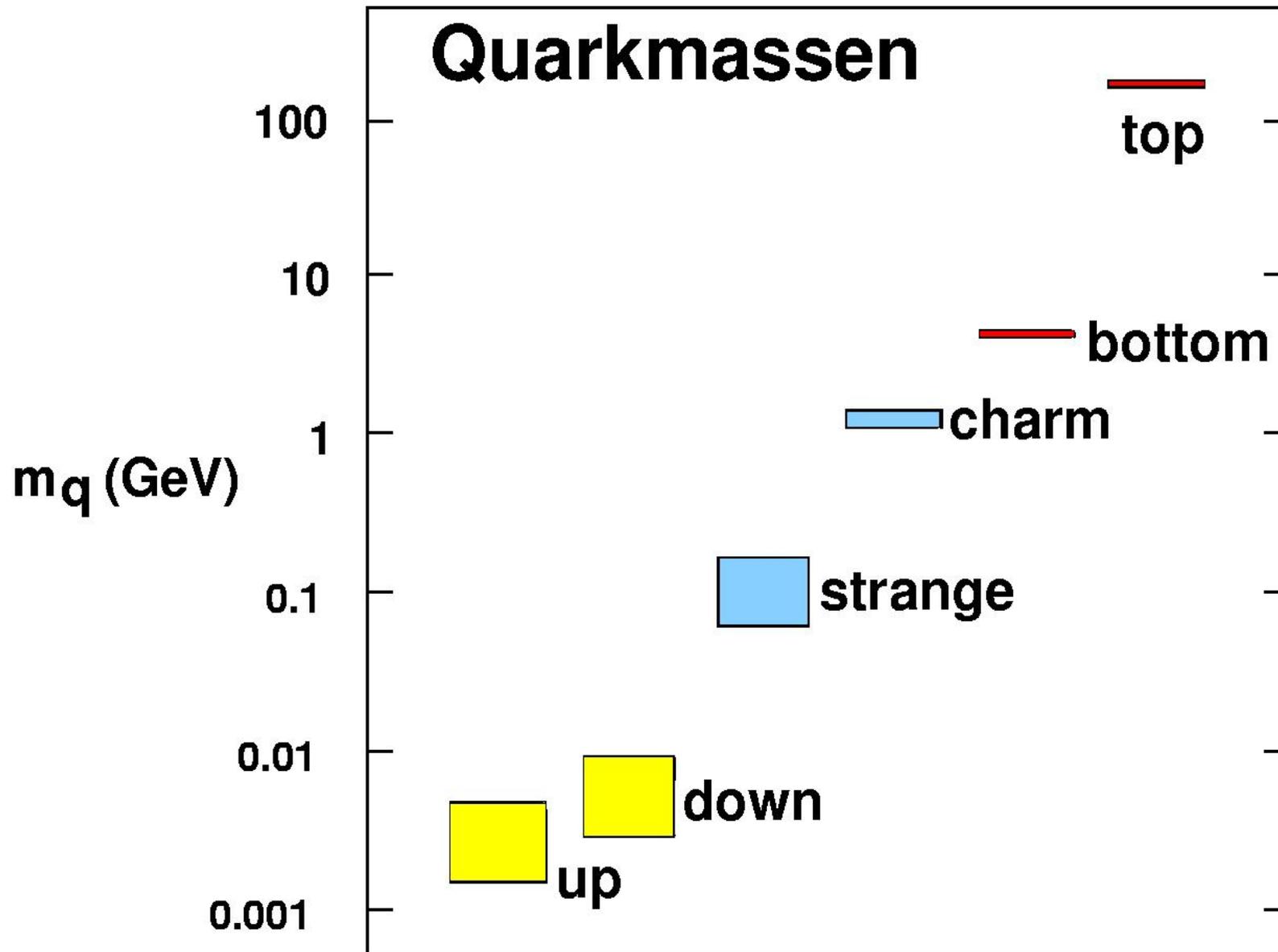


8. Vorlesung

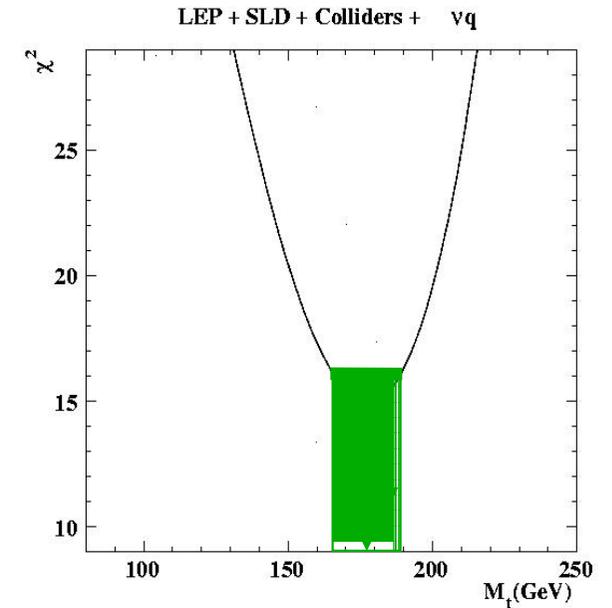
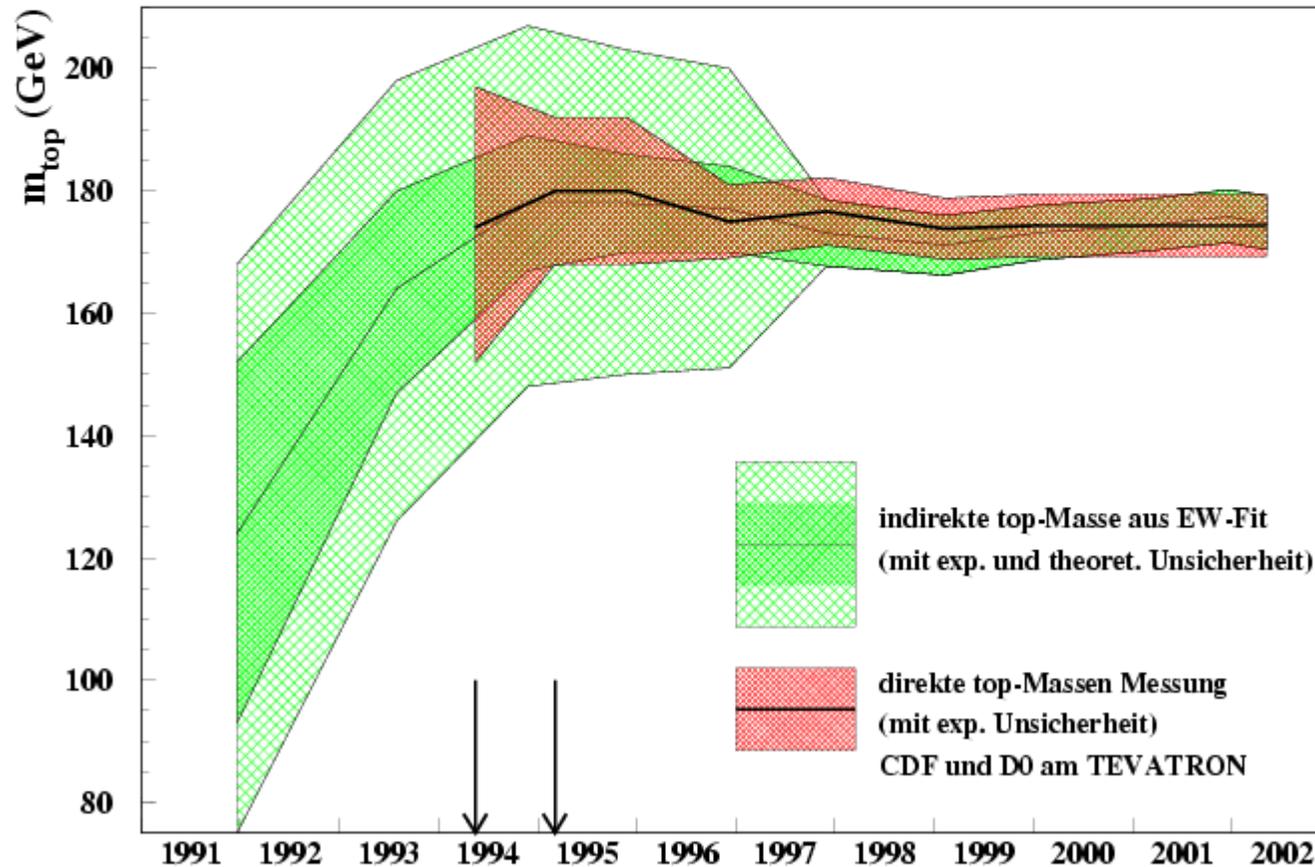
- Quarkmassen in der QCD: Zusammenfassung
- Masse in der elektroschwachen Wechselwirkung
 - Grundzüge der elektroschwachen Wechselwirkung
 - V-A, Massenterme und Eichinvarianz
 - Was bedeutet die Sonderrolle der schwachen Wechselwirkung?
- Quarkmassen und Mischungswinkel
 - Masseneigenzustände
 - Die CKM-Matrix
 - Woher könnten die Mischungswinkel kommen?
 - Massen und CP-Verletzung
 - Baryon-Antibaryon-Symmetrie im Universum
 - CPT-Theorem und Massen von Teilchen/Antiteilchen

Quarkmassen: Was wissen wir?

- Quarkmassen-Spanne = 5 Größenordnungen,
~ 2 MeV (u) bis ~ 170 GeV (t)
- wie bei Leptonen: keine Ahnung, wieso!
renormierte Masse muss experimentell bestimmt
werden
Sonderrolle des top-Quarks?
- aber: Strahlungskorrekturen (Beiträge zu und von
umgebenden Feldern) berechenbar!
selbstkonsistentes Bild!
- wichtig: Higgs-Mechanismus (nächste Vorlesungen),
aber keine wirkliche Erklärung



Entdeckung des top-quarks



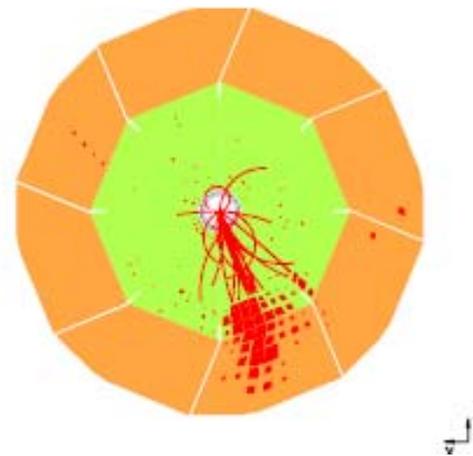
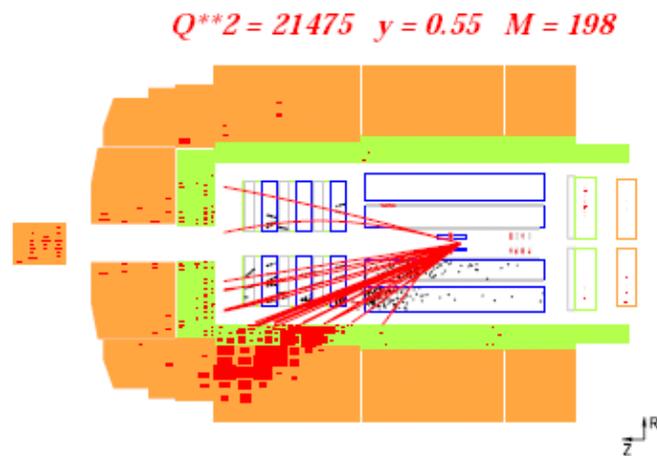
... Entdeckung genau da, wo vorhergesagt ...

Warum überhaupt Higgs?

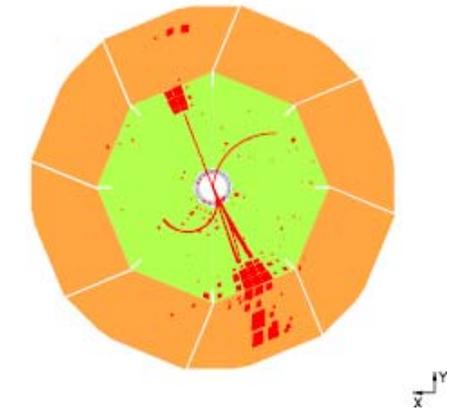
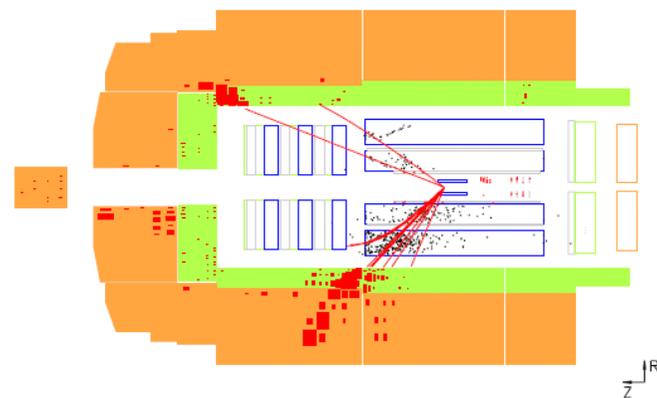
- SM durch Präzisionsmessungen bisher sehr gut bestätigt
 - z.B. Übereinstimmung von gemessenen Massen und Kopplungsstärken der Vektorbosonen W und Z
- Problem:
 - Die Einführung von massiven Vektorbosonen W, Z verletzt die Eichinvarianz
 - Linkshändigkeit der Schwachen WW \rightarrow Fermion-Massenterme verletzen Eichinvarianz!
 - Man hat die Generierung von Fermion- und Vektorbosonmassen noch nicht richtig verstanden
- Lösung:
 - Mechanismus der spontanen Symmetriebrechung (Higgs)

Elektroschwache Vereinigung

Beispiel: Tief-inelastische Streuung (HERA)

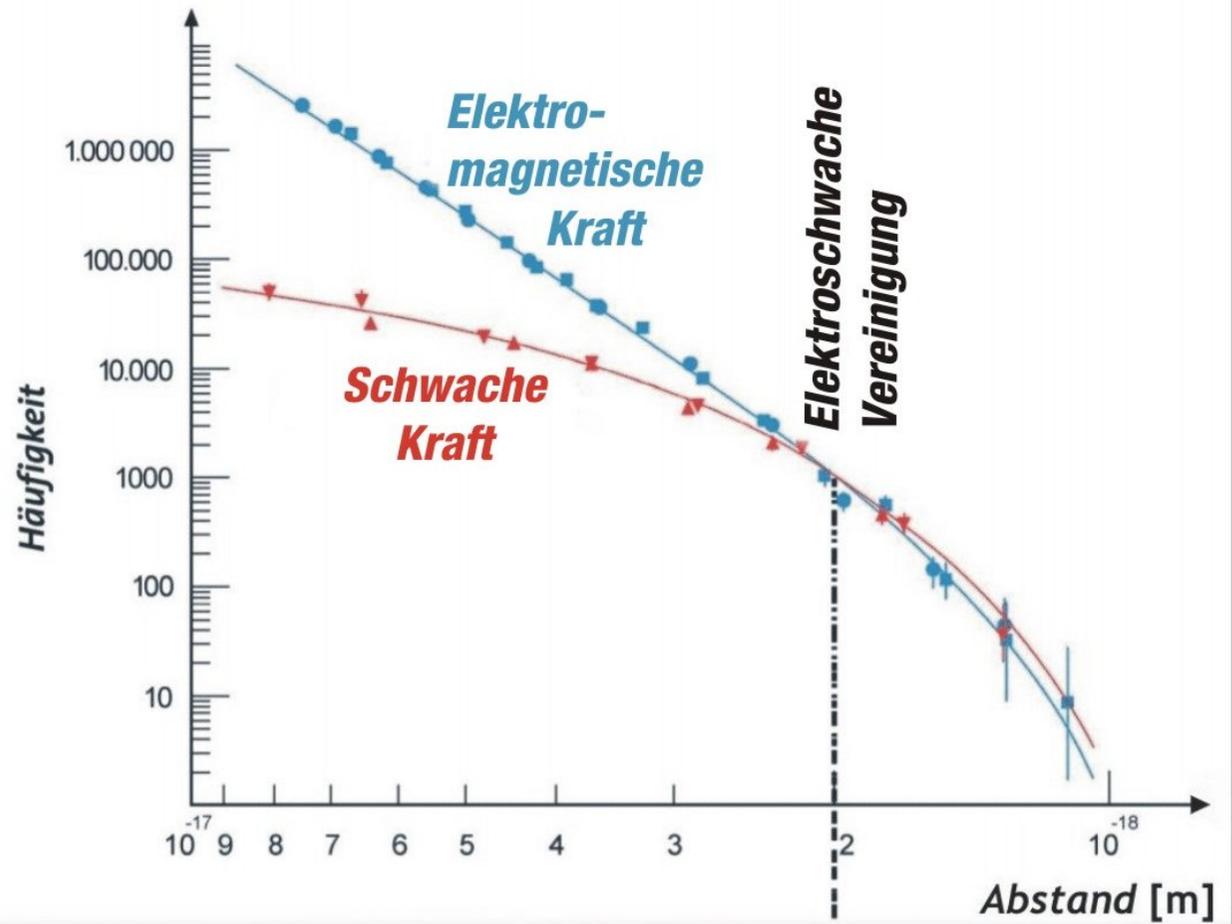


W-Austausch:
 $e^- p \rightarrow \nu_e X$



photon (+Z)-
Austausch“
 $e^- p \rightarrow e^- X$

z.B HERA:



es funktioniert!

Erinnerung: Eichsymmetrien

■ globale Eichsymmetrie: $\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \psi(x)$

■ Lokale Eichsymmetrie:

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)} \psi(x), \quad A_\mu \rightarrow A_\mu - \partial_\mu \alpha(x)$$

$$\partial_\mu \psi \rightarrow D_\mu \psi \equiv \left(\partial_\mu - ieA_\mu \right) \psi$$

Man erhält auf ganz natürliche Art das Photonfeld A_μ

Grundlegendes Prinzip der Physik

Eichinvarianz und massive Eichbosonen

- Eichinvarianz in QED und QCD:
Bedingung: Masselose Austauschteilchen, hier Photonen und Gluonen, denn ein Masseterm zerstört Eichinvarianz

$$\frac{1}{2}M_A^2 A_\mu A^\mu \rightarrow \frac{1}{2}M_A^2 \left(A_\mu - \frac{1}{e}\partial_\mu \alpha\right) \left(A^\mu - \frac{1}{e}\partial^\mu \alpha\right) \neq \frac{1}{2}M_A^2 A_\mu A^\mu$$

- Aber: Austauschteilchen der schwachen WW (W^\pm, Z^0) haben Masse
=> Problem!!

Dirac - Gleichung

Helizität + Chiralität

nicht lorentzinvariant

nicht erhalten

Helizität + Chiralität

Ultrarelativistischer Grenzfall: Helizität = Chiralität

Helizität + Chiralität

Schwache Wechselwirkung

$$T_3 = +\frac{1}{2}$$

$$T_3 = -\frac{1}{2}$$

$$T_3 = +\frac{1}{2}$$

$$T_3 = -\frac{1}{2}$$

$$T = \frac{1}{2}$$

$$T_3 = 0 \quad \left[\nu_e \right]_R$$

$$T_3 = 0$$

$$T_3 = 0$$

$$T_3 = 0$$

$$T = 0$$

schwacher Isospin T

z -Komponente T_3
Ladung der schwachen WW

schwache WW
koppelt nur an L

Eichinvarianz und massive Fermionen

- In QED und QCD: massive Fermionen erlaubt:
 - Phasentransformation (QED) ändert Masse nicht
 - $SU(3)_C$ -Transformation (QCD) ändert Masse nicht (rote, grüne, und blaue Quarks haben selbe Masse)

- In schwacher Wechselwirkung:
Masseterm zerstört Eichinvarianz, z.B. Elektron

$$-m_e \bar{e}e = -m_e \bar{e} \left(\frac{1}{2}(1 - \gamma_5) + \frac{1}{2}(1 + \gamma_5) \right) e = -m_e (\bar{e}_R e_L + \bar{e}_L e_R)$$

$SU(2)_L$: $e_L \rightarrow \nu_L$, e_R bleibt $e_R \rightarrow$ nicht invariant!

Zwei Gründe (einer würde reichen):

- Linkshändigkeit der schwachen WW
- Neutrinomasse \neq Elektronmasse (selbes $SU(2)$ -Dublett)

- Aber: Fermionen haben Masse \Rightarrow Problem!!

Lösung: Der Higgs-Mechanismus

- Alle Bosonen und Fermionen sind "eigentlich" masselos
- Masse "entsteht" durch Wechselwirkung mit einem Hintergrundfeld, dem Higgs-Feld ($SU(2)$ -Dublett).

Konsequenz: Masse transformiert sich effektiv wie ein $SU(2)_L$ -Dublett, nicht wie ein Skalar,
-> Eichinvarianz ist gerettet

Der Higgs-Mechanismus - eine Analogie (I)



Higgs-Hintergrundfeld
erfüllt den Raum



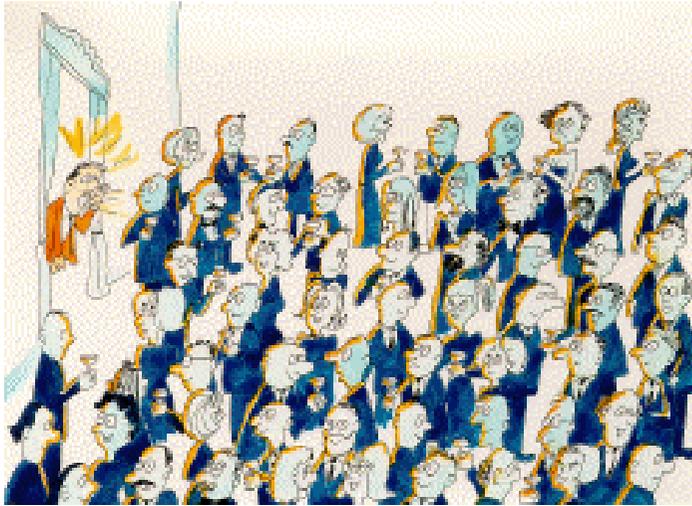
Ein **Teilchen**
im Higgs-Feld...

≙ **Teilchen mit
konstantem Impuls**



... Widerstand gegen
Bewegung ...
Trägheit ↔ Masse

Der Higgs-Mechanismus - eine Analogie (II)



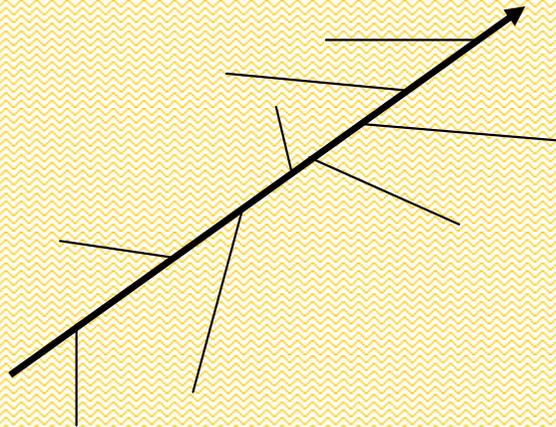
Anregung des
Hintergrundfeldes



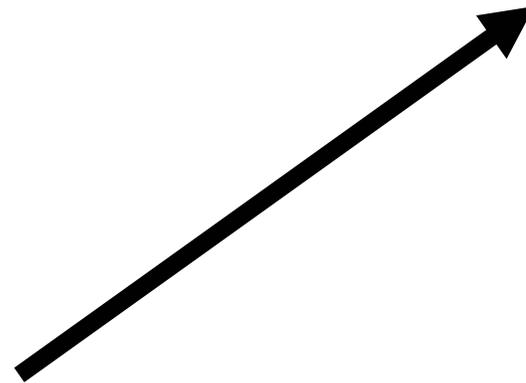
angeregtes Higgs-Hintergrundfeld
 $\hat{=}$ massives Higgs-Bosons

Higgs-Mechanismus

masselose Teilchen
in ständiger Wechselwirkung
mit dem Higgs-Feld



massives Teilchen
Wechselwirkung mit dem
Higgs-Feld absorbiert



... wie effektive u-quark-Masse (Konstituentenmasse) im Gluon-Feld des Protons

Masseneigenzustände

- Zustände mit eindeutiger Masse
 - > eindeutiger 4er-Impuls (Impuls, Energie, Masse)
 - > monochromatische Wellen (für feste Energie)
- Eigenzustände der Wellenausbreitung
 - Propagatorterme
- zeitlich konstant (solange keine Wechselwirkung auftritt)
 - => T-Eigenzustände
 - => CP-Eigenzustände (CPT erhalten)

Eigenzustände der Wechselwirkung

- Zustände mit eindeutiger Kopplung
Wechselwirkungsterme
- Eigenzustände der Wellenausbreitung (Masse) und der Wechselwirkung nicht notwendigerweise identisch
=> Mischung von Masseneigenzuständen in der Wechselwirkung und umgekehrt.
- Interne Wechselwirkungen ändern die Masse

Eigenzustände der Wechselwirkung

- elektromagnetische Wechselwirkung verändert Quantenzahlen nicht
=> Selbstenergie immer für eindeutige Quantenzahlen
=> **Masseneigenzustände = Wechselwirkungseigenzustände**
- starke Wechselwirkung ändert nur Quantenzahlen (Farbe), die keine Änderung der Masse bewirken
z.B. rotes u-Quark -> grünes u-Quark
Selbstenergieterme für alle Farben gleich
=> beliebige Rotation zwischen verschiedenen Zuständen der gleichen Masse (SU(3)-Symmetrie)
Masseneigenzustände = Wechselwirkungseigenzustände

Schwache Wechselwirkung

- vermittelt zwischen Komponenten von $SU(2)$ -Dubletts
z.B. $e \leftrightarrow \nu_e$, $u \leftrightarrow d'$, $c \leftrightarrow s'$, ... aber
 $SU(2)$ -Symmetrie gebrochen durch Higgs-Mechanismus
(und daraus resultierend durch Elektromagnetismus)
 \Rightarrow Komponenten haben nicht mehr die gleiche Masse
- Massen- und Wechselwirkungseigenzustände können verschieden und unterscheidbar sein

Familiensymmetrie (S3xS3)?

3 Familien, für jede Art von Teilchen:

"demokratische"
Massenmatrix $M = 1/3 M^0$ $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ z.B. Fritzsch et al.

diagonalisiere $\rightarrow M^0$ $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ "nackte" Masse

$m=0$ für die erste Familie: e, u, d, ν_e

$m=0$ für die zweite Familie: μ, c, s, ν_μ

$m=m_{\text{nackt}}$ für die dritte Familie: τ, t, b, ν_τ

Brechung der Familiensymmetrie

- durch kleine Störungen
=> von 0 verschiedene Massen für alle Generationen, Mischungswinkel
- Im Standardmodell: Willkürliche Parameter, parametrisiert durch Higgs-Yukawa-Kopplungen
- Manche Erweiterungen des Standardmodells können im Prinzip die Struktur der Störungen vorhersagen.
- **Viele Möglichkeiten, aber kein kohärentes Gesamtbild**