Higgs Properties of the Supersymmetric Grand Unification with the Hosotani Mechanism

柿崎　充（富山大学）

ILC 夏の合宿2014
@鳥取県倉吉市

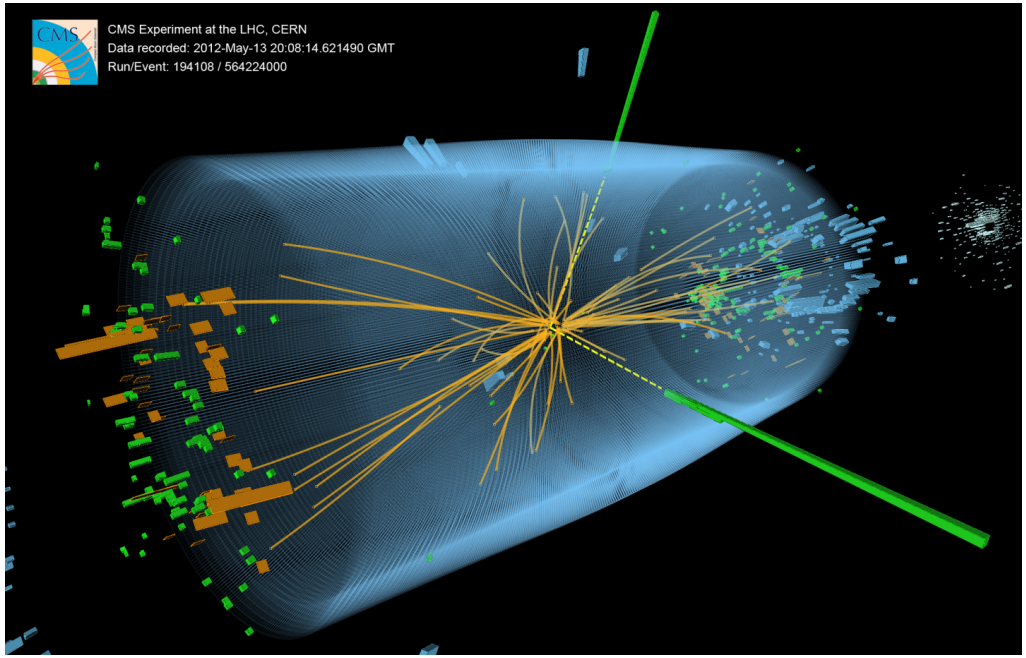
- 共同研究者
  兼村 晋哉 （富山大学）
  谷口 裕幸 （富山大学）
  山下　敏史 （愛知医科大学）
- Physical Review D 89, 075013 (2014) [arXiv:1312.7575 [hep-ph]]

目次

1. 動機
2. 大統一理論と超対称性
3. Supersymmetric Grand Gauge-Higgs Unification (SGGHU)
4. ヒッグスセクターの現象論
5. まとめ

ヒッグス粒子の発見

- 2012年7月4日
  - ヒッグス粒子らしき新粒子の発見 (CERN LHC)



[cds.cern.ch]

- 新粒子の性質
  - 質量:125GeV
  - スピン:0　パリティ:+1
  - 他の粒子との相互作用は標準模型(SM)の予言と誤差の範囲で一致

➡ SMヒッグス粒子と見なして無矛盾:有効理論としてSMは完成

これは終わりではなく新しい時代の幕開け

標準模型を超えて

- 標準模型と矛盾する現象
  - ニュートリノ振動現象
  - 暗黒物質の存在
  - 消えた反物質
  - インフレーション
- 標準模型の理論的問題
  - 電荷の量子化
  - 階層性問題

→ 新しい素粒子理論が必要

- ヒッグス粒子＝新しい物理理論への窓

- SM-like ヒッグス ≠ SM ヒッグス
- 発見された粒子はSM ヒッグスか？
  新物理模型のSM-like ヒッグスか？
- ヒッグス粒子の性質を調べることで
  新物理理論の手がかりが得られる

→ ILCでの精密測定が必要

今日のお話

- 通常の大統一理論(GUT): $\Lambda_{GUT} \sim 10^{16} GeV$
  - GUT 粒子はデカップル ➡ GUT の検証は難しい
  - テラスケール粒子の質量・相互作用から間接的に探るしかない
- Supersymmetric Grand Gauge-Higgs Unification (SGGHU):

  （細谷機構 ➡ 二重項-三重項スプリッティング）

  [Hosotani (1983)] [Yamashita,PRD84,115016(2011)]
  - 予言：ゲージボソンと同じ量子数を持った軽い超場の存在

    カラー8重項超場: $O(8,1,0)$

    SU(2) 3重項超場: $\Delta(1,3,0)$

    SU(1) 1重項超場: $S(1,1,0)$

    } ヒッグスセクターが拡張される

ヒッグスセクターを調べることで大統一理論を検証できる

目次

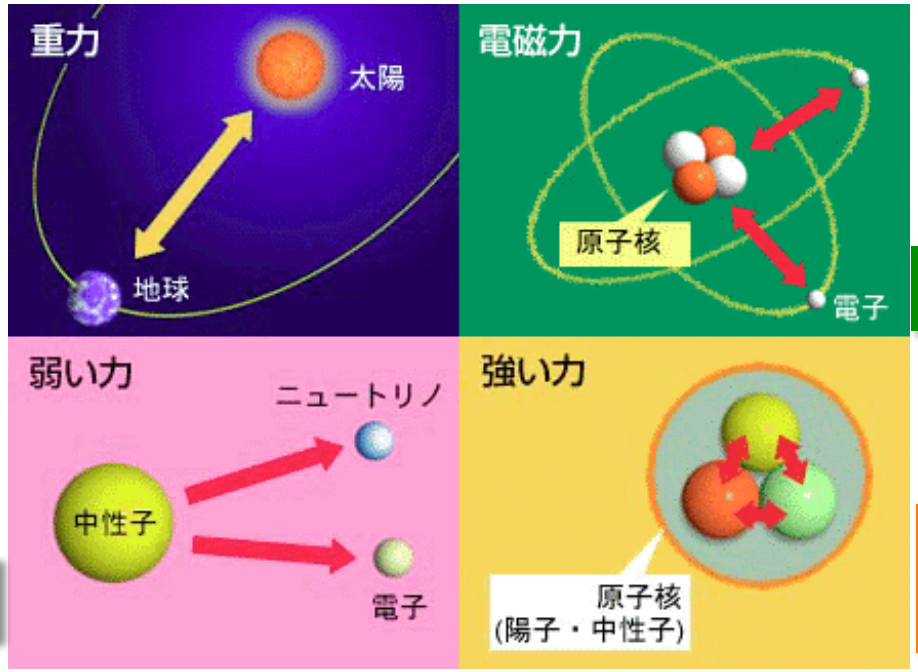
1. 動機
2. 大統一理論と超対称性
3. Supersymmetric Grand Gauge-Higgs Unification (SGGHU)
4. ヒッグスセクターの現象論
5. まとめ

力の物理法則

- 力はたった4種類

物体の落下
地球の自転

重力子の交換



化学反応
磁力

光子の交換

原子核の崩壊
ニュートリノの散乱

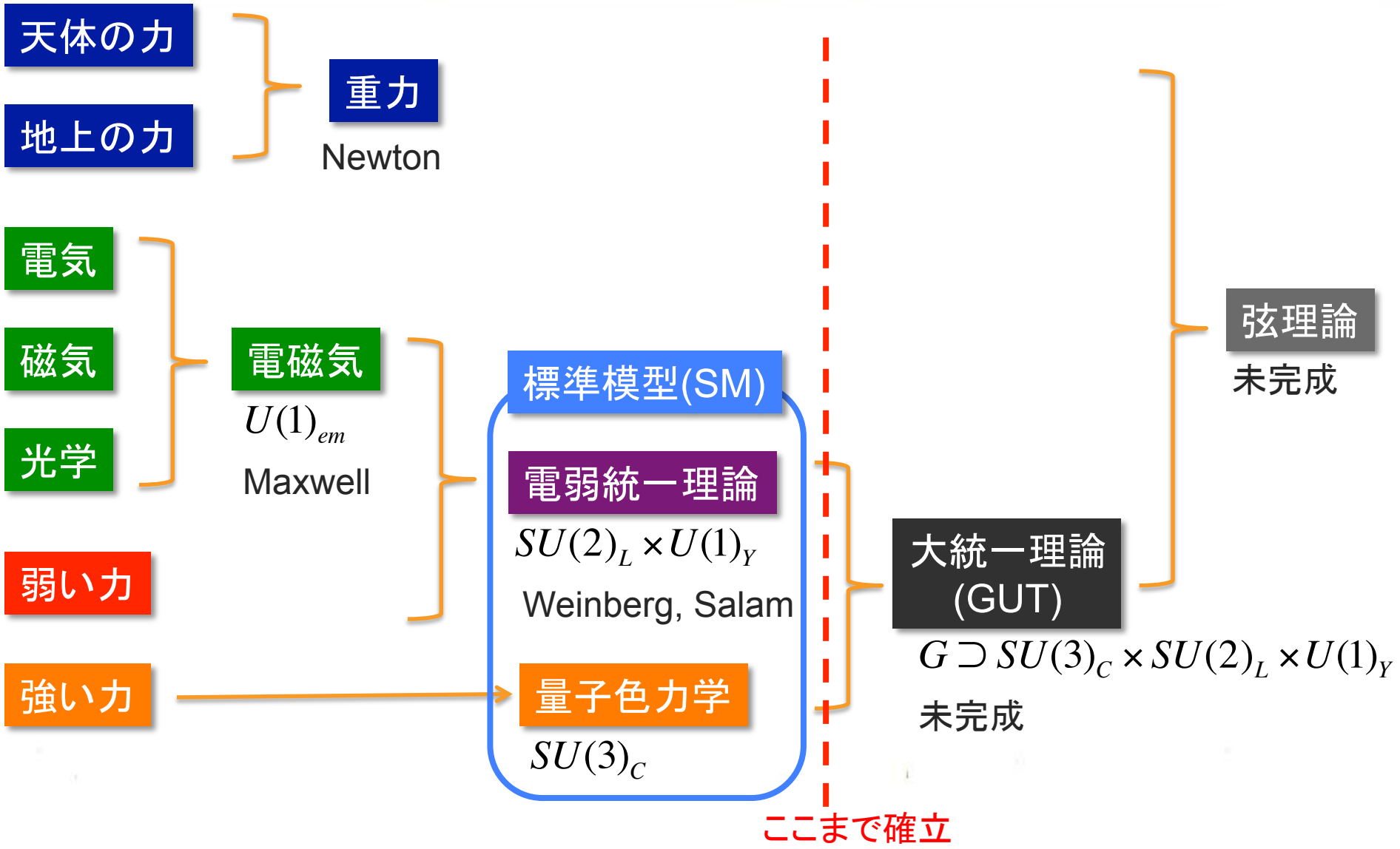
W,Z粒子の交換

原子核の形成
陽子の形成

グルーオンの交換

力の粒子(ゲージ粒子)を交換することで力が働く

力の統一


天体の力
地上の力
重力
Newton
電気
磁気
光学
電磁気
$U(1)_{em}$
Maxwell
弱い力
強い力
標準模型(SM)
電弱統一理論
$SU(2)_L \times U(1)_Y$
Weinberg, Salam
量子色力学
$SU(3)_C$
大統一理論
(GUT)
$G \supset SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
未完成
弦理論
未完成
ここまで確立

大統一理論 (Grand Unified Theory, GUT)

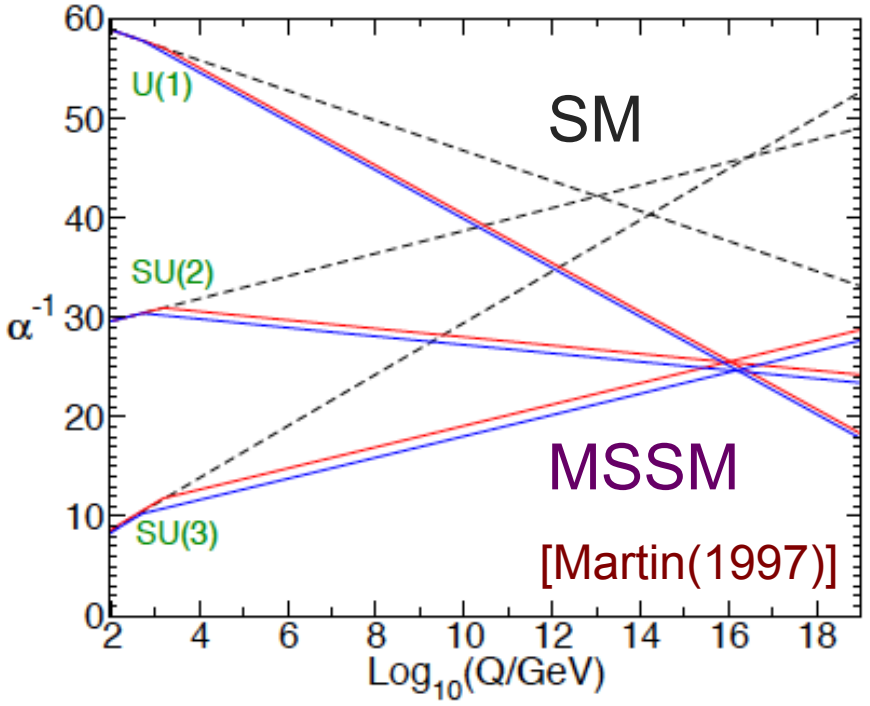
- クォーク・レプトンの表現

例： $G = SU(5)$ ← 単純群

$(Q, U^C, E^C) = 10 \quad (D^C, L) = 5^*$

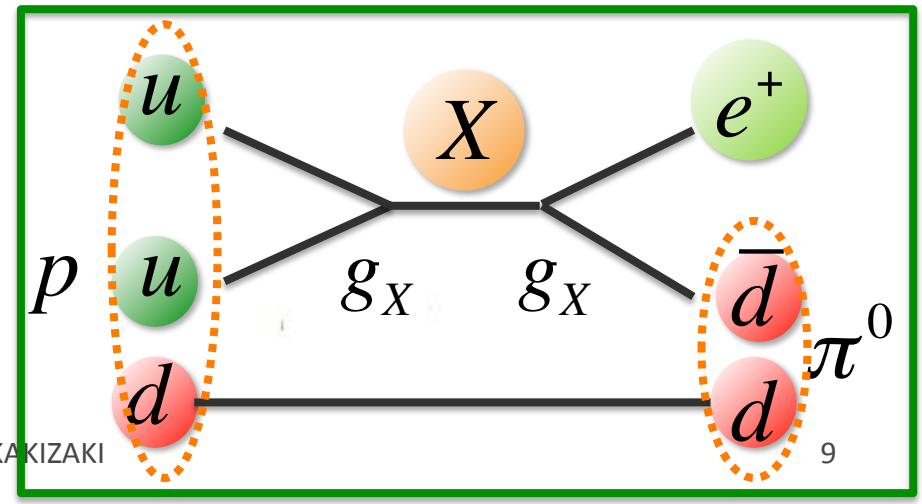
➡ 電荷の量子化

- ゲージ結合定数の
エネルギースケール依存性



- 新しいゲージボソンが導入
  - X-ボソン： $\begin{pmatrix} G & \bar{X} \\ X & W \end{pmatrix} \oplus B = 24$

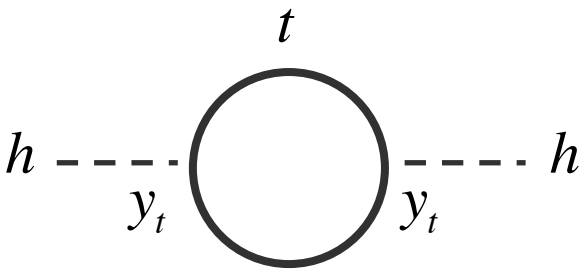
➡ 陽子崩壊（未発見）



階層性問題

- 標準模型のヒッグスボソンの質量:

$$m_h^2 = m_{h,0}^2 + \Delta m_h^2$$



スカラー粒子質量への輻射補正は2次発散:

$$\Delta m_h^2 = -\frac{y_t^2}{8\pi^2}\Lambda^2 + \cdots$$

Λ : 標準模型のカットオフスケール

- 標準模型を量子重力のスケール($\Lambda = 10^{18} GeV$)まで適用すると

$$m_h^2 = m_{h,0}^2 + \Delta m_h^2$$

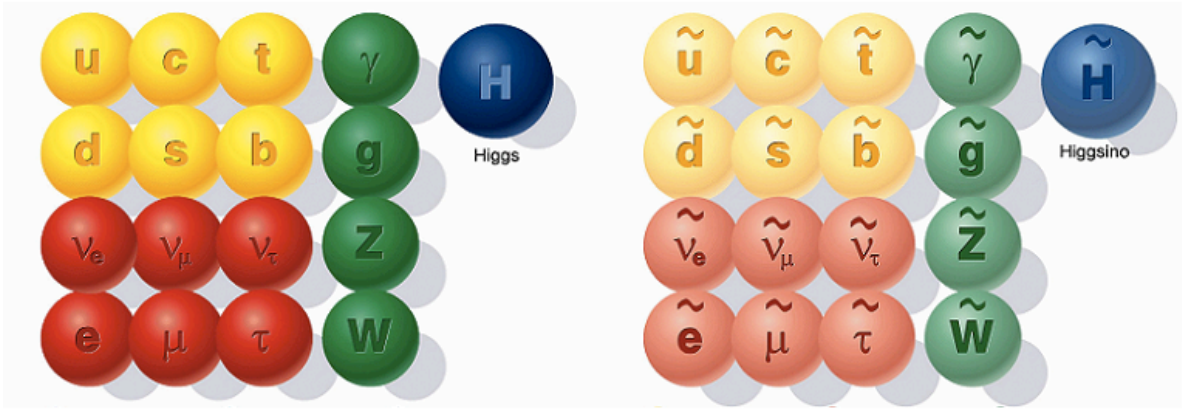
$(125GeV)^2$ $O(10^{34})GeV^2$ $O(10^{34})GeV^2$

  - 10^{-30} の精度でパラメータ間の微調整が必要: 階層性問題

超対称性 (Supersymmetry, SUSY)

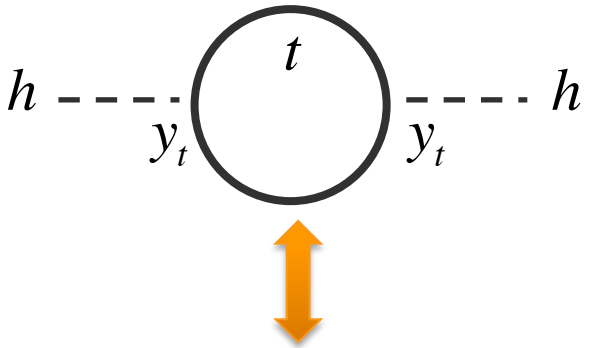
- 超対称性： ボソン ⟷ フェルミオン

標準模型の粒子 ⟷ 超対称粒子

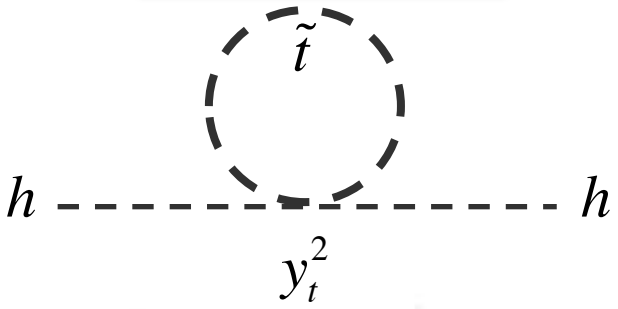


[www.physics.gla.ac.uk]

トップループ



ストップループ



⟹ 輻射補正の2次発散が相殺：

ヒッグス質量が輻射補正に対して安定

超対称模型のヒッグスセクター

- ヒッグス二重項 ⟷ ヒグシーノ二重項（カイラルフェルミオン）

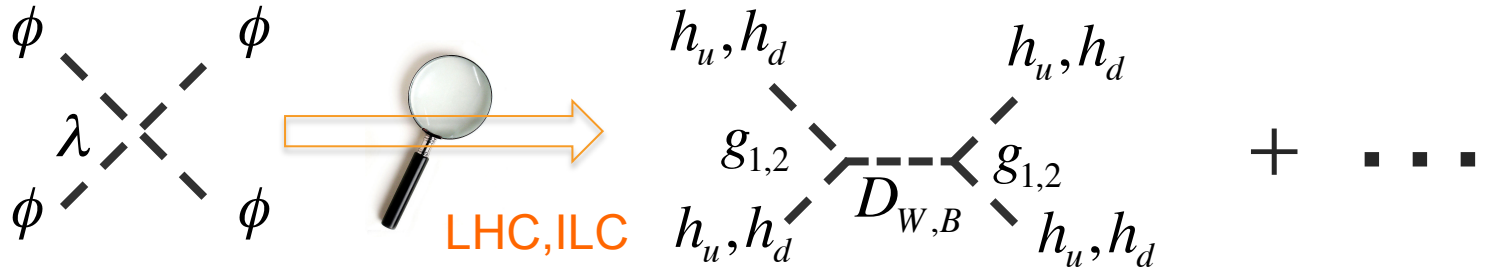
  ➡ 量子異常を相殺するため、ヒッグス二重項は最低2個必要

- ヒッグスカイラルスーパーフィールド：
  - $H_u = (h_u, \tilde{h}_u)$ （アップに質量）
  - $H_d = (h_d, \tilde{h}_d)$ （ダウン、レプトンに質量）
  - 一重項ヒッグス S 、三重項ヒッグス Δ など

  最小超対称標準模型 (MSSM)

  拡張ヒッグス模型

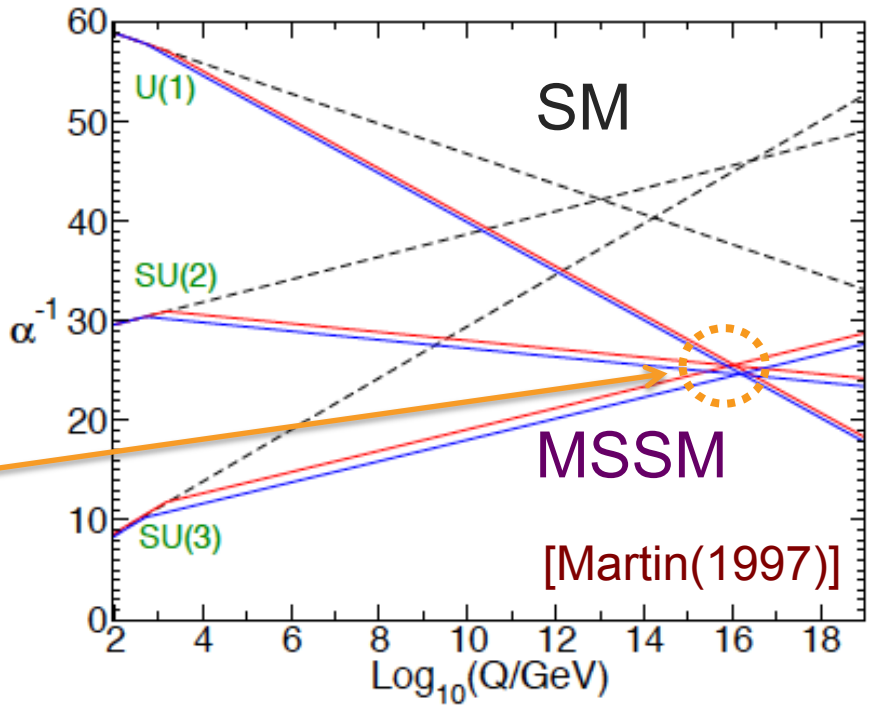
- ヒッグス4点自己相互作用は常に他の結合定数で決まる：



特に超対称理論においてはヒッグスは常に新素粒子模型への窓

超対称大統一理論

- 超対称大統一理論
  = 超対称性×大統一理論
- ゲージ結合定数のエネルギースケール依存性:
  - 超対称粒子の導入
    ➡ ゲージ結合が一致
  - 典型的なGUTスケール:
    $\Lambda_{GUT} \sim 10^{16} GeV$



- カラーを持ったヒッグス三重項 $(H_T, \bar{H}_T)$ が存在:
  - $(H_u, H_T) = 5 \qquad (H_d, \bar{H}_T) = 5^*$
  - $H_T, \bar{H}_T$ 媒介による陽子崩壊を防ぐには:

    $m_{H_T} \approx \Lambda_{GUT} >> m_H \approx 100 GeV$: 二重項-三重項スプリッティング問題

目次

1. 動機
2. 大統一理論と超対称性
3. Supersymmetric Grand Gauge-Higgs Unification (SGGHU)
4. ヒッグスセクターの現象論
5. まとめ

Supersymmetric Grand Gauge-Higgs Unification (SGGHU)

- 細谷機構 [Hosotani (1983)]
  - ゲージ場の余剰次元成分の真空期待値: $\left\langle A_5^a \right\rangle \neq 0$ ← 随伴表現のヒッグス
    - ➡ 対称性の破れ
- Grand-Gauge Higgs Unification [Kojima,Takenaga, Yamashita(2011)]
  - $\left\langle A_5^a \right\rangle \neq 0$ ➡ 大統一対称性の破れ
    - ⇣ 超対称化
- Supersymmetric Grand Gauge-Higgs Unification (SGGHU): [Yamashita,(2011)]
  - $A_5^{SU(3),SU(2),U(1)}$ を含む随伴表現のカイラル超場がTeVスケールに出現:
    - -) カラー8重項: O ← 輻射補正の効果によりかなり重い
    - -) SU(2) 3重項: Δ
    - -) SU(2) 1重項: S
  - ➡ 低エネルギー有効理論 = MSSM + Δ + S

SGGHUのヒッグスセクター

- SGGHUのヒッグスセクターの粒子

	$SU(3)_C$	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$
H_u	1	2	$+1/2$
H_d	1	2	$-1/2$
Δ	1	3	0
S	1	1	0

EWSB →

4 CP-even スカラー
3 CP-odd スカラー + 1 NG ボソン
3 荷電 スカラー + 1 NG ボソン

- SGGHU のヒッグスポテンシャル:

$$W = \mu H_u \cdot H_d + \mu_\Delta \mathrm{tr}(\Delta^2) + \frac{\mu_S}{2} S^2 + \lambda_\Delta H_u \cdot \Delta H_d + \lambda_S S H_u \cdot H_d$$

軽いヒッグスボソンの
性質が変更を受ける

$$\begin{aligned} V_{\rm soft} &= \tilde{m}_{H_d}^2 |H_d|^2 + \tilde{m}_{H_u}^2 |H_u|^2 + 2\tilde{m}_\Delta^2 \mathrm{tr}(\Delta^\dagger \Delta) + \tilde{m}_S^2 |S|^2 \\ &+ \Big[B\mu H_u \cdot H_d + \xi S + B_\Delta \mu_\Delta \mathrm{tr}(\Delta^2) + \frac{1}{2} B_S \mu_S S^2 \\ &+ \lambda_\Delta A_\Delta H_u \cdot \Delta H_d + \lambda_S A_S S H_u \cdot H_d + \mathrm{h.c.} \Big] \end{aligned}$$

- SGGHU の特徴:

Δ, S ⊃ ゲージボソンの5次元目の成分

→
- Δ, S の3点相互作用がない
- $\lambda_S, \lambda_\Delta$ はゲージ結合定数と関係づいている

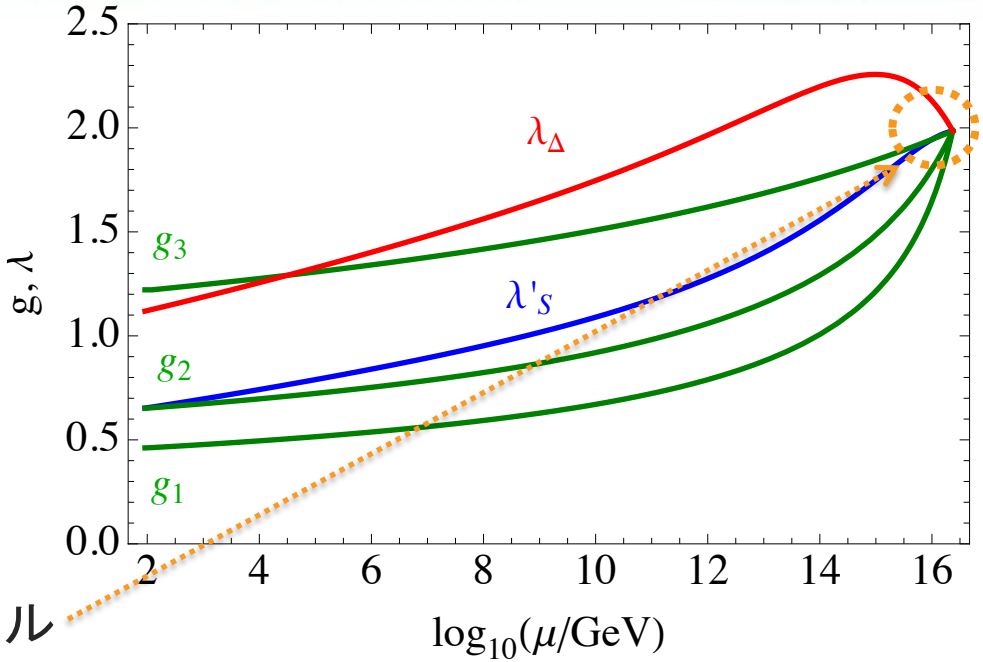
ヒッグス力の起源:ゲージダイナミクス

くりこみ群方程式の解析

- カイラル超場の導入

$$2\times L(1,2,-1/2)+U^C(\bar{3},1,-2/3)$$
$$+E^C(1,1,1) \quad @\ \text{TeV スケール}$$

➡ ゲージ結合定数の統一が回復



- パラメータの発展
  - $\lambda_\Delta = \lambda'_S = g_{1,2,3} \cong 2$ @ GUT スケール

➡ $\lambda_\Delta = 1.1,\ \lambda_S = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{5}}\lambda'_S = 0.25$ @ TeV スケール

ヒッグスの性質に対する予言力が高い

➡ TeV スケールでのソフトパラメータは典型的に $O(1)$ TeV

調整することでより小さなソフトパラメータも得られる

目次

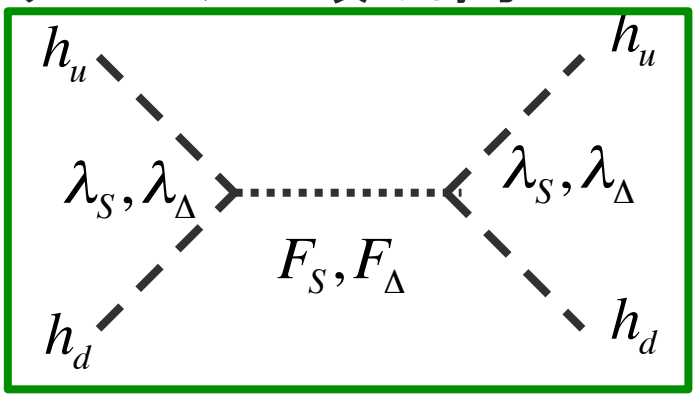
1. 動機
2. 大統一理論と超対称性
3. Supersymmetric Grand Gauge-Higgs Unification (SGGHU)
4. ヒッグスセクターの現象論
5. まとめ

SGGHU におけるSM-like ヒッグスの質量

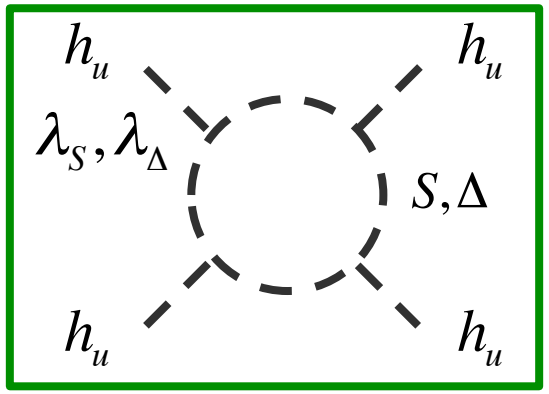
- $\tilde{m}_\Delta, \tilde{m}_S$ が大きいとき:

$$m_h^2 \simeq m_Z^2 \cos^2\beta + \frac{3m_t^4}{2\pi^2 v^2}\left(\ln\frac{m_{\tilde{t}}^2}{m_t^2} + \frac{X_t^2}{m_{\tilde{t}}^2}\left(1 - \frac{X_t^2}{12m_{\tilde{t}}^2}\right)\right) + \frac{1}{8}\lambda_\Delta^2 v^2 \sin^2 2\beta + \frac{1}{2}\lambda_S^2 v^2 \sin^2 2\beta$$

- ツリーレベル F-項の寄与:



- 1-ループレベルの寄与:



- 3重項、1重項ヒッグスのF-項からの寄与により、ヒッグス質量が持ち上がる（ $\tan\beta$ が小さいとき）
  - c.f.: Next-to-MSSM

SM-like ヒッグスボソンの結合定数の指紋照合(I)

- SM-like ヒッグスボソンとSM粒子の結合定数の精密測定で新粒子の存在を間接的に探れる

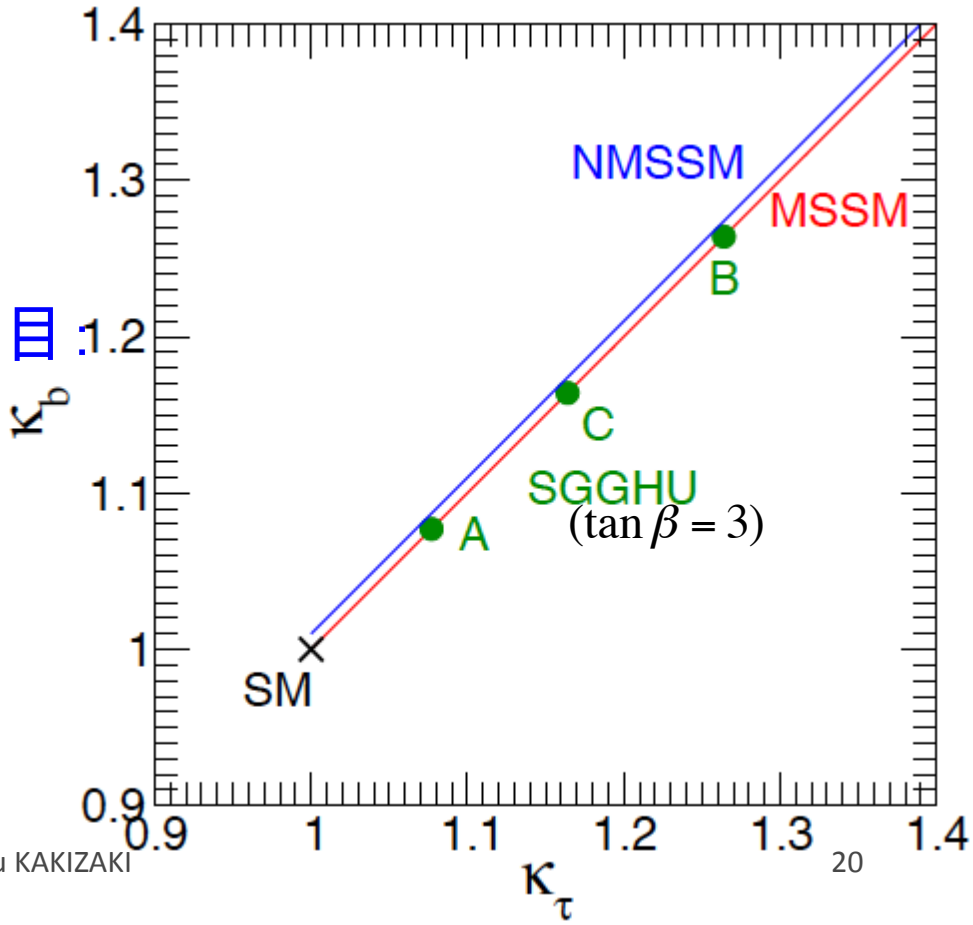
- ヒッグスボソンの結合定数 g_{hXX} のスケールファクター:

$$\kappa_X = \frac{g_{hXX}}{g_{hXX}|_{\rm SM}}$$

- 3 つのベンチマークポイントに着目:

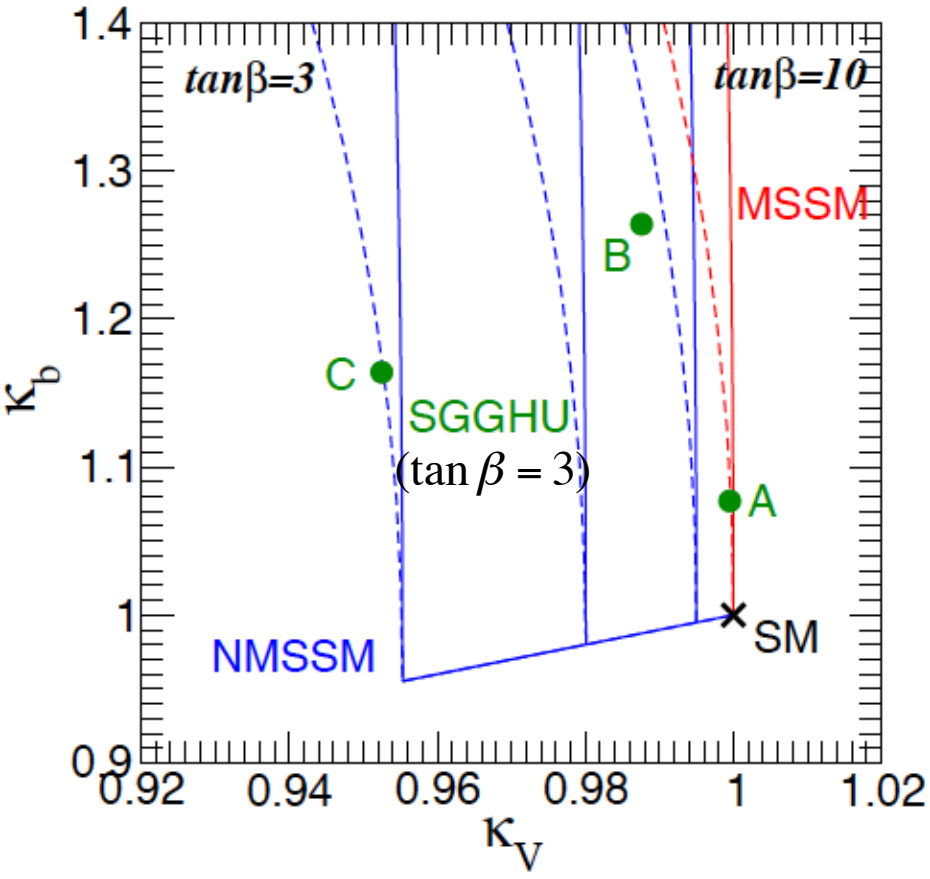
(A) SM-like ヒッグスボソンのみが軽いケース
(B) MSSM-like ヒッグスボソンらが軽いケース
(C) 随伴表現のヒッグスも κ_X に影響を与えるケース

- $\kappa_\tau - \kappa_b$



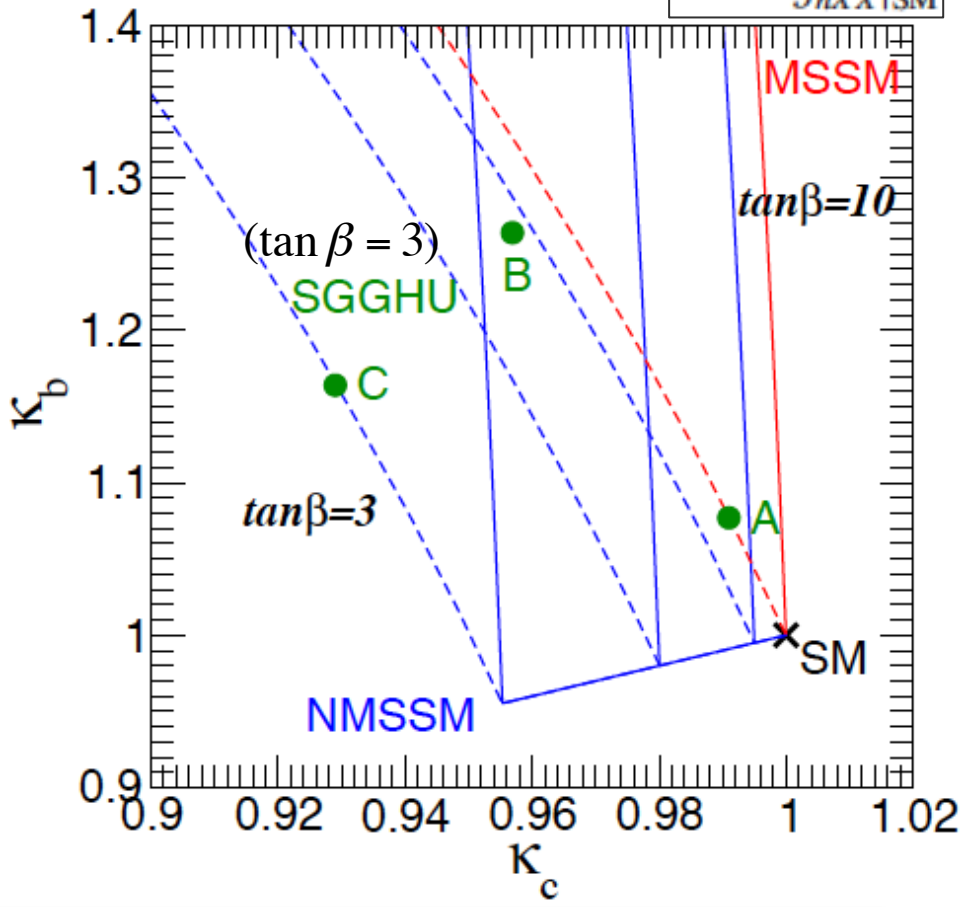
SM-like ヒッグスボソンの結合定数の指紋照合(II)

- $\kappa_V - \kappa_b$



- $\kappa_c - \kappa_b$

$$\kappa_X = \frac{g_{hXX}}{g_{hXX}|_{SM}}$$

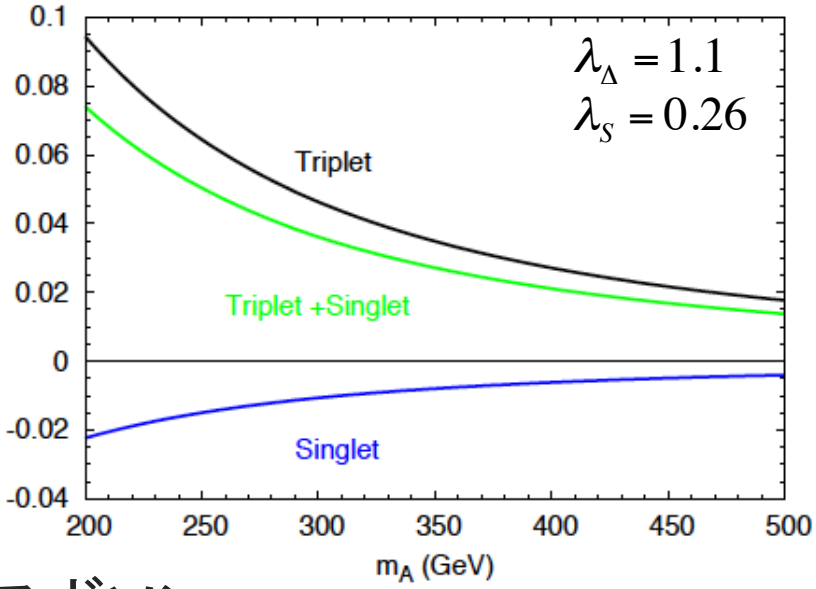


ILC のヒッグス相互作用の精密測定により模型の区別が可能

ヒッグスセクターの粒子の質量

- $\tilde{m}_\Delta, \tilde{m}_S$ が大きいとき:
  - MSSM-like 荷電ヒッグスボソン:

$$m_{H^\pm}^2 = m_{H^\pm}^2|_{\rm MSSM}(1+\delta_{H^\pm})^2$$
$$\simeq m_A^2 + m_W^2 - \frac{\lambda_S^2}{2}v^2 + \frac{\lambda_\Delta^2}{8}v^2$$



➡ 質量のずれ: $O(1)\% \sim O(10)\%$

  - MSSM-like 重い CP-even ヒッグスボソン:

$$m_H \simeq m_H|_{\rm MSSM} \simeq m_H|_{\rm NMSSM}$$

- $\tilde{m}_\Delta, \tilde{m}_S$ が小さいとき:
  - 3重項・1重項ヒッグスボソンの質量を 500 GeV以下にもできる

ILC はこれらの新粒子を直接探索可

ベンチマークポイントCでの質量

CP-even	CP-odd	Charged
122 GeV	–	–
139 GeV	171 GeV	204 GeV
370 GeV	304 GeV	496 GeV
745 GeV	497 GeV	745 GeV

5. まとめ

- Supersymmetric grand gauge-Higgs unification (SGGHU) は軽いヒッグス3重項・1重項の存在を予言
  - SGGHU 模型におけるSM-like ヒッグスボソンの結合定数、MSSM-like 荷電ヒッグス質量は
    SM や MSSM の場合と比べて $O(1)\% \sim O(10)\%$ ずれる
  - ヒッグス3重項・1重項が軽い場合はILC で直接検証可能

→ LHC、ILC でヒッグスセクターの粒子の性質を
調べることで様々な新素粒子模型を区別できる

- SGGHU はコライダー実験で調べられる GUT の模型の好例

Backup slides

Benchmark Points

- GUT-scale input parameters

Case	$\tan\beta$	$M_{1/2}$	μ_Σ
(A)(B)(C)	3	3600 GeV	−300 GeV

Case	A_0	$\tilde{m}_0^2$	$\tilde{m}_{H_u}^2$	$\tilde{m}_{H_d}^2$	$\tilde{m}_5^2$	$\tilde{m}_{10}^2$	$\tilde{m}_\Sigma^2$
(A)	5500 GeV	$(1000\ \text{GeV})^2$	$(10375\ \text{GeV})^2$	$(8570\ \text{GeV})^2$	$-(6300\ \text{GeV})^2$	$-(2000\ \text{GeV})^2$	$-(570\ \text{GeV})^2$
(B)	1000 GeV	$(1800\ \text{GeV})^2$	$(12604\ \text{GeV})^2$	$(10381.5\ \text{GeV})^2$	$-(7700\ \text{GeV})^2$	$-(1960\ \text{GeV})^2$	$-(670\ \text{GeV})^2$
(C)	8000 GeV	$(3000\ \text{GeV})^2$	$(10605.1\ \text{GeV})^2$	$(8751.4\ \text{GeV})^2$	$-(6418\ \text{GeV})^2$	$-(1638.5\ \text{GeV})^2$	$-(400\ \text{GeV})^2$

- Parameters at the TeV scale

RG evolution

Case	M_1	M_2	M_3	μ_Δ	μ_S
(A)(B)(C)	194 GeV	388 GeV	1360 GeV	−252 GeV	−85.8 GeV

Case	μ	$B\mu$	$\tilde{m}_{u_3}$	$\tilde{m}_{q_3}$	$y_t A_t$
(A)	205 GeV	$41400\ \text{GeV}^2$	3290 GeV	4830 GeV	4030 GeV
(B)	177 GeV	$40800\ \text{GeV}^2$	1730 GeV	4480 GeV	6050 GeV
(C)	174 GeV	$42000\ \text{GeV}^2$	4220 GeV	5550 GeV	2910 GeV

Case	$\tilde{m}_\Delta$	$\tilde{m}_S$	$\lambda_\Delta A_\Delta$	$\lambda'_S A_S$	$B_\Delta \mu_\Delta$	$B_S \mu_S$	m_h
(A)	607 GeV	805 GeV	662 GeV	683 GeV	$92000\ \text{GeV}^2$	$-78700\ \text{GeV}^2$	123 GeV
(B)	784 GeV	612 GeV	1340 GeV	1110 GeV	$30700\ \text{GeV}^2$	$-110000\ \text{GeV}^2$	123 GeV
(C)	521 GeV	216 GeV	284 GeV	446 GeV	$207000\ \text{GeV}^2$	$-33600\ \text{GeV}^2$	122 GeV