

3. Abriss der Weinberg - Salam Theorie f. elektroschwache WW

3.1. Motivation

Spitz $\frac{1}{2}$ Teilchen: Leptonen + Quarks

↓
Schwache + elektromagn. WW

Weinberg - Salam - Theorie vereinigt diese
in eine Beschreibung

Leptonen kommen in 3 Familien:

		q	m	Familie #
Elektron	e^-	-1	$0,5 \text{ MeV}/c^2$	(i)
Muon	μ^-	-1	$\sim 10^2 - \text{u} -$	(ii)
Tau	τ^-	-1	$\sim 10^3 - \text{u} -$	(iii)

Zu jedem gibt es 1 Lepton + 1 Antilepton

nach Weinberg-Salam
↓

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Elektron} \quad \nu_e \quad 0 \quad \text{Klein } (0) \quad (i) \\ \text{Neutrino} \quad - \nu_\mu \quad 0 \quad - \quad (ii) \\ \text{Tauon} \quad - \nu_\tau \quad 0 \quad - \quad (iii) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Positron} \quad e^+ \quad +1 \quad (i) \\ \text{Antineutrino} \quad \mu^+ \quad +1 \quad \text{Masse wie} \quad (ii) \\ \text{Antitauon} \quad \tau^+ \quad +1 \quad \text{oben} \quad (iii) \end{array} \right.$$

grundlegendes Vorgehen d. W-S-Theorie:

- Start mit masselosen Feldern $\mathcal{L}_{Dirac} (m \rightarrow 0)$, relativistisch
- erzeugt durch Eichtransformationen $(U(1), SU(2))$ die Wechselwirkung mit Eichbosonen \rightarrow neue Felder (Photon, W, Z -Bosonen) die Bosonen sind zunächst alle masselos, leptonen auch
- Anwendung Higgsmechanismus, um Masse zu erzeugen
 - $\rightarrow W, Z$ -Bosonen (schwach W, Z) bekommen die Masse
 - \rightarrow Photon und das Neutrino wird (das glaubt man halt nicht mehr)

3.2 Lagrange dichte und Spinor d. masselosen Diracfelds

$$\mathcal{L}_{\text{Dir.}} = \bar{\psi} (c \hbar i \gamma^\mu \partial_\mu - m c^2) \psi$$

$\bar{\psi}, \psi$: Vierspinoren (Kettoren)

γ^μ : Diracmatrizen

$\bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0$ adjungiert Kettor

$$\partial_\mu = (\partial_{ct}, \partial_{x_1}, \partial_{y_1}, \partial_z)$$

1.) $c \hbar \rightarrow 1$ (Spine hinzufügen)

2.) $m = 0$

Diracgl.: $i \gamma^\mu \partial_\mu \psi = 0$ folgt aus \mathcal{L} durch Feldgleich.

($\frac{\partial}{\partial \bar{\psi}}$ bilden ...)

$$(i \gamma^0 \partial_t + i \gamma^u \hat{p}_u) \psi = 0$$

$u: 1-3$ (x, y, z)

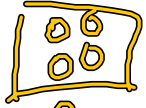
p_u : Impulsoperator

$$\psi \sim e^{-iEt/\hbar} e^{i\vec{p}\cdot\vec{r}/\hbar} \psi_0$$

$$p_u = (p_1, p_2, p_3)$$

$$(\bar{E} \gamma_0 + \gamma^u p_u) \bar{\psi} = 0$$

Ausatz: $\vec{\gamma} = \begin{pmatrix} \gamma_L \\ \gamma_R \end{pmatrix}$ ← links handed
 ← rechts handed
 je 2 Komponenten



← Paulimatrix

$$\begin{pmatrix} \boxed{0} & E - \vec{p} \cdot \vec{\sigma} \\ E + \vec{p} \cdot \vec{\sigma} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_L \\ \gamma_R \end{pmatrix} = 0$$

$$(E - \vec{p} \cdot \vec{\sigma}) \gamma_R = 0$$

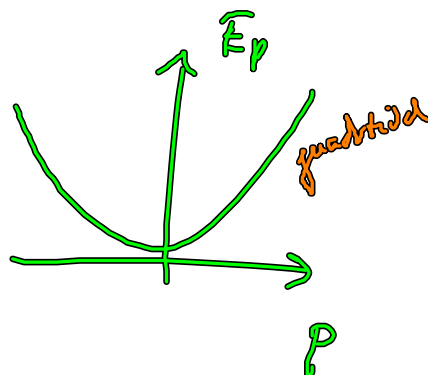
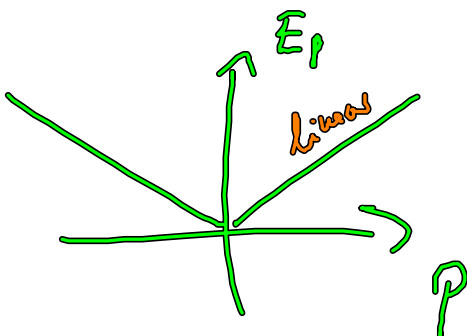
$$(E + \vec{p} \cdot \vec{\sigma}) \gamma_L = 0$$

$$\underbrace{(E + \vec{p} \cdot \vec{\sigma})(E - \vec{p} \cdot \vec{\sigma})}_{=0} \gamma_R = 0$$

$$E^2 - (\vec{p} \cdot \vec{\sigma})^2 = 0$$

↓ ausrechnen

$$E = |\vec{p}|$$



(k)

(k)

relativität

$u \rightarrow 0$

Schöcher

und Meiste



Graphen: hat auch
diesen Bandstruktur

abgibt: gibt die Symmetrie zw. L und R bei
schwach gekoppelter ist die Unterteilung beschränkt

$$\psi \rightarrow \psi_L = \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) \psi$$

$$\psi \rightarrow \psi_R = \frac{1}{2} (1 + \gamma_5) \psi$$

$$\psi = \psi_L + \psi_R$$

$$\gamma_5 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & & \\ 0 & -1 & & \\ & & 1 & 0 \\ 0 & & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

von Q7: $\gamma_5 \psi_{L/R} = \mp 1 \psi_{L/R}$



Q7, Chiralität

was für $m \rightarrow 0$ ist an eine Quarkzahl,
 da die Chiralitätsoperatoren γ_5 vertauscht und $\#$.

\rightarrow was f. Majorana nachher

man schreibt \mathcal{L} in ψ_R und ψ_L

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \psi_R \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \psi_L \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{L} = i \bar{\psi} \not{\partial} \psi \quad \text{erlaubt } \psi = \psi_R + \psi_L$$

$$= i \bar{\psi}_L \not{\partial} \psi_L + \bar{\psi}_R \not{\partial} \psi_R$$

+ Massen, die verbindet

μ^{0-3}

Später: L, R koppeln zusätzlich an die Eichbosonen

Standardmodell:

$\mathcal{L}(\text{Lepton, Quark}) \rightarrow \mathcal{L}(\text{Elektron + Neutrino})$

$\psi_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e_L \end{pmatrix}$
 Majoranafeld } Interpretation von \mathcal{L} an
 Diracfeld } Ende der VL ist
 vermischt

$$\mathbb{R} = \begin{pmatrix} 0 \\ e_R \end{pmatrix} \quad \text{Ausw. f. un beliebig. Naturkos}$$

3.3. Gleichheit und Masse

(a) fordert lokale Einvarianz

$$\text{jed. Glt. f. } \psi \rightarrow \psi' e^{iK(\vec{r}, t)}$$

damit die Physik nicht ändert,

damit sie die Physik nicht ändert,

um das neue Feld und wohldefiniert Eichtransf.

(über K) einführen

Bsp: f. 1-komplexes ψ :

Einvarianz f. d. abh. vom Feld A_μ (Lorenz eichg.)

$$\partial_\mu \rightarrow \partial_\mu + q A_\mu$$

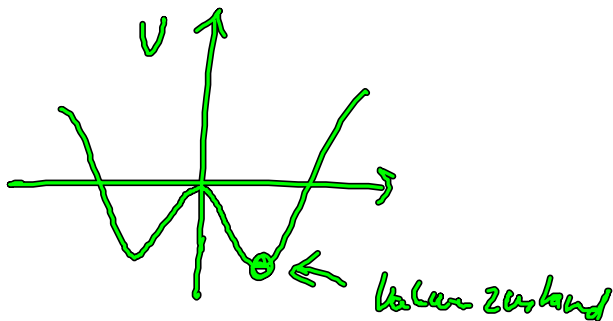
und damit f. d. ein. Feld auf

verallgemeinung auf 2-komplexes ψ :

$\chi(\vec{r}, t)$ zu einer Matrix (Spitze)

(b) auf \mathcal{L} mit WW-Formel wird und die
 Higgs-mechanismen angewendet (addiert und ein
 Teil φ mit WW)

Massenerzeugung findet statt wenn der Vakuumzustand v. $\varphi \neq 0$ ist



↓
 dann verschleichen
 Masse auf

3.3.1. Eigly. d. Teilbosonen

(i) $\mathcal{F} \rightarrow \mathcal{F}'_{\frac{R}{L}} = e^{i\frac{R}{L}(\vec{r}, t)}$ $\vec{\alpha} \cdot \vec{\sigma}$

(ii) $\mathcal{F} \rightarrow \mathcal{F}'_L = e^{i\alpha_i \sigma_i / 2}$ α_i : Winkel

↑
 links händiger Anteil hat schwache WW

→ keine \mathcal{L} :

denk die Trafo von ∂_μ

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{Dirac}} + \mathcal{L}_{\text{WW}} + \mathcal{L}_{\text{EUFeld}}$$

(Dirac)

reinelektre
(Produkt d. Feldstärken tensor)

analytisch $A_\mu \neq$

$$= i \bar{\psi}_R \gamma^\mu (\partial_\mu + i g_B B_\mu) \psi_R$$

$$+ \bar{\psi}_L \gamma^\mu (\partial_\mu + \frac{i g_B}{2} B_\mu + i g_W \frac{\vec{\sigma}}{2} \cdot \vec{W}_\mu) \psi_L$$

g - „Art der Kopplg.“ - irgendwelche Ladg. die die Teilchen tragen

$$\vec{W}_\mu = (W_\mu^1, W_\mu^2, W_\mu^3)$$

$$\begin{pmatrix} A_\mu \\ Z_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_w & \sin \theta_w \\ -\sin \theta_w & \cos \theta_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_\mu \\ W_\mu^3 \end{pmatrix}$$

\uparrow
 kein Feld $\quad \tan \theta_w = \frac{g_w}{g_B} \leftarrow$ Verhältnis der
 Kopplungsstärken

führt auf A_μ , elektromagn. Feld und

Z_μ (Z^0 -Boson)

$$\theta_w = 28^\circ$$

"Mischungswinkel"

Zusammenfassung der Terme:

$$\mathcal{L}_{WW} = -g \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu$$

Kopplung an elektromagn. Feld

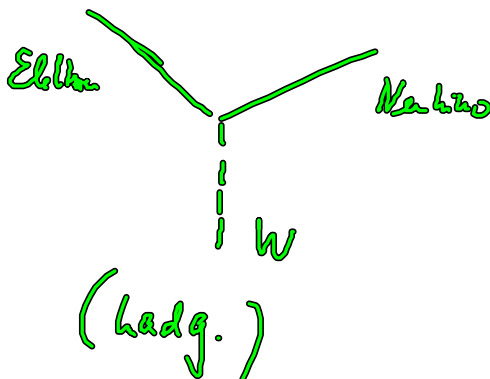
$$+ \sum_i c_i W_i \bar{e}_L \nu$$

Elektron-Neutrino-Kopplung

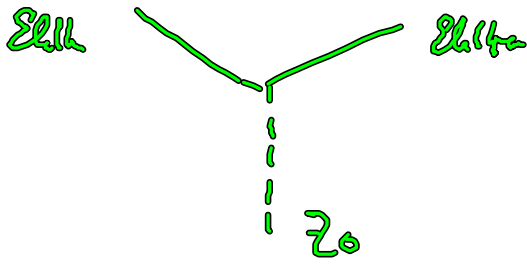
Bosonfelder $W_1 = W_\mu^+ = \frac{U_\mu^1 - iU_\mu^2}{2}$

$$W_2 = W_\mu^- = \frac{W_\mu^1 + iU_\mu^2}{2}$$

gleiche Bosonfelder der Schwach WW



$$+ D Z^0 (\bar{e}_L e_L - \bar{\nu} \nu)$$



ungeladen Z^0 Boson
vermittelt hier die WW

3.3.2. Eigky. d. Higgsfelds

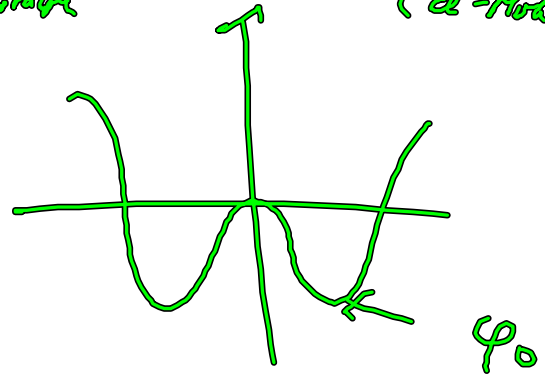
$$\mathcal{L}_{int} = -G_e (\bar{\psi}_L \varphi \psi_R + \bar{\psi}_R \varphi^\dagger \psi_L)$$

↑
WW mit Higgsfeld

↑
Yukawa-Kopplungskonstante

←
einfach Fermion -
Boson Koppl.
(E-Motiv)

$$\varphi = \begin{pmatrix} \varphi_0 \\ \pi \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{4(\sqrt{2}+1)}{\sqrt{2}}$$



$$\mathcal{L}_{int} = -G_e \varphi_0 (\bar{e}_L e_R + \bar{e}_R e_L)$$

WW v. Elektron mit Vakuum-Higgsfeld

quadriert in die Elektronen

$$\frac{\partial}{\partial \bar{e}_L} \rightarrow -G_e \varphi_0 e_R$$

$\hat{=}$ in der Dirac-Gl.: Feld-Masseterm

$$m_e \rightarrow G_0 \varphi_0 \neq 0$$

Die GW mit dem Higgsfeld gibt den e Masse.

Man sieht keine Kopplg. an das Neutrino

\Leftrightarrow das Neutrino verbleibt masselos.

6) modifizierte Ableitg. d. Higgsfelds

$$\partial_\mu \varphi \rightarrow \partial_\mu \varphi + i \frac{g_2}{2} B_\mu \varphi + i \frac{g_w}{2} \vec{\sigma} \cdot \vec{W}_\mu \varphi$$

\uparrow

$\mathcal{L}_{\text{Higgs}}$ wird modifiziert, es entsteht ein Kopplg. φ mit der Eichbosonen

\rightarrow

$$\mathcal{L}_{\text{Kinematik d. Eichboson}} = A_\mu A^\mu \cdot 0$$

Kinematik Anteil
d. Eichboson

Platz bleibt masselos,

$$+ \sum_{\mu} z^{\mu} \left(\frac{g_B^2 + g_W^2}{4} \right) \varphi_0^2$$

$$m_Z = \frac{\sqrt{g_B^2 + g_W^2}}{2} \varphi_0$$

$$+ \sum_{\mu} W^{\mu} W^{\mu} \frac{g_W^2}{4} \varphi_0^2$$

$$m_W = \frac{g_W}{2} \varphi_0$$

Es steht Masseterm f. Bosonen der schwach GW:

$\Rightarrow m_Z > m_W$ ist eine Vorhersage, die
 ($\theta = 28^\circ$) bestätigt wurde.

(alle Ruhe massen!)