

KAPITEL 11 :

Das Standardmodell

11.1 Zusammenfassung

11.2 Tests des Standardmodells

11.1 Das Standardmodell: Zusammenfassung

Das Standardmodell der Teilchenphysik umfasst die Theorie der elektroschwachen WW und QCD:

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse:

- Wechselwirkungen: Struktur sehr ähnlich durch Austausch von Vektorbosonen

WW	koppelt an	Austauschteilchen	Masse GeV/c^2
stark	Farbladung	8 Gluonen (g)	0
elm.	elektr. Ladung	Photon (γ)	0
schwach	schwache Lad.	$W^\pm, Z$	80, 91

Gluonen tragen Farbladung: WW untereinander

$W^\pm, Z$ tragen schwache Ladung: WW untereinander

Elm. und schwache WW: 2 Aspekte einer WW
 —→ elektroschwache WW

entsprechende Ladungen durch Weinberg-Winkel verknüpft: $e = g \sin \theta_W$

Reichweite der WW und Relative Stärke (1 GeV)

$m_g = 0$: eff. Reichweite beschränkt, da Gluonen untereinander WW

bei Abständen > 1 fm: Energie des Farbfeldes so gross, dass $q\bar{q}$ -Paare erzeugt

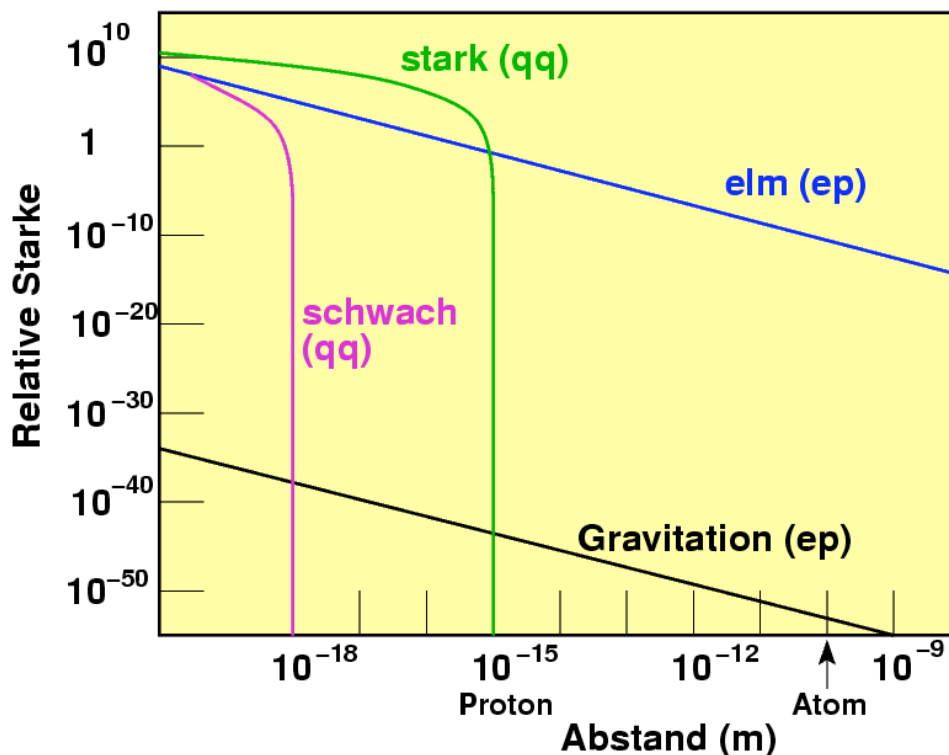
freie Teilchen müssen farbneutral sein

relative Stärke: $\alpha_s \simeq 1$

$m_\gamma = 0$: Reichweite = ∞ , Potential $\propto 1/r$,
relative Stärke: $\alpha = 1/137$

$m_W = 80 \text{ GeV}/c^2, m_Z = 91 \text{ GeV}/c^2$:

effekt. Reichweite: 10^{-18} m
relative Stärke: $\alpha_W = 10^{-6}$
Potential $\propto e^{-Mr}/r$



- Quarks und Leptonen: Fermionen (Spin 1/2)
in 3 Familien einordnen (LEP: $N_\nu = 3$)

Fermionen	Familien			Elektr. Ladung	Farbe	Schwacher Isospin	
	1	2	3			LH	RH
Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	—	1/2	—
	e	μ	τ	-1		—	0
Quarks	u	c	t	+2/3	r, g, b	1/2	0
	d	s	b	-1/3		—	—

Antifermionen: gleiche Masse
entgegengesetzte elektr. Ladung, Farbe, T_3

- Erhaltungssätze:

Erhaltene Grösse	Wechselwirkung		
	starke	elm.	schwache
Energie/Impuls			
Ladung	ja	ja	ja
Baryonzahl			
Leptonzahl			
I (Isospin)	ja	nein	nein
S (Seltsamkeit)	ja	ja	nein
P (Parität)	ja	ja	nein
C (C-Parität)	ja	ja	nein
CP (oder T)	ja	ja	nein ^{*)}
CPT	ja	ja	ja

^{*)} CP-Verletzung im K^0 –System (10^{-3})

Bemerkung: CPT - Theorem

Lüders, Pauli, Schwinger zeigten unabhängig voneinander, dass die Operation CPT eine Symmetrie jeder Theorie sein muss, welche unter Lorentz-Transformationen invariant ist.

Folgerungen:

- Teilchen und Antiteilchen: gleiche Masse und Lebensdauer
- QZ der Teilchen = QZ der Antiteilchen
- Teilchen mit halbzahligem Spin: Fermi-Dirac Statistik
Teilchen mit ganzzahligem Spin: Bose-Einstein Statistik
→ Operator mit ganzzahl. Spin wird mittels
Kommutator-Relationen quantisiert
Antikommutator-Relationen für halbzahl. Spin

The final $\mathcal{L}$ of the Weinberg-Salam Model (electroweak sector)

To summarize the Standard (Weinberg-Salam) Model, we gather together all the ingredients of the Lagrangian. The complete Lagrangian is:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} \mathbf{W}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} & \left\{ \begin{array}{l} W^\pm, Z, \gamma \text{ kinetic} \\ \text{energies and} \\ \text{self-interactions} \end{array} \right. \\
 & + \bar{L} \gamma^\mu \left(i \partial_\mu - g \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) L \\
 & + \bar{R} \gamma^\mu \left(i \partial_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) R & \left\{ \begin{array}{l} \text{lepton and quark} \\ \text{kinetic energies} \\ \text{and their} \\ \text{interactions with} \\ W^\pm, Z, \gamma \end{array} \right. \\
 & + \left| \left(i \partial_\mu - g \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) \phi \right|^2 \\
 & - V(\phi) & \left\{ \begin{array}{l} W^\pm, Z, \gamma \text{ and} \\ \text{Higgs masses} \\ \text{and couplings} \end{array} \right. \\
 & - (G_1 \bar{L} \phi R + G_2 \bar{L} \phi_c R + h.c.) & \left\{ \begin{array}{l} \text{lepton and quark} \\ \text{masses and} \\ \text{coupling to Higgs} \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

L ... left-handed fermion (l or q) doublet

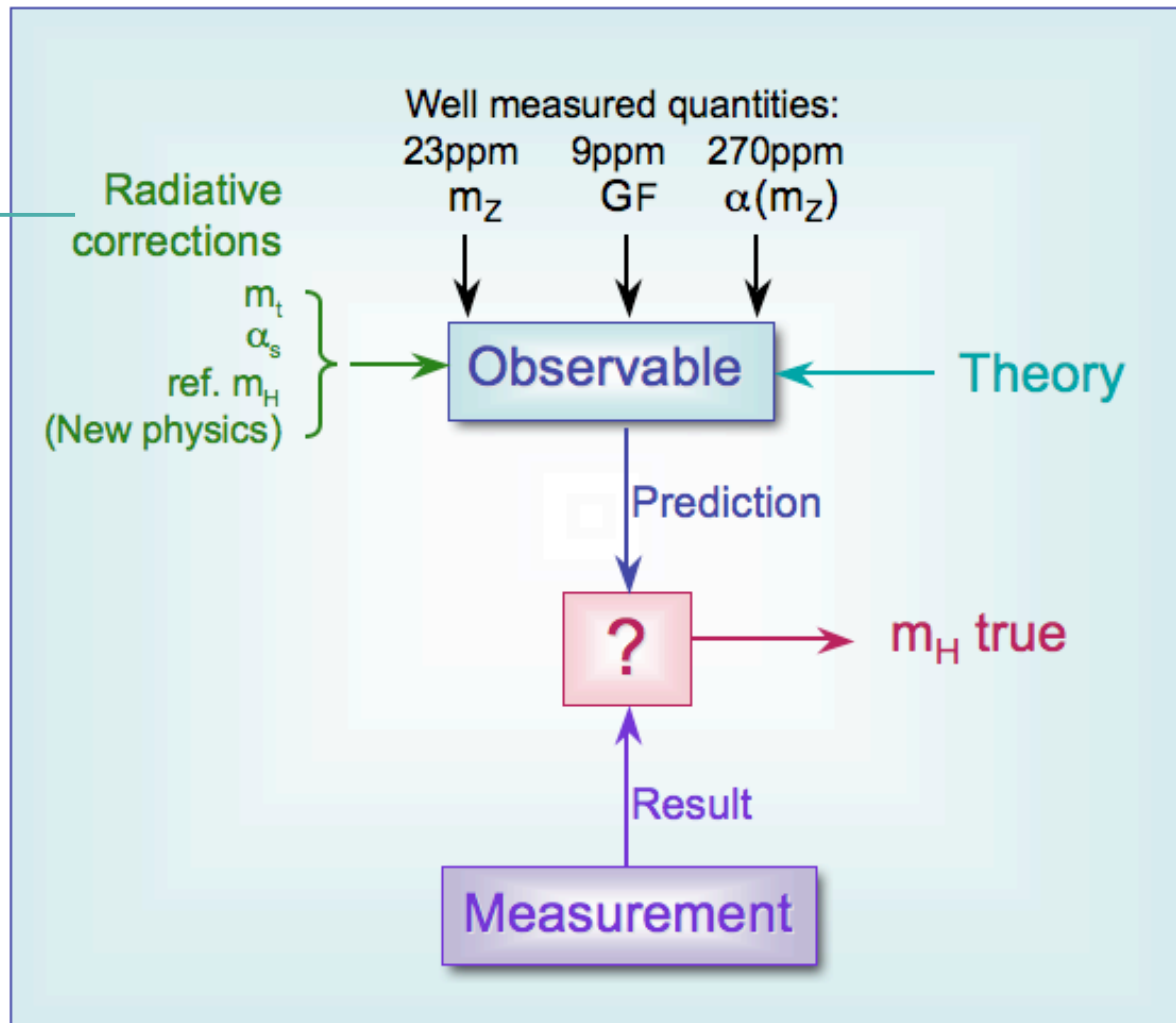
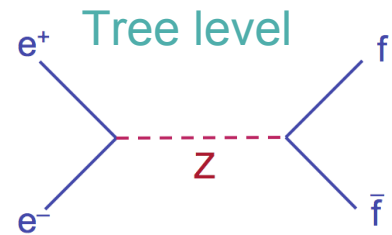
R ... right-handed fermion singlet

$\mathcal{L}$ from QCD:

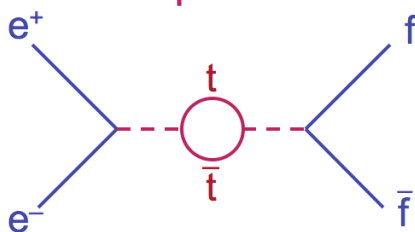
$$\mathcal{L} = \underbrace{\bar{q} (i \gamma^\mu \partial_\mu - m) q}_{E_{\text{kin}}(q)} - \underbrace{g (\bar{q} \gamma^\mu T_a q) G_\mu^a}_{\text{Interaction } q, g} - \underbrace{\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}}_{\substack{E_{\text{kin}}(g) \\ \text{includes} \\ \text{self-interaction} \\ \text{between gluons}}}$$

11.2 Tests des Standardmodells

Concept of precision measurements

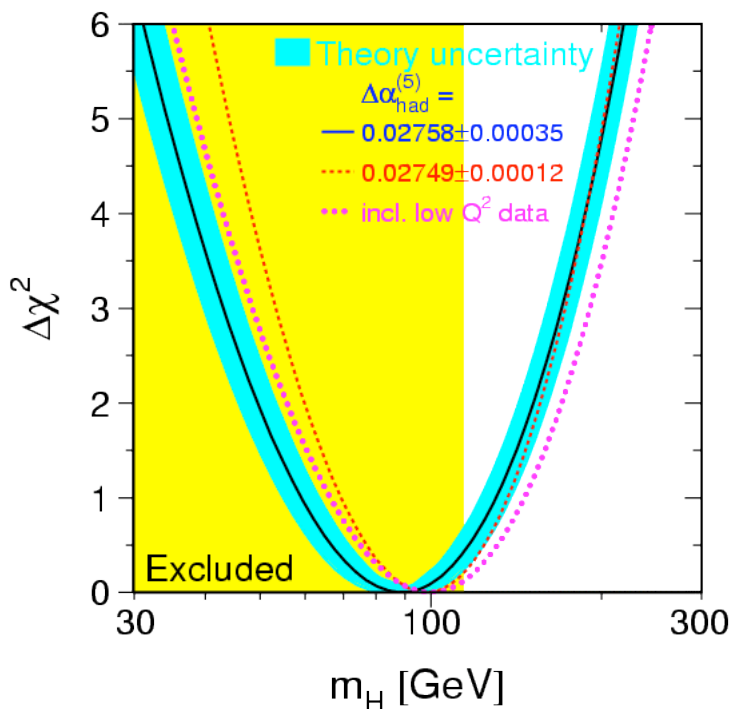
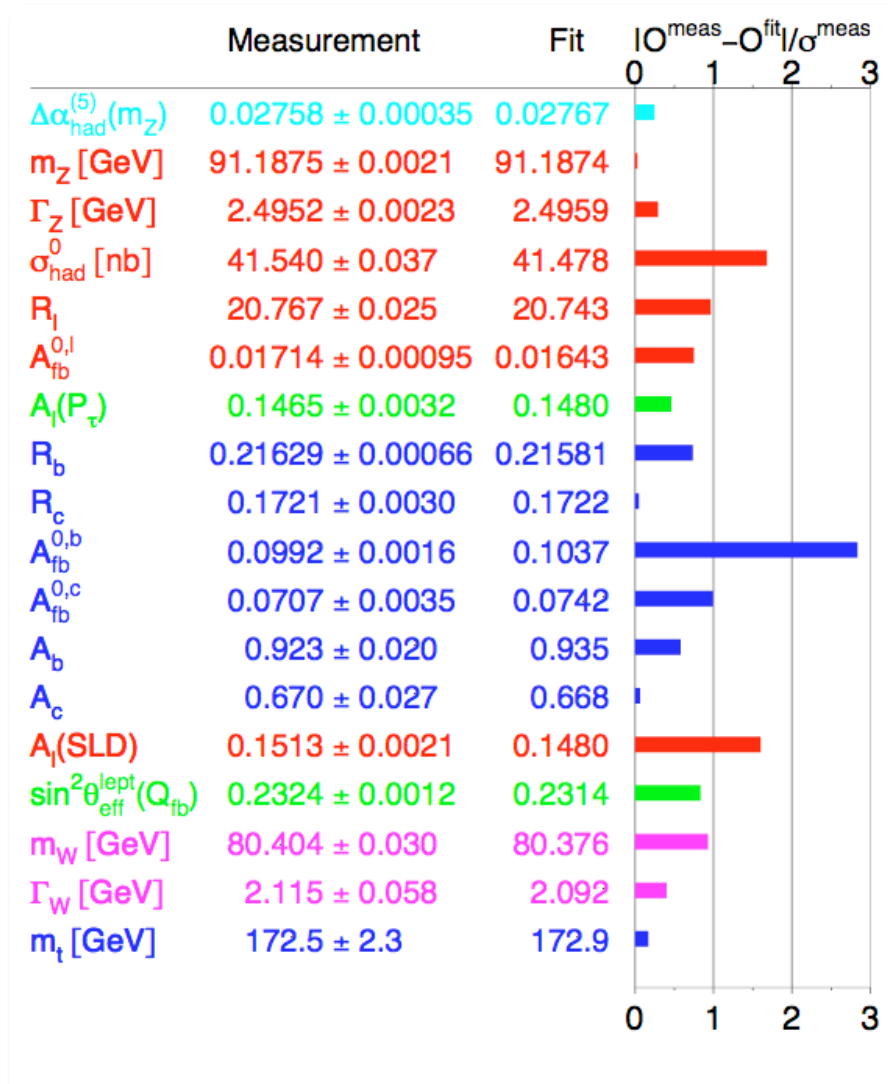


Loop level



All known particles as well as possible "new" particles can intervene in the loop
 $\rightarrow$ numerical values of observables are modified

Consistency of Electroweak Data



Fit for the Higgs mass
Combining
LEP+SLD+TEVATRON:
 $m_H < 194 \text{ GeV}/c^2$ (95%CL)

SM $\longleftrightarrow$ Offene Fragen

SM Vorhersagen stimmen ausgezeichnet mit Daten überein

Jedoch: SM ist sicherlich nicht TOE !!!

Beispiele offener Fragen:

- Ursprung der Teilchenmassen:
elektroschwache Symmetriebrechung $\longleftrightarrow$ Higgs Sektor
 $\longrightarrow$ Experimente am LHC
- Die Massen (-Differenzen) und Eigenschaften der Neutrinos $\longrightarrow$ Oszillationsexperimente
- Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen $\longleftrightarrow$ Super-symmetrie
 $\longrightarrow$ Experimente am LHC
- Eine fundamentale Skala in der Physik $\longleftrightarrow$ Extra Dimensionen
 $\longrightarrow$ Experimente am LHC

Siehe Kapitel 17 und 18

Feynman:

“Nature has always looked like a horrible mess, but as we go along we see patterns and put theories together; a certain clarity comes and things get simpler.”