

# 9. Jenseits des Standardmodells

Wir haben gesehen, daß das Standardmodell viel Willkürlichkeit und viele Parameter hat. Wie könnte es vereinfacht werden? Es gibt sicher sehr viele Möglichkeiten; wir betrachten nur ein Beispiel.

## 9.1 Vereinheitlichung und experimentelle Randbedingungen

Fangen wir mit einer Generation an:

$$\begin{pmatrix} u \\ e \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$$

$$e_R \quad u_R \\ d_R$$

Wieviele "Freiheitsgrade" gibt es hier?

- Leptonen = 3
- Quarks =  $4 \times 3 = 12$
- Insgesamt = 15

Die Idee (H. Georgi, S. Glashow 1974):  $15 \equiv 5 + 10$

Wir setzen 5 Freiheitsgrade ( $u_L, e_L, d_R \times N_c$ ) in einen Spaltenvektor der SU(5) ein.

Die übrigen 10 ( $e_R, u_R \times N_c, u_L \times N_c, d_L \times N_c$ ) bilden eine antisymmetrische 5x5-Matrix.

Statt 5 verschiedene Einheiten haben wir also jetzt nur zwei, und statt 3 Arten von Wechselwirkungen nur eine, SU(5).

[Eine beliebte Alternative: SO(10). Gewöhnlich nimmt man auch eine "supersymmetrische" Version davon.]

So eine Vereinfachung nennt man "Große Vereinheitlichung", GUT.

Was passiert mit Gluonen,  $W^\pm, Z^0, \gamma$ ?

$SU(N_c)$  hat  $N_c^2 - 1$  Parameter / Generatoren  $T^a$ . Das heißt,  $D_\mu = \partial_\mu - ig_{\text{color}} \hat{A}_\mu^a T^a$ ,  
wo  $a = 1, \dots, N_c^2 - 1$ .

Für  $N_c = 3$ , gibt es also 24 Vektorteilchen. Die Gluonen,  $W^\pm, Z^0, \gamma$  nehmen  $8+3+1$  davon. Die übrigen 12 sind als "X-Bosonen" bekannt.

In der Natur werden solche Teilchen allerdings nicht beobachtet.  
Das heißt, sie müssen sehr schwer sein!

Wie könnten die X-Bosonen schwer sein? Wie schon  $W^\pm, Z^0$ : durch Spontane Symmetriebrechung!

Allerdings gibt es hier einen wichtigen Unterschied:

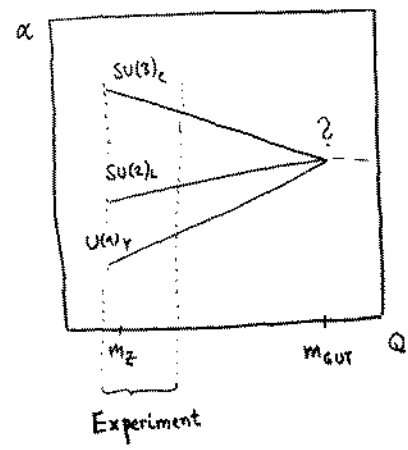
- \* In der Brechung von  $SU(2)_L$  kriegen alle Vektorbosonen eine Masse. Wir nennen dieses Phänomen "eine komplette Symmetriebrechung".
- \* In der Brechung von  $SO(5)$  müssen die Gluonen und das Photon masselos bleiben;  $W^\pm, Z^0$  eine "kleine" Masse kriegen; und die X-Bosonen sehr schwer werden. Dies verlangt "eine partielle Symmetriebrechung".

Eine partielle Symmetriebrechung kommt zustande, wenn das Higgs-Feld nicht ein 5-komponentiger Spaltenvektor ist, sondern, wie schon (e.g.  $u, d, \nu, \mu, e$ ), in einer anderen Darstellung steht. Diesmal braucht man, zeigt es sich, eine spurlose hermitesche  $5 \times 5$ -Matrix.

Nun eine wichtige Frage: was für (experimentell verifizierbare) Konsequenzen hat ein solches Modell?

(1) Vereinheitlichung der Eichkopplungen

Statt dreier Eichkopplungen haben wir jetzt nur eine Kopplung, g<sub>gr</sub>. An niedrigen Energien ist diese Symmetrie zwar gebrochen, aber an hohen Energien sollte es wieder da sein!



(2) Neutrinomassen

Wie wir schon gesehen haben, muß eine "fundamentale" Theorie renormierbar sein. Dies gilt jetzt also für die GUT. Aber das Standardmodell ist dann nicht mehr eine fundamentale Theorie, sondern eine "effektive" Theorie, die nur an niedrigen Energien genau funktionieren soll.

Eine wichtige Konsequenz davon: wir können uns jetzt auch Vertizes mit fünf oder mehr Teilchen erlauben,\* insofern sie durch die große Skala  $m_{GUT}$  "supprimiert" sind, so daß sie für  $m_{GUT} \rightarrow \infty$  verschwinden.

Ein wichtiges Beispiel:

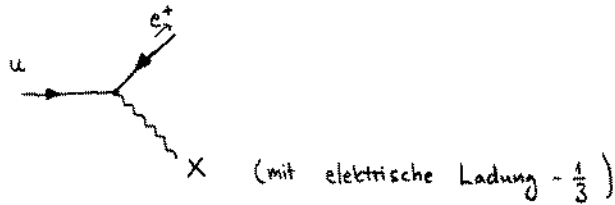
$$\delta \hat{\mathcal{L}} = - \frac{h_w^2}{m_{GUT}} \hat{L}_{1L} \hat{\Phi} \hat{\Phi}^\dagger \hat{L}_{1L} + \text{2. und 3. Generation} + \dots$$

Solche Terme führen zu nichtverschwindenden Massen für die Neutrinos; vgl. Abschnitt 9.2.

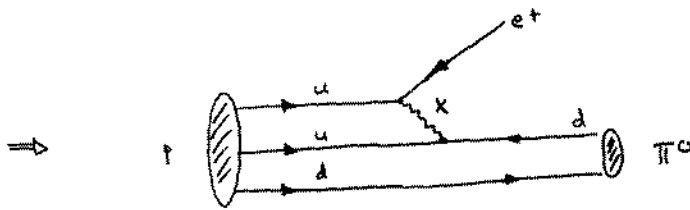
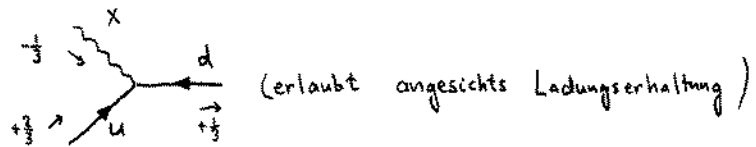
\* oder vier aber mit Fermionen dabei

(iii) Proton-Zerfall

Eine sehr wichtige Vorhersage der GUTs ist, daß das Proton zerfällt. Die Ursache dafür ist, daß sich sowohl Quarks als auch Leptonen im gleichen Vektor befinden, und wir dann "geladene Ströme" durch den Austausch von X-Bosonen haben:



Und dann auch:



Die Zerfallsrate zu diesem Kanal ist leicht abzuschätzen (vgl. Übungen), und führt zu einer unteren Grenze für  $m_{GUT}$ , die eine recht gute Übereinstimmung mit der Abbildung auf S. 99 hat!

Schon eines Tages sollte dieser Zerfall beobachtet werden, falls  $m_{GUT}$  tatsächlich endlich ist!