Resummierung logarithmischer Beiträge in MSSM-Higgsmassenberechnungen

Henning Bahl

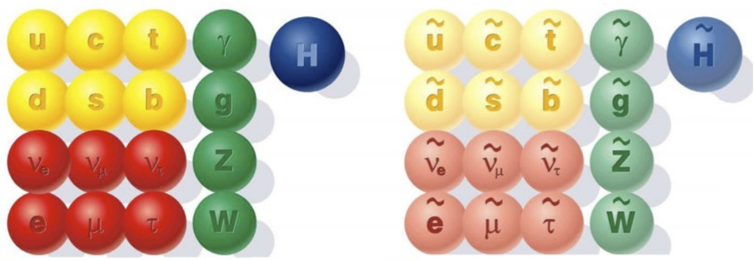
Max-Planck-Institut für Physik, München

48. Herbstschule in Maria Laach
9.9.2016

MSSM

Minimal **S**upersymmetric **S**tandard **M**odel:

- eines der weitverbreitesten Modelle für Physik jenseits des Standard-Modells (SM)
- Supersymmetry stellt eine Beziehung zwischen Bosonen und Fermionen her
- jedes SM Teilchen erhält Superpartner
  z.B. 2 Stops (Spin 0) $\leftrightarrow$ Top (Spin 1/2)
- ermöglicht Lösungsansätze für: Hierarchieproblem, Dunkle Materie, Eichkopplungsvereinigung,...



MSSM Higgssektor

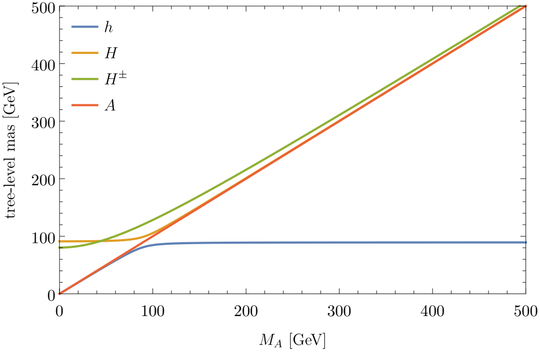
- Konsistenz der Theorie (Holomorphizität, Anomalien)
  $\Rightarrow$ zweites Higgsdublett benötigt
- fünf physikalische Higgs: h, H (CP-gerade); A (CP-ungerade); $H^\pm$
- Normalerweise wird h mit dem SM Higgs identifiziert
- SUSY fixiert Massen und Kopplungen
- Higgssektor wird auf Born-Niveau durch zwei Parametern vollständig festgelegt:
  M_A, $\tan\beta = v_2/v_1$

Higgsmasse als Präzisionsobservable

Besonderheit des MSSM

Die Masse des SM-artigen *h*-Bosons kann in Abhängigkeit der MSSM-Parameter berechnet werden.

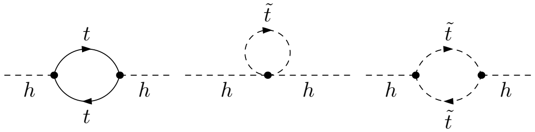
- gemessene Higgsmasse kann als Präzisionsobservable benutzt werden um Parameterraum einzuschränken
- auf Born-Niveau: $M_h^2 \leq M_Z^2 \cos(2\beta)^2 \leq M_Z^2$



Quantenkorrekturen zur Higgsmasse (I)

Wie wird dies durch Quantenkorrekturen beeinflusst?

- exakte SUSY $\rightarrow$ alle Quantenkorrekturen heben sich gegenseitig auf



$= 0$

Gründe? $\rightarrow$ exakte SUSY impliziert, dass die Superpartner

- die gleiche Masse haben wie das zugehörige SM-Teilchen
- die gleiche Kopplungen haben wie das zugehörige SM-Teilchen

Erinnerung: Fermionische Schleifen haben entgegengesetztes Vorzeichen wie skalare Schleifen

Brechung von SUSY

M_h ist ~ 125 GeV ($> M_Z \sim 90$ GeV)!

Und es wurden bisher keine SUSY Teilchen gefunden!

$\Rightarrow$ **SUSY muss gebrochen sein**

- Genauer Brechungsmechanismus ist unbekannt
- Zusätzliche Massenterme parametrisieren diese Unwissenheit (soft-breaking Terme)

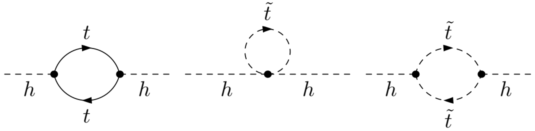
$$m_{\tilde{t}_1}^2 = m_t^2 + \Delta m_1^2$$
$$m_{\tilde{t}_2}^2 = m_t^2 + \Delta m_2^2$$

- Kopplungen werden nicht verändert
  ($\rightarrow$ keine quadratischen Divergenzen)

Quantenkorrekturen zur Higgsmasse (II)

SUSY gebrochen

Schleifenkorrekturen liefern Beiträge zur Higgsmasse



$\neq 0$

$$M_h^2 = M_Z^2 \cos(2\beta)^2 + \frac{3}{4\pi^2} m_t^2 h_t^2 \ln\left(\frac{M_S^2}{m_t^2}\right) + (\text{nicht log. Terme})$$

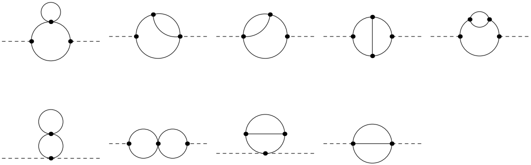
mit der Stopskala $M_S^2 = m_{\tilde{t}_1} m_{\tilde{t}_2}$.

- Ein-Schleifen-Beiträge können Born-Niveau Masse um mehr als $\sim$80% erhöhen

$\Rightarrow$ **Korrekturen höherer Ordnung werden für ein präzises Resultat benötigt!**

Das Problem der großen Logarithmen (I)

$\rightarrow$ Zwei-Schleifen Rechnung (bereits sehr schwierig, aber machbar):



- Rechnung liefert Terme $\propto \ln^2\left(\frac{M_S^2}{m_t^2}\right)$
- für $M_S \gg m_t$ (schwere Stops $\leftarrow$ LHC Stop-Suchen):

Numerisch große Logarithmen verschlechtern die Konvergenz der Störungsreihe

Das Problem der großen Logarithmen (II)

$\rightarrow$ Drei-Schleifen Rechnung ???

Nicht machbar, aber große logarithmische Beiträge sind zu erwarten ($\ln^3(..)$)!!

$$\Downarrow$$

Alternative Methode benötigt um große Logarithmen unter Kontrolle zu bekommen!

Urspung der großen Logarithmen

Ursprung des Problems

Große Hierarchie zwischen den Skalen m_t und M_S

$$\Downarrow$$

Die Beiträge der SUSY Teilchen und der SM Teilchen müssen separiert werden!

$$\Downarrow$$

Effektive **F**eld-**T**heorie

Effektive Feldtheorie am Beispiel einer Spieltheorie

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{Spiel}} =& \frac{1}{2}\partial_\mu\phi\partial^\mu\phi + \frac{1}{2}\partial_\mu\Phi\partial^\mu\Phi - m^2\phi^2 - M^2\Phi^2 - V(\phi,\Phi)\\ V(\phi,\Phi) =& \lambda_1\phi^4 + \lambda_2\phi^2\Phi^2 + \lambda_3\Phi^4\end{aligned}$$

Effektiver Lagrangian für Energien $Q \sim m \ll M$:

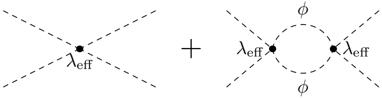
$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \frac{1}{2}\partial_\mu\phi\partial^\mu\phi - m^2\phi^2 - \frac{\lambda_{\text{eff}}}{4!}\phi^4$$

$\rightarrow$ Effekt des schweren Φ-Teilchens absorbiert in λ_{eff}

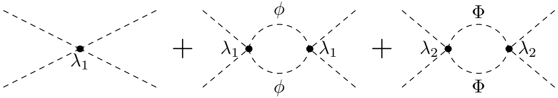
Bestimmung der effektiven Kopplung

Bestimme λ_{eff} durch Vergleich mit der vollen Theorie (VT) an $Q \sim M$ via $\phi\phi \to \phi\phi$ Streuung:

EFT Ergebnis =



Ergebnis VT =



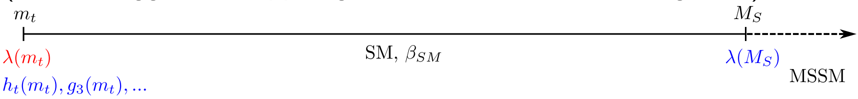
EFT-Ergebnis $\stackrel{!}{=}$ Ergebnis in der vollen Theorie

SM als EFT des MSSM

Betrachte SM als EFT des MSSM

$M_h^2 = 2\lambda(Q = m_t)v^2$

(λ: SM Higgsselbstkopplung, v: SM Vakuumserwartungswert)



- Vergleiche SM mit MSSM an $Q = M_S$: $\lambda(M_S)$ kein freier Parameter im MSSM

Berechne Higgsmasse im effektiven SM:

- Im effektiven SM sind alle SUSY-Teilchen ausintegriert $\rightarrow$ keine großen Logarithmen
- Die Effekt aller SUSY-Teilchen sind absorbiert in $\lambda(m_t)$

Laufen der Higgsselbstkopplung

Wie erhält man $\lambda(m_t)$? Nur $\lambda(M_S)$ ist bekannt.

- Higgs-Selbstkopplung ist ein laufender Parameter
  $\rightarrow$ der numerische Wert ist abhängig von der Energieskala des jeweiligen Prozesses
- Laufen wird durch Renormierungsgruppengleichungen (RGEs) bestimmt
- Vergleichbar zur laufenden Eichkopplung der QCD

Laufen der Higgsselbstkopplung $\rightarrow$ große Logarithmen

$$\text{SM RGE für } \lambda\text{:}\ \frac{d\lambda}{d\ln Q^2} = \frac{6}{(4\pi)^2}\left(\lambda^2 + \lambda h_t^2 - h_t^4\right)$$

Iterative Lösung:

$$\lambda(m_t) \approx \lambda(M_S) + \int_{Q=M_S}^{Q=m_t} \frac{d\lambda}{d\ln Q^2} d\ln Q^2 \approx$$

$$\approx \lambda(M_S) - \frac{6}{(4\pi)^2}\left(\lambda^2(M_S) + \lambda(M_S)h_t^2(m_t) - h_t^4(m_t)\right)\ln\left(\frac{M_S^2}{m_t^2}\right) \approx$$

$$\approx \frac{6}{(4\pi)^2} h_t^4(m_t)\ln\left(\frac{M_S^2}{m_t^2}\right)$$

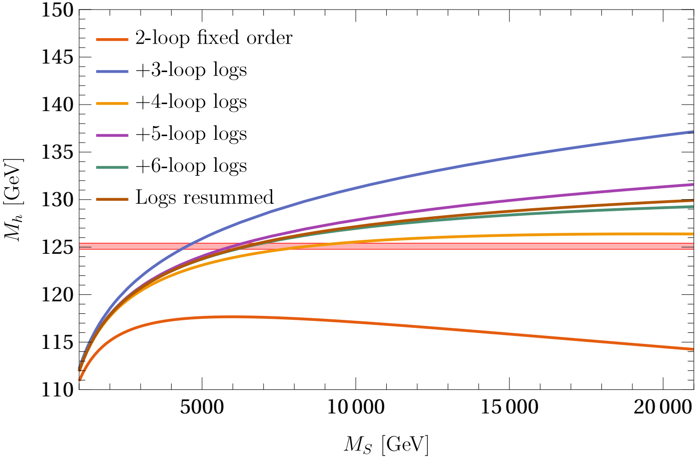
Multipliziere mit $2v^2 \rightarrow$ Logarithmus auf Ein-Schleifen-Niveau reproduziert ($h_t v = m_t$)

$\Rightarrow$ **große Logarithmen werden durch RGE-Laufen erzeugt**

Numerische Ergebnisse

Numerische Lösung des Systems von gekoppelten RGEs:

$\Rightarrow$ **Resummierung der großen Logarithmen bis zu allen Ordnungen**



Zusammenfassung

- Im MSSM ist die Masse des SM-artigen Higgs in Abhängigkeit von den Modelparametern berechenbar.
- M_h kann als Präzisionsobservable benutzt werden, um den Parameterraum einzuschränken.
- Die Rechnung wird durch große Logarithmen erschwert, die die Konvergenz der Störungsreihe verschlechtern.
- Die Benutzung von effektiven Feldtheorien erlaubt es diese Beiträge zu resummieren.