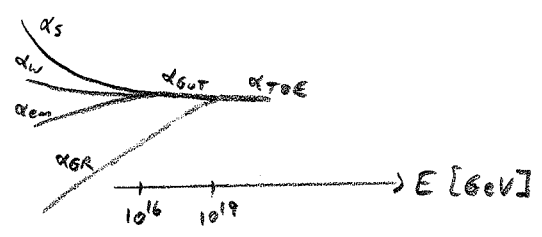


(6) Strings

bisher: SM beinhaltet nur 3 von 4 W's
 Grund: Theorie der Quantengravitation bisher unbekannt
 ((Elektrodynamik \rightarrow QED OK
 Allg. Rel. Theorie \rightarrow QART \checkmark , Punktmassen nicht renormierbar))

in einer fundamentalen Theorie, welche auch für hohe Energien
 ($E \geq M_{Pl} \approx 10^{19} \text{ GeV}$) gelten soll, können Gravitations-Effekte
 nicht mehr vernachlässigt werden.

Schemm einer TDE:
 (Theory of Everything)



Kernidee: fundamentale Freiheitsgrade: 1-dimensionale "Strings" / Saiten, Fäden
 bzw. höher-dim. "Branes" / Branen, Membrane
 "Teilchen" nicht 0-dim. Punkte,
 sondern Anregungen / Vibrationsmoden der Strings

Bem: • mathematische Konsistenz ("Anomalie-Freiheit")
 erfordert eine höhere Anzahl von Raum-Dimensionen!
 z.B. bosonische Theorie \Rightarrow 26 Raum-Dimensionen
 z.B. bos. \leftrightarrow fer. Theorie \Rightarrow 9 oder 10 Raum-Dimensionen
 \uparrow "Superstrings"

- beinhaltet "Graviton" \Rightarrow Kandidat für Quantengravitation
- Extra-Dimensionen müssen "kompaktifiziert" / aufgerollt sein, so dass wir sie in unseren "Niedr.-" Energie-Expt'n nicht wahrnehmen;
 $9(+1) D \rightarrow 3(+1) D + 6D$ Calabi-Yau
 "II-Theorie": $10(+1) D \rightarrow 3(+1) D + 7D$ G_2
- \rightarrow Art der Kompaktifizierung \Rightarrow Teildimensionalität, Kräfte, ...
- \rightarrow Problem: viele ($\sim 10^{500}$?) Mögl. / String-Vacua ...

• expt. Tests?! $M_{Pl} \sim 10^{-35} \text{ m} \sim 10^{-43} \text{ s}$
 \rightarrow bisher: String-Theorie - Struktur / System / Rahmen

9. Zusammenfassung SM

lokale Eichtheorie, $SU(3)_{color} \times SU(2)_L \times U(1)_Y \leftarrow$ Hyperladung

$$\hat{\mathcal{L}}_{SM} = \hat{\mathcal{L}}_{stark} + \hat{\mathcal{L}}_{elektroschwach}$$

$$= \hat{\mathcal{L}}_{stark} + \hat{\mathcal{L}}_{Eich} + \hat{\mathcal{L}}_{Higgs} + \hat{\mathcal{L}}_{Fey} + \hat{\mathcal{L}}_{Yukawa} \quad (\text{vgl. S. 76})$$

① $\mathcal{L}_{stark} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu a} + \sum_f \bar{\psi}_f i \gamma^\mu [D_\mu \delta_{ff} + \frac{ig_s}{2} \lambda_{\alpha\beta}^a G_\mu^a] \psi_f$

QCD $SU(3)$

starke Eichkopplung

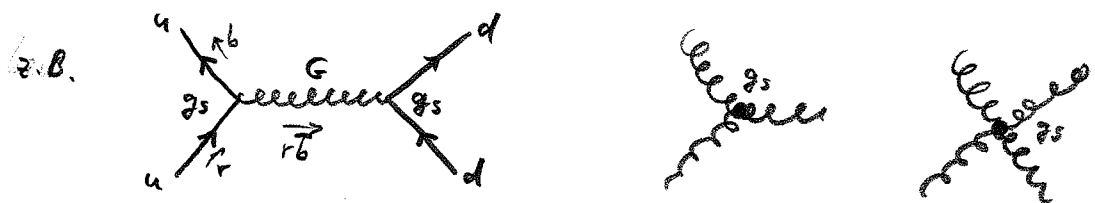
$f \in \{u, c, t, d, s, b\}$ Farbe: $\alpha \in \{r, b, g\}$

Gluonfelder, $a = 1..8 \in 3^2 - 1$

(Gluon-)Feldstärke tensor, $F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g_s \underbrace{f^{abc}}_{\substack{\text{Zahlen, s.a.} \\ \text{Strukturkonstanten}}} G_\mu^b G_\nu^c$

$SU(3)$ Matrizen $\lambda^{1..3} = \begin{pmatrix} \sigma^{1..3} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \lambda^{4,5} = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^{1,2} \\ \sigma^{1,2} & 0 \end{pmatrix}, \lambda^{6,7} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^{1,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

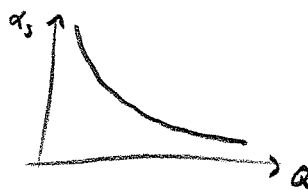
$\lambda^8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}, [\lambda^a, \lambda^b] = 2i f^{abc} \lambda^c$



Farbladung der Quarks geändert

Wie ist diagonal in Quark-(Massen-)Eigenzuständen

Kopplung $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$



(vgl. Ü 31)

② $\mathcal{L}_{\text{Eich}} = -\frac{1}{4} \underbrace{A_{\mu\nu}^i A^{i\mu\nu}}_{\substack{\uparrow \\ \mathcal{L} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu}} - \frac{1}{4} \underbrace{B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}}_{\substack{\uparrow \\ \mathcal{L} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu}}$

Struktur: $[A^2, A^3, A^4]$

$\mathcal{L} = \partial_\mu A_\nu^i - \partial_\nu A_\mu^i - g_{\mu\nu} \varepsilon^{ijk} A_j^i A_k^j \xrightarrow{U(1)} \text{Eichfeld}$

$\xrightarrow{SU(2) \text{ Eichfeld, } i=1..3} \xrightarrow{SU(2) \text{ Eichkopplung}} U(1) \text{ Eichkopplung}$ (später: $B + A^3$ mischen in $\mathcal{L}, \mathcal{Z}^0$)

③ $\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = (\underbrace{\partial_\mu \Phi}_{\substack{\uparrow \\ \mathcal{L} = \partial_\mu - \frac{ig_W}{2} \sigma^i A_\mu^i - ig_Y Q_Y B_\mu}})^{\dagger} (\partial^\mu \Phi) - V(\Phi)$, $\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$ komplexes Skalarfeld

$[A^2, A^2 H, H^2, H^3, H^4]$

$\xrightarrow{U(1) \text{ Eichkopplung}} \xrightarrow{\text{Hyperladung; } Q_Y = -\frac{1}{2} \text{ f\u00fcr } \Phi}$

Higgs-Potential $V(\Phi) = -\mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$

$\mu^2 > 0, \lambda > 0 \Rightarrow \text{SSB}$

④ $\mathcal{L}_{\text{Fey}} = \sum_{i=1}^3 \left\{ \begin{aligned} &\bar{Q}'_{iL} i\gamma^\mu \left[\partial_\mu - \frac{ig_W}{2} \vec{\sigma} \vec{A}_\mu - ig_Y \left(-\frac{1}{6}\right) B_\mu \right] Q'_{iL} \\ &+ \bar{L}'_{iL} i\gamma^\mu \left[\partial_\mu - \frac{ig_W}{2} \vec{\sigma} \vec{A}_\mu - ig_Y \left(\frac{1}{2}\right) B_\mu \right] L'_{iL} \\ &+ \sum_{k_i} \bar{l}''_{iR} i\gamma^\mu \left[\partial_\mu - ig_Y Q_Y^k B_\mu \right] l''_{iR} \end{aligned} \right\}$

$[f^2, f^2 A]$ Generations

$\xrightarrow{\mathcal{L}_i \in \{u_i, d_i, e_i, \nu_i\}; Q_Y^k = \{-\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, 1, 0\}}$

mit $Q'_{iL} = \begin{pmatrix} u_i \\ d_i \end{pmatrix}_L$, $L'_{iL} = \begin{pmatrix} \nu_i \\ e_i \end{pmatrix}_L$

Quantum-Field-Indices klar unterschiedet: alles dazugeh\u00f6rig $\Rightarrow \Sigma$

⑤ $\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = - \sum_{i,j=1}^3 \left\{ \begin{aligned} &\tau_{ij}^u \bar{Q}'_{iL} \tilde{\Phi} u''_{jR} + \tau_{ij}^d \bar{Q}'_{iL} \Phi d''_{jR} \\ &+ \left(\tau_{ij}^{\nu} \bar{L}'_{iL} \tilde{\Phi} \nu''_{jR} \right) + \tau_{ij}^e \bar{L}'_{iL} \Phi e''_{jR} \end{aligned} \right\} + \text{h.c.}$

$[f^2, f^2 H]$ Generations

mit $\tilde{\Phi} = \begin{pmatrix} \phi^{0*} \\ \phi^+ \end{pmatrix} = i\sigma^2 \Phi^*$