Bem.: - Prinzipien sehr einfach. "Schönheit" der El.-Teilchen-Physik.
- das SM ist nicht sehr einfach:
  viele Teilchen, viele Parameter
- offene Fragen z.B.: warum genau diese Eich symmetrie?
  " Quantenzahlen?
  woher kommen die Parameterwerte?
- Beantwortung dieser Fragen von theoretischer Seite:
  Aufgabe der "Physik jenseits des SM" (s. z.B. §8)
- experimentell sind alle diese Werte bekannt ($\pm$ Messfehler)
  (s. z.B. PDG Booklet)

jetzt: genauere Betrachtung einiger Teile der Lagrange-Dichte

((Ww'n zwischen $W^\pm, Z^0, \gamma$, Quarks: s.o.
Gluonen haben keine Ww'n mit dem Higgs-Boson.))

(1) Ww'n zwischen $W^\pm, Z^0, \gamma$ und Higgs-Boson
  $\Rightarrow$ Massen für $W^\pm, Z^0$

(2) Dynamik des Higgs-Bosons
  $\Rightarrow$ warum hat man es noch nicht experimentell gesehen?

(3) Ww'n zwischen Quarks und Higgs-Boson
  $\Rightarrow$ Massen für Quarks; ~~CP~~

(1) Ww'n zwischen $W^\pm, Z^0, \gamma$ und Higgs

Quantenzahlen des Higgs-Bosons:
- neutral unter $SU(3)_c$
- transformiert unter $SU(2)_L$ $\Rightarrow$ $\hat{\Phi} = \begin{pmatrix} \hat{\phi}^+ \\ \hat{\phi}^0 \end{pmatrix}$
- transformiert unter $U(1)_Y$, mit Ladung $-\frac{1}{2}$

aus Übung, Aufg. 44: allg. eichinvar. Form ((unter $\phi \to e^{i\alpha(x)}\phi$, $A_\mu \to A_\mu + \frac{1}{e}\partial_\mu \alpha(x)$))

$$\sim \left[(\partial_\mu - ie\hat{A}_\mu)\hat{\phi} \right]^+ \left[(\partial^\mu - ie\hat{A}^\mu)\hat{\phi} \right]$$

$$\Rightarrow \quad \delta\hat{\mathcal{L}} = [D_\mu \hat{\Phi}]^+ [D^\mu \hat{\Phi}]$$

wobei $D_\mu \equiv \partial_\mu - i g_w T^a \hat{A}^a_\mu + \frac{1}{2} i g_Y \hat{B}_\mu$

(S.59) ⟶ schwache Kopplungskonst.

(S.13) ⟶ 2×2-Matrizen; $T^a \equiv \frac{\sigma^a}{2}$

drei SU(2)-Felder; $a = 1,2,3$

$\Rightarrow W^\pm, Z^0$

Hyperladungs-Feld
↔ Photon; s. unten, S.69

Hyperladungs-Kopplung
↔ "e" s. unten, S.69

Hyperladung $= -\frac{1}{2}$

- mehr zu dieser Struktur (Konsequenzen, ..) : s. unten, S.68

(2) Dynamik des Higgs

Terme, die nur das Higgs-Boson enthalten, werden als "Potential" bezeichnet: $\delta\hat{\mathcal{L}} \equiv -V(\hat{\Phi})$

es gibt nur 2 erl. renorm. Möglichkeiten: $V(\hat{\Phi}) = \mu^2 \hat{\Phi}^+\hat{\Phi} + \lambda(\hat{\Phi}^+\hat{\Phi})^2$

μ^2, λ: freie Parameter; mehr dazu: s. unten, S.70

(3) Ww'n zwischen Quarks und Higgs

brauchen jetzt zwei Objekte (vgl. Übung, Aufgabe 46)
$\hat{\Phi} = \begin{pmatrix} \hat{\phi}^+ \\ \hat{\phi}^0 \end{pmatrix}$, $\tilde{\hat{\Phi}} = \begin{pmatrix} \hat{\phi}^{0*} \\ -\hat{\phi}^{+*} \end{pmatrix} = i\sigma^2 \hat{\Phi}$

$$\Rightarrow \delta\hat{\mathcal{L}} = -h_u \left[\bar{\hat{Q}}'_{1L} \tilde{\hat{\Phi}} \hat{u}_R + \bar{\hat{u}}_R \tilde{\hat{\Phi}}^+ \hat{Q}'_{1L} \right] - h_d \left[\bar{\hat{Q}}'_{1L} \hat{\Phi} \hat{d}_R + \bar{\hat{d}}_R \hat{\Phi}^+ \hat{Q}'_{1L} \right] + 2.+3.\ \text{Generation}$$

- wiederum gibt es keinen Grund, genau $\hat{u}_R / \hat{d}_R$ der ersten Generation zuzuordnen. Allgemeiner: $\hat{u}''_R / \hat{d}''_R$ als Lin. Komb. aller Quarks mit gleichen Quantenzahlen. Genauer: s. später (S.73 ff)
- Quark-Higgs Ww'n nennt man auch <u>Yukawa-Ww'n</u>.
mehr: s. unten, S.73

Eichbosonen $W^\pm, Z^0, \gamma$ im SM

Eichinvarianz erlaubt keine direkten Massenterme (s. S. 63).

Ww zwischen Spin-1 und Spin-0 Feldern jedoch erlaubt (s. S. 67):

$$\hat\Phi = \begin{pmatrix}\hat\phi^+\\ \hat\phi^0\end{pmatrix}, \quad \delta\hat{\mathcal{L}} = [D_\mu \hat\Phi]^\dagger [D^\mu \hat\Phi]$$

$$D_\mu = \partial_\mu - i g_W T^a \hat A^a_\mu + \tfrac12 i g_Y \hat B_\mu$$

$$T^a = \frac{\sigma^a}{2}, \quad \vec\sigma = \left\{\begin{pmatrix}0&1\\1&0\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}0&-i\\i&0\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}1&0\\0&-1\end{pmatrix}\right\}, \quad \sigma^i\sigma^j = \delta^{ij}\mathbb{1}_{2\times2} + i\varepsilon^{ijk}\sigma^k$$

Wie ergibt sich hieraus eine Masse?

<u>Annahme</u>: irgendeine Dynamik (genauer: s. unten $\to$ S. 70) bestimmt in guter Näherung $\hat\Phi \approx \frac{1}{\sqrt2}\begin{pmatrix}0\\ v\end{pmatrix}$, v konstant

$$\Rightarrow \delta\hat{\mathcal{L}} \approx \frac12 \left[\left(-ig_W T^a \hat A^a_\mu + \tfrac12 i g_Y \hat B_\mu\right)\begin{pmatrix}0\\ v\end{pmatrix}\right]^\dagger \left[\left(-ig_W T^b \hat A^{b\mu} + \tfrac12 i g_Y \hat B^\mu\right)\begin{pmatrix}0\\ v\end{pmatrix}\right]$$

$$= \frac12 (0, v^*)\left(\frac{ig_W}{2}\sigma^a \hat A^a_\mu - \frac{ig_Y}{2}\hat B_\mu\right)\left(-\frac{ig_W}{2}\sigma^b \hat A^{b\mu} + \frac{ig_Y}{2}\hat B^\mu\right)\begin{pmatrix}0\\ v\end{pmatrix}$$

$$= \frac{|v|^2}{8}(0,1)\Big(g_W^2 \underbrace{\sigma^a\sigma^b}_{\to\ \delta^{ab}\mathbb{1}_{2\times2} + \cancel{i\varepsilon^{abc}\sigma^c}\ \text{antisym. in } a\leftrightarrow b} \hat A^a_\mu \hat A^{b\mu} - g_W g_Y \sigma^a\left[\hat A^a_\mu \hat B^\mu + \hat B^\mu \hat A^a_\mu\right] + g_Y^2 \hat B_\mu \hat B^\mu\Big)\begin{pmatrix}0\\ 1\end{pmatrix}$$

(s. Üg. A.11)

↳ gleichzeitige Feldop's vertauschen

außerdem: $(0,1)\,\sigma^a\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = -\delta^{a3}$

$$= \frac12\left(\frac{g_W|v|}{2}\right)^2\left(\hat A^1_\mu \hat A^{1\mu} + \hat A^2_\mu \hat A^{2\mu}\right)$$

$$+ \frac12\left(\frac{|v|}{2}\right)^2\left\{g_W^2 \hat A^3_\mu \hat A^{3\mu} + g_W g_Y\left(\hat A^3_\mu \hat B^\mu + \hat B_\mu \hat A^{3\mu}\right) + g_Y^2 \hat B_\mu \hat B^\mu\right\}$$

$$= \left(g_W \hat A^3_\mu + g_Y \hat B_\mu\right)\left(g_W \hat A^{3\mu} + g_Y \hat B^\mu\right)$$

$$= \left(g_W^2+g_Y^2\right)\underbrace{\Big(\underbrace{\boxed{\frac{g_W}{\sqrt{g_W^2+g_Y^2}}}}_{\equiv \cos(\theta_W)}\hat A^3_\mu + \underbrace{\boxed{\frac{g_Y}{\sqrt{g_W^2+g_Y^2}}}}_{\equiv \sin(\theta_W)}\hat B_\mu\Big)}_{\equiv \hat Z_\mu}\left(\frac{g_W}{\sqrt{g_W^2+g_Y^2}}\hat A^{3\mu} + \frac{g_Y}{\sqrt{g_W^2+g_Y^2}}\hat B^\mu\right)$$

↑ $\theta_W \equiv$ <u>Weinberg-Winkel</u>

bzw. "schwacher Mischungswinkel"

aha: können also durch Einführung einer neuen Basis

$$\begin{pmatrix} \hat{Z}_\mu \\ \hat{Q}_\mu \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \cos\theta_w & \sin\theta_w \\ -\sin\theta_w & \cos\theta_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{A}^3_\mu \\ \hat{B}_\mu \end{pmatrix}$$

das $\delta\hat{\mathcal{L}}$ diagonalisieren!

mit den weiteren Bezeichnungen

$$m_w \equiv \frac{g_w |v|}{2}, \qquad m_Z \equiv \frac{\sqrt{g_w^2 + g_Y^2}\,|v|}{2}$$

wird das obige $\delta\hat{\mathcal{L}}$ also zu

$$\delta\hat{\mathcal{L}} = \frac{1}{2} m_w^2 \left(\hat{A}^1_\mu \hat{A}^{1\mu} + \hat{A}^2_\mu \hat{A}^{2\mu} \right) + \frac{1}{2} m_Z^2 \hat{Z}_\mu \hat{Z}^\mu + 0 \cdot \hat{Q}_\mu \hat{Q}^\mu$$

Coulomb-Eichung: $\hat{A}^a_0 = \hat{B}_0 = 0$

$$\longrightarrow -\frac{1}{2} m_w^2 \left(\hat{A}^1_i \hat{A}^1_i + \hat{A}^2_i \hat{A}^2_i \right) - \frac{1}{2} m_Z^2 \hat{Z}_i \hat{Z}_i - 0 \cdot \hat{Q}_i \hat{Q}_i$$

wir erhalten also zwei Teilchen mit Masse m_w $\Leftrightarrow W^\pm$

ein —"— $m_Z > m_w$ $\Leftrightarrow Z^0$

ein masseloses Feld $\hat{Q}_\mu$ $\Leftrightarrow \gamma$

$\Rightarrow$ exakt so wie beobachtet!!!

---

wie sieht D_μ in der neuen Basis aus? (($Q_Y = -\frac{1}{2}$ für Higgs))

$$D_\mu = \partial_\mu - i g_w T^a \hat{A}^a_\mu - i Q_Y g_Y \hat{B}_\mu$$

$$= \partial_\mu - i \frac{g_w}{2} \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & \hat{A}^1_\mu - i\hat{A}^2_\mu \\ \hat{A}^1_\mu + i\hat{A}^2_\mu & 0 \end{pmatrix}} - i \frac{\sqrt{g_w^2 + g_Y^2}}{2} \underbrace{\begin{pmatrix} \cos\theta_w \hat{A}^3_\mu + 2Q_Y \sin\theta_w \hat{B}_\mu & 0 \\ 0 & -\cos\theta_w \hat{A}^3_\mu + 2Q_Y \sin\theta_w \hat{B}_\mu \end{pmatrix}}$$

Kopplung der $W^\pm$ an "geladene Ströme", vgl. S. 59

Kopplung der Z^0, γ an "neutrale Ströme", vgl. S. 60

$$\left(\left(\begin{pmatrix} \hat{A}^3_\mu \\ \hat{B}_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c & -s \\ s & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{Z}_\mu \\ \hat{Q}_\mu \end{pmatrix} \right)\right)$$

$$= \begin{pmatrix} [\cos^2\theta_w + 2Q_Y \sin^2\theta_w]\hat{Z}_\mu + \cos\theta_w \sin\theta_w (-1 + 2Q_Y)\hat{Q}_\mu & 0 \\ 0 & [-\cos^2\theta_w + 2Q_Y \sin^2\theta_w]\hat{Z}_\mu + \cos\theta_w \sin\theta_w (1 + 2Q_Y)\hat{Q}_\mu \end{pmatrix}$$

Higgs-Boson: $Q_Y = -\frac{1}{2}$ $\Rightarrow$ untere Komponente koppelt nicht an $\hat{Q}_\mu$ (also el. neutral)

$\Rightarrow$ obere —"— koppelt mit $+i\sqrt{g_w^2 + g_Y^2} \cos\theta_w \sin\theta_w \equiv ie$

$\Leftrightarrow$ $\underline{\underline{e = g_w \sin\theta_w}}$ (vgl. Übg. Afg. 47)