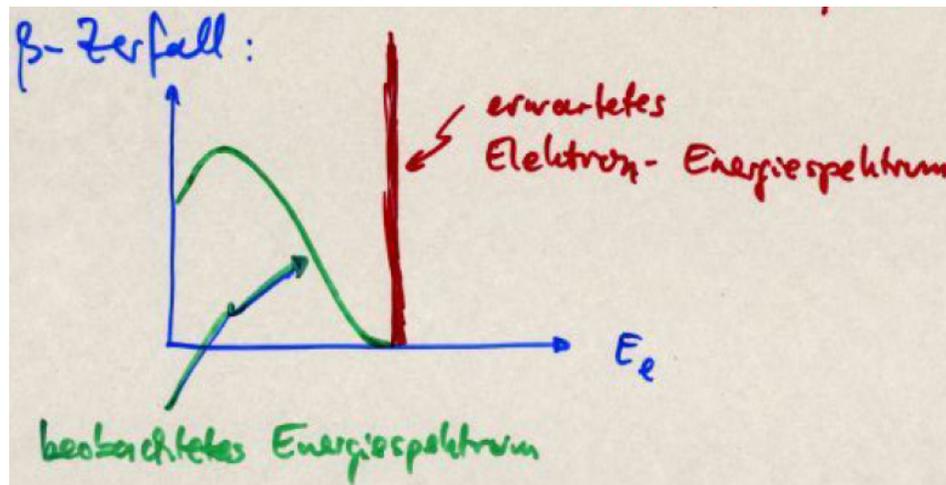


Massen der Fermionen



"Erfindung des Neutrinos" (Pauli 1930)

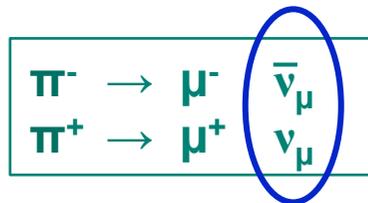
- **2-Körper – Endzustand :** Impulse der Zerfallsteilchen im Schwerpunktsystem eindeutig festgelegt



- Möglichkeiten:
1. Energiesatz ist nicht gültig
 2. Es wird ein 3., unbeobachtbares Teilchen erzeugt. Kann Spektrum erklären!

Pauli 1930: Möglichkeit 2

Verschiedenheit von ν_μ und ν_e



diese Neutrinos induzieren bei Absorption stets nur μ^\pm , nie e^\pm

⇒ Existenz von 2 Neutrinosorten

Steinberger, Schwartz, Ledermann 1962

- Inzwischen: Es gibt 3 Neutrino – Familien

1) LEP: Form der Z^0 – Resonanz

2) Urknall – Nukleosynthese

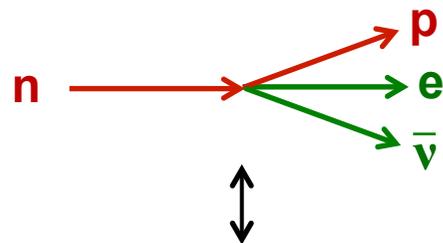
- **Leptonzahl – Erhaltung:** $L_\ell = N(\ell) - N(\bar{\ell}) + N(\nu_\ell) - N(\bar{\nu}_\ell)$ $\ell = e, \mu, \tau$
(für jede Familie individuell)

Gesamt – Leptonzahl: $L = L_e + L_\mu + L_\tau$

(L wird durch seit einigen Jahren beobachtete Neutrino – Oszillationen verletzt)

Schwache Prozesse

- historisch: **Fermi – 4-Fermion – Wechselwirkung**



punktförmiger Vertex, an dem ein Neutron vernichtet und ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino erzeugt werden.

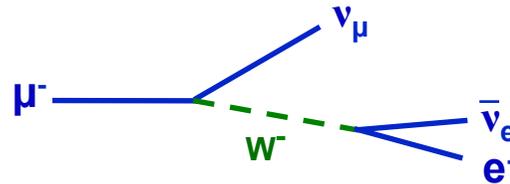
Kopplungskonstante: $G_F = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} \cdot (\hbar c)^3$

↑
Fermi – Kopplungskonstante, klein!

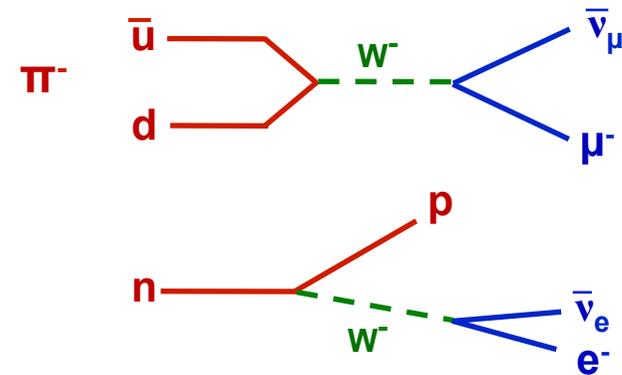
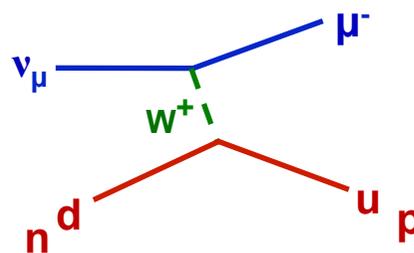
Schwache Prozesse

- heute: Austausch von **schweren Vektorbosonen** W^\pm, Z^0
- geladener Strom

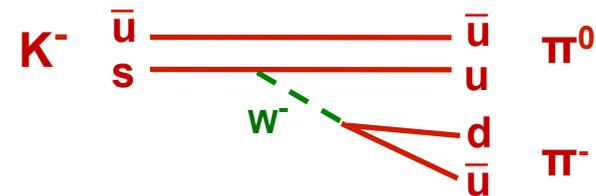
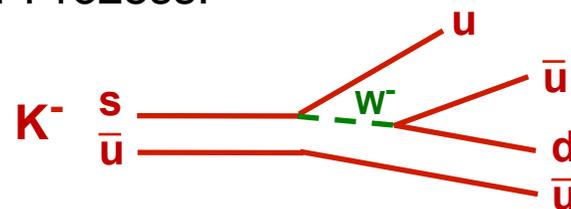
leptonischer Prozess:



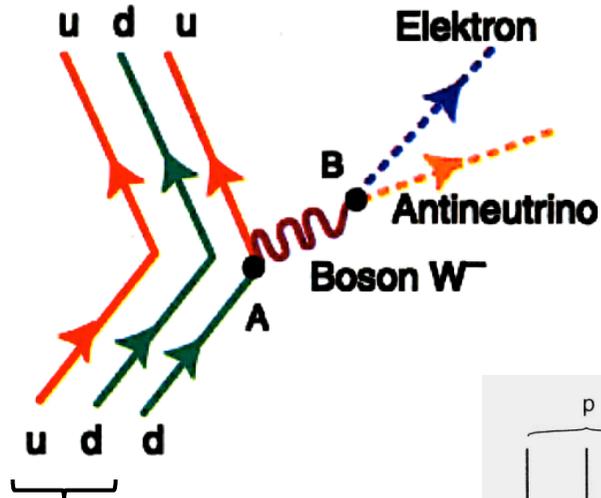
semileptonischer Prozess:



nichtleptonischer Prozess:



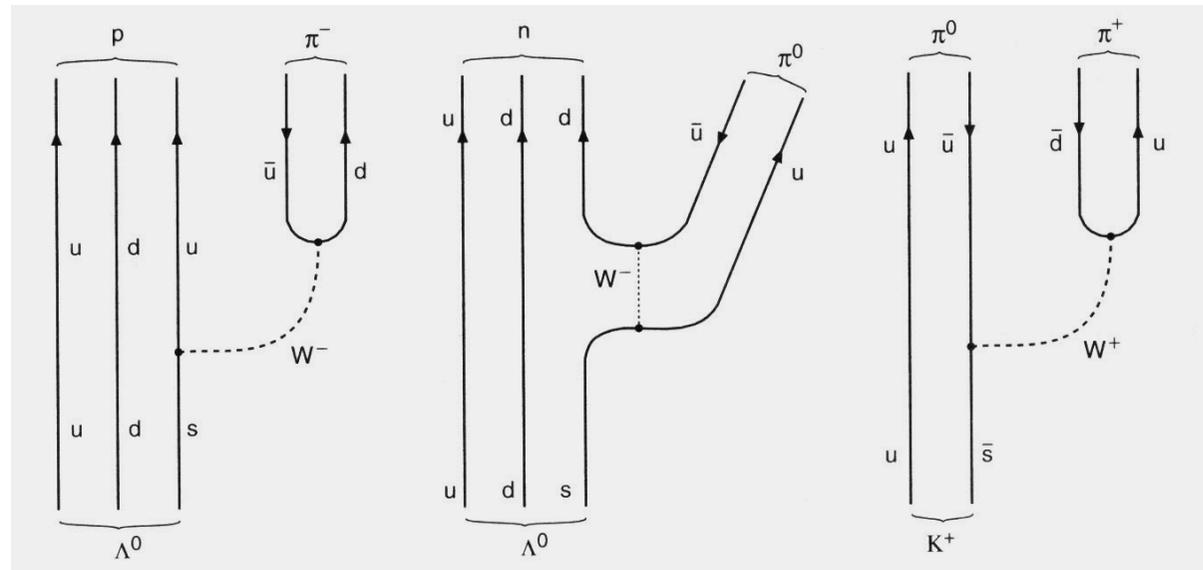
Semileptonische und Nichtleptonische Zerfälle



Neutron-Zerfall: semileptonischer Prozess

Nichtleptonische schwache Zerfälle

"Zuschauer"-Quarks
Spectatorquarks



Neutrino – Reaktionen

$$\nu + N \rightarrow \ell + X$$

- ν erzeugen immer negative Leptonen
- ν aus π^* – Zerfall erzeugen immer μ -Leptonen
- ν aus n – Zerfall erzeugen immer Elektronen (bzw. Positronen)

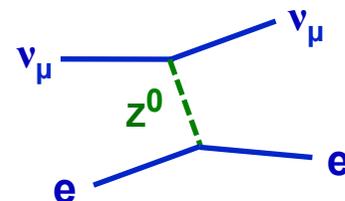
■ geladene Ströme:



■ neutrale Ströme:

es wurden auch Reaktionen ohne geladenes Lepton beobachtet:

auch elastische Neutrino – Streuung an Elektronen:

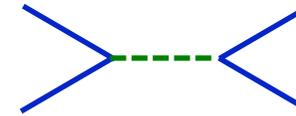


(plötzlich anfangende Spur, Hüllenelektron vorher in Ruhe)

Neutrale Ströme werden durch Z^0 – Austausch hervorgerufen.

Kopplung über schwache Ströme

Analog zu Mott – Streuung und e^+e^- – Kollisionen:



■ Matrixelement:

$$\begin{array}{c}
 \text{weak} \swarrow \\
 \boxed{M_{fi}^w \propto g \cdot \frac{1}{Q^2 + M_W^2} \cdot g} \\
 \begin{array}{ccc}
 \uparrow & \uparrow & \uparrow \\
 \text{Kopplung bei} & \text{massives Austauschteilchen} & \text{Kopplung bei} \\
 \text{W - Emission} & M_W \approx 80 \text{ GeV} & \text{W - Absorption}
 \end{array}
 \end{array}$$

W - Propagator

■ Grenzfall Q^2 klein ($\ll M_W^2$):

$$\boxed{M_{fi}^w \xrightarrow{Q^2 \text{ klein}} \frac{g^2}{M_W^2}} \approx \text{konstant und klein}$$

⇒ schwache Wechselwirkung erscheint bei kleinen Q^2 sehr viel schwächer als e.m. Wechselwirkung.

Zusammenhang mit Fermi – Theorie

- Reichweite der schwachen Wechselwirkung

$$\approx \hbar/M_W \approx 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ fm}$$

⇒ fast punktförmig wie in Fermi-Theorie

- Zusammenhang zwischen G_F und g , M_W :

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{\pi \alpha g^2}{2 e^2} \frac{(\hbar c)^3}{M_W^2 c^4}$$

Wert z.B. aus μ -Zerfall erhältlich: $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$



Zerfallsbreite

■ Goldene Regel, Dirac – Gleichung, Phasenraum \Rightarrow

$$\Gamma_\mu = \frac{\hbar}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2}{192\pi^3(\hbar c)^6} \cdot (m_\mu c^2)^5 (1 + \varepsilon) \quad \Rightarrow \quad \tau \propto m^{-5}$$

↑
kleine Korrekturen

$$\Rightarrow \quad \frac{G_F}{(\hbar c)^3} = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

■ Neutrino – Elektron – Streuung: $\nu_\mu e \rightarrow \mu \nu_e$ via W^+ – Austausch

Wirkungsquerschnitt: $\sigma \propto G_F^2$, $\sigma \propto s \Rightarrow$

$$\sigma = \frac{G_F^2 \cdot s}{\pi(\hbar c)^4}, \quad s = 2m_e c^2 E_\nu \quad (E_\nu : \text{Neutrino-Energie im Laborsystem})$$

$$\Rightarrow \quad \sigma = 1.7 \cdot 10^{-41} \text{ cm}^2 \frac{E_\nu}{\text{GeV}}$$

sehr kleiner WQ. Reichweite von solaren ν mit $\sim \text{MeV} \hat{=} \text{Lichtjahre in Fe}$

⚡ $\sigma \rightarrow \infty$ für $s \rightarrow \infty$ kann asymptotisch nicht richtig sein: \Rightarrow

W-Propagator

$$\sigma = \frac{G_F^2}{\pi(\hbar c)^4} \cdot \frac{M_W^2 \cdot c^4 \boxed{s}}{\boxed{s} + M_W^2 \cdot c^4} = \text{konst.}$$

Universalität von g

- Betrachte Zerfallsraten vom τ -Lepton:

$$\begin{array}{l}
 \tau^- \rightarrow \nu_\tau e^- \bar{\nu}_e \\
 \rightarrow \nu_\tau \mu^- \bar{\nu}_\mu \\
 \rightarrow \nu_\tau \underbrace{\bar{u} d}_{\pi^-, \rho^-, a_1^-}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \Leftrightarrow \Gamma_{\tau e} \\
 \Leftrightarrow \Gamma_{\tau \mu} \\
 \Leftrightarrow \Gamma_{\tau d\bar{u}}
 \end{array}
 \quad
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \tau^- \\ \rightarrow \\ \rightarrow \\ \rightarrow \end{array}} \right\} \approx \text{gleich}$$

$$\Gamma_{\tau d\bar{u}} \approx \boxed{3} \Gamma_{\tau \mu} = n_c$$

$\Rightarrow \bar{u}d$ existiert in 3 Farben

- Vergleiche τ - und μ -Lebensdauern:

$$\Gamma_{\tau e} = \left(\frac{m_\tau}{m_\mu} \right)^5 \cdot \Gamma_{\mu e} \quad \rightarrow \quad \tau_\tau = \frac{\hbar}{\Gamma_{\tau e} + \Gamma_{\tau \mu} + \Gamma_{\tau d\bar{u}}} \approx \frac{\tau_\mu}{5 \cdot (m_\tau/m_\mu)^5} \approx 3.1 \cdot 10^{-13} \text{ s}$$

$$\begin{array}{c}
 \parallel \quad \parallel \\
 \Gamma_{\tau e} \quad 3\Gamma_{\tau e} \\
 [1 + 1 + 3]
 \end{array}
 \quad \swarrow \quad \downarrow \quad \checkmark$$

exp: $(2.9 \pm 0.01) \cdot 10^{-13} \text{ s}$ ✓

Bestätigung für $n_c = 3$ und Universalität von g:
schwache Ladung von Leptonen und Quarks ist gleich

Genauerer Studium von semileptonischen Prozessen: Diskrepanz
 \Rightarrow erklärbar durch Quark – Mischung

Quark – Mischung

Beobachtung: einige semileptonische Kopplungen erscheinen kleiner als im

$$\begin{aligned} \mu\text{-Zerfall:} & \quad - 4\% \quad \text{im } n\text{-Zerfall} \quad d \rightarrow u \\ & \quad \quad \quad \frac{1}{20} \quad \text{im } \Lambda_0\text{-Zerfall} \quad s \rightarrow u \end{aligned}$$

- **Leptonen:** wandeln sich durch W – Austausch innerhalb der Familie um:

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

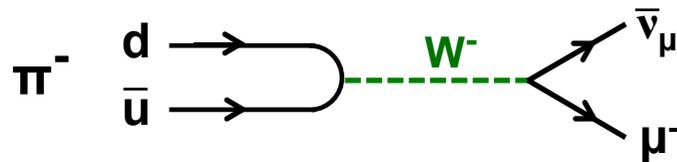
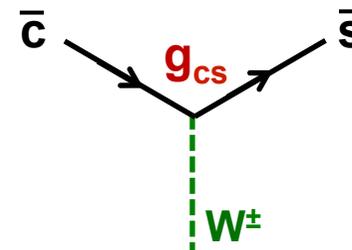
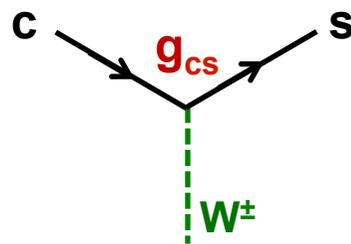
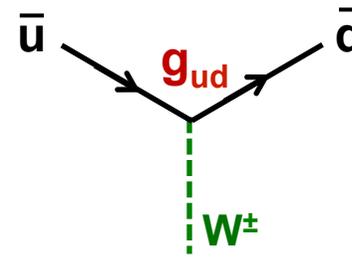
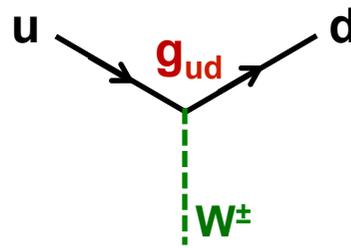
- **Quarks:** Es gibt auch Übergänge zwischen den Familien (mit reduzierbarer Stärke): Universalität von g aufgeben?

$$\begin{array}{l} q = \frac{2}{3} \rightarrow \\ q = -\frac{1}{3} \rightarrow \end{array} \begin{array}{c} \begin{pmatrix} u \\ \updownarrow \\ d \end{pmatrix} \\ \swarrow \quad \searrow \\ \begin{pmatrix} c \\ \updownarrow \\ s \end{pmatrix} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{c} \begin{pmatrix} t \\ \updownarrow \\ b \end{pmatrix} \end{array} \right. \text{(zunächst zu ignorieren)}$$

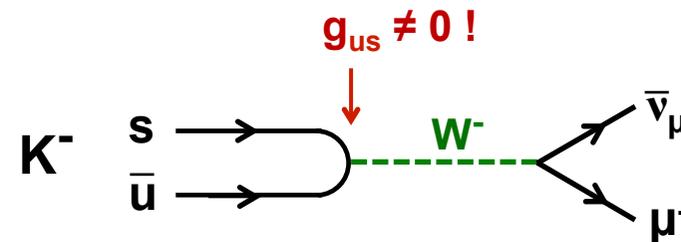
Cabbibo 1963: g ist universell. W koppelt an "gedrehte" Quarkzustände
 \Rightarrow **Cabibbo – Winkel $\theta_c \approx 22^\circ$**

Basisdiagramme mit W^\pm – Vertices

ohne
Quarkmischung

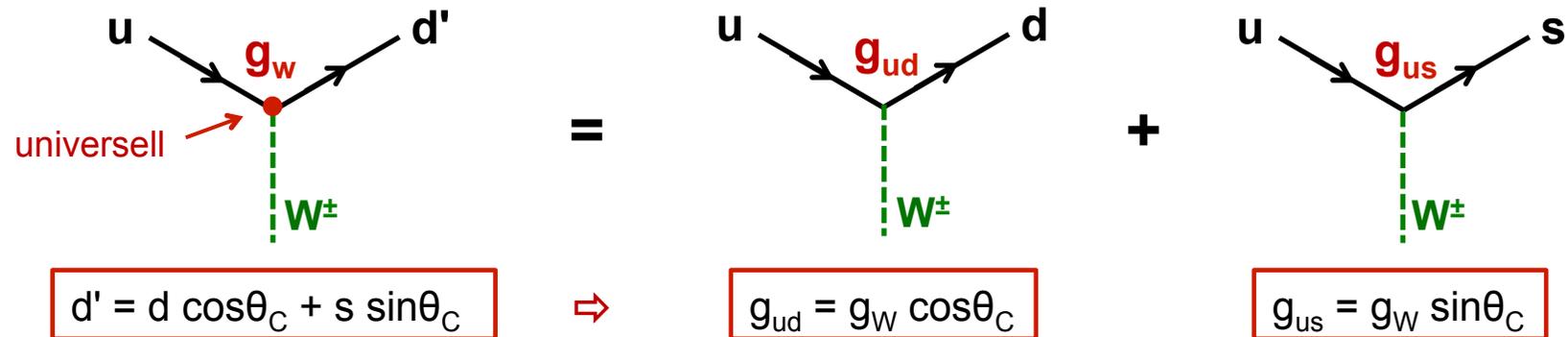


können Pion – Zerfall beschreiben

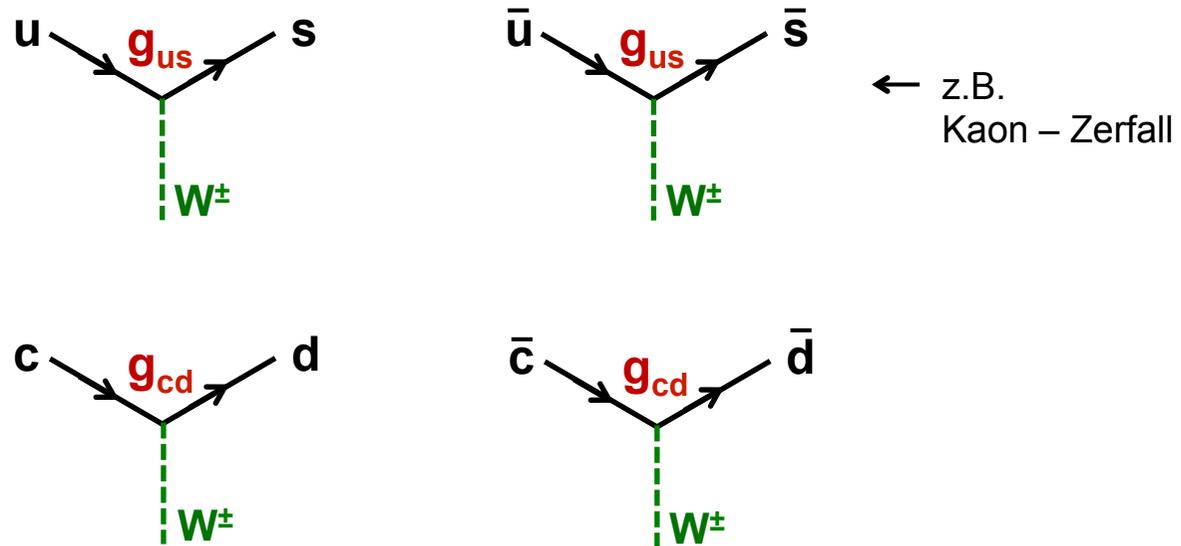


aber Kaon – Zerfall nicht
(beobachtet, lange Lebensdauer)

"Gedrehte" Quarkzustände: ud' - W -Vertex



Damit sind auch diese Diagramme möglich (aber Kopplung mit $\sin\theta_C$ unterdrückt!)



Quarkmischungen

- u koppelt an Linearkombination von d und s
- c koppelt an Linearkombination von s und d
- Mit Quarkmischungen treten neben $u-d$ und $c-s$ Übergängen auch $u-s$ und $c-d$ auf:

W koppelt an $\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}$ oder $\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}$ oder $\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$

mit der **gedrehten** Basis:

$$\begin{aligned} d' &= d \cos\theta_C + s \sin\theta_C \\ s' &= -d \sin\theta_C + s \cos\theta_C \end{aligned}$$

$$\text{oder} \quad \begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_C & \sin\theta_C \\ -\sin\theta_C & \cos\theta_C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

⇒ **neue effektive Kopplungen:**

$$\begin{aligned} g_{ud} &= g_{cs} = g \cdot \cos\theta_C \\ g_{us} &= -g_{cd} = g \cdot \sin\theta_C \end{aligned}$$

erfordern nur **einen** neuen Parameter

$\theta_C = \text{Cabibbo - Winkel}$



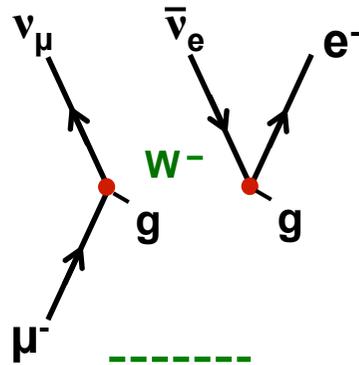
**Eigenzustände
der schwachen
Wechselwirkung**

≠

**Eigenzustände
der starken
Wechselwirkung**

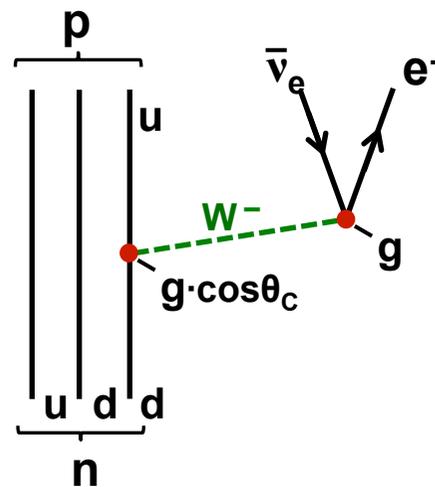
Experimentelle Bestimmung von θ_C

aus Lebensdauern und Verzweigungsverhältnissen



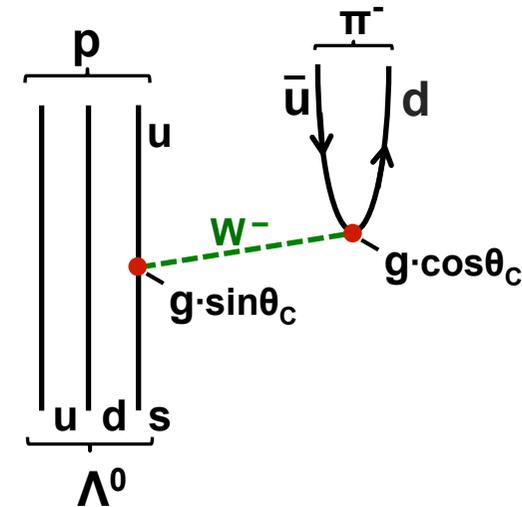
$$M_{if} \propto g^2$$

leptonisch



$$M_{if} \propto g^2 \cdot \cos\theta_C$$

semileptonisch
(1 Winkel)



$$M_{if} \propto g^2 \cdot \cos\theta_C \cdot \sin\theta_C$$

nichtleptonisch
(2 Winkel)

- Beispiele:
- $\frac{\Gamma(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu})}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu})} \propto \frac{g_{us}^2}{g_{ud}^2} = \tan^2\theta_C \approx \frac{1}{20}$
 - $\frac{n\text{-Zerfall}}{\mu\text{-Zerfall}} \propto \frac{g_{ud}^2}{g^2} = \cos^2\theta_C$

Cabibbo-unterdrückt

$$\Rightarrow \begin{cases} \sin\theta_C & \approx 0.22 \\ \cos\theta_C & \approx 0.98 \\ \theta_C & \approx 12.7^\circ \end{cases}$$

Erweiterung auf 3 Familien

2x2 Cabibbo – Matrix \Rightarrow 3x3 Cabibbo – Kobayashi – Maskawa – Matrix

- Diagonalelemente ≈ 1

CKM – Matrix 1973

- $|V_{cb}|$ und $|V_{ts}|$ fast 10 mal kleiner als $|V_{us}|$ und $|V_{cd}| \Rightarrow 10^{-2}$ in Zerfallsbreiten

2.-3. Familie

1.-2. Familie

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

1.-3. Familie
sehr kleine
Mischung

$$\left(|V_{ij}| \right) = \begin{pmatrix} 0.9745 \dots 0.9760 & 0.217 \dots 0.224 & 0.0018 \dots 0.0045 \\ 0.217 \dots 0.224 & 0.9737 \dots 0.9753 & 0.036 \dots 0.042 \\ 0.004 \dots 0.013 & 0.035 \dots 0.042 & 0.9991 \dots 0.9994 \end{pmatrix}$$

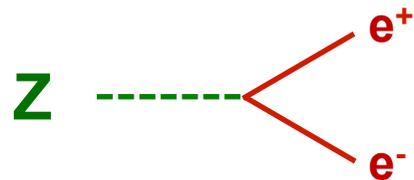
- Elemente von V_{cb} komplex \Rightarrow **CP – Verletzung möglich**

(siehe später)

Kopplung neutraler Ströme

Neutrale Ströme koppeln nur flavour – diagonal,
 d.h. es gibt keine **FCNC** (flavour changing neutral currents)

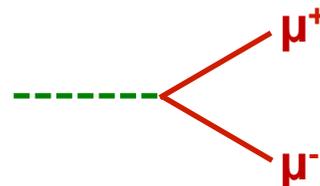
- diese Zerfälle gibt es



$$Z \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e$$

$$Z \rightarrow u \bar{u}$$

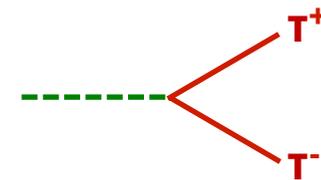
$$Z \rightarrow c \bar{c}$$



$$Z \rightarrow \nu_\mu \bar{\nu}_\mu$$

$$Z \rightarrow d \bar{d}$$

$$Z \rightarrow b \bar{b}$$



$$Z \rightarrow \nu_\tau \bar{\nu}_\tau$$

$$Z \rightarrow s \bar{s}$$

$$Z \rightarrow t \bar{t}$$

- ABER: diese Zerfälle gibt es nicht!

$$Z \rightarrow e^+ \mu^-$$

$$Z \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_\mu$$

$$Z \rightarrow e^+ \tau^-$$

$$Z \rightarrow d \bar{b}$$

$$Z \rightarrow u \bar{c}$$

$$Z \rightarrow t \bar{u}$$