

Kann das SM CP-Verletzung beschreiben? JA!

- die CKM-Matrix hat i.A. komplexe Matrixelemente (vgl. Übg, A.51).
 - die meisten davon können durch Phasendrehungen der Quark-Felder als reelle Zahlen undefiniert werden
 - aber für drei Generationen bleibt mindestens eine Phase übrig.
 - diese Phase führt zu CP im SM.
- eigentlich können die Parameter h_u, h_d etc (vgl. S. 73) auch komplex sein können
 - im Prinzip können diese Phasen wieder wegdefiniert werden (vgl. Übung, Aufgabe 53), durch sog. "chirale Transformationen"
 - Bem: in der QFT führen diese Transformationen zu Problemen ("Anomalien"; "starke CP-Verletzung")
 - jedenfalls ist hier die zweite Möglichkeit zu CP im SM.

Weitere Terme im \mathcal{L}_{SM}

haben nun die wichtigsten Neutrinos kennengelernt, wie dem (S. 66/67) versprochen: $(L^{\pm}, \bar{\nu}^0, \nu) \leftrightarrow H$, H-Dynamik, Qu. $\leftrightarrow H$

in Analogie zur Yukawa (Qu.-H) bzw bekommen auch die Leptonen

eine Masson: $\delta \hat{\mathcal{L}} = -h_l^e [\hat{L}_{1L} \hat{\Phi} \hat{e}_R + \hat{e}_R \hat{\Phi}^\dagger \hat{L}_{1L}] + 2. + 3. \text{ Gen.}$

$$\text{Jetzt wieder } \hat{\Phi} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}: \begin{array}{l} \text{SSB} \\ \text{quad.} \end{array} \rightarrow -\frac{h_l^e v}{\sqrt{2}} [\bar{e}_L e_R + \bar{e}_R e_L] + 2. + 3. \text{ Gen.}$$

$$\stackrel{LIR=1, \text{ S. 73}}{=} -m_e \bar{e} e + 2. + 3. \text{ Gen.}$$

((und im Prinzip auch $\delta \hat{\mathcal{L}} = -h_l^{\nu} [\hat{L}_{1L} \hat{\Phi} \hat{\nu}_R + \text{h.c.}] + \dots$)) aber ν_R nicht nötig

Zusammenfassung aller Terme $\hat{\mathcal{L}}_{SM} = \hat{\mathcal{L}}_{\text{stark}} + \hat{\mathcal{L}}_{\text{elektroschwach}}$
 (s. unten, § 9) $= \hat{\mathcal{L}}_{\text{Eich}} + \hat{\mathcal{L}}_{\text{Higgs}} + \hat{\mathcal{L}}_{\text{Fey}} + \hat{\mathcal{L}}_{\text{Yuk}}$

8. Ideen jenseits des SM

bisher gesehen: Struktur des SM beinhaltet einige willkürliche Festlegungen; es hat viele freie Parameter
 Vereinfachungen möglich? \rightarrow es gibt sicherlich viele Ideen.
 hier: ein wichtiges Beispiel

Vereinheitlichung

die erste Teilchen-Generation (vgl. S. 65): $\begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$, e_R , $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$, u_R , d_R

Anzahl der Freiheitsgrade: 3 Leptonen + $4 \cdot 3$ Quarks $\stackrel{N_c=3 \text{ Farben}}{=} 15$

die Kernidee (Glashow/Gell-Mann '74): $15 = 5 + 10$

bilde einen Spaltenvektor der $SU(5)$ aus 5 Freiheitsgraden $(\nu_L, e_L, d_R \cdot 3)$

bilde eine antisymm. 5×5 -Matrix aus 10 Freiheitsgraden $(e_R, u_L \cdot 3, d_L \cdot 3, u_R \cdot 3)$

der Vorteil:

haben statt 5 verschiedenen Strukturen nur 2

haben statt 3 verschiedenen W's nur 1

dies nennt man "große Vereinheitlichung", "GUT"
 \hookrightarrow grand unified theories

Bem.: • es gibt viele "größere" Eichgruppen, in deren Repräsentationen die Freiheitsgrade der $SU(2) \times U(1)$

untergebracht werden können; populär ist z.B. auch

$SO(10)$: 16 Freiheitsgrade, $15 + \underline{\nu_R}$

• keine der vielen möglichen GUT's ist momentan universell akzeptiert; daher hier: weiter mit $SU(5)$

Was geschieht mit den Eichbosonen $(Gluon, W^\pm, Z^0, \gamma)$?

$SU(N)$ hat $N^2 - 1$ Parameter $\rightarrow N^2 - 1$ Generatoren T^a
 $a = 1, \dots, N^2 - 1$

also $D_\mu = \partial_\mu - ig_{\text{GUT}} \hat{A}_\mu^a T^a$

\rightarrow 24 Vektorfelder A_μ^a für $N=5$

\uparrow $\leftarrow (N^2 - 1) = 3^2 - 1$
 $8 \text{ Gluon} + 1 W^+ + 1 W^- + 1 Z^0 + 1 \gamma = 12$

+ 12 "X-bosonen" $((12 = 4 \cdot 3^{\text{er Farben}}, 4 \text{ Ladungen } \pm \frac{1}{3}, \pm \frac{2}{3}))$

\uparrow neue Teilchen?!

in der Natur (noch) nicht beobachtet

\rightarrow mx sehr groß!

wie können die X-bosonen eine so hohe Masse bekommen?

\rightarrow SSB, genau wie bei W^\pm, Z^0 ?!
 \swarrow

nicht ganz; wichtiger Unterschied:

- bei $SU(2)_L$ -Brechung bekommen alle Vektorbosonen eine Masse. dies nennt man "vollständige Symmetrie brechung".

- bei $SU(5)$ -Brechung müssen
 Gluon, Photon masselos bleiben
 W^\pm, Z^0 "kleine" Massen bekommen
 X-bosonen "große" Massen bekommen

dies erfordert eine "partielle Symmetrie brechung"
 \searrow

ergibt sich, wenn das Higgs-Feld nicht als ein 5-komponentiger Spaltenvektor, sondern durch eine spurlose hermitesche 5×5 -Matrix dargestellt wird