

$$\textcircled{4}'_b \Rightarrow \mathcal{L}_{\text{fer}} \ni \mathcal{L}_{\text{qed}} = -e \underbrace{j_{\text{em}}^\mu}_{\substack{\text{Photon} = \cos \theta_w B_\mu - \sin \theta_w A_\mu^3}} Q_\mu$$

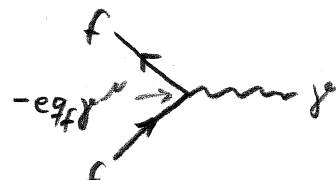
$= \frac{g_w g_Y}{\sqrt{g_w^2 + g_Y^2}} = g_Y \cos \theta_w = g_w \sin \theta_w$

$$\text{el. mag. Strom} = \sum_{i=1}^3 \left\{ \frac{2}{3} \bar{u}_i \gamma^\mu u_i - \frac{1}{3} \bar{d}_i \gamma^\mu d_i - \bar{e}_i \gamma^\mu e_i \right\}$$

Generationen

hat dieselbe Form für schwache und Massen-EZ
 ((da die mischenden Fermionen die gleiche Ladung haben))

bzw.



, $e q_f \equiv$ Ladung von f

$$\textcircled{4}'_c \Rightarrow \mathcal{L}_{\text{fer}} \ni \mathcal{L}_{\text{neutr. Strom}} = - \frac{g_w}{2 \cos \theta_w} \underbrace{j_0^\mu}_{\substack{\sin \theta_w B_\mu + \cos \theta_w A_\mu^3}} Z_\mu$$

neutraler
Strom
(vgl. S. 60)

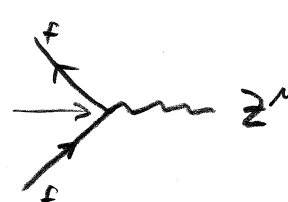
$$= \sum_D \bar{D}_L \begin{pmatrix} \gamma^\mu (c_V^u + c_A^u \gamma^5) & 0 \\ 0 & \gamma^\mu (c_V^d + c_A^d \gamma^5) \end{pmatrix} D_L$$

$$= \sum_{i=1}^3 \left\{ \bar{u}_{iL} \gamma^\mu u_{iL} - \bar{d}_{iL} \gamma^\mu d_{iL} + \bar{\nu}_{iL} \gamma^\mu \nu_{iL} - \bar{e}_{iL} \gamma^\mu e_{iL} \right\}$$

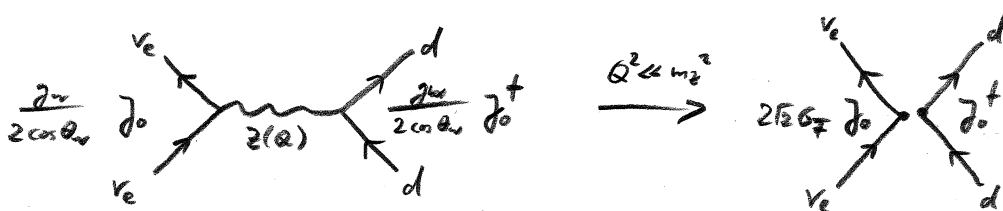
$$= -2 \sin^2 \theta_w j_{\text{em}}^\mu$$

hat wieder dieselbe Form für schwache und Massen-EZ

bzw.



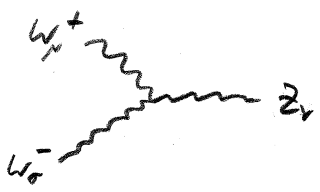
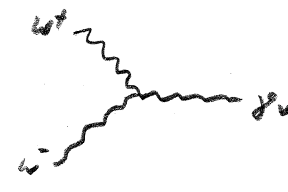
Bem.: wieder $Q^2 \ll m_Z^2 \Rightarrow \mathcal{L}_{\text{neutr. Strom}}^{\text{eff.}} = -2\sqrt{2} G_F j_0^\mu (j_{0\mu})^+$

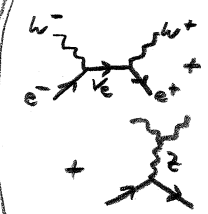


$$\left(\frac{g_w^2}{4 \cos^2 \theta_w m_Z^2} = \frac{g_w^2}{4 m_w^2} = \sqrt{2} G_F ; \text{ Faktor 2 ?} \right)$$

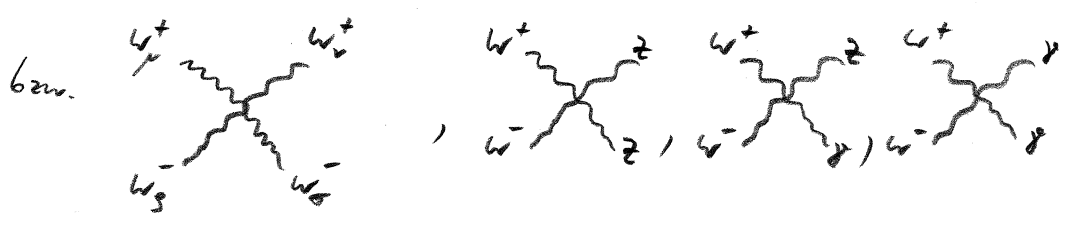
$$\textcircled{2}'_a \Rightarrow \mathcal{L}_{\text{Eid}} \ni \mathcal{L}_{A^3} = -ig_w \left\{ (\partial_\mu A_\nu^3) W_{\mu_3}^+ W_{\mu_4}^- + A_\mu^3 (\partial_\mu W_2^+) W_3^- + A_\mu^3 W_4^+ (\partial_\mu W_2^-) \right\} [g^{\mu_1 \mu_2} g^{\mu_3 \mu_4} - g^{14} g^{23}]$$

$A_\mu^3 = \cos \theta_w Z_\mu - \sin \theta_w Q_\mu$
(wichtiger Prozess bei LEP: $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$)

bzw.  , 




$$\textcircled{2}'_b \Rightarrow \mathcal{L}_{\text{Eid}} \ni \mathcal{L}_{A^4} = \frac{g_w^2}{4} \left\{ W_{\mu_1}^+ W_{\mu_2}^+ W_{\mu_3}^- W_{\mu_4}^- - 2 W_{\mu_1}^+ W_{\mu_2}^- A_\mu^3 A_\mu^3 \right\} * [2g^{\mu_1 \mu_2} g^{\mu_3 \mu_4} - g^{13} g^{24} - g^{14} g^{23}]$$



→ haben nun alle U_W -Terme explizit aufgeschrieben.

was bleibt? restliche quadratische Terme:

((in "Feynman-Gleichung", $\mathcal{L}_{\text{GF}} = -\frac{1}{2}(\partial_\mu \phi^\dagger \partial^\mu \phi)$))

- $\textcircled{2}'_c \Rightarrow \mathcal{L}_{\text{Eid}, A^2} = -\frac{1}{4}(\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu)^2 - \frac{1}{2}(\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+)(\partial^\mu W^\nu - \partial^\nu W^\mu) - \frac{1}{2}(\partial_\mu Q_\nu)^2$
- $\textcircled{4}'_d \Rightarrow \mathcal{L}_{\text{fer}, f^2} = \sum_f \bar{\psi}_f i \gamma^\mu \partial_\mu \psi_f$

→ freie Parameter des SM: messen! (s. PDG); verstehen?? (s. BSM)

wir können sie hier zumindest zählen:

(3 Teilchen-Generationen)

- 2 : g_s, θ ; 2 Parameter der starken U_W
- 3 · (2+1) : m_u, m_d, m_e + 2.+3. Gen. ; 9 Fermion-Massen
- 4 : g_w, g_Y, v, λ ; 4 Kopplungen aus elektroschwach + Higgs Sektor
- (3-1)² : 4 Parameter in V_{CKM}
- 3 · 1 : m_ν + 2.+3. Gen. ; 3 Neutrino-Massen
- (3-1)² : 4 Parameter in V_ℓ ((falls Majorana: +2 Phasen))

26 zu viele?! $\mathcal{L}$ (beschreibt tausende hochpräziser Experimente!)

... und jetzt?

93

Ausblick / Herausforderungen / offene Fragen

- Majorana ($\bar{\nu} = \nu$) vs. Dirac-Neutrinos?
→ experimentell beantwortet! $0\nu 2\beta$ -Zerfall; selten: $\tau \sim 10^{26}$ Jahre

- SUSY (Supersymmetrie)?

theor. Argument: Teilchenmassen ändern sich durch Schleifen-Quantenkorrekturen

Skalarfeld (Higgs): $m_H \xrightarrow{\text{Schleifen}} 10^{16} \text{ GeV} ?!$ $H \cdots \text{Schleife} \cdots H$
fordere Symmetrie! Bos $\leftrightarrow$ Fer, $H \cdots \text{Schleife} \cdots H$ $\left. \begin{array}{l} \text{"stop"} \\ \text{Summe} = 0 \end{array} \right\}$

- (Kein) Higgs? $\Delta \hat{L}_{SM}$? GUT-, SUSY-, ...-Teilchen antreiben?

aktuell: SLAC (USA), KEK (Japan): B-Physik

Fermilab (USA): 1+1 TeV $p + \bar{p}$; Higgs-Suche

Brookhaven (USA): $\frac{100 \text{ GeV}}{\text{Nukleon}}$ $Au + Au$; QCD-Materie

fast fertig: LHC (CERN, Schweiz): 7+7 TeV $p + p$
 $\varnothing 8.5 \text{ km}$ 3+3 $\frac{\text{TeV}}{\text{Nukleon}}$ $Pb + Pb$

zukünftig(?): ILC [International Linear Collider]: 1 TeV $e^+ + e^-$, Länge 30 km

VLHC [Very Large Hadron Collider]: 60 TeV $p + p$, $\varnothing 20 \text{ km}$

Muon-Collider, $\mu^+ + \mu^- @ 1 \text{ TeV}$

...

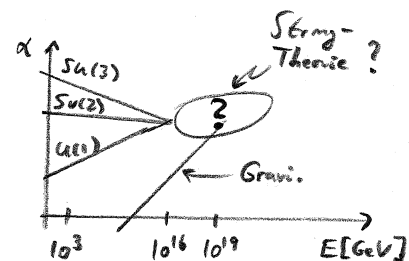
- BSM. Woher kommen die 4 Kräfte?

warum sehen wir die verschiedenen Teilchen?

woher kommen deren Massen und Ladungen?

warum leben wir in 4D?

was ist die Struktur von Raumzeit + Gravi.?



- Gravi-Expt.: Gravitations-Wellen! z.B. LISA (NASA, ESA), ≈ 2018 [Shuttle?]
(5 M km Interferometer)

[Vorlesung: WS] →

- Kosmologie / Astroteilchenphysik

"Kosmol. Standard-Modell" ((konsistente Beschreibung aller Beobachtungsdaten))

Energie-/Masse-Dichte des Universums $\left\{ \begin{array}{l} \approx 5\% \text{ "normale" Materie} \\ \approx 25\% \text{ "dunkle" Materie} \\ \approx 70\% \text{ "dunkle Energie"} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{"sieht" man nur via Gravi.} \\ v's: \lesssim 1\% \\ \rightarrow \text{WIMPs? Neutrinos? (SUSY)} \end{array} \right.$

wie geht es konkret weiter?

- Theorie: Quantenfeldtheorie! [Vorlesung: SS]
- Teilchenphysik-Prüfungen: Termine mit VS absprechen
 (9.2. - 20.3.
 2.4. - 9.4.
 PDG-Booklet mitbringen
- BA-Arbeiten