

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

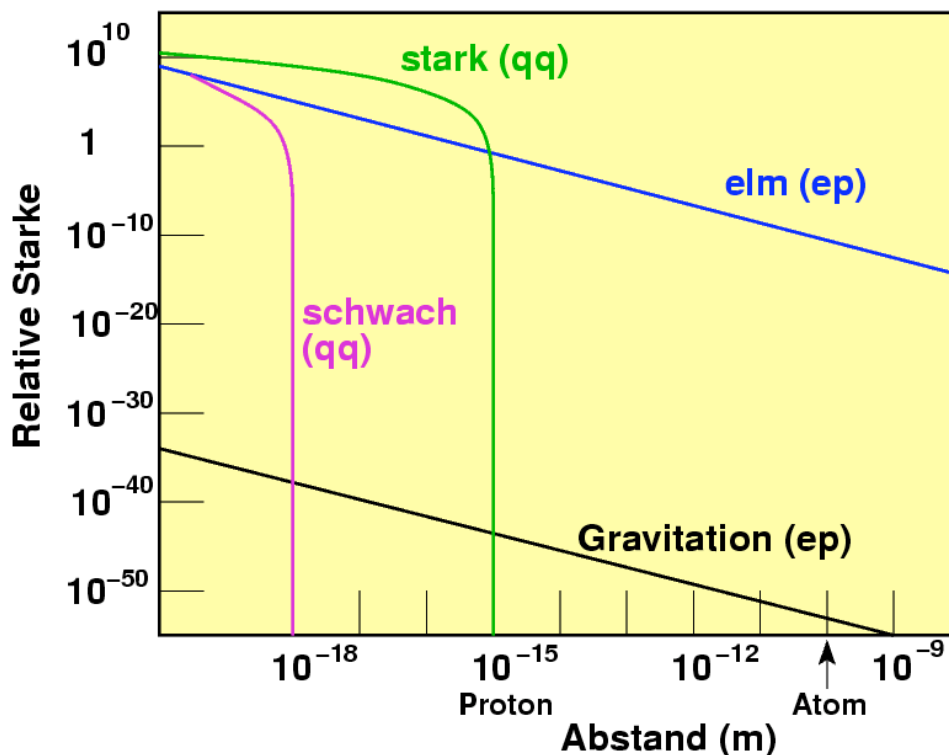
freie Teilchen müssen farbneutral sein

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})

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:

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

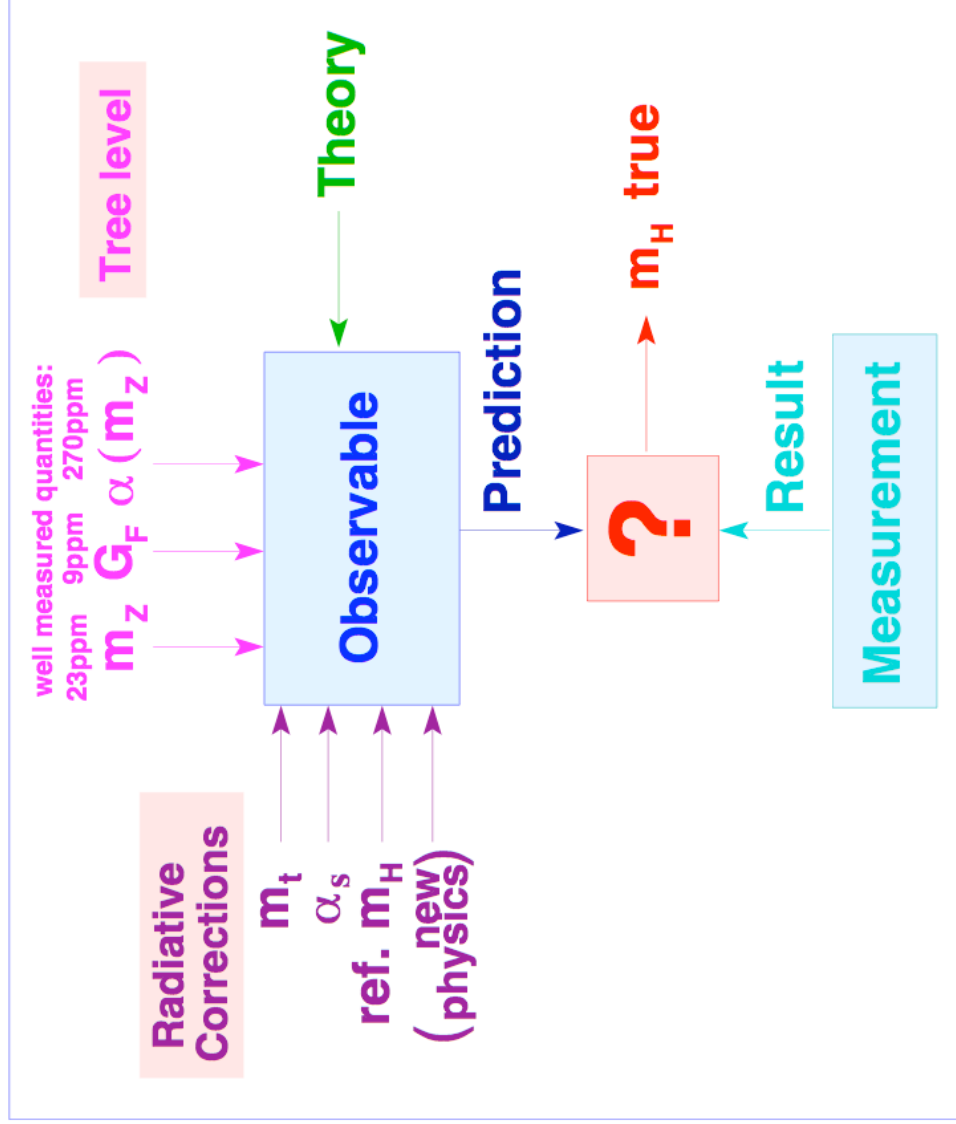
Bemerkung: CPT - Theorem

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

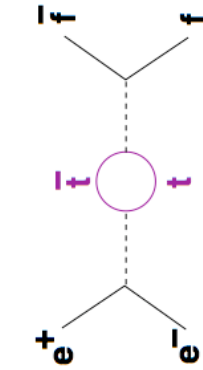
Folgerungen:

- 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

Concept of Precision Measurements



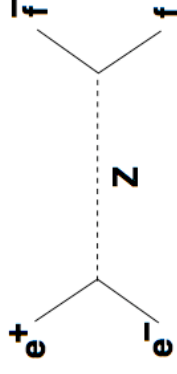
Loop level



All known particles as well as possible "new" particles can intervene in the loop

Numerical values of observables are modified

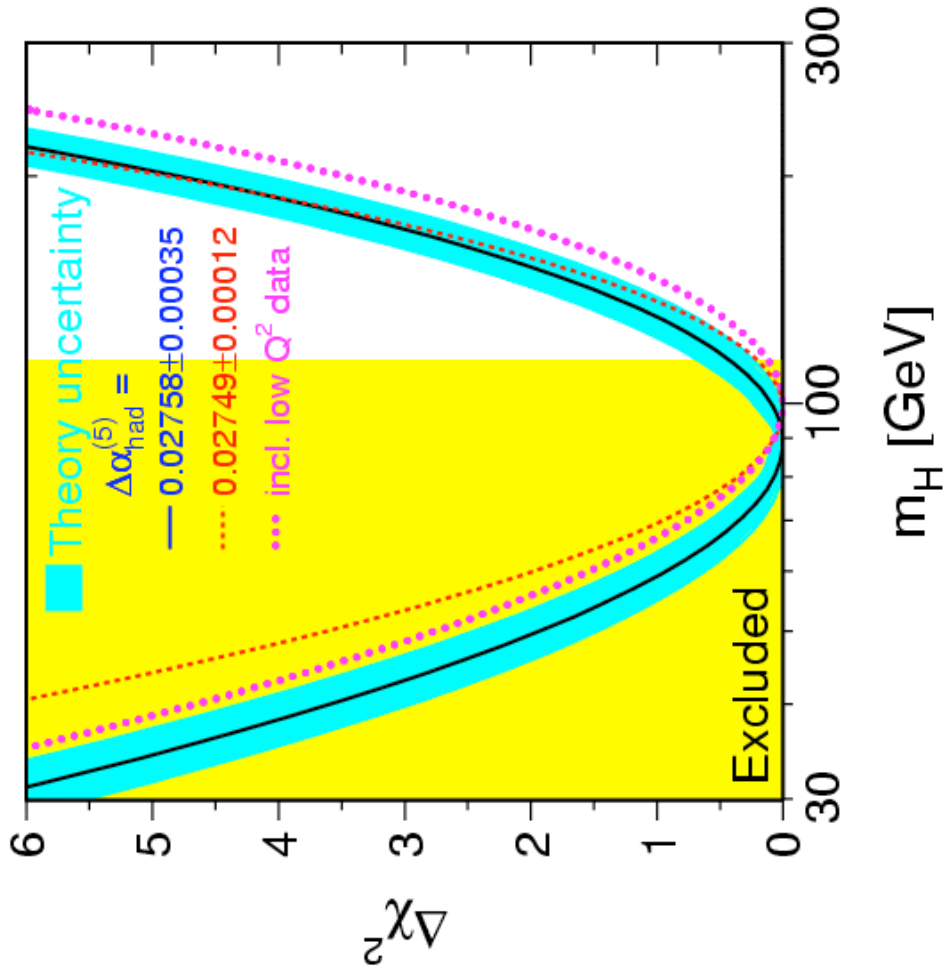
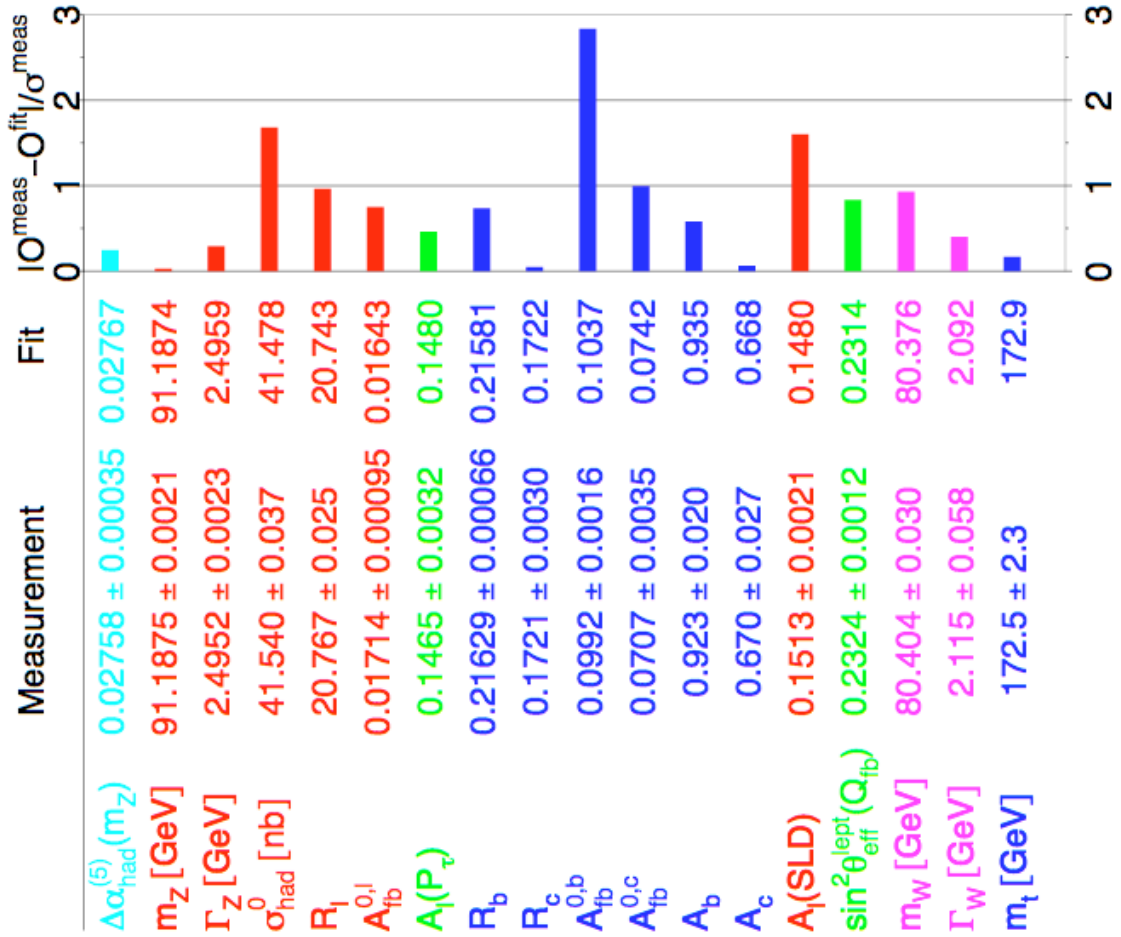
Tree level



Through accurate measurements get information about particles, even if they are too heavy to be produced in the final state

Examples: top mass, Higgs mass ?

Consistency of Electroweak Data



$\Rightarrow M_H < 207 \text{ GeV}/c^2$

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.”