

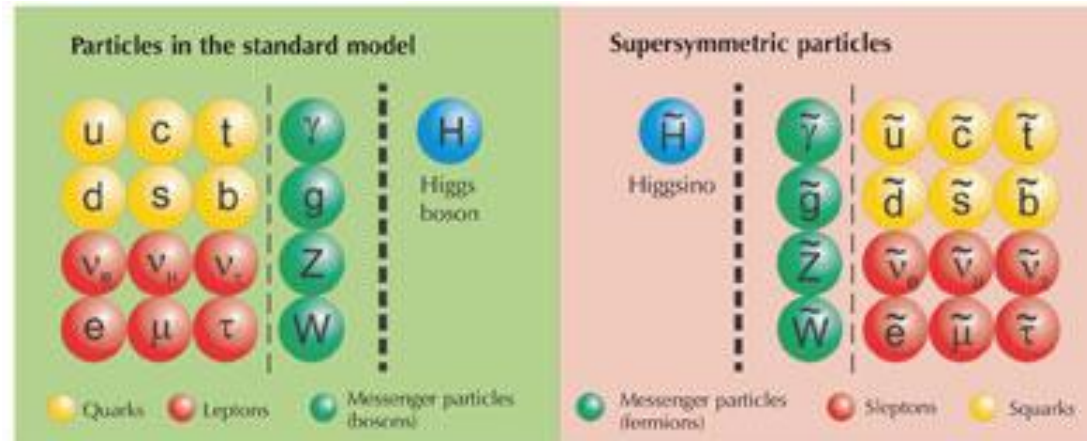
MSSM4 için Kütle Spektrumu ve Ayar Bağlaşımları

Volkan ARI ve Orhan ÇAKIR

İçerik

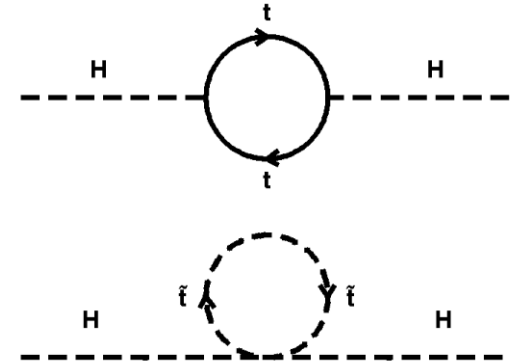
- Süpersimetri
- MSSM (Minimal Süpersimetrik Standart Model)
- MSSM4' de RGE
- Ayar bağlaşımı ve RGE Çözümleri
- Sonuç

Süpersimetri



- Bozon ve fermiyonlar arasındaki uzay-zaman simetrisidir.
- Her bir fermiyona bozonik bir süperez karşı gelir (veya tersi)
- Higgs kütesine fermiyon ve sfermiyon kütlelerinden gelen katkılar birbirini götürür (fine-tuning)
- SUSY' deki bağlaşımlar Standart Model bağlaşımlarıyla özdeştir.

$$Q | boson \rangle = | fermion \rangle \quad Q | fermion \rangle = | boson \rangle$$



MSSM (Minimal Süpersimetrik Standart Model)

- Yukarı ve aşağı tipli fermiyonlar ile etkileşen iki Higgs doubleti vardır, 5 fiziksel Higgs bozonu ortaya çıkar (h, H^0, A, H^-, H^+)
- Her bir SM parçacığına bir süperez karşı gelir.
- Sparçacıklar çiftler halinde üretilir ve LSP kararlıdır (eğer $R_p = (-1)^{3(B-L)+2s}$ korunur ise)
- Charginolar ve nötralinolar EW ayar ve Higgs bozonlarının fermiyonik eşlerinin karışım öz durumlarıdır.
- 100' den fazla yeni parametre (soft SUSY kırılması)

Gauge Bosons $S = 1$ gluon, W^\pm, Z, γ	Gauginos $S = 1/2$ gluino, $\tilde{W}, \tilde{Z}, \tilde{\gamma}$
Fermions $S = 1/2$ $\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L^e \\ e_L \end{pmatrix}$ u_R, d_R, e_R	Sfermions $S = 0$ $\begin{pmatrix} \tilde{u}_L \\ \tilde{d}_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\nu}_L^e \\ \tilde{e}_L \end{pmatrix}$ $\tilde{u}_R, \tilde{d}_R, \tilde{e}_R$
Higgs $\begin{pmatrix} H_2^0 \\ H_2^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_1^+ \\ H_1^0 \end{pmatrix}$	Higgsinos $\begin{pmatrix} \tilde{H}_2^0 \\ \tilde{H}_2^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{H}_1^+ \\ \tilde{H}_1^0 \end{pmatrix}$

MSSM (Minimal Süpersimetrik Standart Model)

- Büyük Birleşme Skalasında MSSM deki parametre sayısı 5'e iner,

$m_{1/2}$: ortak gaugino kütlesi
 m_0 : ortak skaler kütle
 A_0 : Trilineer bağlaşımlar
 $\tan\beta$: Higgslerin vakum beklenen değerlerinin oranı ($\langle H_u \rangle / \langle H_d \rangle$)

} GUT skalasında

} → EW skalada

$\text{sign}(\mu)$: Higgs karışım parametresinin işareti ($\mu H_u H_d$)

MSSM4 'de Renormalizasyon Grup Denklemleri

GUT skalasından EW skalaya kadar kütlelerin değişiminden sorumludur,

Yukawa Bağlaşımlarının Skala Bağımlı Değişimi

$$\frac{dY_t}{dt} = \frac{Y_t}{16\pi^2} \left[6Y_t^2 + Y_b^2 + 3Y_{t'}^2 + Y_{\nu'}^2 - \left(\frac{16}{3}g_3^2 + 3g_2^2 + \frac{13}{15}g_1^2 \right) \right]$$

$$t = \log Q$$

$$\frac{dY_{t'}}{dt} = \frac{Y_{t'}}{16\pi^2} \left[6Y_{t'}^2 + Y_{b'}^2 + 3Y_t^2 + Y_{\nu'}^2 - \left(\frac{16}{3}g_3^2 + 3g_2^2 + \frac{13}{15}g_1^2 \right) \right]$$

$$\frac{dY_b}{dt} = \frac{Y_b}{16\pi^2} \left[Y_t^2 + 6Y_b^2 + 3Y_{b'}^2 + Y_{\tau}^2 + Y_{\tau'}^2 - \left(\frac{16}{3}g_3^2 + 3g_2^2 + \frac{7}{15}g_1^2 \right) \right]$$

$$\frac{dY_{b'}}{dt} = \frac{Y_{b'}}{16\pi^2} \left[Y_{t'}^2 + 6Y_{b'}^2 + 3Y_b^2 + Y_{\tau}^2 + Y_{\tau'}^2 - \left(\frac{16}{3}g_3^2 + 3g_2^2 + \frac{7}{15}g_1^2 \right) \right]$$

$$\frac{dY_{\nu'}}{dt} = \frac{Y_{\nu'}}{16\pi^2} \left[4Y_{\nu'}^2 + 3Y_{t'}^2 + 3Y_t^2 + Y_{\tau'}^2 - \left(3g_2^2 + \frac{3}{5}g_1^2 \right) \right]$$

$$\frac{dY_{\tau}}{dt} = \frac{Y_{\tau}}{16\pi^2} \left[4Y_{\tau}^2 + Y_{\tau'}^2 + 3Y_b^2 + 3Y_{b'}^2 - \left(3g_2^2 + \frac{9}{5}g_1^2 \right) \right]$$

$$\frac{dY_{\tau'}}{dt} = \frac{Y_{\tau'}}{16\pi^2} \left[4Y_{\tau'}^2 + Y_{\tau}^2 + Y_{\nu'}^2 + 3Y_b^2 + 3Y_{b'}^2 - \left(3g_2^2 + \frac{9}{5}g_1^2 \right) \right]$$

MSSM4 'de Renormalizasyon Grup Denklemleri

Kütlelerin Skala Bağımlı Değişimini veren Denklemler

$$\frac{dm_{Q_3}^2}{dt} = \frac{1}{8\pi^2} \left[Y_t^2 X_t + Y_b^2 X_b - \left(\frac{16}{3} g_3^2 M_3^2 + 3g_2^2 M_2^2 + \frac{1}{15} g_1^2 M_1^2 \right) \right]$$

$$\frac{dm_{Q_4}^2}{dt} = \frac{1}{8\pi^2} \left[Y_{t'}^2 X_{t'} + Y_{b'}^2 X_{b'} - \left(\frac{16}{3} g_3^2 M_3^2 + 3g_2^2 M_2^2 + \frac{1}{15} g_1^2 M_1^2 \right) \right]$$

$$\frac{dM_i}{dt} = -\frac{b_i}{2\pi} \alpha_i M_i$$

$$\frac{dm_{\tilde{t}_R}^2}{dt} = \frac{1}{8\pi^2} \left[2Y_t^2 X_t - \left(\frac{16}{3} g_3^2 M_3^2 + \frac{16}{15} g_1^2 M_1^2 \right) \right]$$

$$\frac{dm_{\tilde{t}'_R}^2}{dt} = \frac{1}{8\pi^2} \left[2Y_{t'}^2 X_{t'} - \left(\frac{16}{3} g_3^2 M_3^2 + \frac{16}{15} g_1^2 M_1^2 \right) \right]$$

$$X_t = m_{Q_3}^2 + m_{u_3}^2 + m_{H_u}^2 + A_t^2$$

$$\frac{dm_{L_3}^2}{dt} = \frac{1}{8\pi^2} \left[Y_\tau^2 X_\tau - \left(3g_2^2 M_2^2 + \frac{3}{5} g_1^2 M_1^2 \right) \right]$$

$$X_{t'} = m_{Q_4}^2 + m_{u_4}^2 + m_{H_u}^2 + A_{t'}^2$$

$$\frac{dm_{L_4}^2}{dt} = \frac{1}{8\pi^2} \left[Y_{\tau'}^2 X_{\tau'} + Y_{\nu'}^2 X_{\nu'} - \left(3g_2^2 M_2^2 + \frac{3}{5} g_1^2 M_1^2 \right) \right]$$

$$\frac{dm_{\tilde{\tau}_R}^2}{dt} = \frac{1}{8\pi^2} \left[2Y_\tau^2 X_\tau - \frac{12}{5} g_1^2 M_1^2 \right]$$

$$\frac{dm_{\nu'}^2}{dt} = \frac{1}{8\pi^2} \left[2Y_{\nu'}^2 X_{\nu'} \right]$$

$$\frac{dm_{\tilde{\tau}'_R}^2}{dt} = \frac{1}{8\pi^2} \left[2Y_{\tau'}^2 X_{\tau'} - \frac{12}{5} g_1^2 M_1^2 \right]$$

Ayar bağlaşımı ve RGE Çözümleri

Ayar Bağlaşımının Enerji
Skalasına Bağlı Değişimi ifadesi

$$\frac{d}{dt} (\alpha_i^{-1}) = \frac{b_i}{2\pi}$$

$$\alpha_3 \rightarrow SU(3)$$

$$\alpha_2 \rightarrow SU(2)$$

$$\alpha_1 \rightarrow U(1)$$

SM dahilinde b_i
Katsayılarının değerleri

$$b_1 = -\frac{41}{10}$$

$$b_2 = \frac{19}{6}$$

$$b_3 = 7$$

MSSM dahilinde b_i
Katsayılarının değerleri

$$b_1 = -\frac{33}{5}$$

$$b_2 = -1$$

$$b_3 = 3$$

MSSM4 dahilinde b_i
Katsayılarının değerleri

$$b_1 = -\frac{43}{5}$$

$$b_2 = -3$$

$$b_3 = 1$$

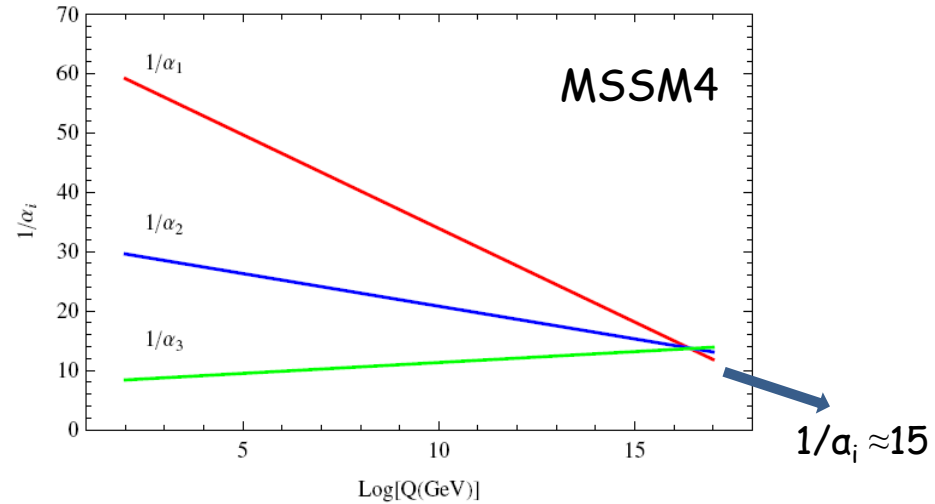
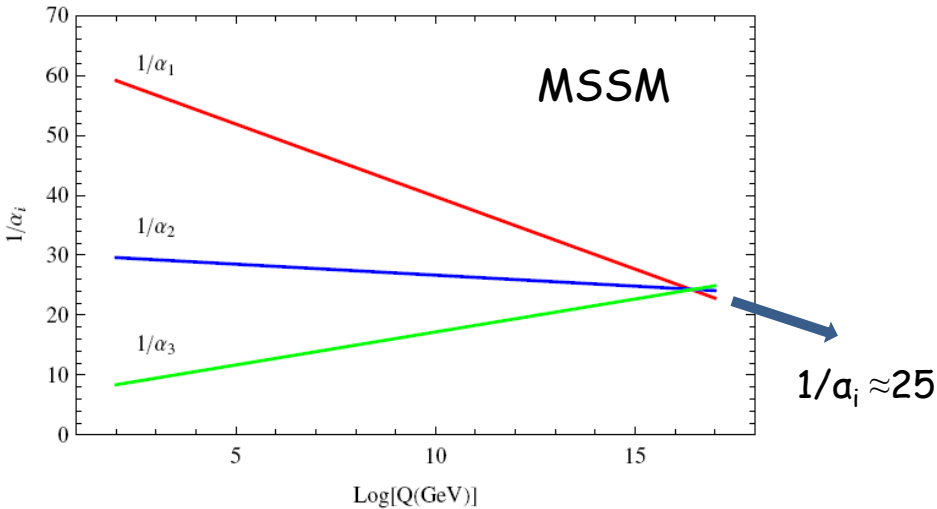
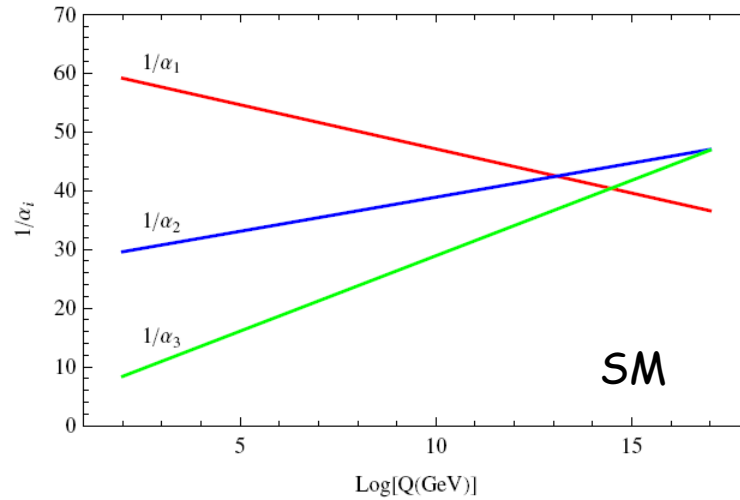
Ayar bağlaşımı ve RGE Çözümleri

Diferansiyel denklemlerin sayısal çözümlemesini yapar.



```
s2 = NDSolve[{  
   $\alpha[1]'[t] = -b[1] * \alpha[1][t]^2 / (2 * Pi),$   
   $\alpha[2]'[t] = -b[2] * \alpha[2][t]^2 / (2 * Pi),$   
   $\alpha[3]'[t] = -b[3] * \alpha[3][t]^2 / (2 * Pi),$   
   $M[1]'[t] = -b[1] / (2 * Pi) * \alpha[1][t] * M[1][t],$   
   $M[2]'[t] = -b[2] / (2 * Pi) * \alpha[2][t] * M[2][t],$   
   $M[3]'[t] = -b[3] / (2 * Pi) * \alpha[3][t] * M[3][t],$   
  .  
  .  
  .  
}
```

Ayar bağlaşımı ve RGE Çözümleri



Ayar bağlaşımı ve RGE Çözümleri

$$m_t' = 400 \text{ GeV}$$

$$m_b' = 350 \text{ GeV}$$

$$m_\tau' = 200 \text{ GeV}$$

$$m_b' = 100 \text{ GeV}$$

3. Ve 4. Aile Sfermionları için Kütle Spektrumu

Hesaplarda kullanılan kütle değerleri

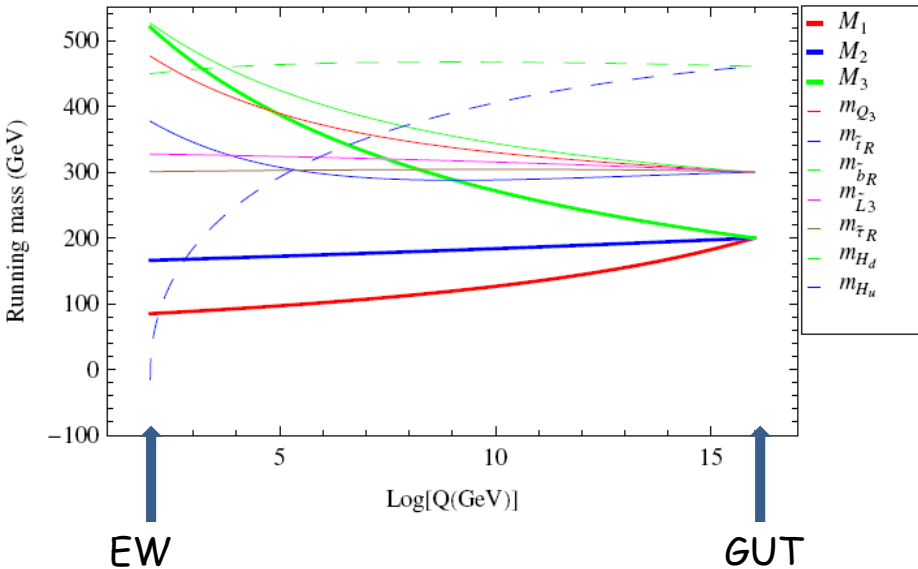


Figure 1: MSSM : $A_0 = 100$, $m_0 = 300$, $m_{1/2} = 200$, $\tan\beta = 1.8$

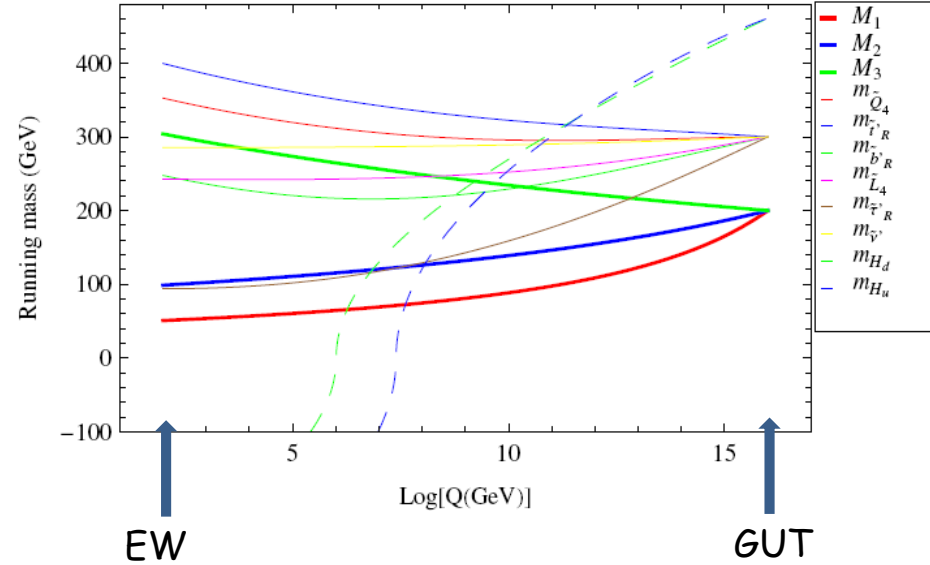


Figure 2: MSSM4 : $A_0 = 100$, $m_0 = 300$, $m_{1/2} = 200$, $\tan\beta = 1.8$

Ayar bağlaşımı ve RGE Çözümleri

3. Ve 4. Aile Sfermiyonları için Kütle Değerleri

MSSM(SuSpect)	MSSM(Mathematica)
$m_{\tilde{\tau}_R} = 310 \text{ GeV}$	$m_{\tilde{\tau}_R} = 300 \text{ GeV}$
$m_{\tilde{\tau}_L} = 330 \text{ GeV}$	$m_{\tilde{\tau}_L} = 325 \text{ GeV}$
$m_{\tilde{b}_R} = 517 \text{ GeV}$	$m_{\tilde{b}_R} = 530 \text{ GeV}$
$m_{\tilde{t}_R} = 346 \text{ GeV}$	$m_{\tilde{t}_R} = 380 \text{ GeV}$
$m_{\tilde{Q}_{3L}} = 458 \text{ GeV}$	$m_{\tilde{Q}_{3L}} = 480 \text{ GeV}$

MSSM4(Mathematica)
$m_{\tilde{\tau}'_R} = 100 \text{ GeV}$
$m_{\tilde{\tau}'_L} = 240 \text{ GeV}$
$m_{\tilde{b}'_R} = 250 \text{ GeV}$
$m_{\tilde{t}'_R} = 400 \text{ GeV}$
$m_{\tilde{Q}_{4L}} = 360 \text{ GeV}$
$m_{\tilde{\nu}'_l} = 290 \text{ GeV}$

$$A_0 = 100, m_0 = 300, m_{1/2} = 200, \tan\beta = 1.8, \text{sign}(\mu) = 1$$

Sonuç

- Kütle spektrumunu elde edebilmek için Yukawaların bilinmesi gerekmektedir, mevcut deney sınırlamalarıyla Yukawalar 1'den büyük olur. Yukawaların pertürbatifliği ile ilgili bazı çalışmalar vardır.
 - R. M. Godbole, S.K. Vempati and A. Wingerter, JHEP 1003,023(2010);
 - Z. Murdock, S. Nandi and Z. Tavartkiladze, Phys. Lett. B 668, 303-307(2008)
- Vakum beklenen değerinin (vev) skala bağımlılığı veya daha fazla sayıda Higgs'in olduğu modeller düşünülebilir.
- MSSM4 durumu $\tan\beta$ üzerine sınırlama getirmektedir (bu parametre seti için $\tan\beta < 2$)