

# 軽いSUSYの可能性

横崎 統三 (東北大学)

Refs: Yin, Yokozaki, arXiv:1607.05705 (PLB)

Yanagida, Yin, Yokozaki, arXiv:1608.06618 (JHEP)

Yanagida, Yokozaki, arXiv:1704.00711

(See also, Ibe, Matsumoto, Yanagida, Yokozaki, 2012 (JHEP) )

# アウトライン

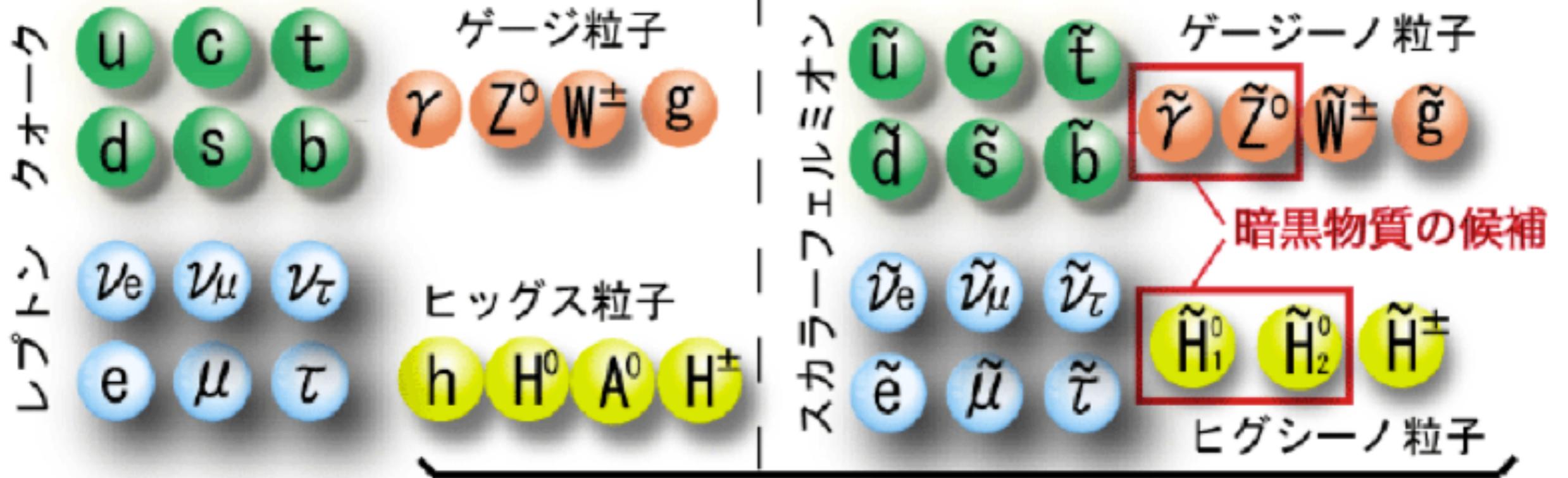
コスモロジーは有利

- イントロダクション
- **Part 1 (グラビティーノが重いシナリオ)**
  - Pure gravity mediation
  - Higgs-Anomaly Mediation
  - 超対称性粒子の質量スペクトラムと湯川結合定数の統一
- **Part 2 (ミュオン $g-2$ をシリアスに捉えた場合)**
  - Gauge Mediationでのミュオン $g-2$
  - もっとも有りそうな質量スペクトラム
- **結論**

# 最小超对称性標準模型 (MSSM)

## 通常の素粒子

## 超対称性粒子



暗黒物質の候補

ヒッグス、超対称性粒子は未発見

+

グラビトン

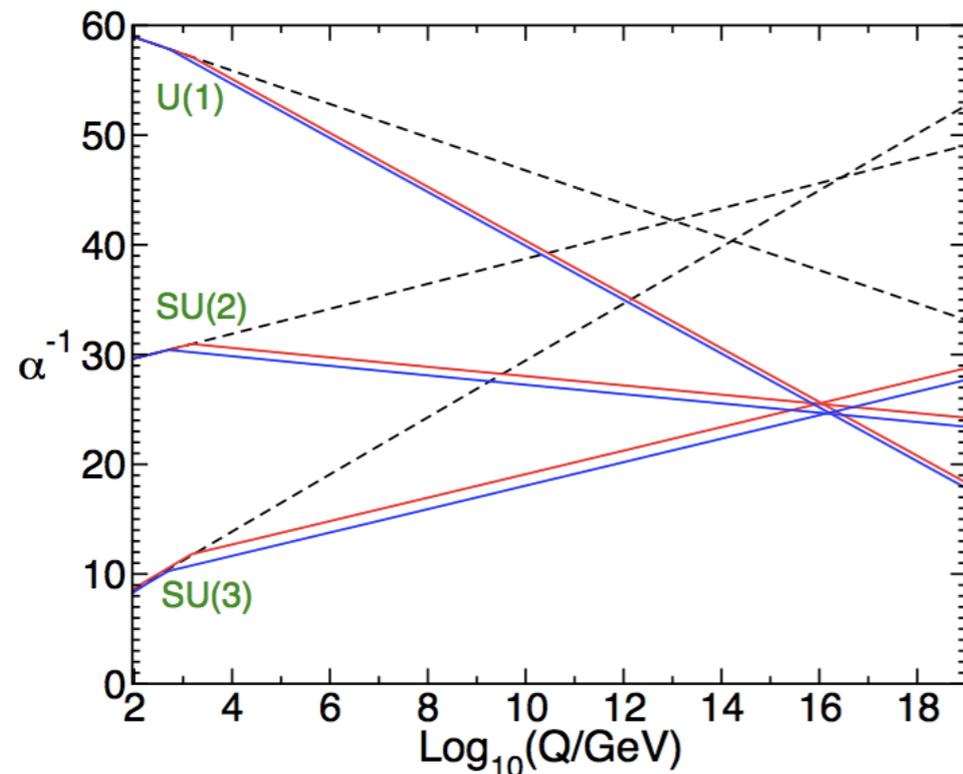


グラビティーノ



暗黒物質の候補

# Why SUSY

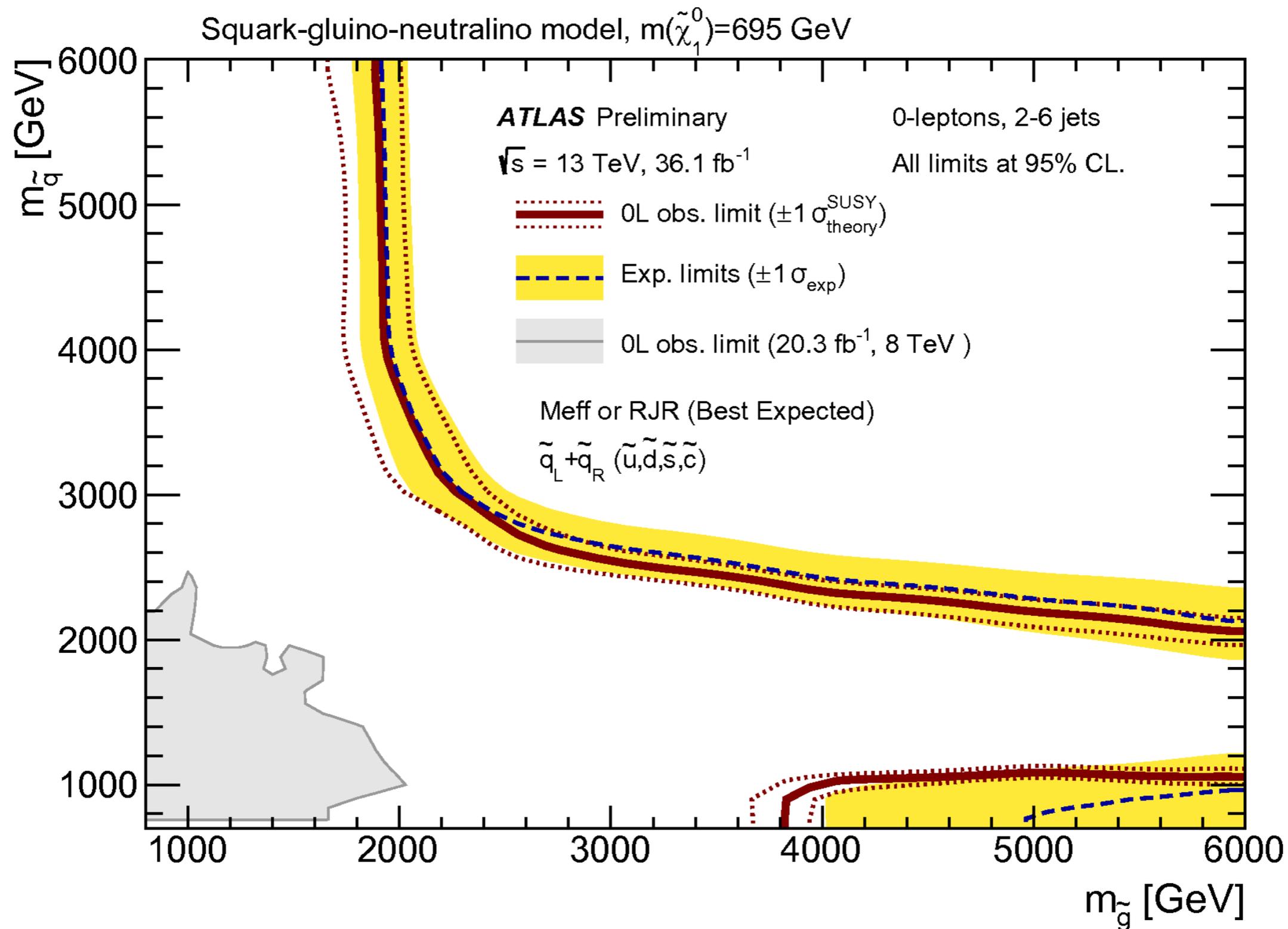


[from SUSY primer, S. Martin]

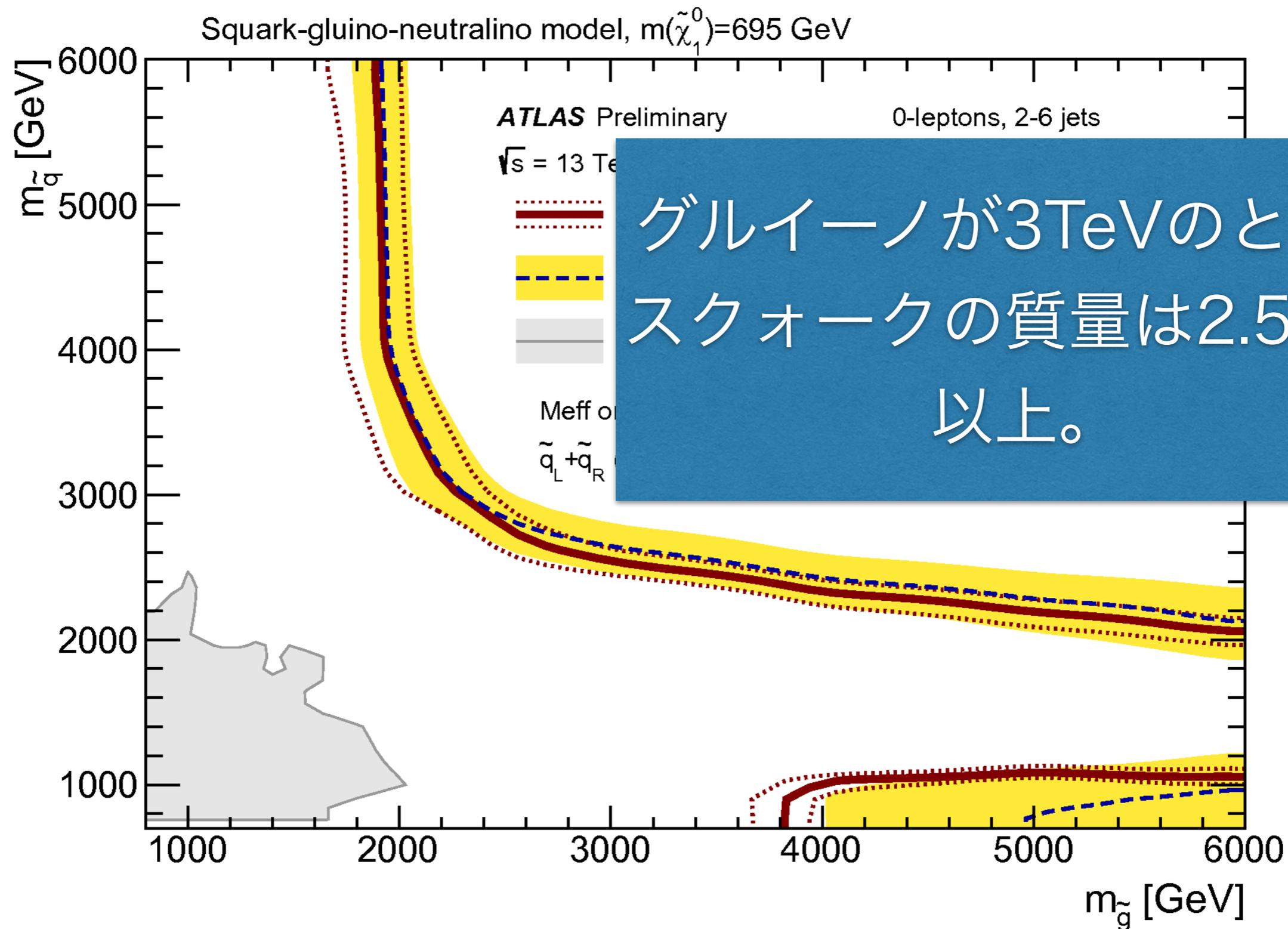
- Gauge coupling unification
  - 大統一理論(GUT)を示唆
  - 電荷の量子化
  - 物質場の統一

- スカラー場の2次発散を消去  
(ヒッグス, PQ-breaking scalar, インフラトン)
- 暗黒物質の候補を含む (ニュートラリーノ, グラビティーノ)

# Bound on colored SUSY particles



# Bound on colored SUSY particles



# Higgs mass

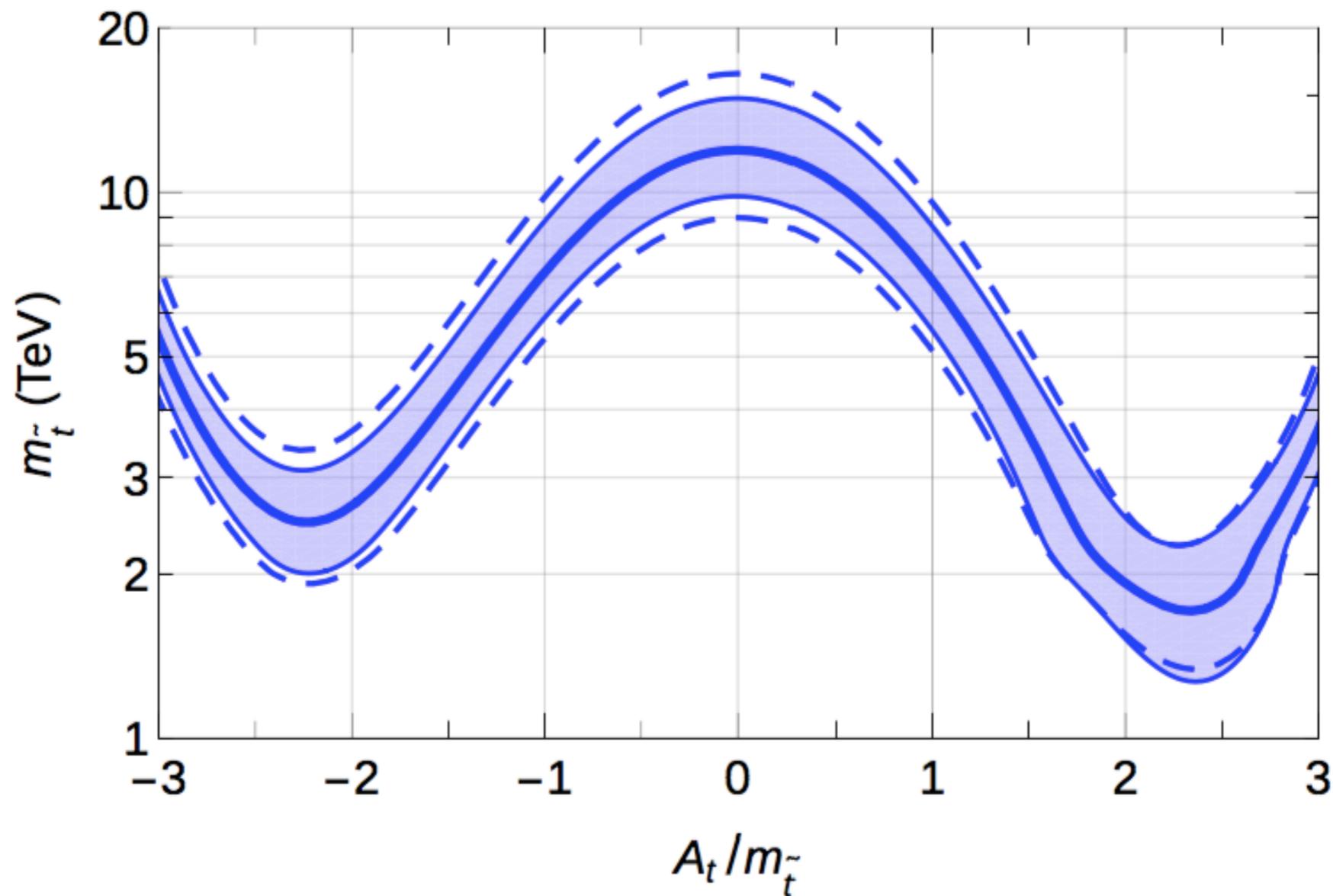


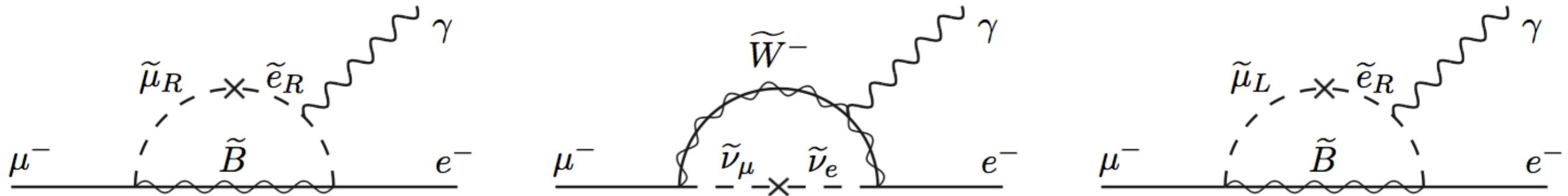
Figure 5: Allowed values of the OS stop mass reproducing  $m_h = 125 \text{ GeV}$  as a function of the stop mixing, with  $\tan\beta = 20$ ,  $\mu = 300 \text{ GeV}$  and all the other sparticles at  $2 \text{ TeV}$ . The band reproduce the theoretical uncertainties while the dashed line the  $2\sigma$  experimental uncertainty from the top mass. The wiggle around the positive maximal mixing point is due to the physical threshold when  $m_{\tilde{t}}$  crosses  $M_3 + m_t$ .

[SUSYHD: Vega, Villadoro, 2015]

[Okada, Yamaguchi, Yanagida, 1991 ...]

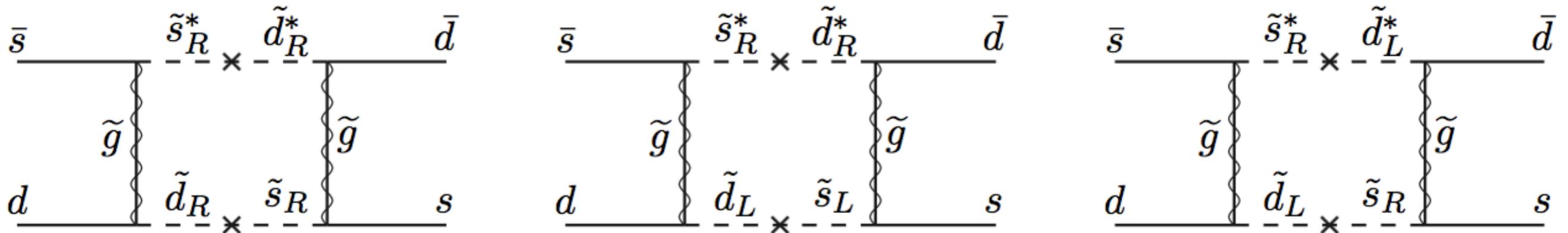
# Flavor problem

$\mu \rightarrow e \gamma$



世代間のMixingが $O(1)$ ならば、スレプトンの質量は10-50 TeV以上。

CPV in Kメソンmixing

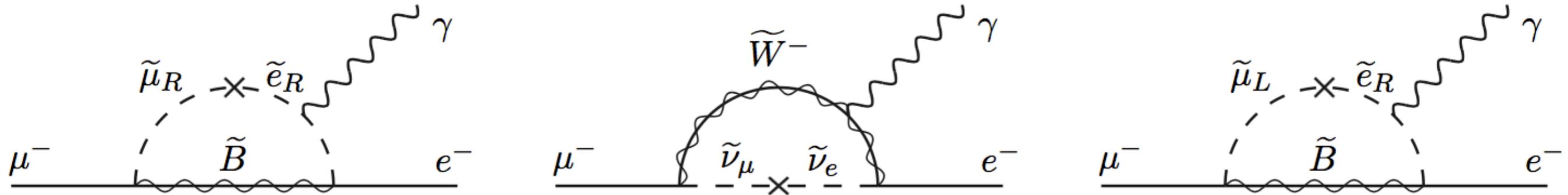


スクォークの質量は~1000 TeV必要。

Figs. from "A Supersymmetry Primer"

# Flavor problem

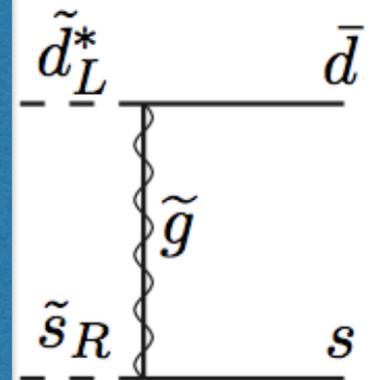
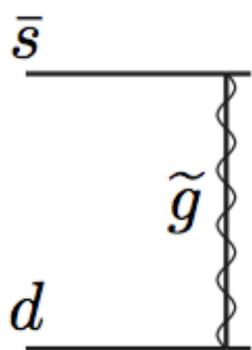
$\mu \rightarrow e \gamma$



世代間のMixingが $O(1)$ ならば、スレプトンの質量は10-50 TeV以上。

CPV in

この状況でも、フレーバーの制限は非常に重要。フレーバー問題を起こさないモデルを考える必要がある。



スクォークの質量は~1000 TeV必要。

Figs. from "A Supersymmetry Primer"

# フレーバー問題の解

グラビティーノとスカラーを重くする。~100-1000 TeV

軽いグラビティーノ (<1 GeV) とフレーバーを破らない Mediation

Kahler potential は一般的

Pure gravity mediation  
(最もシンプル)

Gauge mediation

ユニバーサルなスカラー質量

Tree-level ではスカラーは質量ゼロ

Kahler potential は特別な形

Minimal Kahler potential

Sequestered Kahler potential  
No scale supergravity  
(例えば余剰次元のセットアップ)

# フレーバー問題の解

★  
★  
重力ティーンとスカラーを重くする。~100-1000 TeV

★  
★  
軽い重力ティーン (<1 GeV) とフレーバーを破らない Mediation

Kahler potential は一般的

★  
ユニバーサルなスカラー質量

★  
Tree-level ではスカラーは質量ゼロ

Kahler potential は特別な形

Pure gravity mediation  
(最もシンプル)

Gauge mediation

Minimal Kahler potential

Sequestered Kahler potential  
No scale supergravity  
(例えば余剰次元のセットアップ)

# Pure gravity mediation

- スカラーとグラビティーノは $\sim 100\text{TeV}$ 。125GeVヒッグスともコンシステント。
- ゲージノ質量は $O(1)\text{TeV}$ 。アノマリーメディエーションから one-loop levelで。
- ウィーノが一番軽い超対称性粒子(LSP)で暗黒物質の候補。

$$\begin{array}{ccc} \text{ビーノ} & \text{ウィーノ} & \text{グルイーノ} \\ M_1 \simeq \frac{33}{5} \frac{g_1^2}{16\pi^2} m_{3/2}, & M_2 \simeq \frac{g_2^2}{16\pi^2} m_{3/2}, & M_3 \simeq -3 \frac{g_3^2}{16\pi^2} m_{3/2}, \\ & & + \text{NLO corrections} \end{array}$$

[Ibe, Yanagida, 2011; Ibe, Matsumoto, Yanagida, 2012] [Hall, Nomura, Shirai, 2012]

Refs for Anomaly mediation:

[Giudice, Luty, Murayama, Rattazzi; Randall, Sundrum, 1999]

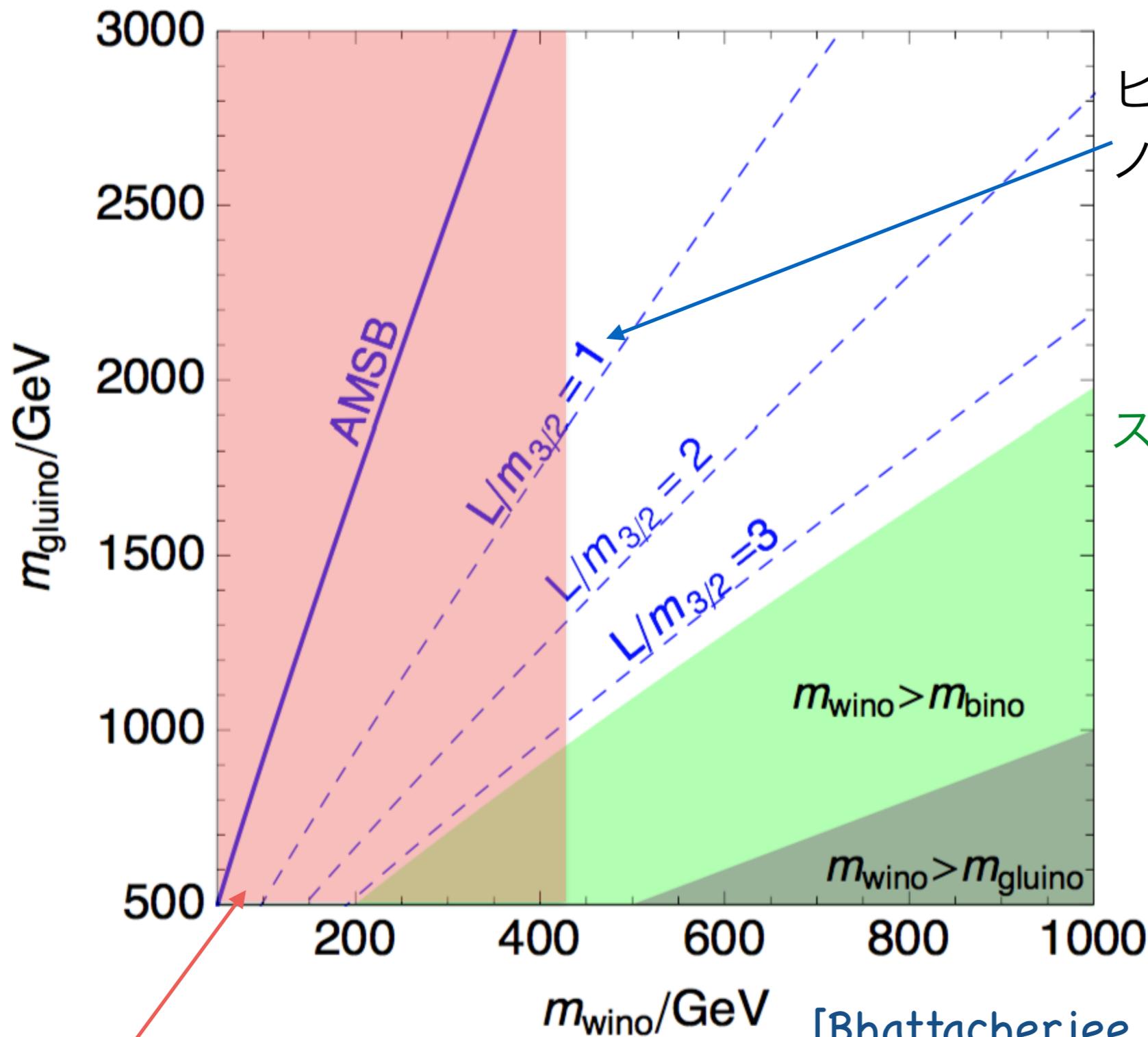
# Pure gravity mediation

- このシナリオは宇宙論的にも望ましい。
- グラビティーノが重いので、グラビティーノ問題が大幅にリラックス。
- Tree-levelでゲージノに質量を与えるポロニー場がないので、ポロニー問題がない。

[Ibe, Yanagida, 2011; Ibe, Matsumoto, Yanagida, 2012] [Hall, Nomura, Shirai, 2012]

Refs for Anomaly mediation:

[Giudice, Luty, Murayama, Rattazzi; Randall, Sundrum, 1999]



ヒッグス・ヒッグシー  
ノの量子補正の大きさ

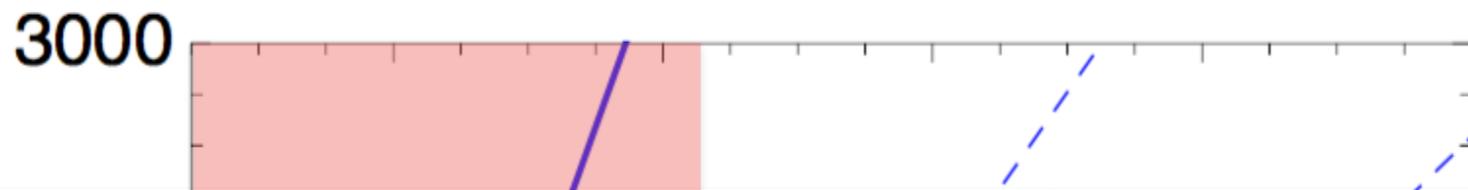
スカラーは重すぎて生  
成されない。

LHC Wino searchで排除  
( $< 430\text{GeV}$ )

[Bhattacharjee, Feldstein, Ibe,  
Matsumoto, Yanagida, 2012]

NLO correctionsを含めると図よりグルイーノの質量が少し下がるかも (~20%)。

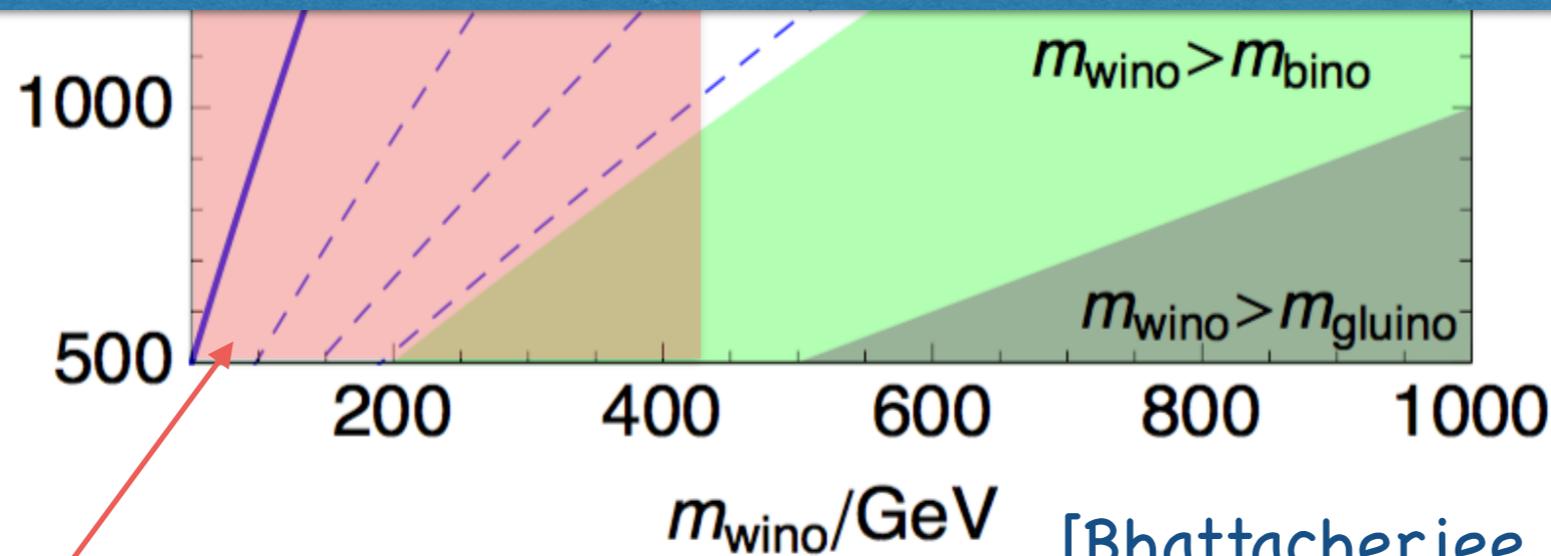
[Gherghetta, Giudice, Wells, 1999]



ヒッグス・ヒッグシー  
大きさ

ヒッグス・ヒッグシーの量子補正が大きければ、グルイーノが見える！

ぎて生



[Bhattacharjee, Feldstein, Ibe, Matsumoto, Yanagida, 2012]

LHC Wino searchで排除 (< 430GeV)

NLO correctionsを含めると図よりグルイーノの質量が少し下がるかも (~20%)。

[Gherghetta, Giudice, Wells, 1999]

3000



ヒッグス・ヒッグシー

大きさ

ヒッグス・ヒッグシーの量子補正が大きければ、グルイーノが見える！

ぎて生

1000



$m_{\text{wino}} > m_{\text{bino}}$

スクォークは見えないのか？見えるような理論にモチベーションがあるのか。

LH

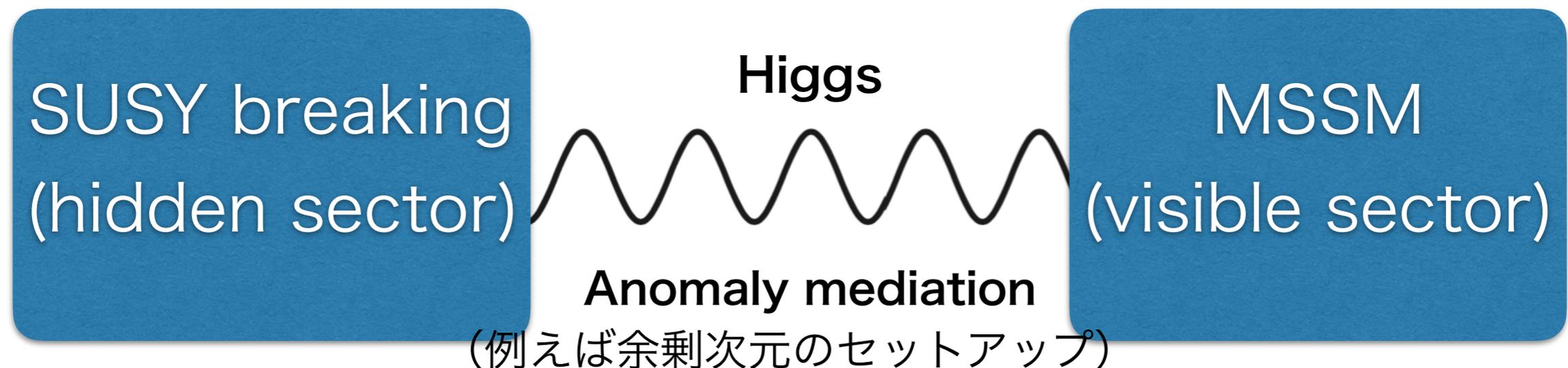
NLC

%)。



# Higgs-Anomaly mediation

- ヒッグス場のみがSUSY breaking場と直接カップルしているシナリオは非常に興味深い (グラビティーノが $\sim 100\text{TeV}$ であっても)。
- スクォークがLHCで発見され、Yukawa couplingが統一する。
- スクォーク・スレプトン・ゲージノ質量はアノマリーメディエーションとヒッグス場からの量子補正で生じる。
- したがって、SUSYのフレーバー問題がない。
- このシナリオもウィーノが暗黒物質の候補。



# Setup

$$K = -3M_P^2 \ln \left[ 1 - \frac{f(Z, Z^\dagger) + \phi_i^\dagger \phi_i + \Delta K}{3M_P^2} \right],$$

SUSY breaking field

(quark, lepton, Higgs)

$$\Delta K = c_Z \frac{|Z|^2}{M_P^2} (|H_u|^2 + |H_d|^2),$$

$c_Z > 0$

# Setup

$$K = -3M_P^2 \ln \left[ 1 - \frac{f(Z, Z^\dagger) + \phi_i^\dagger \phi_i}{3M_P^2} \right],$$

SUSY breaking field

(quark, lepton, Higgs)

## Sequestered Kahler potential

Tree-levelではスクォーク、スレプトンの質量がゼロ

SUSYのフレーバー問題を解くのに、シンプルかつ重要な仮定

(ゲージーノもtree-levelでは質量ゼロ)

Ref. for sequestered form [Randall, Sundrum, 1999]

# Setup

$$K = -3M_P^2 \ln \left[ 1 - \frac{f(Z, Z^\dagger) + \phi_i^\dagger \phi_i}{3M_P^2} \right],$$

SUSY breaking field

(quark, lepton, Higgs)

$$M_1 \simeq \frac{33}{5} \frac{g_1^2}{16\pi^2} m_{3/2}, \quad M_2 \simeq \frac{g_2^2}{16\pi^2} m_{3/2}, \quad M_3 \simeq -3 \frac{g_3^2}{16\pi^2} m_{3/2},$$

(ゲージノ質量はアノマリーメディエーションから)

Ref. for sequestered form [Randall, Sundrum, 1999]

# Setup

$$K = -3M_P^2 \ln \left[ 1 - \frac{f(Z, Z^\dagger) + \phi_i^\dagger \phi_i}{3M_P^2} \right],$$

SUSY breaking field

(quark, lepton, Higgs)

アノマリーメディエーションからスフェルミン質量が出て来る (two-loop level)。しかし、スレプトンの質量はタキオニック。

$$m_{\bar{E}}^2 \approx -22g_Y^4 \frac{m_{3/2}^2}{(16\pi^2)^2}$$

(右巻きスレプトンの質量もタキオニック。)

# Setup

$$K = -3M_P^2 \ln \left[ 1 - \frac{f(Z, Z^\dagger) + \phi_i^\dagger \phi_i}{3M_P^2} \right],$$

SUSY breaking field

(quark, lepton, Higgs)

アノマリーメディエーションからスフェルミン質量が出て来る (two-loop level)。しかし、スレプトンの質量はタキオニック。

**アノマリーメディエーションのタキオニックスレプトン問題。**

# Setup

$$K = -3M_P^2 \ln \left[ 1 - \frac{f(Z, Z^\dagger) + \phi_i^\dagger \phi_i + \Delta K}{3M_P^2} \right],$$

SUSY breaking field

(quark, lepton, Higgs)

$$\Delta K = c_Z \frac{|Z|^2}{M_P^2} (|H_u|^2 + |H_d|^2),$$

$c_Z > 0$

**ヒッグス場のみがSUSY breaking fieldと直接カップルする。**

(タキオニックスレプトン問題を解いて、3世代目のスフェルミオンを重くする。)

# Setup

$$K = -3M_P^2 \ln \left[ 1 - \frac{f(Z, Z^\dagger) + \phi_i^\dagger \phi_i + \Delta K}{3M_P^2} \right],$$

SUSY breaking field

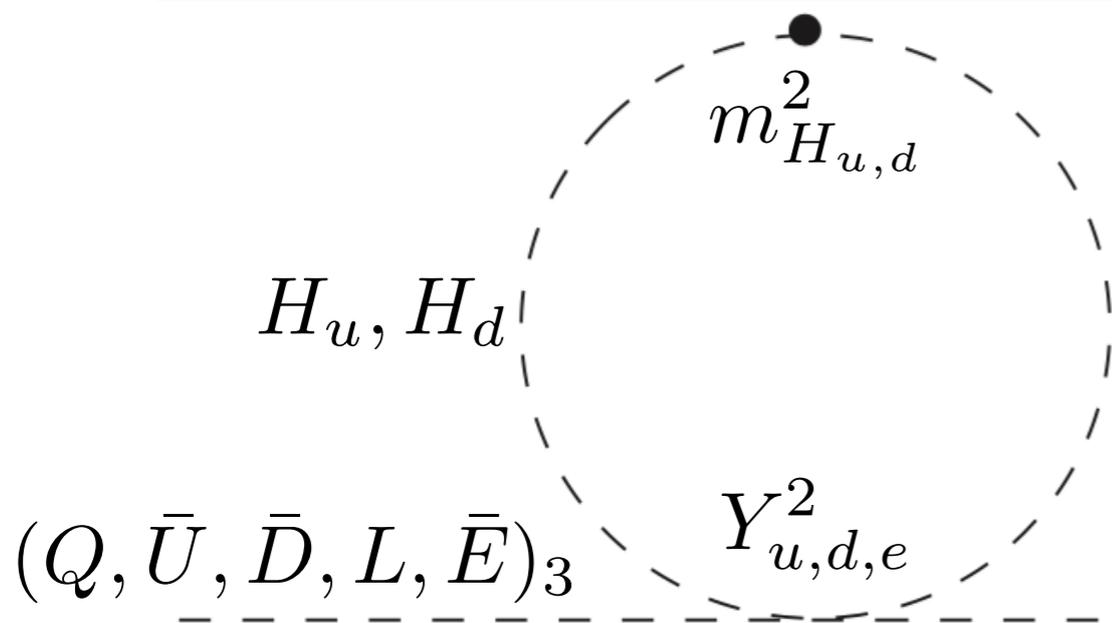
(quark, lepton, Higgs)

$$\Delta K = c_Z \frac{|Z|^2}{M_P^2} (|H_u|^2 + |H_d|^2),$$

$c_Z > 0$

**ヒッグス場のみがSUSY breaking fieldと直接カップルする。**

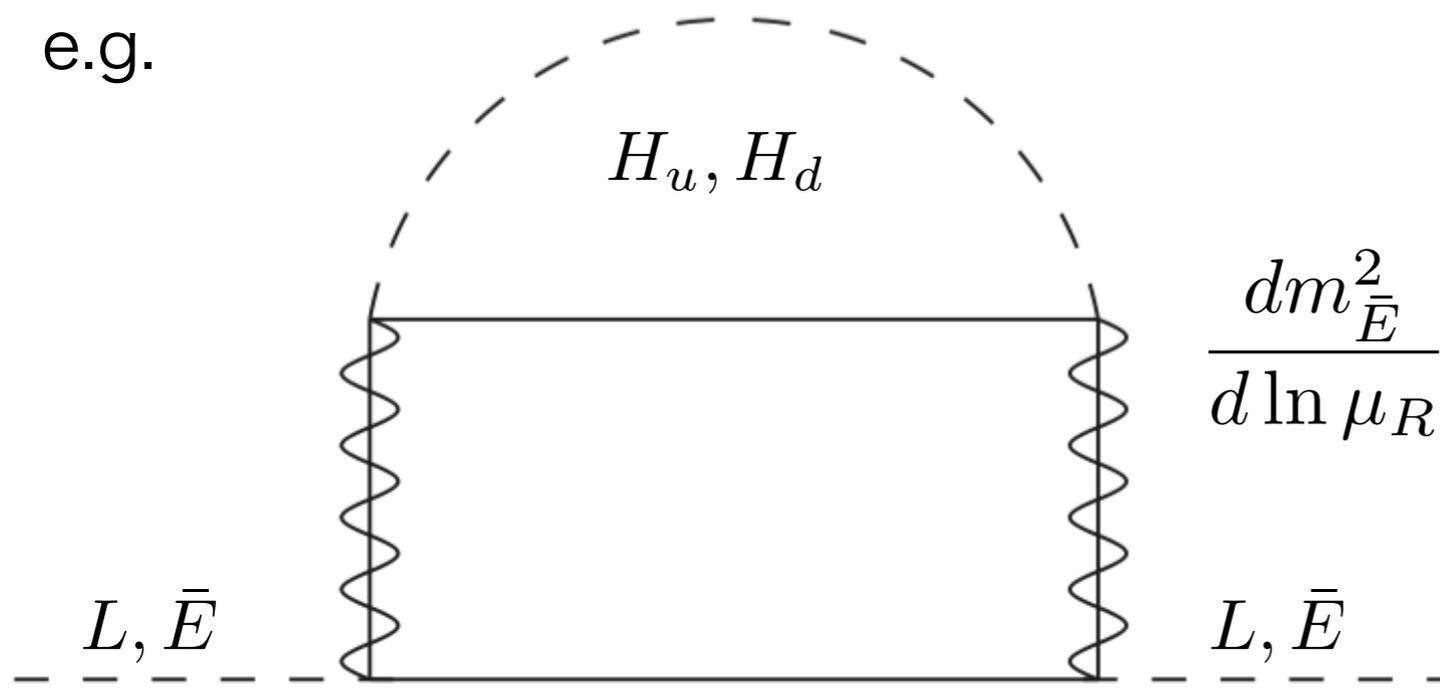
ヒッグスのソフトな質量がネガティブであることが重要。



$$\frac{dm^2_{Q_3}}{d \ln \mu_R} \ni \frac{1}{8\pi^2} (Y_t^2 m^2_{H_u} + Y_b^2 m^2_{H_d}) < 0$$

3世代目のスフェルミオンの質量を持ち上げる。  
125GeV ヒッグス質量にとって重要。

e.g.

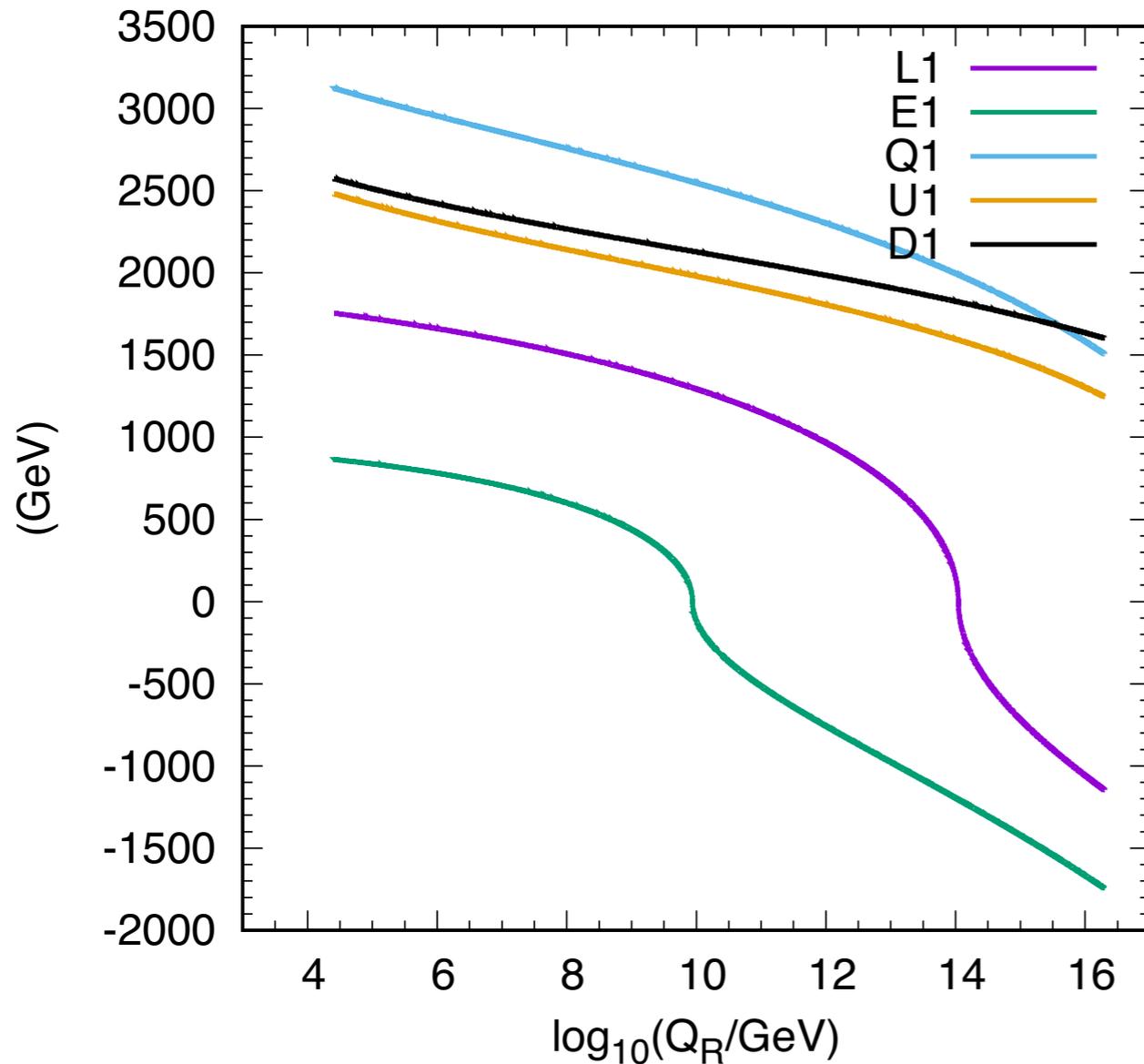


$$\frac{dm^2_{\bar{E}}}{d \ln \mu_R} \ni \frac{1}{(16\pi^2)^2} \left[ \frac{36}{25} g_1^4 (m^2_{H_u} + m^2_{H_d}) \right] < 0$$

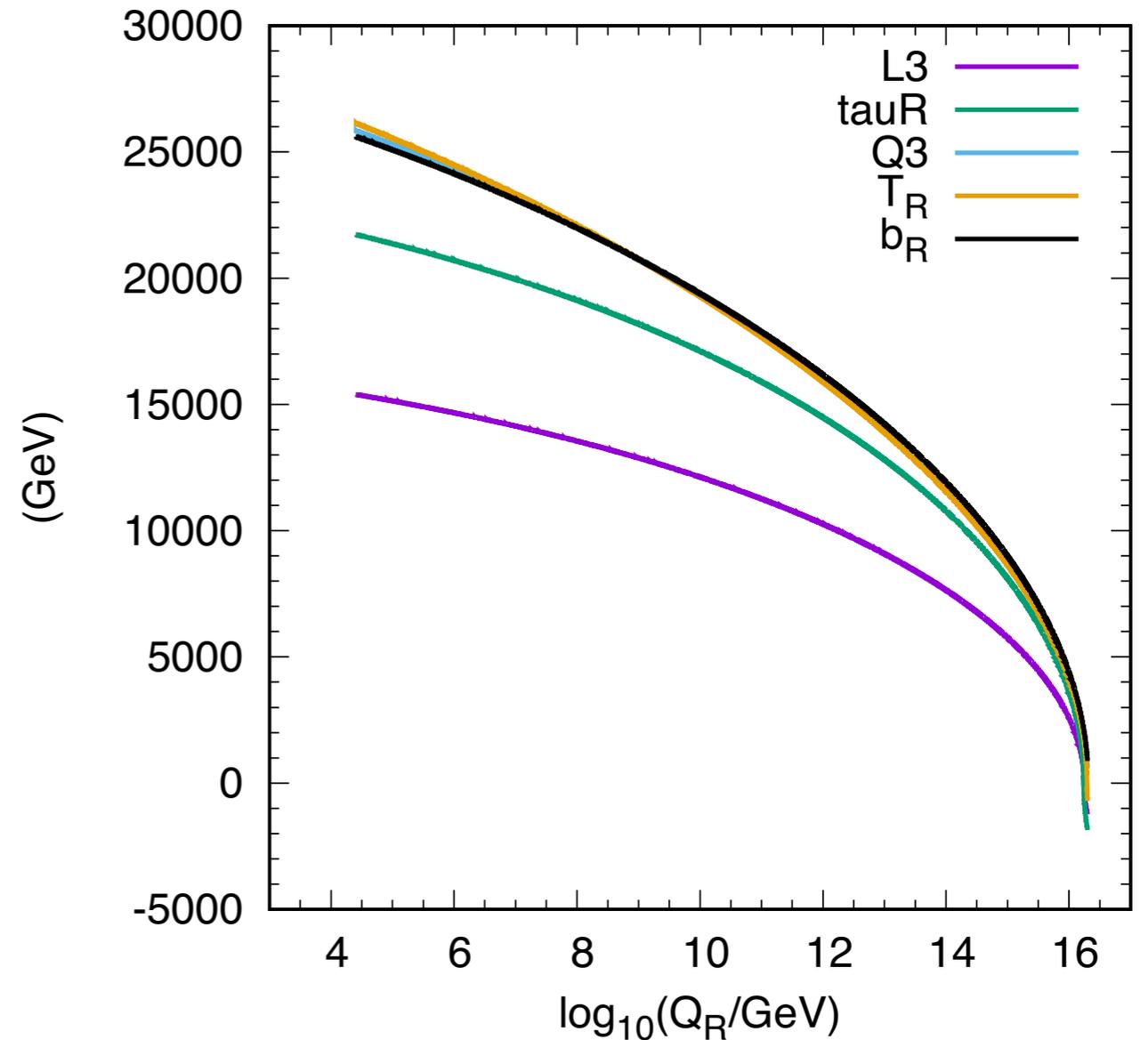
スレプトンの質量を持ち上げる。タキオニックスレプトン問題を解く。

# RGE runnings

1st/2nd generation



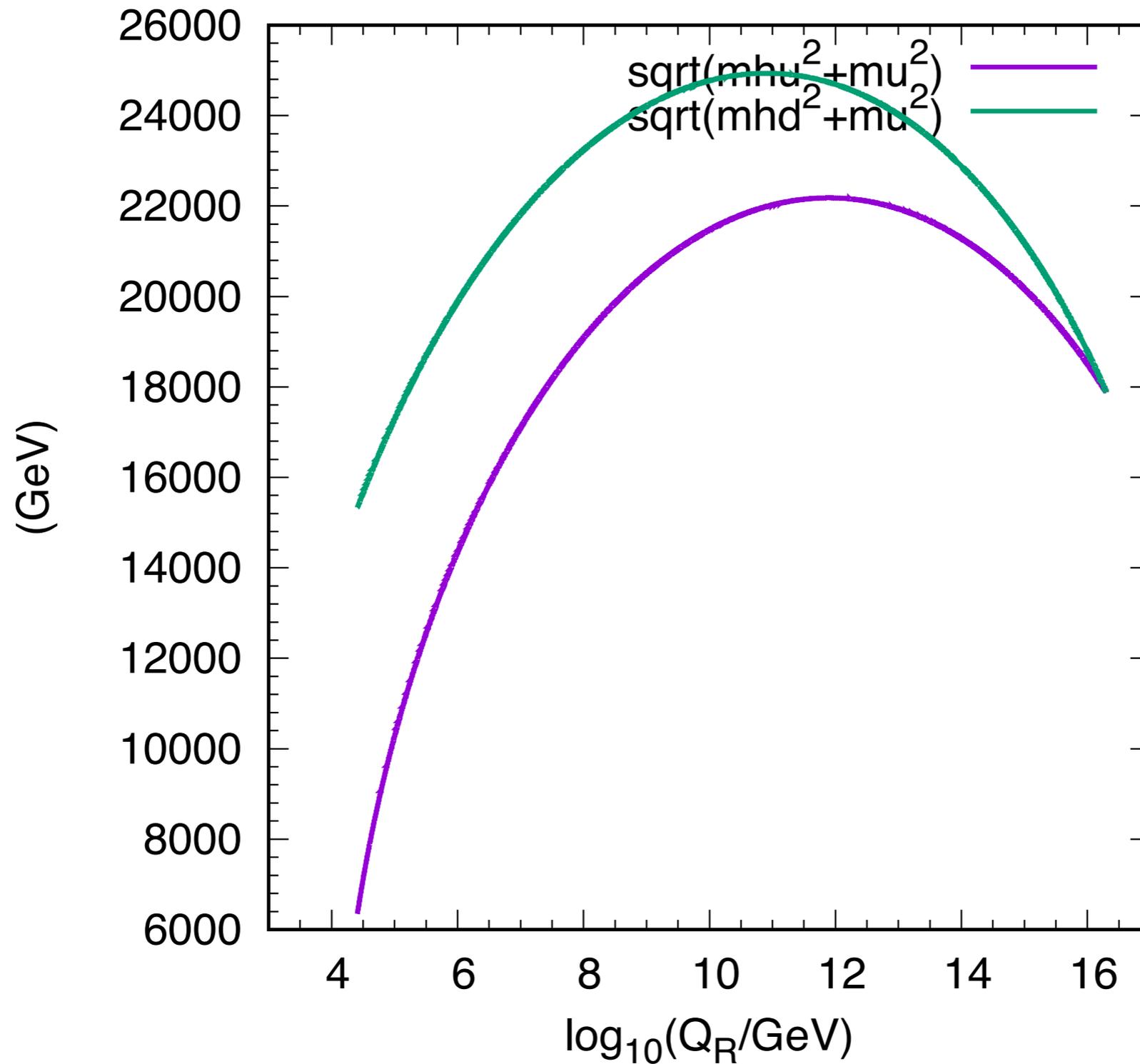
3rd generation



$m_{3/2} = 200 \text{ TeV}, c_H = -0.1, \tan \beta = 45$

$$m_{H_u}^2 = m_{H_d}^2 = c_H m_{3/2}^2$$

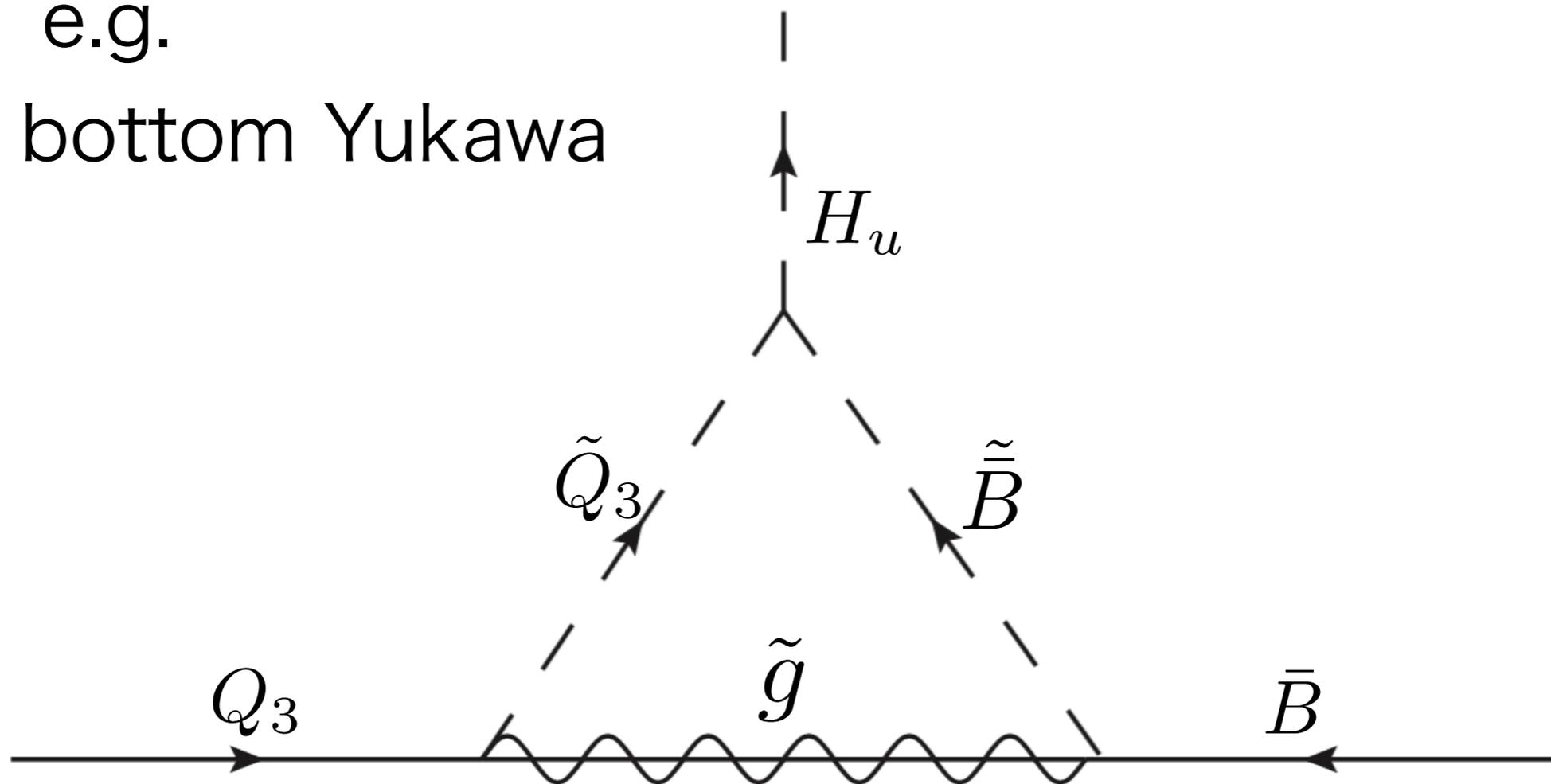
**Glino: 4 TeV, Wino: 630 GeV**



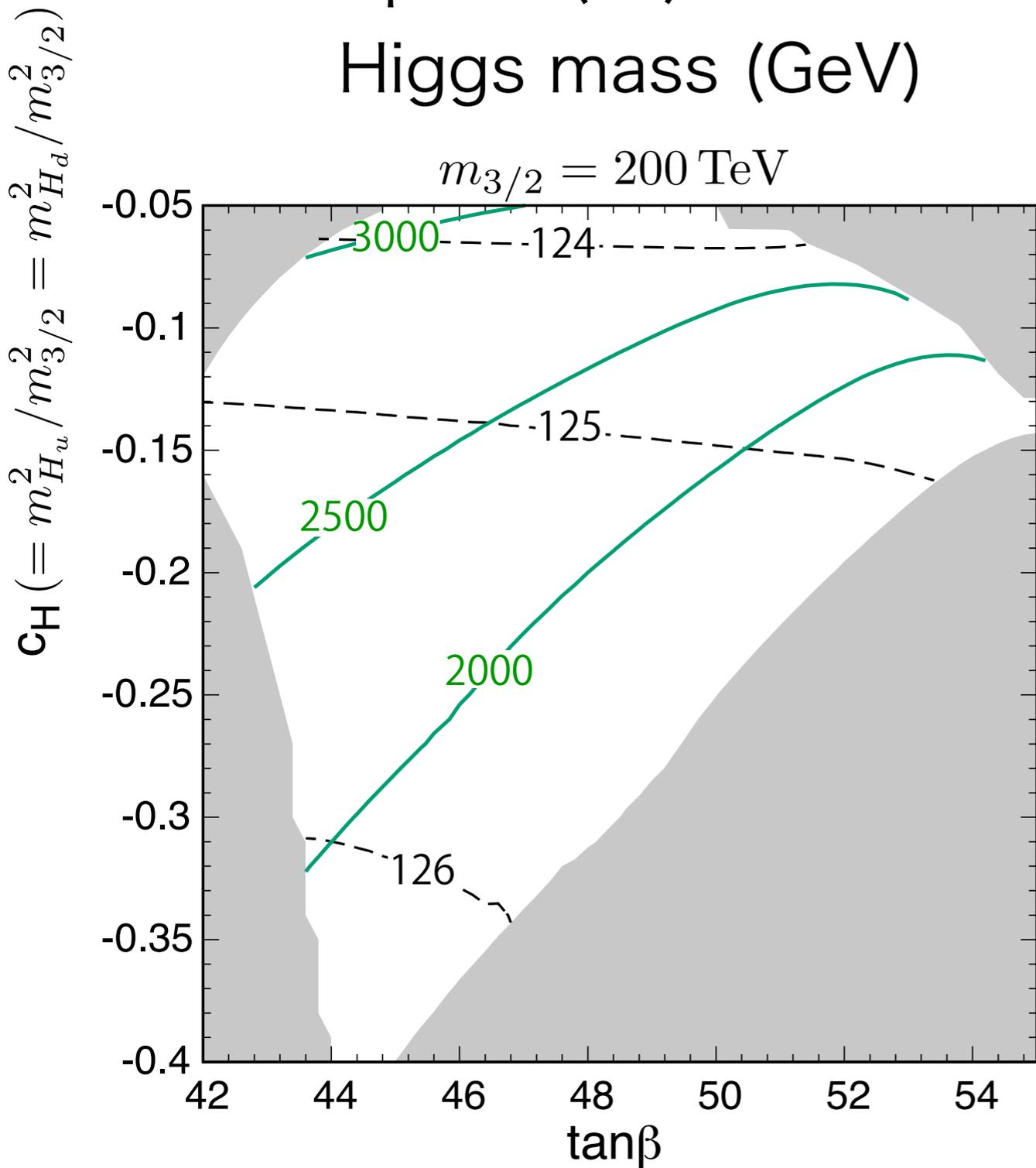
ヒッグスポテンシャルの2次の項自体はポジティブ  
(D-flat direction ( $H_u=H_d$ ) は安全!)

# Higgs mass, squark mass and unification of Yukawa couplings

e.g.  
bottom Yukawa



# Squark ( $u_R$ ) mass & Higgs mass (GeV)

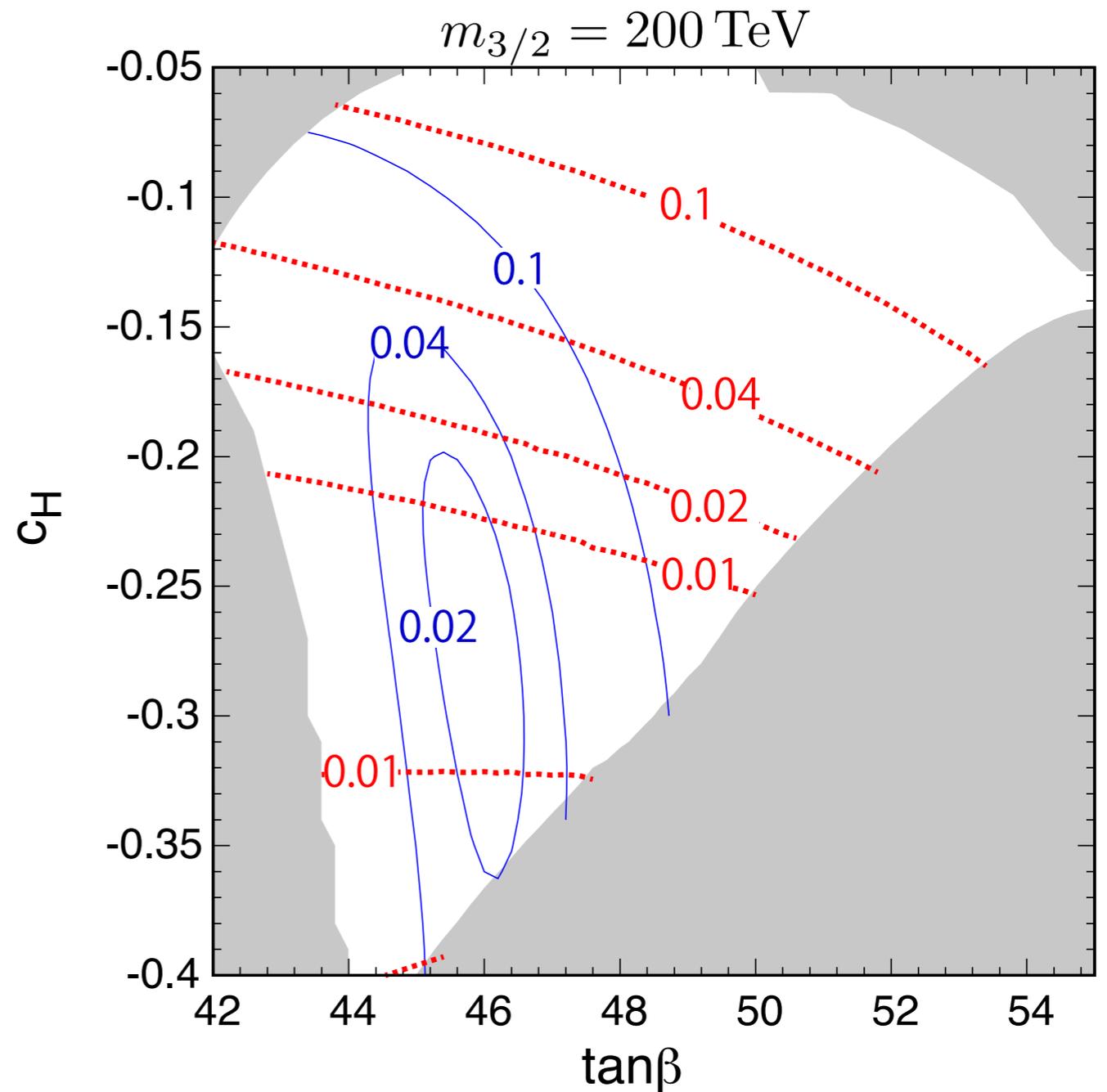


black: Higgs boson mass

green: squark mass

グルイーン: 4TeV, ウィーン: 630GeV

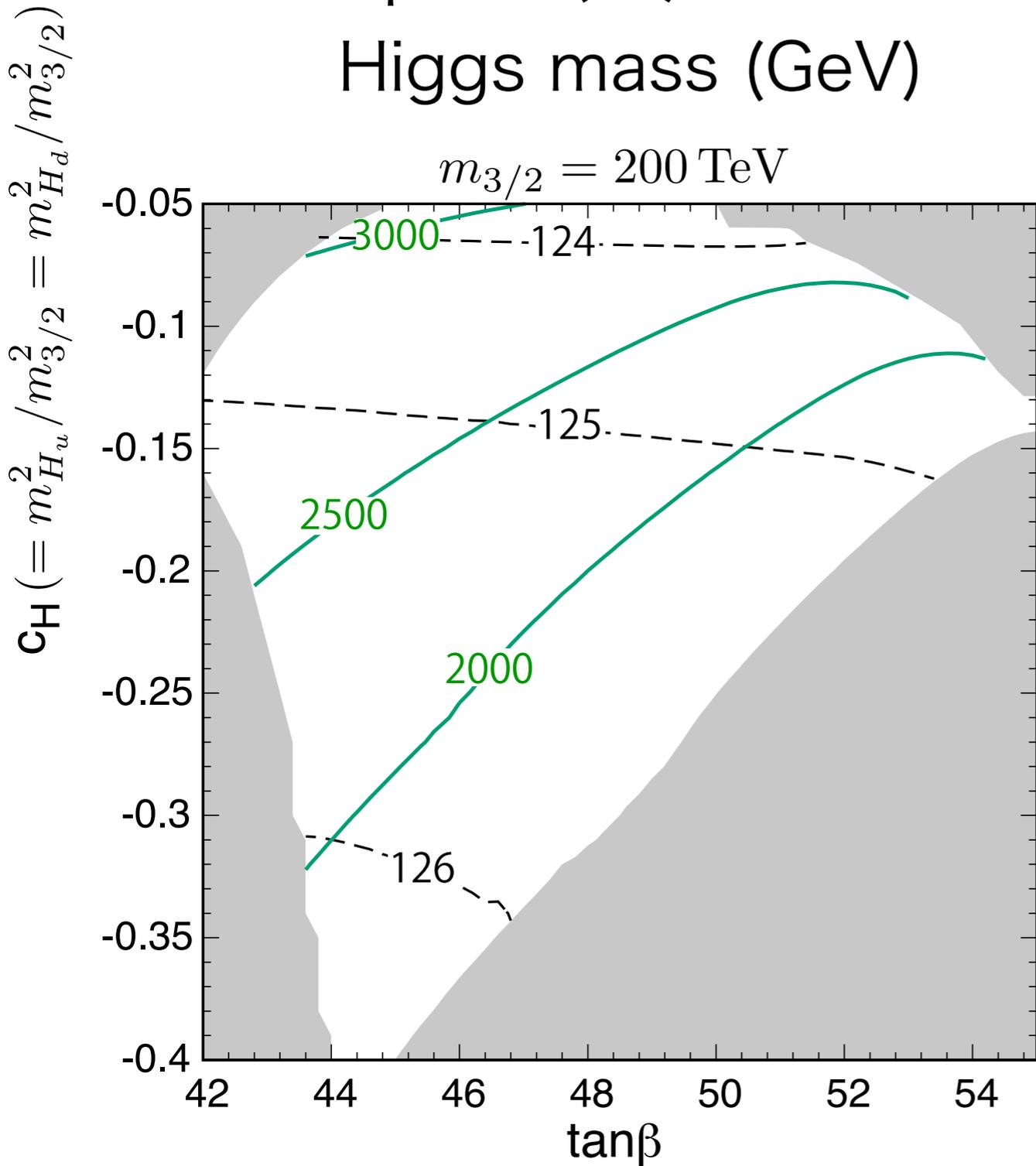
# Unification of Yukawa couplings



blue:  $\sqrt{(Y_b - Y_\tau)^2 + (Y_t - Y_\tau)^2 + (Y_t - Y_b)^2} \delta y_{10}$

red:  $\sqrt{(Y_b - Y_\tau)^2} \delta y_5$

# Squark ( $u_R$ ) mass & Higgs mass (GeV)

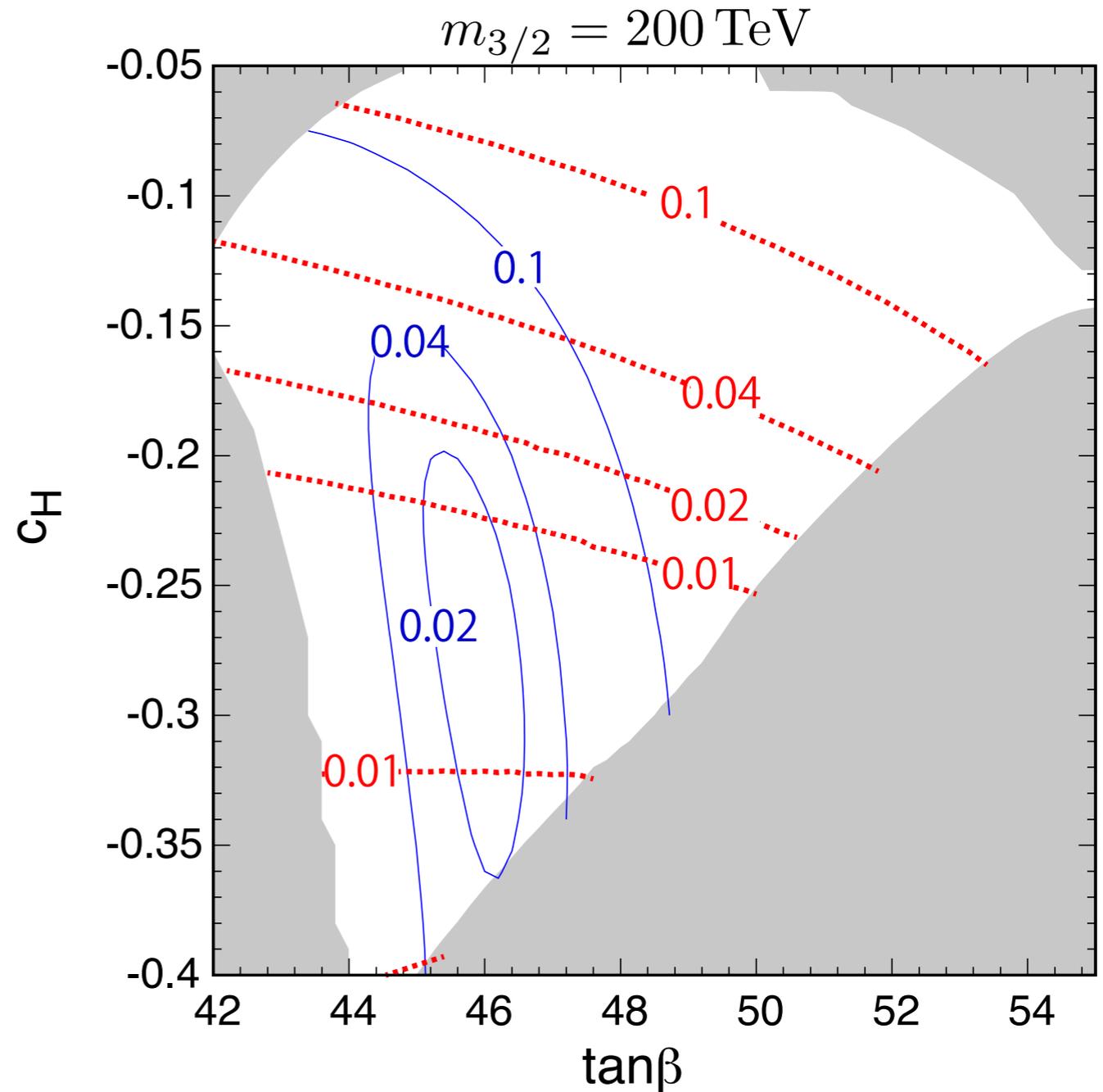


black: Higgs boson mass

green: squark mass

グルイーノ: 4TeV, ウィーノ: 630GeV

# Unification of Yukawa couplings



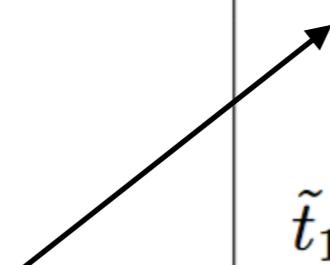
マッチングの精度を上げるとリージョンが少し上にずれそう

[Chigusa, Moroi, 2016]

# Mass spectra

| Parameters                              | Point I     | Point II    |
|---|-------------|-------------|
| $m_{3/2}$ (TeV)                         | 200         | 250         |
| $c_H$                                   | -0.2        | -0.21       |
| $\tan \beta$                            | 44          | 45          |
| Particles                               | Mass (GeV)  | Mass (GeV)  |
| $\tilde{g}$                             | 4120        | 5050        |
| $\tilde{q}$                             | 2400 - 3540 | 2830 - 4360 |
| $\tilde{\chi}_1^0 / \tilde{\chi}_1^\pm$ | 633         | 786         |
| $\tilde{\chi}_2^0$                      | 1860        | 2330        |
| $\tilde{e}_{L,R}$                       | 2660, 1200  | 3330, 1710  |
| $\tilde{t}_{1,2}$ (TeV)                 | 34, 35      | 44, 45      |
| $\tilde{b}_{1,2}$ (TeV)                 | 34, 35      | 44, 45      |
| $\tilde{\tau}_{1,2}$ (TeV)              | 21, 29      | 27, 38      |
| $H^\pm$ (TeV)                           | 13          | 21          |
| $h_{\text{SUSYHD}}$                     | 125.5       | 126.2       |
| $\mu$ (TeV)                             | 78          | 100         |
| $\delta y_5$                            | 0.01        | 0.01        |
| $\delta y_{10}$                         | 0.05        | 0.02        |

暗黒物質候補  
(ウィーノ)



# Short summary

- グラビティーノが $\sim 100\text{TeV}$ のシナリオではグラビティーノ問題が無く魅力的。
- もっともシンプルな場合
  - Pure gravity mediation.
  - ウィーノとグルイーノが見えるかも。
- ヒッグス場のみがSUSY breaking fieldと結合していたら
  - Higgs-Anomaly Mediation.
  - スクォーク/グルイーノ/ウィーノが見える。
  - GUTとよりコンシステント (Yukawa couplings)。
- ではミューオン $g-2$ をシリアスに捉えた場合はどうか。

# フレーバー問題の解

★  
重力ティーンとスカラーを重くする。 $\sim 100-1000$  TeV

Pure gravity mediation  
(最もシンプル)

★  
軽い重力ティーン ( $< 1$  GeV) とフレーバーを破らない Mediation

Gauge mediation

Kahler potentialは一般的

★  
ユニバーサルなスカラー質量

Minimal Kahler potential

★  
Tree-levelではスカラーは質量ゼロ

Sequestered Kahler potential  
No scale supergravity

Kahler potentialは特別な形

# EWセクターへのインプリケー ション

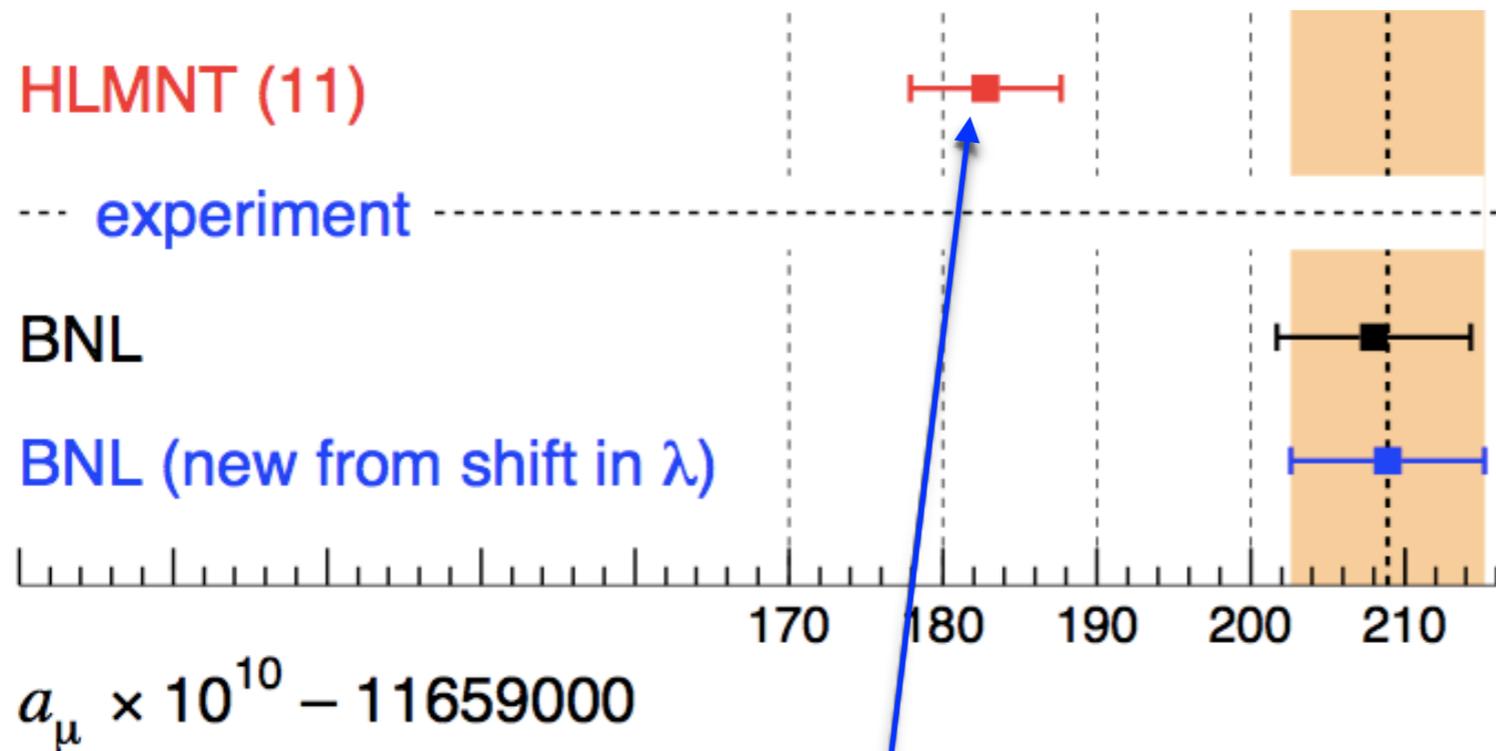
## Muon $g-2$ in GMSB models revisited

(グラビティーノが暗黒物質の候補)

Yanagida, Yokozaki, arXiv:1704.00711

(See also, Ibe, Matsumoto, Yanagida, Yokozaki, 2012 (JHEP) )

# ミュオン $g-2$ アノマリー



**>3  $\sigma$  deviation  
from SM  
prediction!**

[Also, Davier et al., 2016  
→ 3.6  $\sigma$ ]

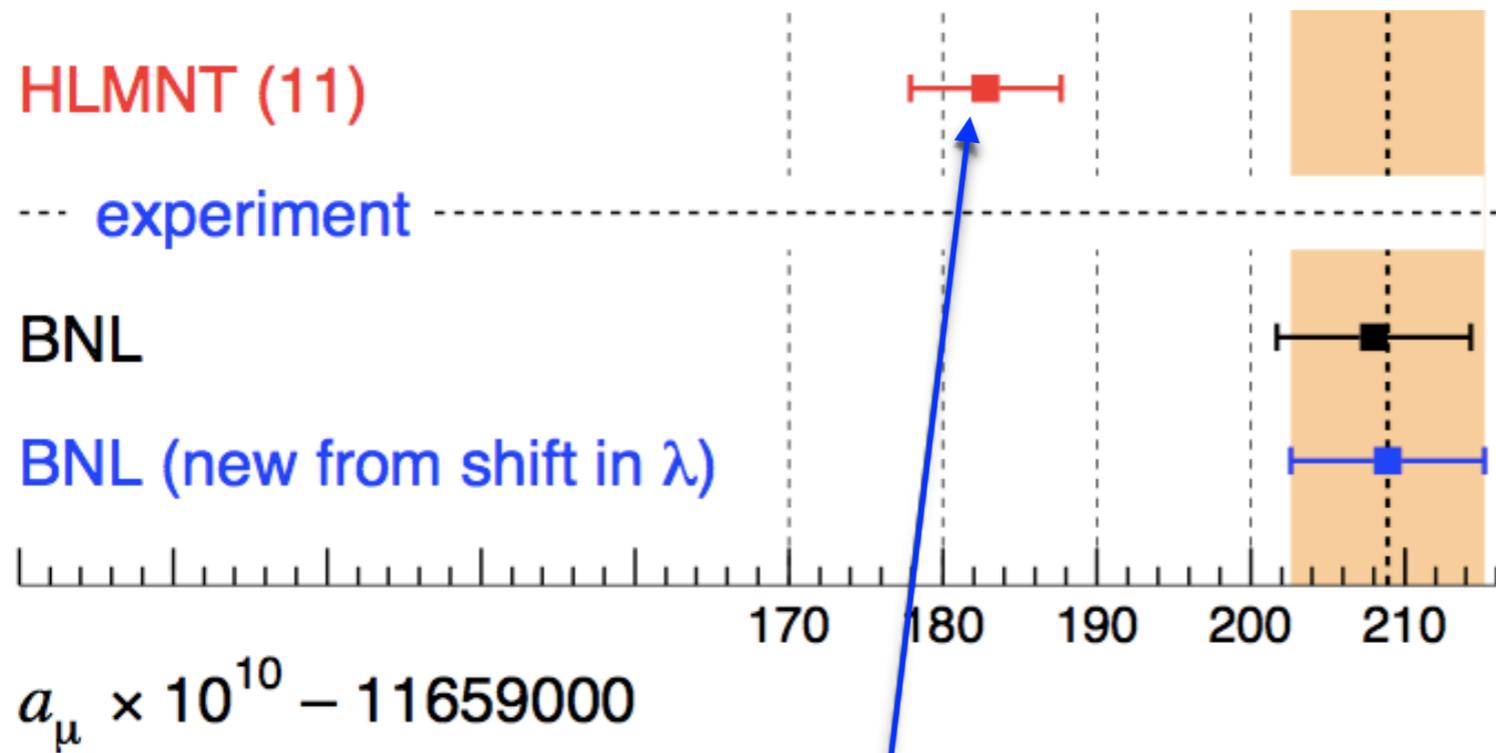
[Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner, J.Phys. G38 (2011) 085003]

SM value

$$\mathcal{L} = \frac{e}{4m_\mu} (a_\mu)^{\text{NP}} \bar{\mu} \sigma_{\alpha\beta} \mu F^{\alpha\beta}$$

$$(a_\mu)^{\text{NP}} \approx 2 \times 10^{-9} \quad \text{が必要。}$$

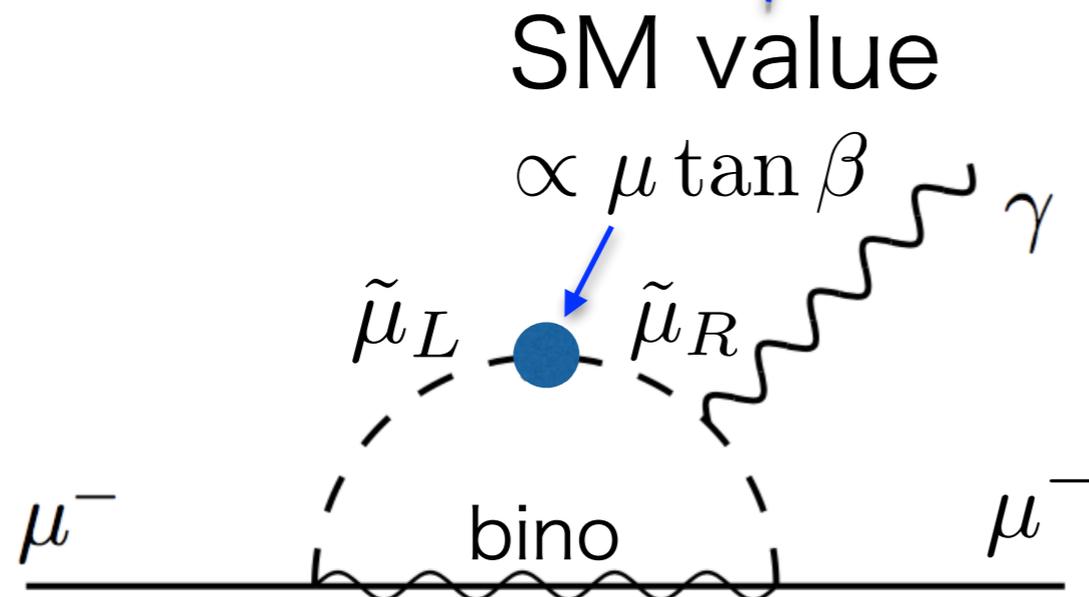
# ミューオン $g-2$ アノマリー



**>3  $\sigma$  deviation  
from SM  
prediction!**

[Also, Davier et al., 2016  
→ 3.6  $\sigma$ ]

[Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner, J.Phys. G38 (2011) 085003]



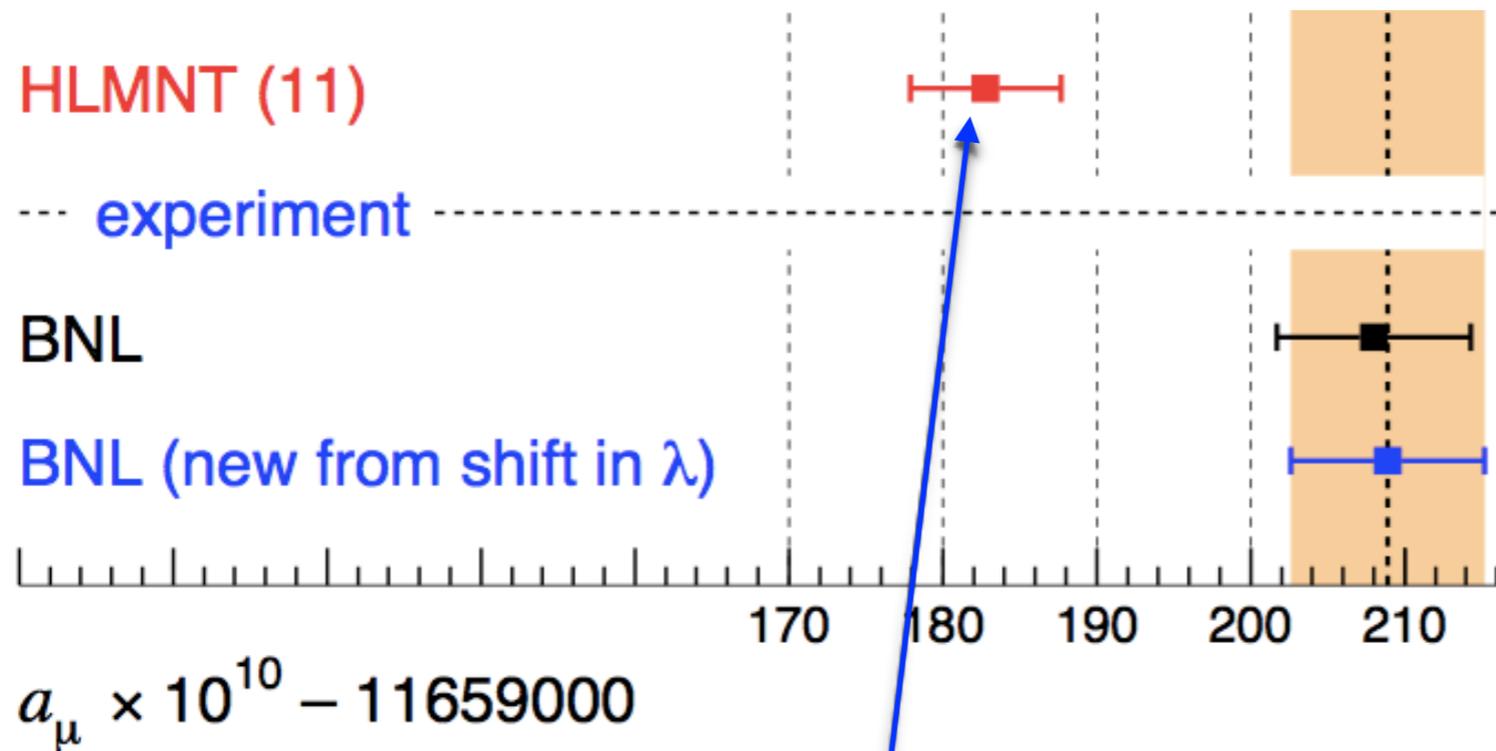
SM value

$$\propto \mu \tan \beta$$

スレプトン、ニュートラリーノ、  
チャージーノは  $O(100)$  GeV

[Lopez, Nanopoulos and Wang, 1994;  
Chattopadhyay and Nath, 1996;  
Moroi, 1996]

# ミューオン $g-2$ アノマリー



**>3 $\sigma$  deviation  
from SM  
prediction!**

[Also, Davier et al., 2016  
→ 3.6 $\sigma$ ]

[Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner, J.Phys. G38 (2011) 085003]

SM value

125GeVヒッグス質量を考えると、一方でスクォークは、~10TeV近い。どうやってこのような質量の階層性を説明するのか。

# 5 + 5\* GMSB model

$$W = (M_D + k_D Z) \Psi_D \Psi_{\bar{D}} + (M_L + k_L Z) \Psi_L \Psi_{\bar{L}},$$

$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, 1/3)$   $(\mathbf{1}, \mathbf{2}, -1/2)$

SUSY breaking field,  $\langle Z \rangle = 0$  and  $\langle F_Z \rangle \neq 0$

$\Psi_{\bar{D}}, \Psi_L$  はメッセンジャー場  
SUSY breaking を伝達する。

$\mathbf{5} = (\Psi_D, \Psi_{\bar{L}})$   $\bar{\mathbf{5}} = (\Psi_{\bar{D}}, \Psi_L)$  of SU(5)

# 5 + 5\* GMSB model

$$W = (M_D + k_D Z) \Psi_D \Psi_{\bar{D}} + (M_L + k_L Z) \Psi_L \Psi_{\bar{L}},$$

$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, 1/3)$

SU(3)のカラーを持っている

$(\mathbf{1}, \mathbf{2}, -1/2)$

カラーを持っていない

# 5 + 5\* GMSB model

$$W = (M_D + k_D Z) \Psi_D \Psi_{\bar{D}} + (M_L + k_L Z) \Psi_L \Psi_{\bar{L}},$$

$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, 1/3)$                        $(\mathbf{1}, \mathbf{2}, -1/2)$

SUSY breaking field,  $\langle Z \rangle = 0$  and  $\langle F_Z \rangle \neq 0$

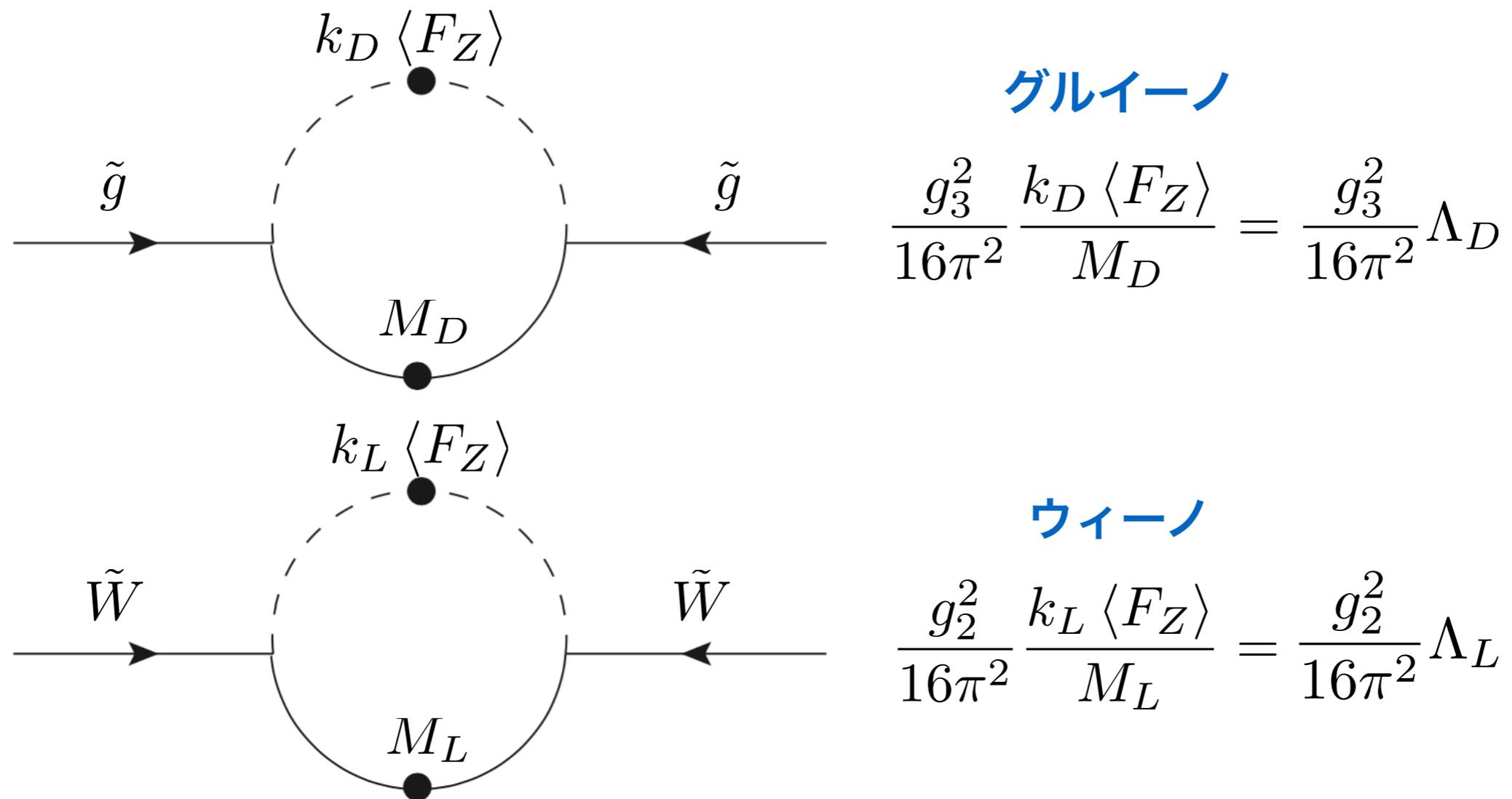
$\Psi_{\bar{D}}, \Psi_L$  はメッセンジャー場  
SUSY breakingを伝達する。

$\mathbf{5} = (\Psi_D, \Psi_{\bar{L}})$      $\bar{\mathbf{5}} = (\Psi_{\bar{D}}, \Psi_L)$  of SU(5)

メッセンジャー場を積分した後に、MSSMセクターの超対称性の破れのパラメータが生成される。

# 5 + 5\* GMSB model

$$W = (M_D + k_D Z) \Psi_D \Psi_{\bar{D}} + (M_L + k_L Z) \Psi_L \Psi_{\bar{L}},$$

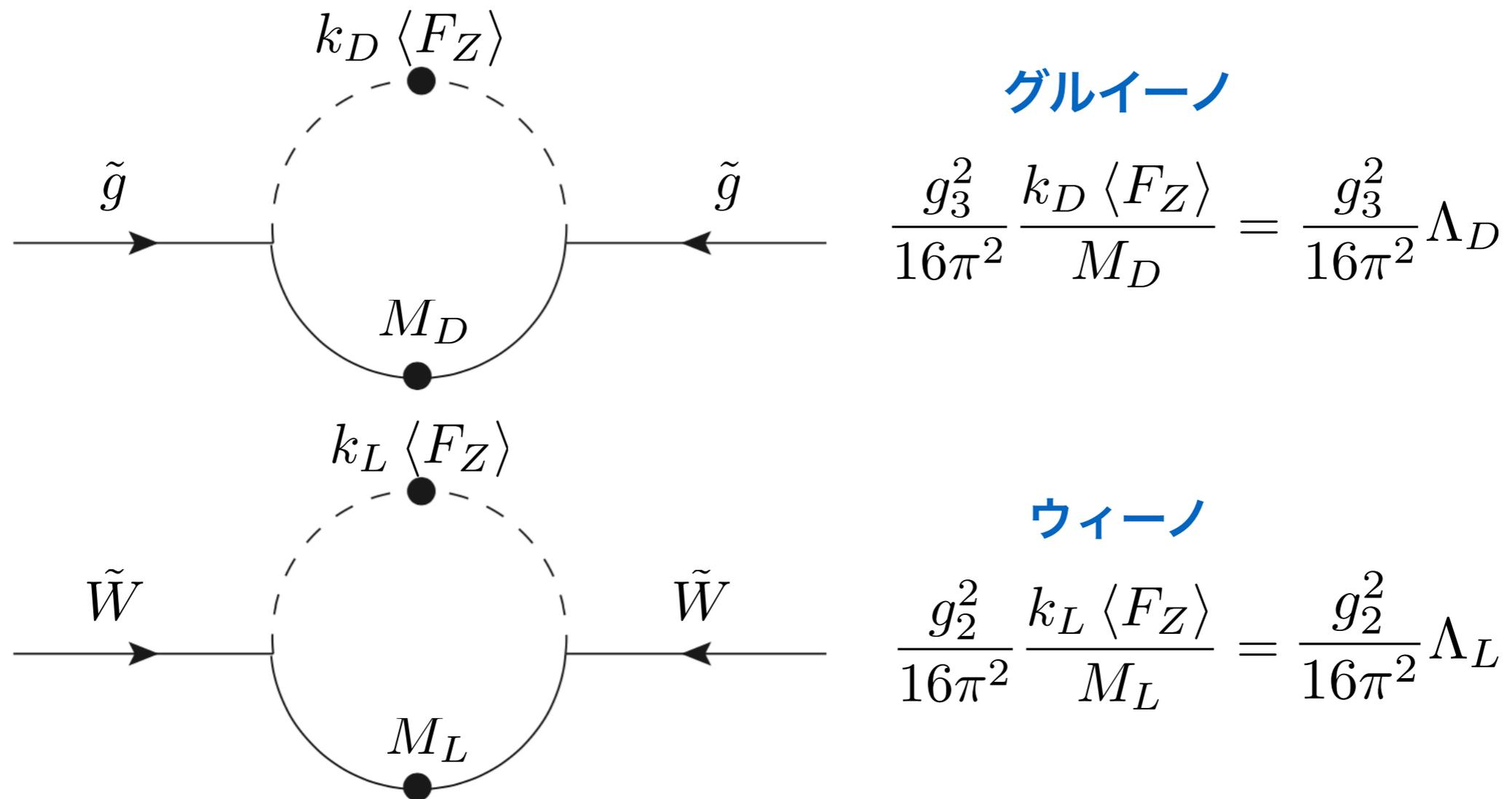


GUTの破れがない場合  $\Lambda_D = \Lambda_L$ 。

そこまでスレプトンとスクォークに質量の階層性がでない。

# 5 + 5\* GMSB model

$$W = (M_D + k_D Z) \Psi_D \Psi_{\bar{D}} + (M_L + k_L Z) \Psi_L \Psi_{\bar{L}},$$

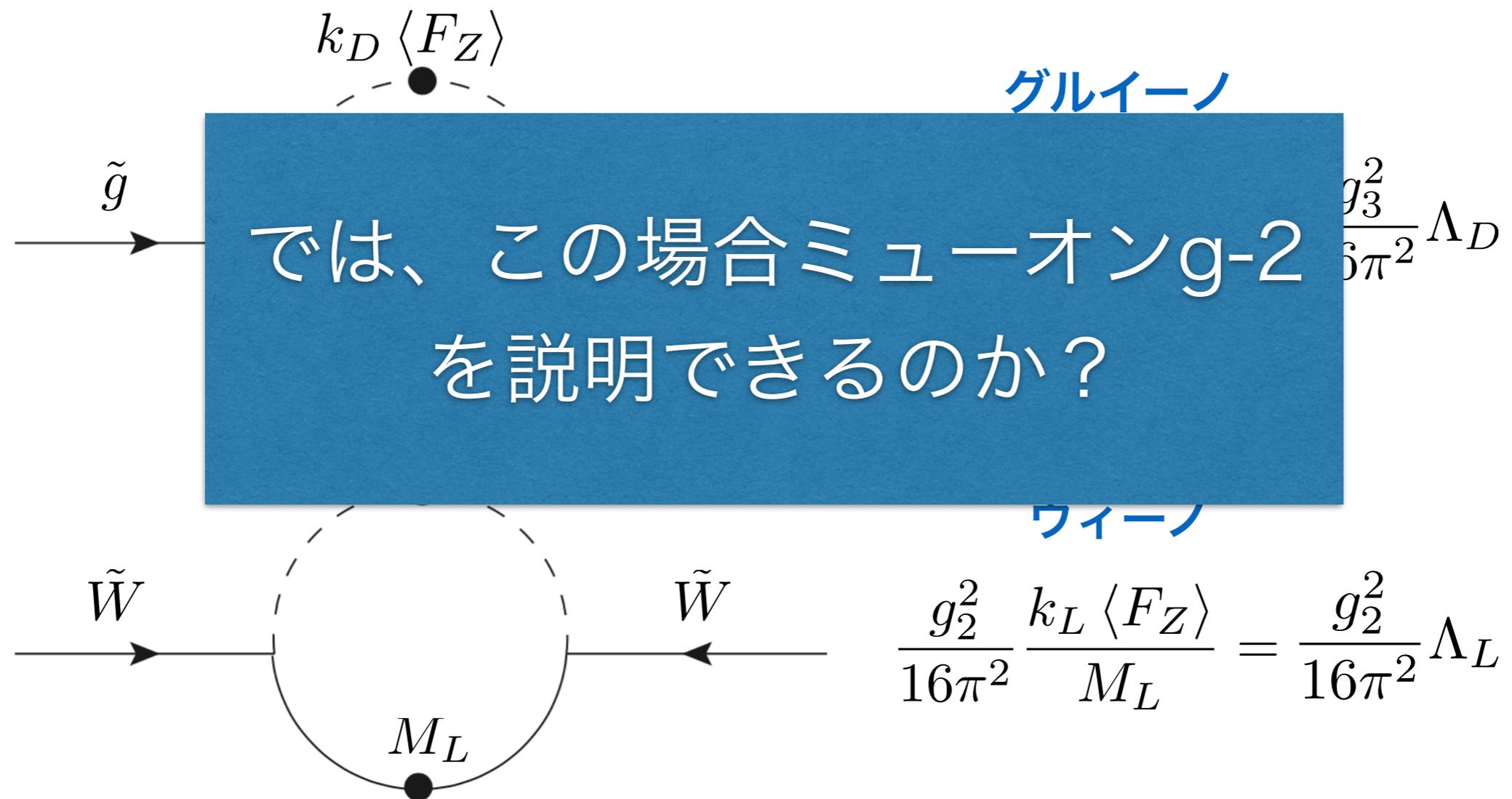


GUTの破れがある場合  $\Lambda_D \gg \Lambda_L$ 。

スレプトンとスクォークに大きな質量の階層性ができる。

# 5 + 5\* GMSB model

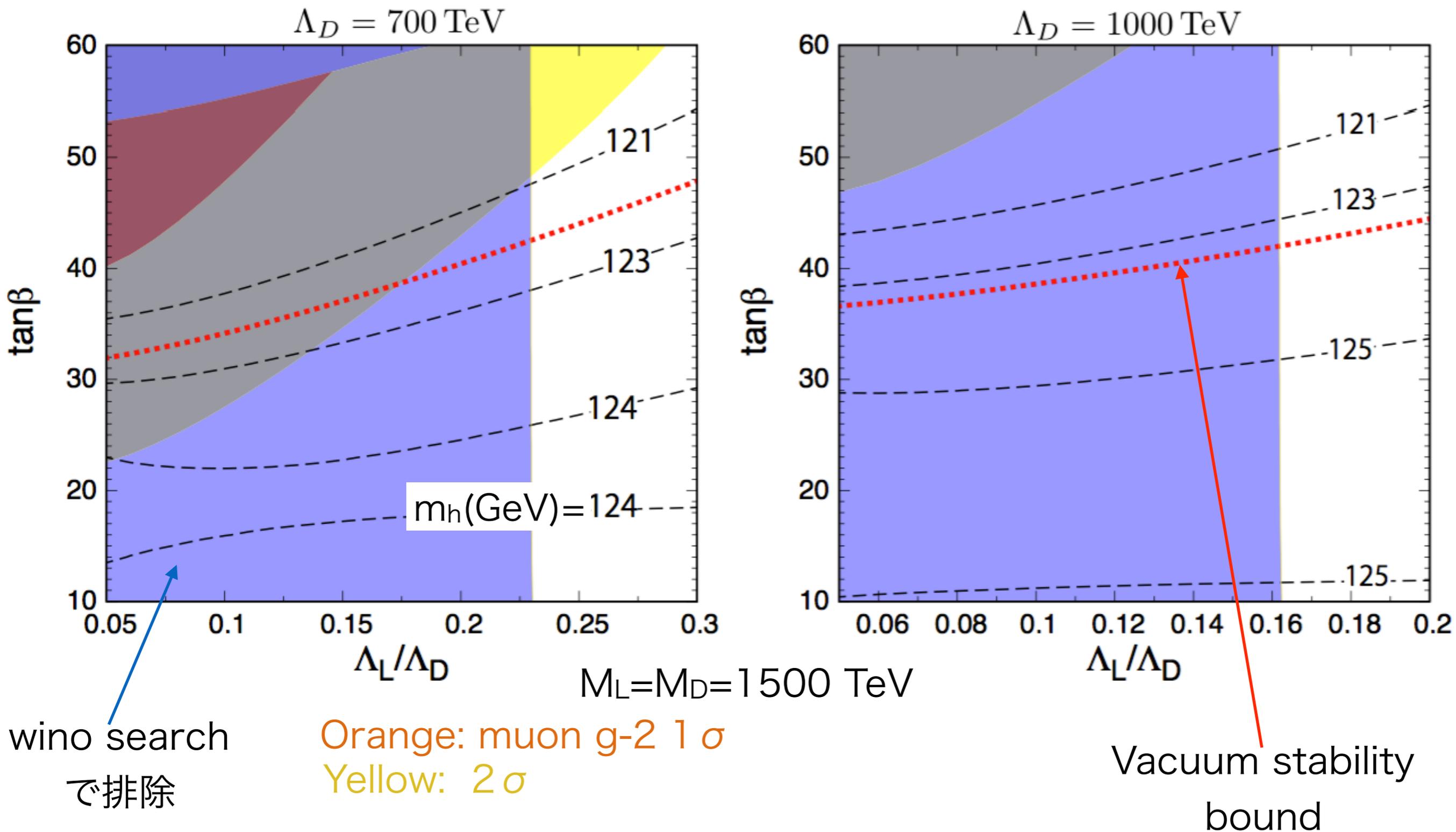
$$W = (M_D + k_D Z) \Psi_D \Psi_{\bar{D}} + (M_L + k_L Z) \Psi_L \Psi_{\bar{L}},$$



GUTの破れがある場合  $\Lambda_D \gg \Lambda_L$ 。

スレプトンとスクォークに大きな質量の階層性ができる。

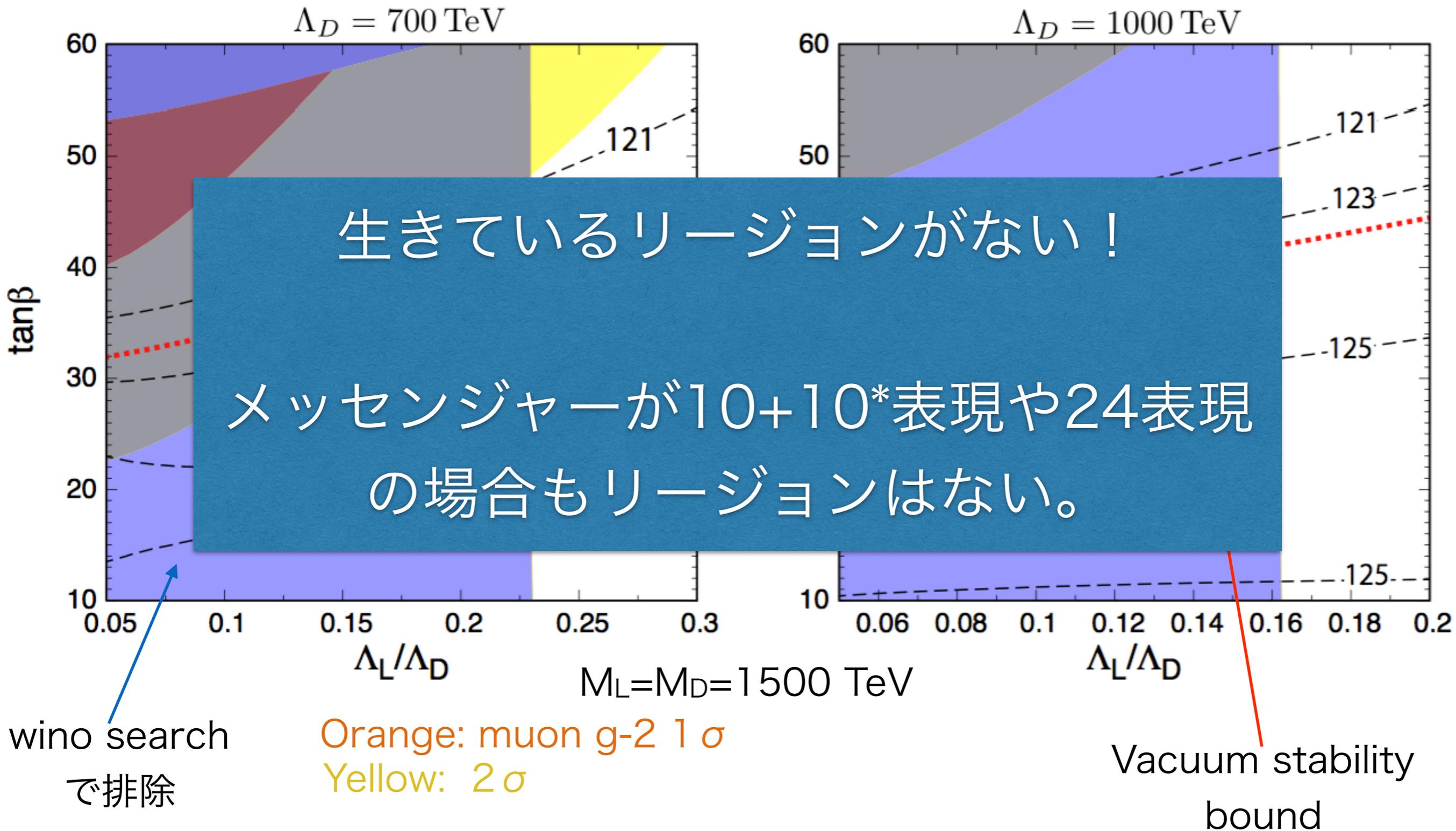
# Wino searchによるインパクト



LHCのWino searchによって全て死んでいる。

(ウィーノのTree-levelの質量差は大きくサプレスされている。)

# Wino searchによるインパクト

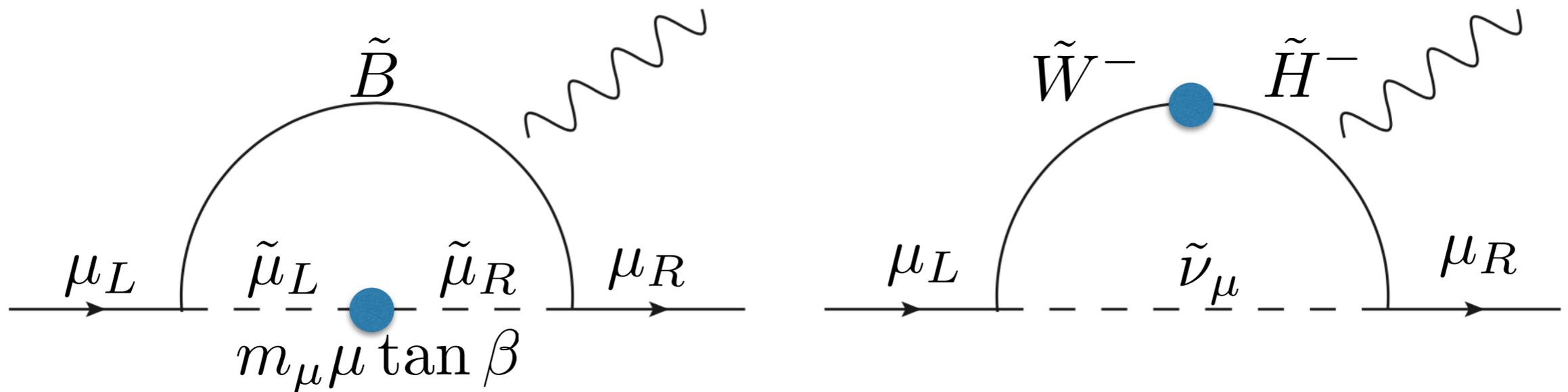


LHCのWino searchによって全て死んでいる。

(ウィーノのTree-levelの質量差は大きくサプレスされている。)

# 困難の原因

- ストップ質量が大きいので $\mu$ も大きい。
- チャージーノの $g-2$ への寄与がサプレスされる（右図）。  
（より軽いスレプトンが必要。）
- ウィーノが軽くないと、スレプトンも軽くない（量子補正）。
- 軽いウィーノはLHCで排除されている。  
[電荷を持ったウィーノと中性なウィーノの質量差はTree-levelではサプレスされる (for large  $\mu$  and  $\tan\beta$ ).]



# 困難の原因

- ではどうすればよいか。
- $\mu$  を小さくすればよい。

電弱対称性の破れのスケールを説明するのに、超対称性の破れのセクターで微調整をする。

アディショナルなヒッグスのソフトな質量項があればよい。そのためには、SUSY breaking場とヒッグス場が結合していれば良い(loop effect等で)。

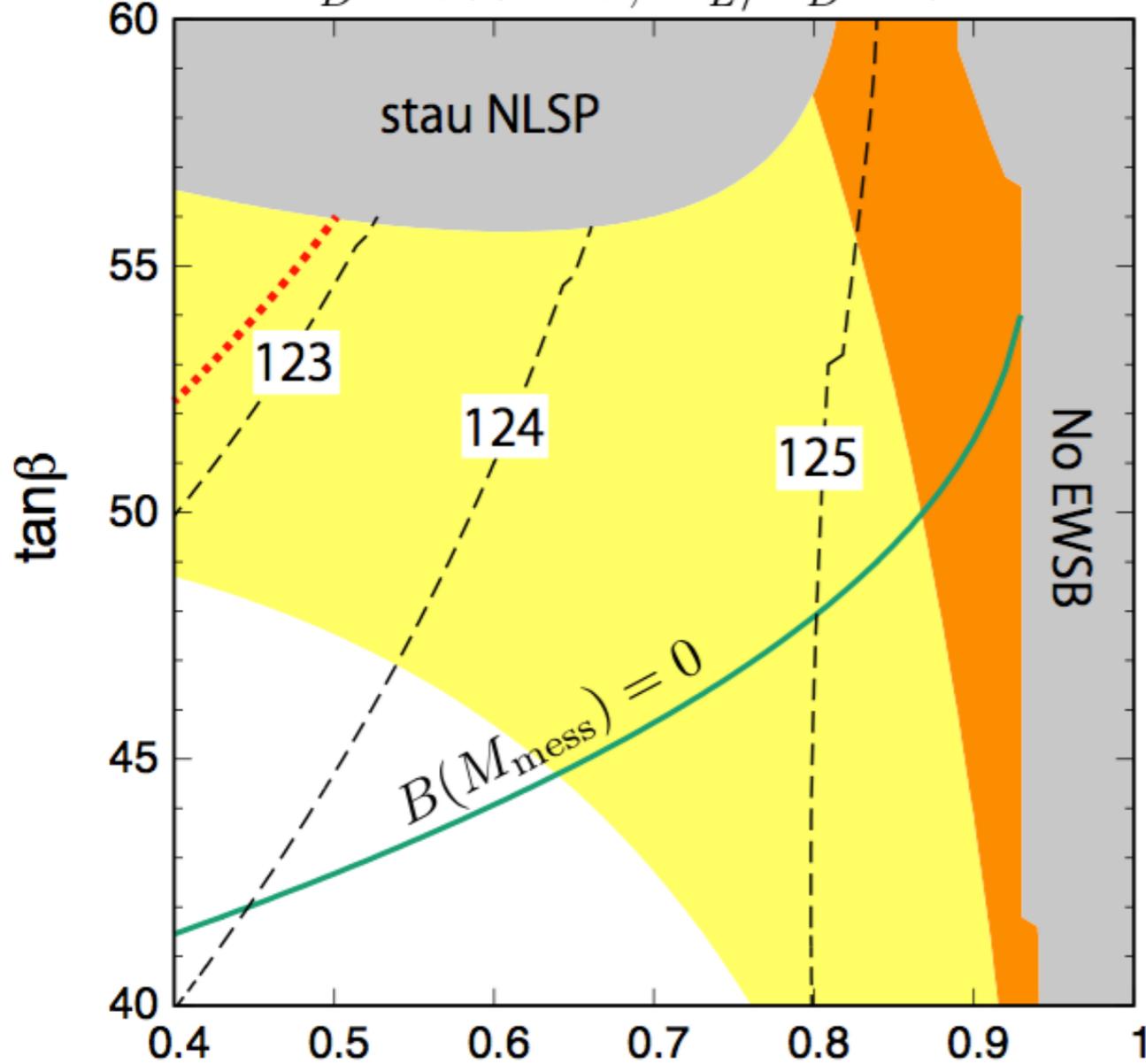
$$\frac{m_Z^2}{2} \simeq -\mu^2 - [m_{H_u}^2|_{\text{tree}} - (3-4 \text{ TeV})^2]$$

gluino/stop loops

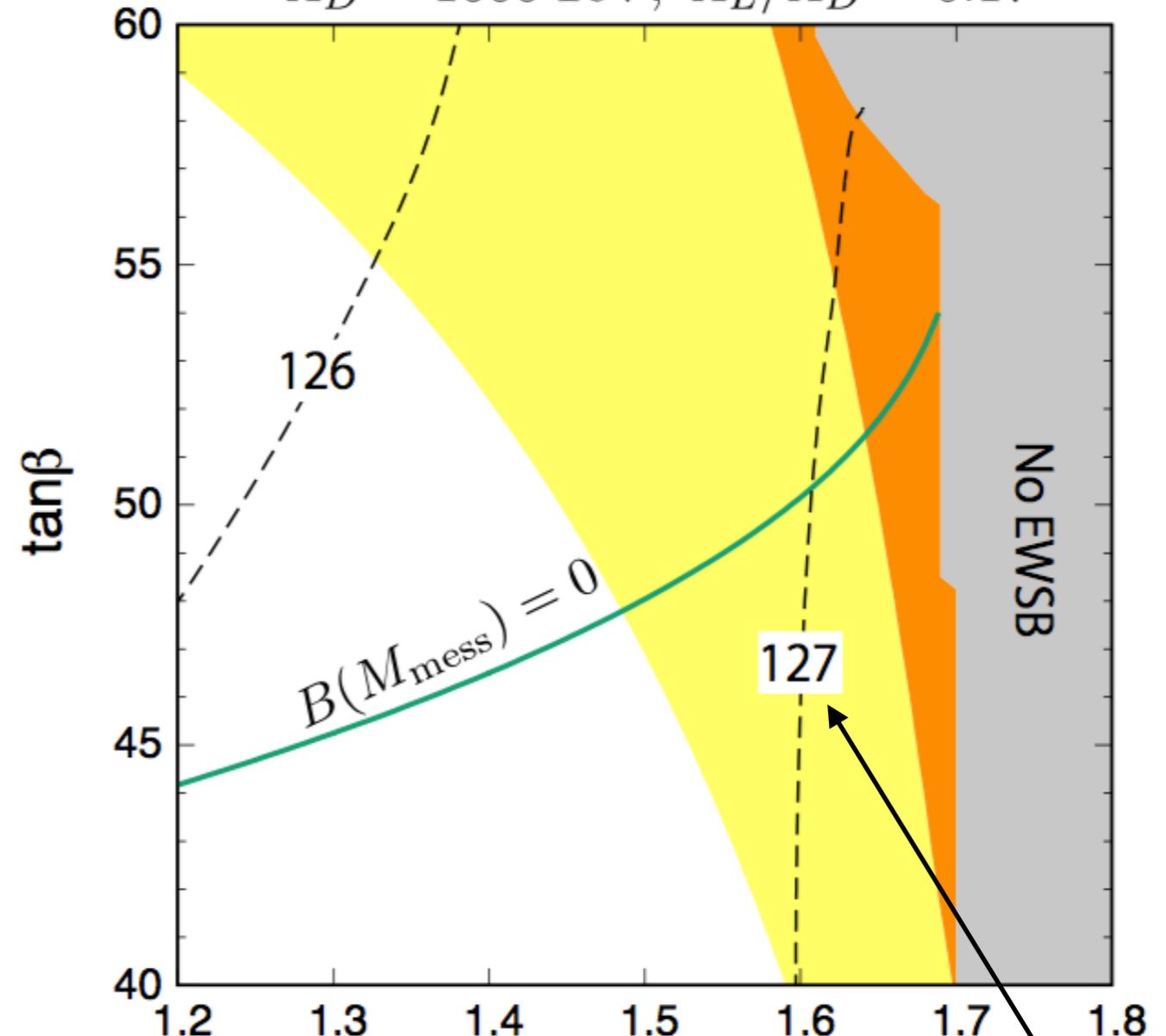
# Muon g-2 and Higgs mass

$M_L = M_D = 1500 \text{ TeV}$

$\Lambda_D = 700 \text{ TeV}, \Lambda_L / \Lambda_D = 0.24$



$\Lambda_D = 1000 \text{ TeV}, \Lambda_L / \Lambda_D = 0.17$



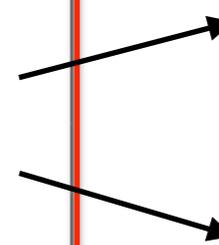
$m_{H_u}^2 = m_{H_d}^2 (10^7 \text{ GeV}^2)$  Orange: muon g-2  $1 \sigma$   $m_{H_u}^2 = m_{H_d}^2 (10^7 \text{ GeV}^2)$   
 Yellow: muon g-2  $2 \sigma$   $m_h \text{ (GeV)}$

$m_H^2$ が大きくなると、 $\mu$ は小さくなる。

# Mass spectra

| Parameters                          | Point I    | Point II   |
|-------------------------------------|------------|------------|
| $M_D$ (TeV)                         | 1500       | $10^4$     |
| $\Lambda_D$ (TeV)                   | 1000       | 700        |
| $\Lambda_L/\Lambda_D$               | 0.17       | 0.25       |
| $m_H^2$ ( $10^7$ GeV <sup>2</sup> ) | 1.69       | 1.09       |
| Particles                           | Mass (GeV) | Mass (GeV) |
| $\tilde{g}$                         | 7070       | 4710       |
| $\tilde{q}$                         | 9030       | 6190       |
| $\tilde{t}$                         | 8320       | 5560       |
| $\tilde{\chi}_1^\pm$                | 211        | 226        |
| $\tilde{\chi}_2^\pm$                | 471        | 482        |
| $\tilde{\chi}_1^0$                  | 205        | 219        |
| $\tilde{\chi}_2^0$                  | 225        | 241        |
| $\tilde{\chi}_3^0$                  | 470        | 480        |
| $\tilde{\chi}_4^0$                  | 746        | 533        |
| $\tilde{e}_{L,R}$                   | 775, 1140  | 717, 852   |
| $\tilde{\tau}_{1,2}$                | 578, 868   | 471, 530   |
| $H^\pm$                             | 1200       | 1230       |
| $h_{\text{SM-like}}$                | 127.4      | 125.5      |
| $\mu$ (GeV)                         | 213        | 229        |
| $\tan \beta$                        | 54.1       | 52.5       |
| $\delta a_\mu (10^{-10})$           | 27.7       | 28.5       |

ウィーノ  
ライク



$$\frac{m_Z^2}{2} \simeq -\mu^2 - [m_{H_u}^2|_{\text{tree}} - (3-4 \text{ TeV})^2]$$

電弱対称性の破れのスケールを説明する微調整は、ソフトな質量項  $m_{H_u}^2$  で成される。

$\mu$  が小さいのが自然ではないか。

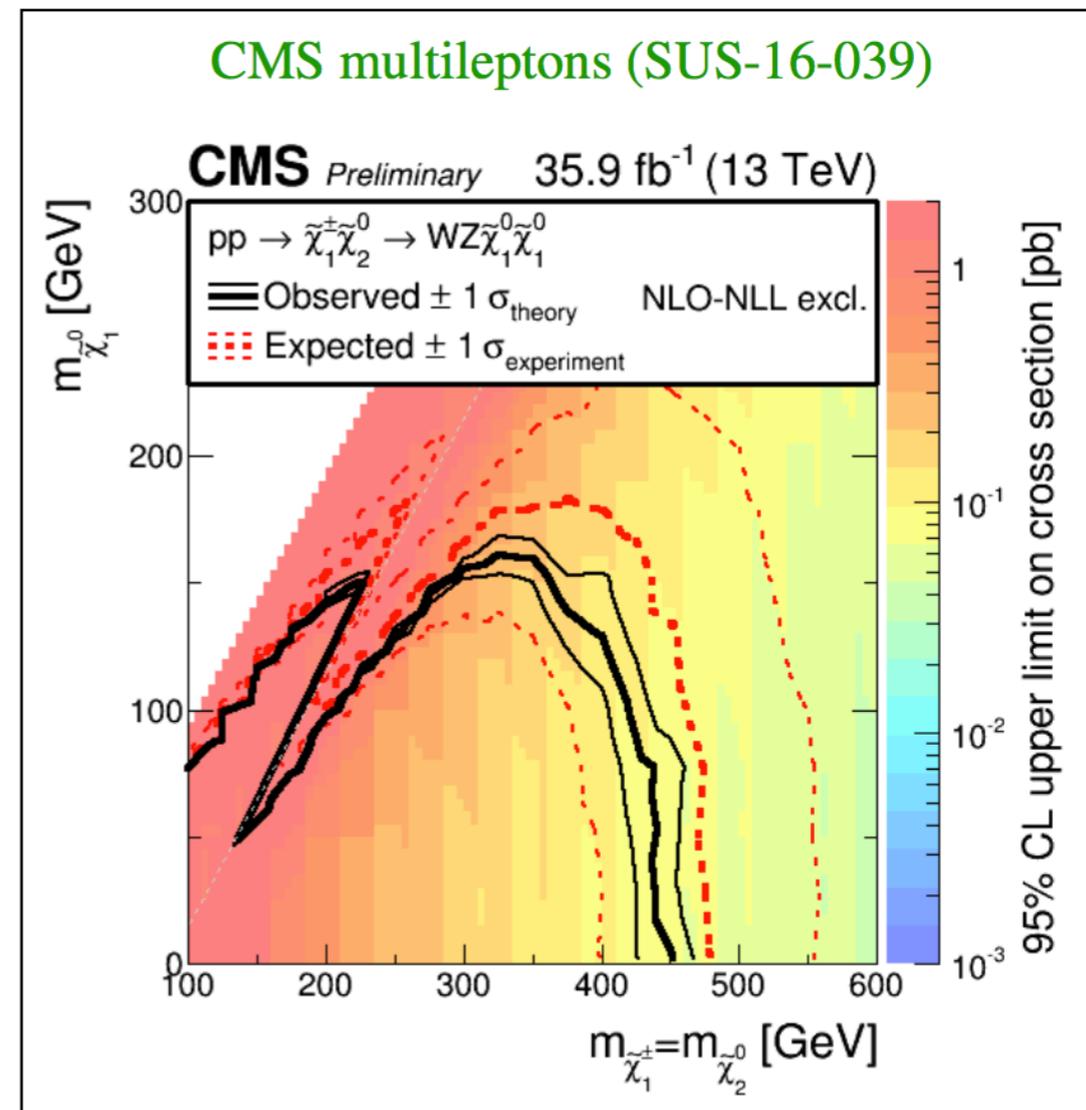
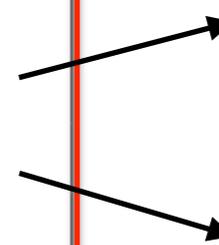
→ ILCのターゲット

$\tan \beta$  は予言値 ( $B(M_D=M_L)=0$ )

# Mass spectra

| Parameters                          | Point I    | Point II   |
|-------------------------------------|------------|------------|
| $M_D$ (TeV)                         | 1500       | $10^4$     |
| $\Lambda_D$ (TeV)                   | 1000       | 700        |
| $\Lambda_L/\Lambda_D$               | 0.17       | 0.25       |
| $m_H^2$ ( $10^7$ GeV <sup>2</sup> ) | 1.69       | 1.09       |
| Particles                           | Mass (GeV) | Mass (GeV) |
| $\tilde{g}$                         | 7070       | 4710       |
| $\tilde{q}$                         | 9030       | 6190       |
| $\tilde{t}$                         | 8320       | 5560       |
| $\tilde{\chi}_1^\pm$                | 211        | 226        |
| $\tilde{\chi}_2^\pm$                | 471        | 482        |
| $\tilde{\chi}_1^0$                  | 205        | 219        |
| $\tilde{\chi}_2^0$                  | 225        | 241        |
| $\tilde{\chi}_3^0$                  | 470        | 480        |
| $\tilde{\chi}_4^0$                  | 746        | 533        |
| $\tilde{e}_{L,R}$                   | 775, 1140  | 717, 852   |
| $\tilde{\tau}_{1,2}$                | 578, 868   | 471, 530   |
| $H^\pm$                             | 1200       | 1230       |
| $h_{\text{SM-like}}$                | 127.4      | 125.5      |
| $\mu$ (GeV)                         | 213        | 229        |
| $\tan \beta$                        | 54.1       | 52.5       |
| $\delta a_\mu$ ( $10^{-10}$ )       | 27.7       | 28.5       |

ウィーノ  
ライク



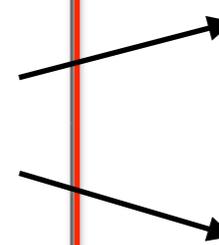
ウィーノライクなチャージーノとニュートラリーノはW, Z or h ボソンを放出してヒッグシーノに崩壊する。

$\tan \beta$  は予言値 (B( $M_D=M_L$ )=0)

# Mass spectra

| Parameters                          | Point I    | Point II   |
|-------------------------------------|------------|------------|
| $M_D$ (TeV)                         | 1500       | $10^4$     |
| $\Lambda_D$ (TeV)                   | 1000       | 700        |
| $\Lambda_L/\Lambda_D$               | 0.17       | 0.25       |
| $m_H^2$ ( $10^7$ GeV <sup>2</sup> ) | 1.69       | 1.09       |
| Particles                           | Mass (GeV) | Mass (GeV) |
| $\tilde{g}$                         | 7070       | 4710       |
| $\tilde{q}$                         | 9030       | 6190       |
| $\tilde{t}$                         | 8320       | 5560       |
| $\tilde{\chi}_1^\pm$                | 211        | 226        |
| $\tilde{\chi}_2^\pm$                | 471        | 482        |
| $\tilde{\chi}_1^0$                  | 205        | 219        |
| $\tilde{\chi}_2^0$                  | 225        | 241        |
| $\tilde{\chi}_3^0$                  | 470        | 480        |
| $\tilde{\chi}_4^0$                  | 746        | 533        |
| $\tilde{e}_{L,R}$                   | 775, 1140  | 717, 852   |
| $\tilde{\tau}_{1,2}$                | 578, 868   | 471, 530   |
| $H^\pm$                             | 1200       | 1230       |
| $h_{\text{SM-like}}$                | 127.4      | 125.5      |
| $\mu$ (GeV)                         | 213        | 229        |
| $\tan \beta$                        | 54.1       | 52.5       |
| $\delta a_\mu$ ( $10^{-10}$ )       | 27.7       | 28.5       |

ウィーノ  
ライク



## コメント

Gaugino mediation [ $SU(5)_{\text{GUT}} \times SU(3)_H \times U(1)_H$ ]ではスクォークが見つかる可能性も十分ある。

(A-termがそこそこ大きく、ヒッグス質量が説明しやすいため)

[Harigaya, Yanagida, Yokozaki, 2015]

$\tan \beta$  は予言値 ( $B(M_D=M_L)=0$ )

# 結論

- 最もシンプルな場合(Pure Gravity Mediation)、ウィーノとグルイーノが見えるかも。
- ヒッグスがSUSY breaking fieldと直接結合している場合(Higgs-Anomaly mediation), スクォークも見える可能性が高い。また大統一理論とよりコンシスタント(湯川結合定数の統一)。
- ミューオン $g-2$ をシリアスに捉えた場合、ヒッグシーノ質量は $O(100)\text{GeV}$ である可能性が高い。

有難うございました。

# Gaugino mediation in PGU

| Parameters                  | Point I    |
|-----------------------------|------------|
| $M_1(M_{\text{GUT}})$ (GeV) | 2600       |
| $M_2(M_{\text{GUT}})$ (GeV) | 400        |
| $M_3(M_{\text{GUT}})$ (GeV) | 1500       |
| $A_u(M_{\text{GUT}})$ (GeV) | -1700      |
| $\mu$ (GeV)                 | 200        |
| $m_A$ (GeV)                 | 2000       |
| $\tan \beta$                | 30         |
| Particles                   | Mass (GeV) |
| $\tilde{g}$                 | 3200       |
| $\tilde{q}$                 | 2770       |
| $\tilde{t}$                 | 2090       |
| $\tilde{\chi}_1^\pm$        | 185        |
| $\tilde{\chi}_2^\pm$        | 339        |
| $\tilde{\chi}_1^0$          | 180        |
| $\tilde{\chi}_2^0$          | 211        |
| $\tilde{\chi}_3^0$          | 337        |
| $\tilde{\chi}_4^0$          | 1110       |
| $\tilde{e}_{L,R}$           | 554, 930   |
| $\tilde{\tau}_{1,2}$        | 366, 721   |
| $h_{\text{SM-like}}$        | 125.1      |
| $\delta a_\mu (10^{-10})$   | 25.8       |

$SU(5)_{\text{GUT}} \times SU(3)_H \times U(1)_H$ の模型

EW sectorはGMSBと似ている。

スクォークとグルイーノは軽い。

# Additional Higgs soft masses

For instance,

$$W = m^2 Z + \frac{\kappa}{2} Z X^2 + M_{XY} XY + \lambda_X X H_u H_d,$$

$$\delta m_{H_u}^2 = \delta m_{H_d}^2 = \frac{|\lambda_X|^2 \kappa^2 m^4}{32\pi^2 M_{XY}^2} \left[ 1 + \frac{\kappa^2 m^4}{6M_{XY}^4} + \mathcal{O}\left(\frac{\kappa^4 m^8}{M_{XY}^8}\right) \right].$$

$\sim 10^7 \text{ GeV}^2$

No A-terms and B-terms are generated.