8.4 Spontane Symmetriebrechung und das Higgs-Boson

Im Abschnitt 8.3 haben wir gelernt, daß die $W^\pm, Z^0, \gamma$ - Teilchen ihre richtigen Massen kriegen, falls es in guter Näherung $\hat{\Phi} \approx \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$ gilt, wobei v eine Konstante ist. Wie könnte dies passieren?

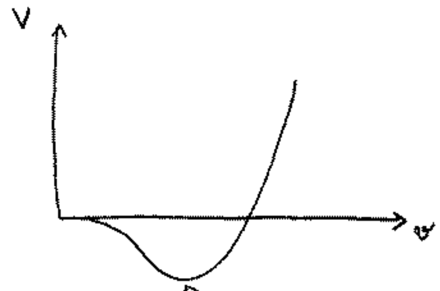
Die allgemeine Form der Lagrange-Dichte des Higgs-Bosons wurde auf S. 84 gegeben:

$$\delta \hat{\mathcal{L}} \equiv -V(\hat{\Phi})$$
$$V(\hat{\Phi}) \equiv \mu^2 \hat{\Phi}^\dagger \hat{\Phi} + \lambda (\hat{\Phi}^\dagger \hat{\Phi})^2$$

Setzen wir $\hat{\Phi} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$ als Ansatz ein:

$$V = \frac{1}{2}\mu^2 v^2 + \frac{1}{4}\lambda v^4$$

Ein nicht-trivialer Wert $v \neq 0$ kann durch die Dynamik als ein "Sattelpunkt" / "Extremum" bestimmt werden, falls $\mu^2 < 0, \lambda > 0$!



Wir nennen dieses Phänomen "spontane Symmetriebrechung": die Lagrange-Dichte selbst hat viel (Eich)symmetrie, zum Beispiel

$$V\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}\right) = V\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 0 \\ iv \end{pmatrix}\right) = V\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix}\right) = V\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} iv \\ 0 \end{pmatrix}\right),$$

jedoch <u>wählen</u> wir als Repräsentant für das Extremum einen speziellen Wert, zum Beispiel $\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$.

In der Folge schreiben wir

$$\boxed{V(\hat{\Phi}) \equiv -\mu^2 \hat{\Phi}^+ \hat{\Phi} + \lambda (\hat{\Phi}^+ \hat{\Phi})^2},$$

und nehmen an, daß es $\mu^2 > 0$, $\lambda > 0$ gilt!

Dann wird: $V = -\frac{1}{2}\mu^2 v^2 + \frac{1}{4}\lambda v^4$

$$\Rightarrow \quad V' = -\mu^2 v + \lambda v^3 = 0 \quad \Rightarrow \quad v^2 = \frac{\mu^2}{\lambda} \quad ; \quad \underline{\underline{v \equiv \sqrt{\frac{\mu^2}{\lambda}}}}$$

Natürlich kann aber $\hat{\Phi} \to \frac{1}{\sqrt{2}}\binom{0}{v}$ nicht eine exakte Ersetzung sein; es ist nur eine Näherung. Um genauer zu sein, müßen wir auch <u>Ableitungen</u> um diesen Punkt berücksichtigen.

Hier muß man aufpassen, wegen eines wichtigen Unterschiedes:

* Es gibt Theorien mit einer sogenannten <u>globalen</u> Symmetrie. In diesem Fall ist die Symmetrietransformation <u>unabhängig</u> <u>von x</u>. Wir können zwar das Extremum als $\frac{1}{\sqrt{2}}\binom{0}{v}$ wählen, dann ist die allgemeine Ableitung aber der Form

$$\hat{\Phi} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} \hat{\phi}_2 + i\hat{\phi}_3 \\ v + \hat{\phi}_0 + i\hat{\phi}_1 \end{pmatrix}.$$

Man findet <u>vier</u> neue Teilchen $(\hat{\phi}_0, \hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \hat{\phi}_3)$ – vgl. Übungen.

* Im Falle einer <u>lokalen</u> Symmetrie $\equiv$ Eichsymmetrie, gibt es weniger unabhängige Ableitungen; für eine abelsche Symmetrie kann die Phase immer weggedreht werden (vgl. S. 79), weil für $SU(2)_L$, zeigt es sich, gilt dies für $\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \hat{\phi}_3$. Man findet nur <u>ein</u> neues Teilchen, das <u>Higgs-Boson</u>.

Also schreiben wir jetzt

$$\hat{\Phi} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + \hat{\phi}_0 \end{pmatrix} \quad ; \quad \hat{\Phi}^+ \hat{\Phi} = \frac{1}{2} \left(v^2 + 2v\hat{\phi}_0 + \hat{\phi}_0^2 \right)$$

$$\Rightarrow \quad V(\hat{\Phi}) = -\frac{\mu^2}{2} \left(v^2 + 2v\hat{\phi}_0 + \hat{\phi}_0^2 \right) + \frac{\lambda}{4} \left(v^4 + 4v^3\hat{\phi}_0 + 2v^2\hat{\phi}_0^2 + 4v^2\hat{\phi}_0^2 + 4v\hat{\phi}_0^3 + \hat{\phi}_0^4 \right)$$

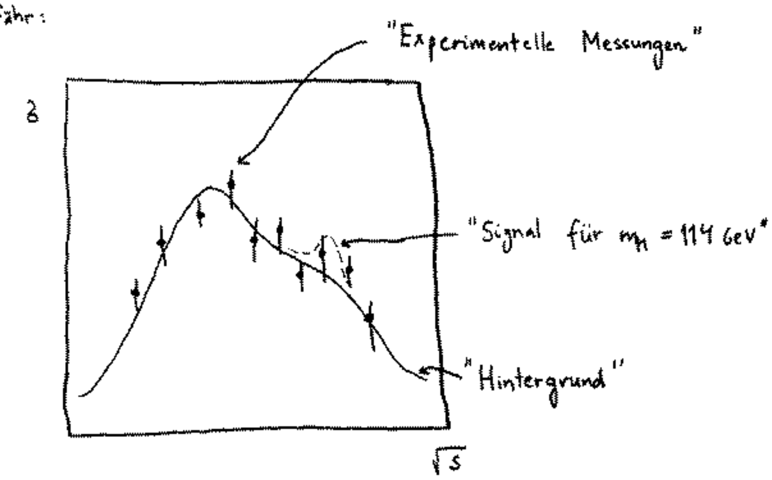
$$= \underbrace{-\frac{\mu^2}{2}v^2 + \frac{\lambda}{4}v^4}_{\substack{\text{was wir} \\ \text{schon} \\ \text{hatten (S. 90)}}} + \underbrace{(-\mu^2 + \lambda v^2)}_{\substack{= 0\,! \\ \text{(vgl. S. 90)}}} v\hat{\phi}_0 + \frac{1}{2} \underbrace{(-\mu^2 + 3\lambda v^2)}_{\equiv m_H^2} \hat{\phi}_0^2 + \underbrace{\lambda v \hat{\phi}_0^3 + \frac{\lambda}{4} \hat{\phi}_0^4}_{\text{Wechselwirkungen}}$$

Die Masse-Quadrat des Higgs-Bosons:

$$m_H^2 = -\mu^2 + 3\lambda v^2$$
$$= 2\lambda v^2$$
$$= 2\mu^2$$

Die Masse hat also wieder einen neuen Parameter in sich: μ^2 bzw. λ. Das heißt, wir haben keine Vorhersage für die Masse; wir wissen nur, daß es ein neues Teilchen geben muß, mit bestimmten Wechselwirkung. Experimentell ist das Higgs-Boson noch nicht entdeckt worden, aber wir wissen (vom LEP-Eksperiment am CERN), daß falls es ein solches Teilchen gibt, muß die Masse mehr als 114 GeV betragen.

So läuft es ungefähr:



Fazit:

* Wenn das Potential des Higgs-Feldes die richtige Form hat, wird die $SU(2)_L \times U(1)_Y$ Eichinvarianz spontan gebrochen. In diesem Fall vermittelt das Higgs-Feld eine Masse zu $W^\pm, Z^0$, aber das Photon bleibt masselos.

* Um aber sicher zu sein, daß es wirklich dieses Mechanismus ist, das die Massen liefert, muß das Higgs-Boson entdeckt werden.

* Die Schwierigkeit hier ist, daß die Theorie fast nichts darüber sagt, was die Masse sein sollte. (Durch Schleifenkorrekturen gibt es allerdings indirekte Hinweise für eine Masse $m_H = 113^{+56}_{-40}$ GeV.)