

# 軽い超対称性粒子の可能性

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

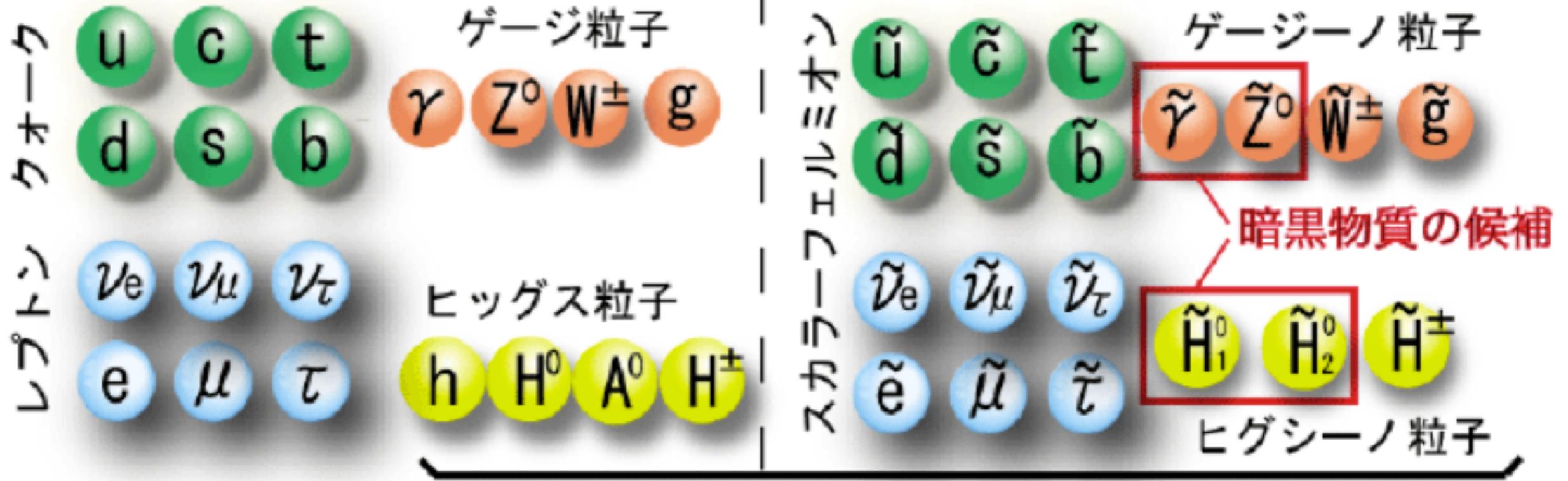
コスモロジーは有利

- 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



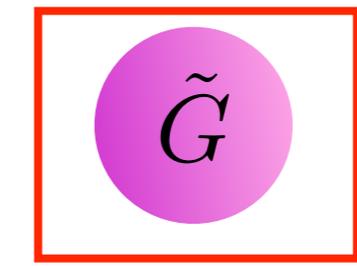
ヒッグス、超対称性粒子は未発見

+

グラビトン



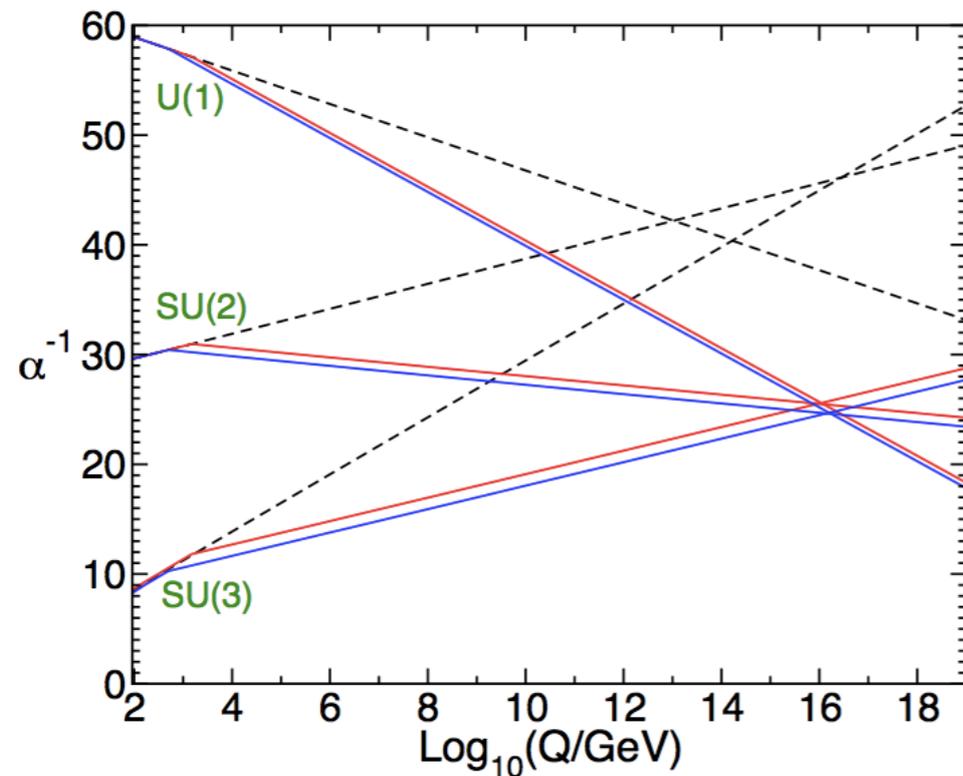
グラビティーノ



暗黒物質の候補

上の図は、<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/tokutei/overview/significance.html>から

# Why SUSY



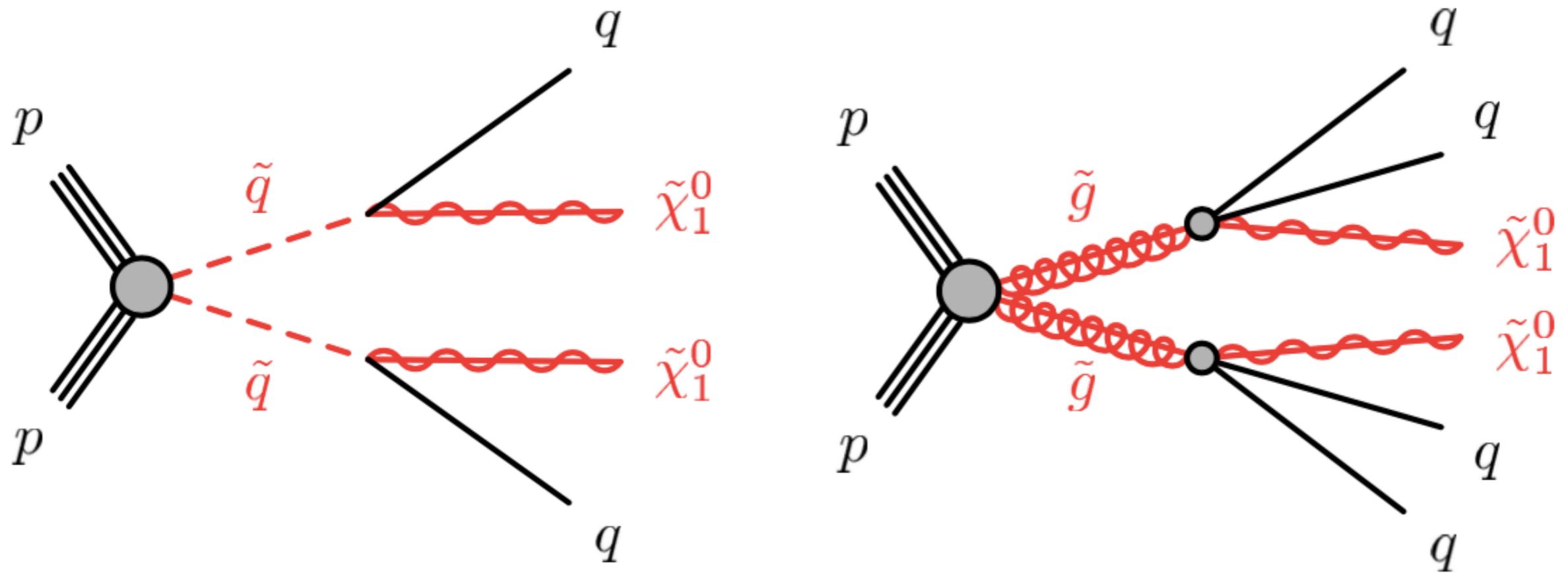
[from SUSY primer, S. Martin]

- 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

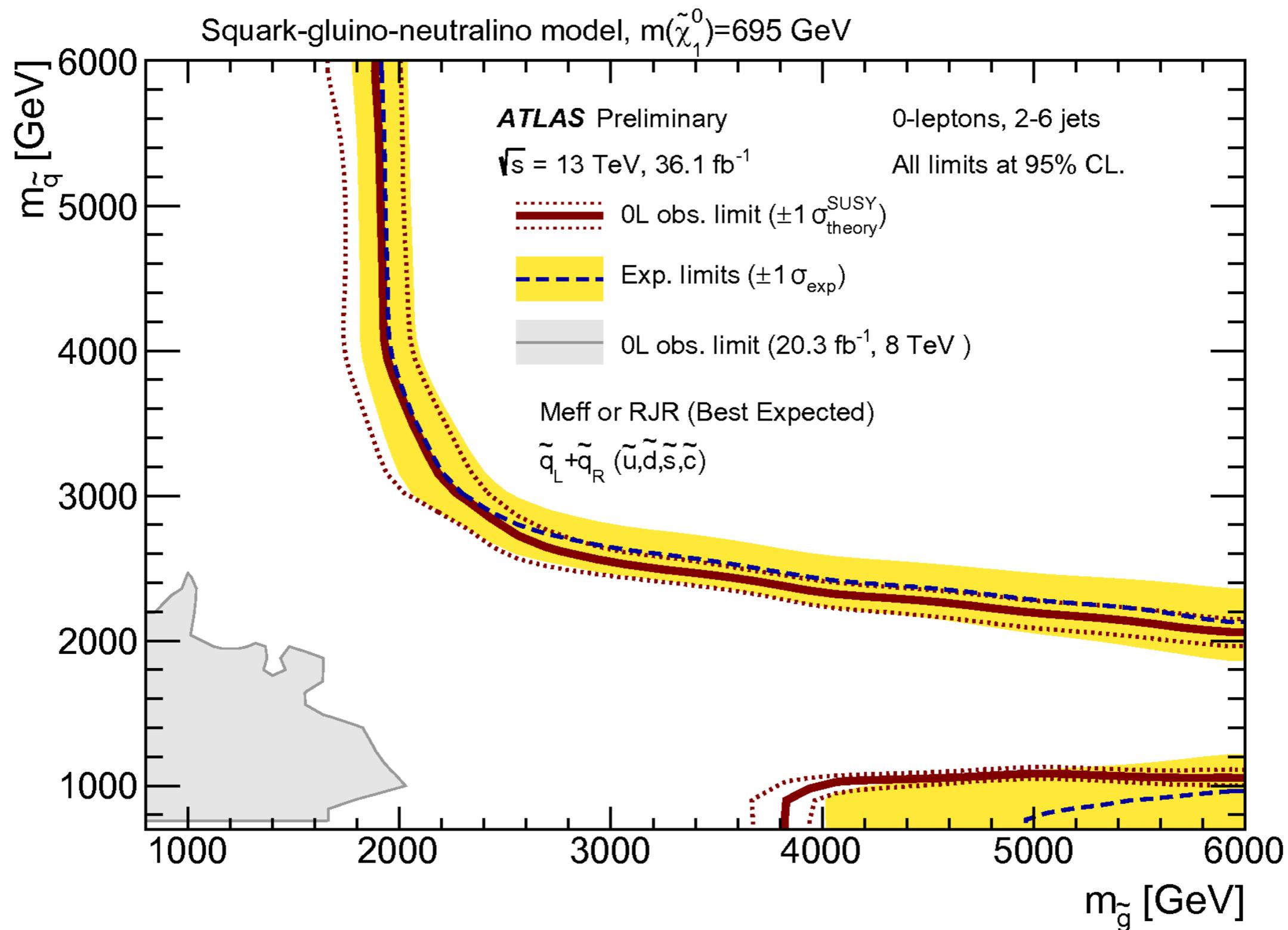
例



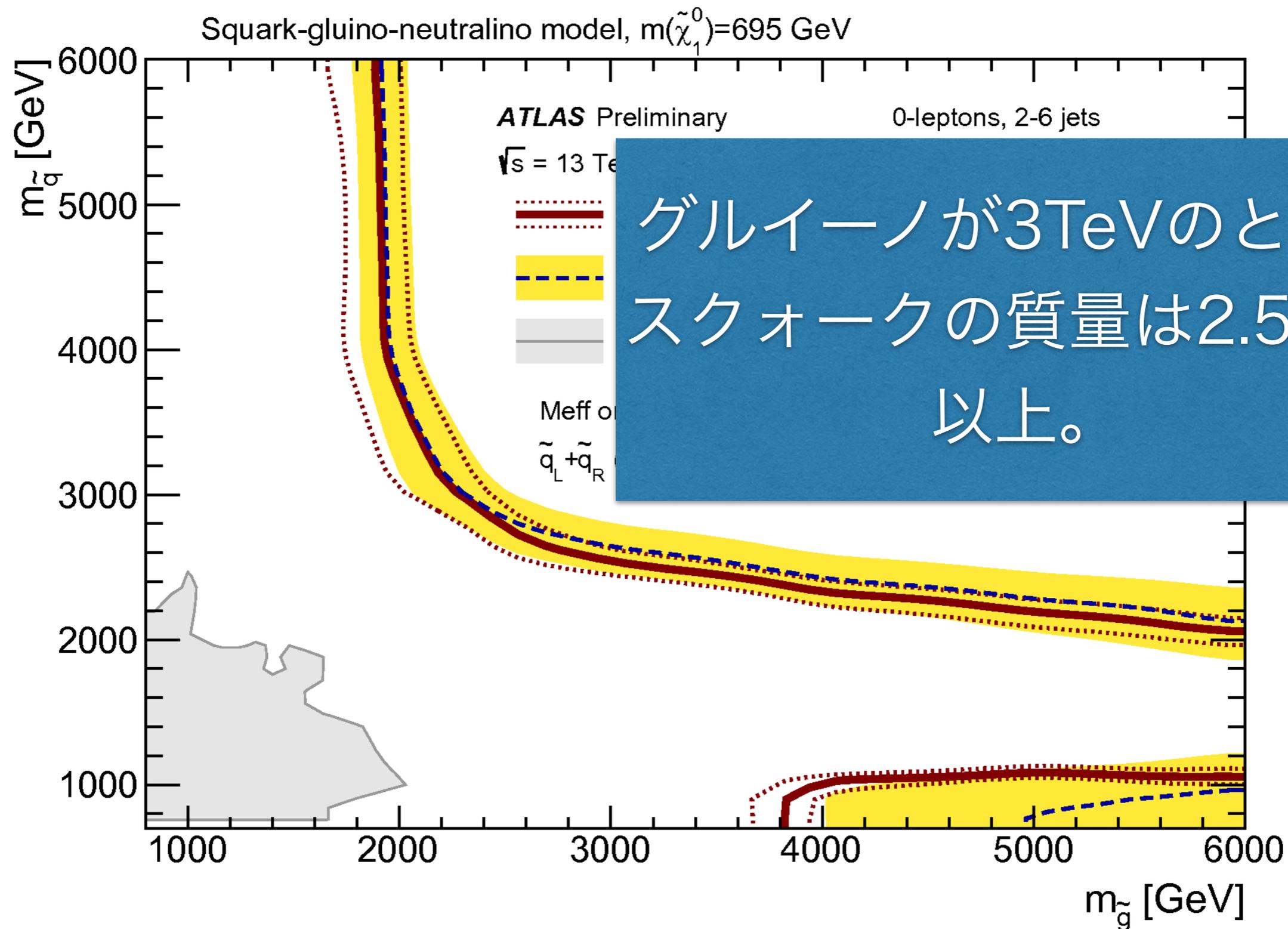
終状態はmulti-jets + missing transverse momentum

Figs: ATLAS-CONF-2017-022

# Bound on colored SUSY particles



# Bound on colored SUSY particles



# Higgs mass

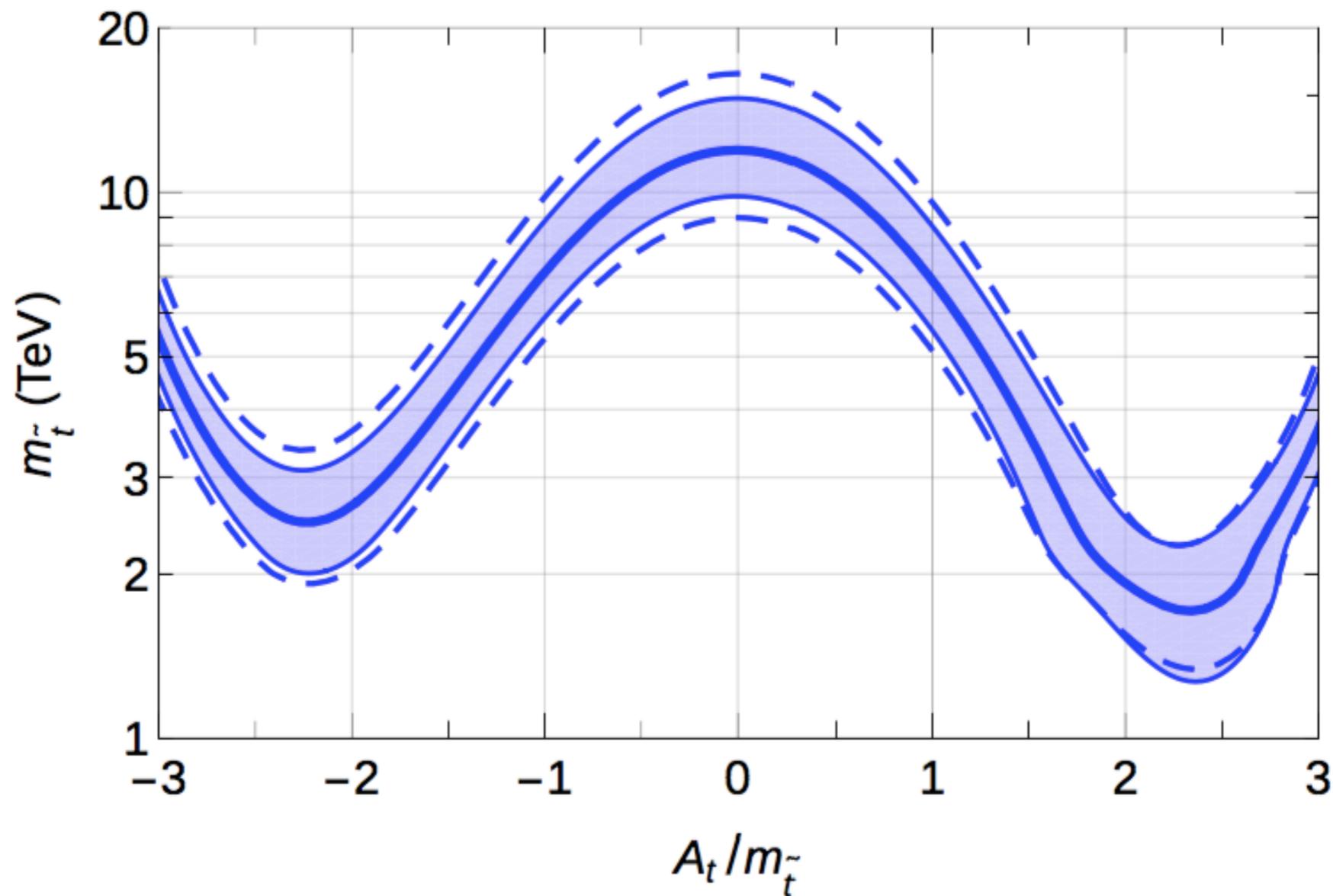


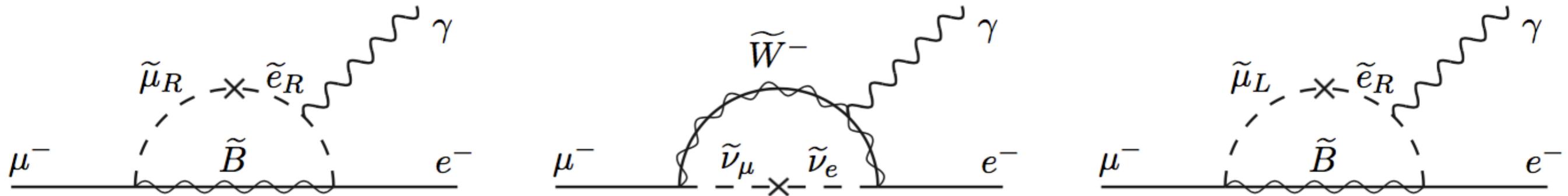
Figure 5: Allowed values of the OS stop mass reproducing  $m_h = 125$  GeV as a function of the stop mixing, with  $\tan\beta = 20$ ,  $\mu = 300$  GeV and all the other sparticles at 2 TeV. The band reproduce the theoretical uncertainties while the dashed line the  $2\sigma$  experimental uncertainty 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 ...]

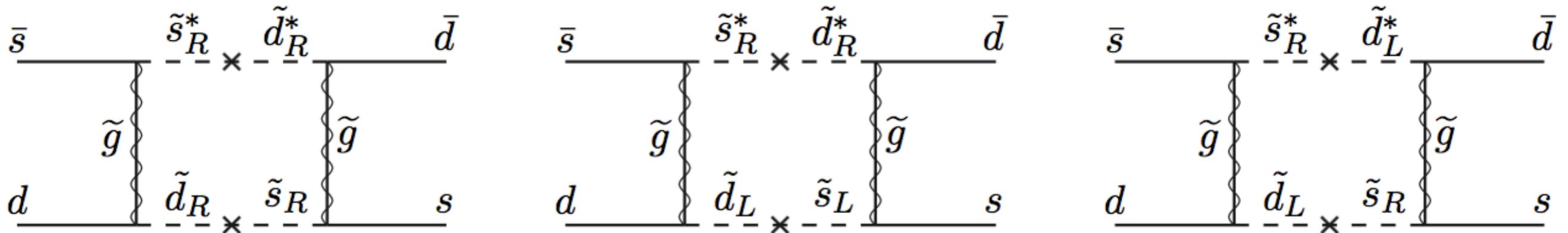
# Flavor problem

$\mu \rightarrow e \gamma$



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

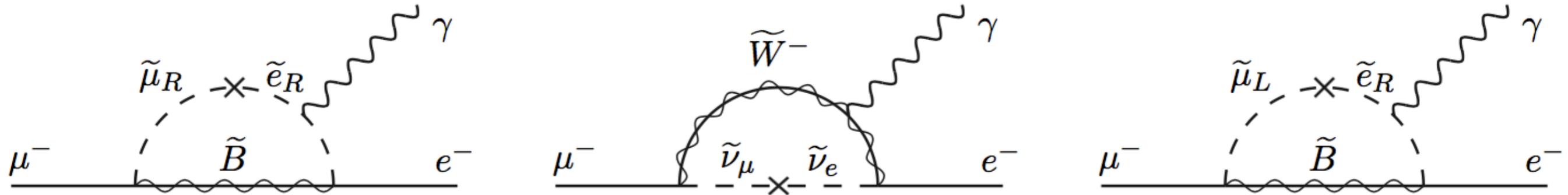


スクォークの質量は~1000 TeV必要。

Figs. from "A Supersymmetry Primer"

# Flavor problem

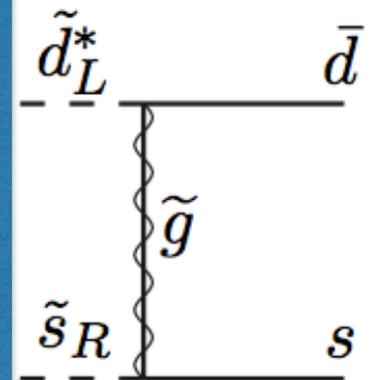
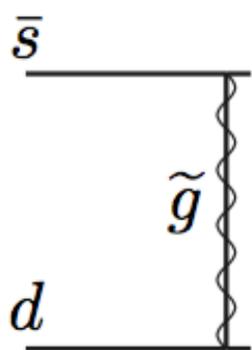
$\mu \rightarrow e \gamma$



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。 $\sim 100-1000$  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]

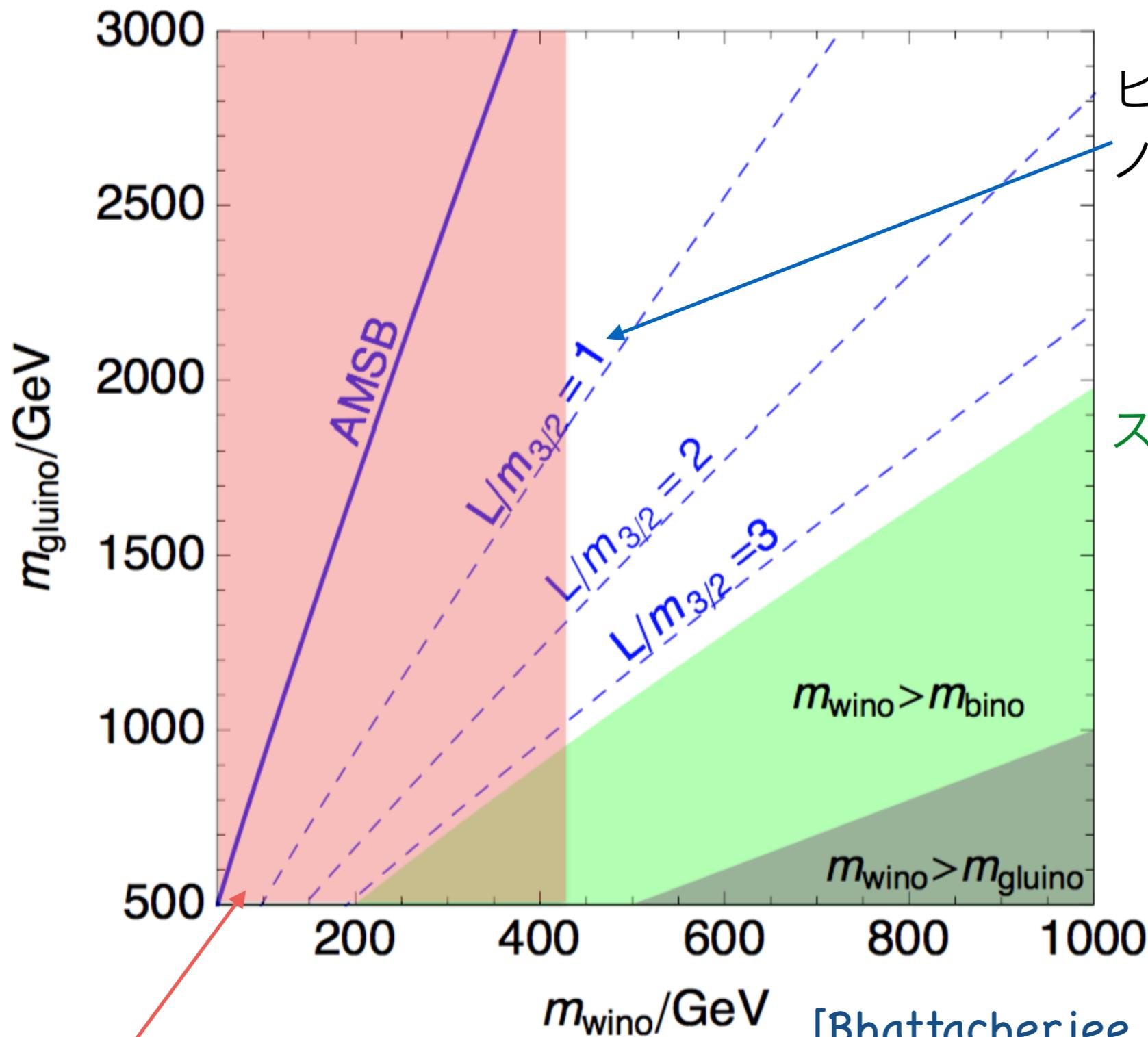
# Pure gravity mediation

- 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%)。

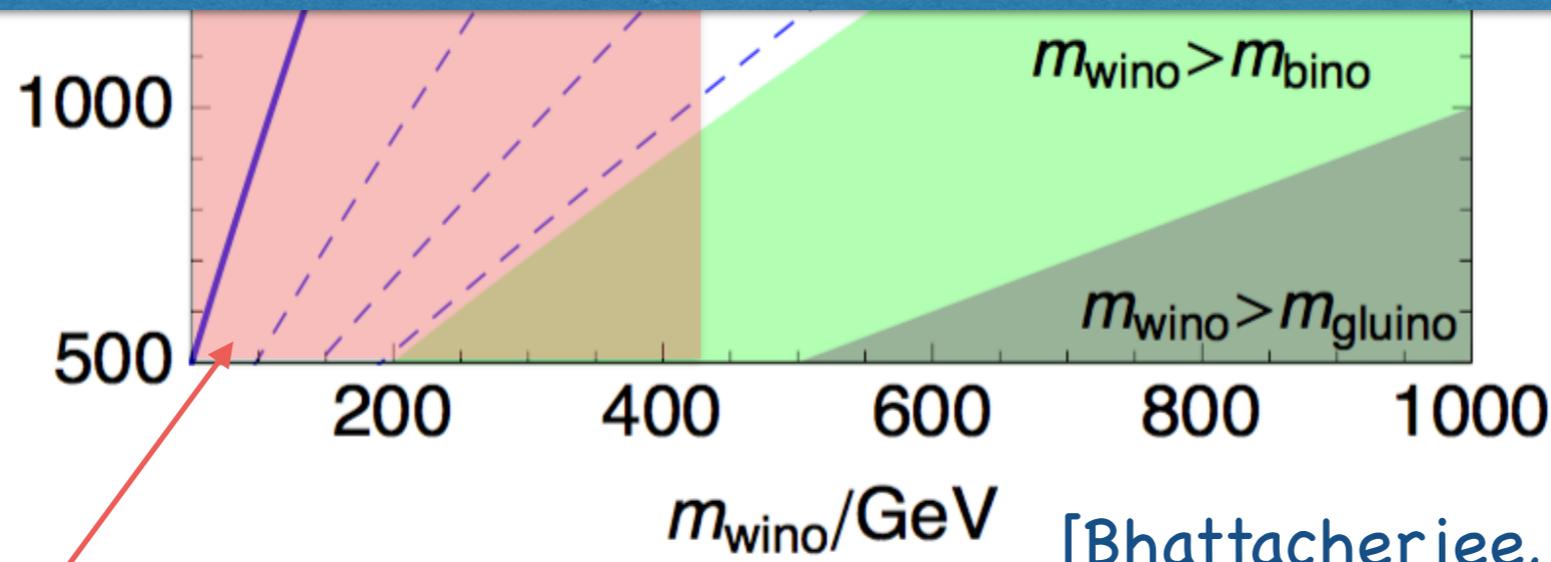
[Gherghetta, Giudice, Wells, 1999]



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

%)。

# フレーバー問題の解

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

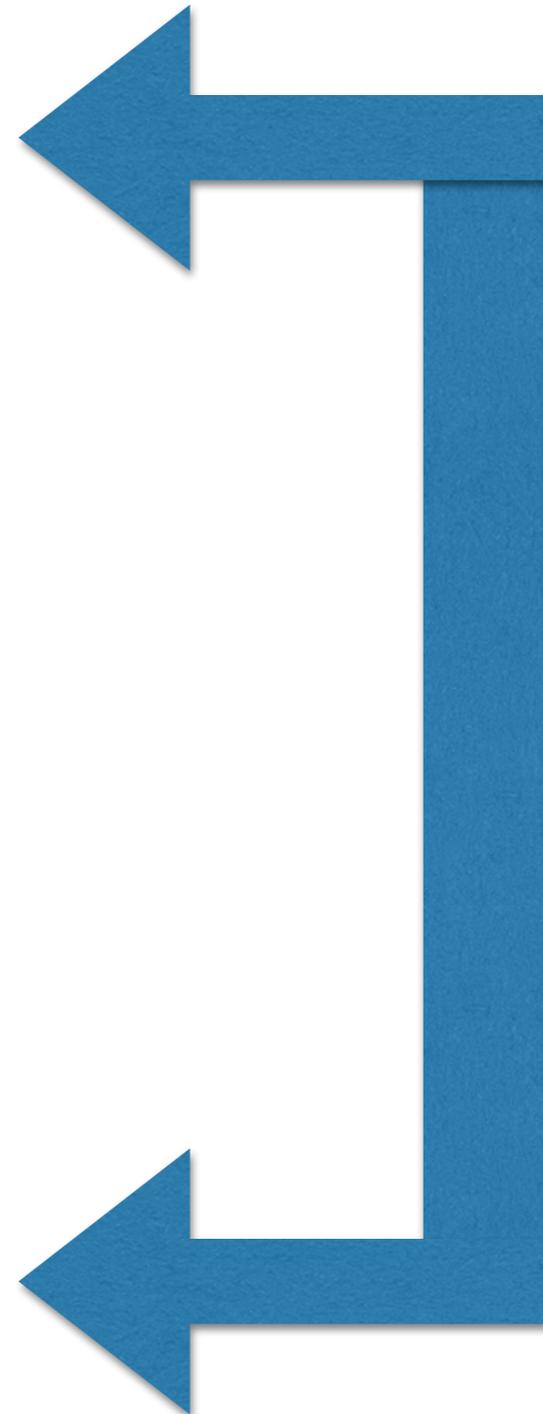
★  
★  
軽い重力ティーノ (<1 GeV) とフレーバーを破らない Mediation

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

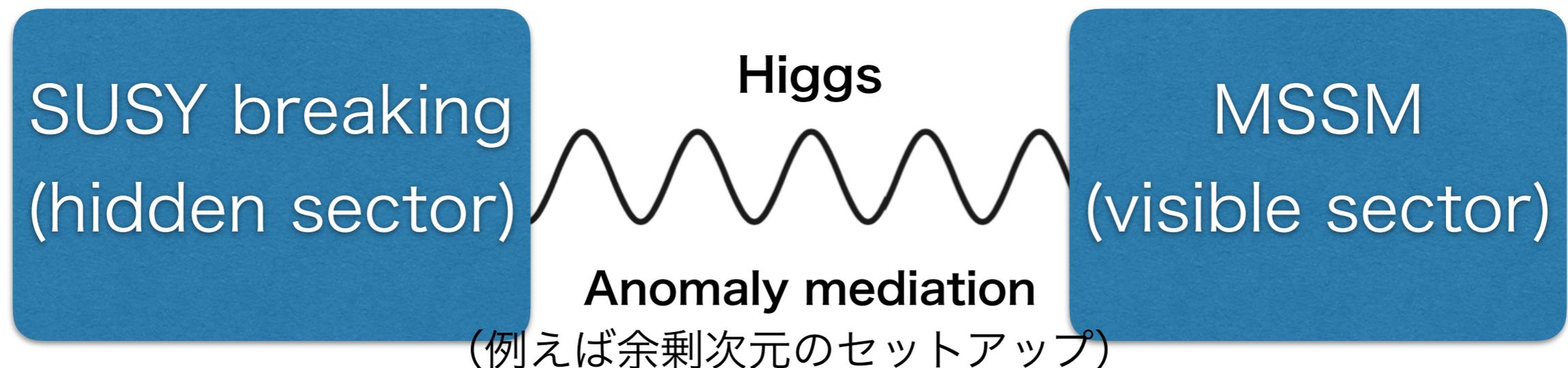


合体

(スクォークが見えるだけでなく、GUTとよりコンシステトになる)

# 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

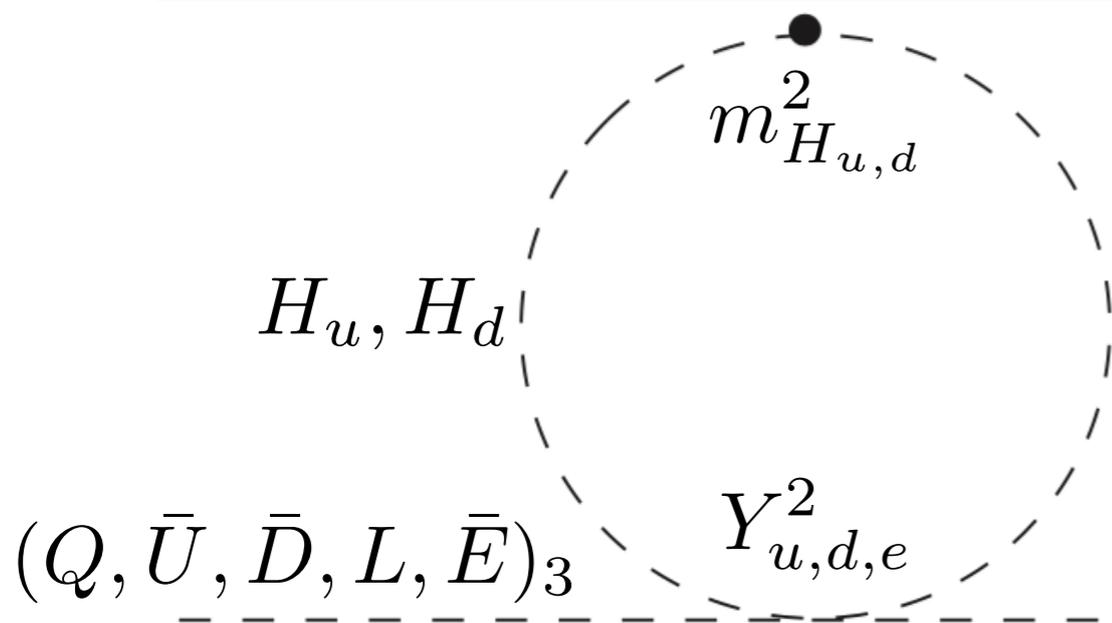
(quark, lepton, Higgs)

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

$c_Z > 0$

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

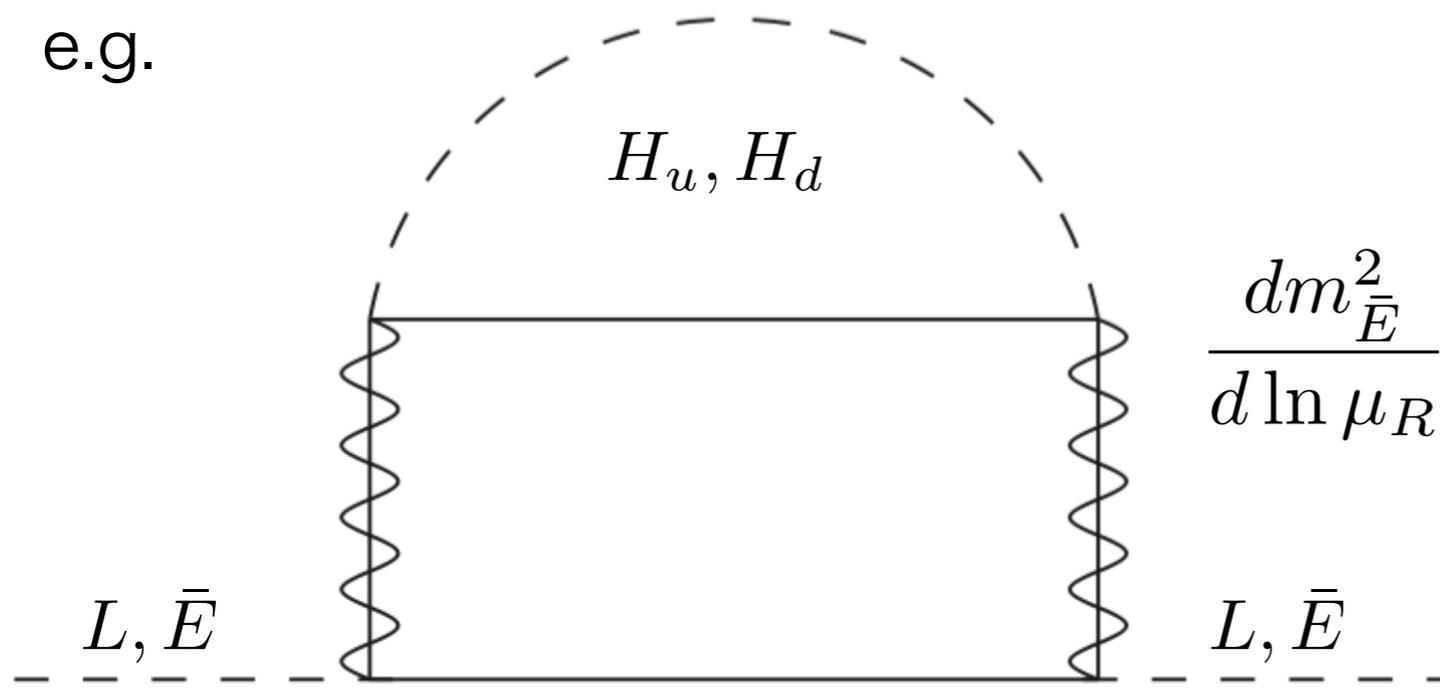
ヒッグスのソフトな質量がネガティブであることが重要。



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

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.

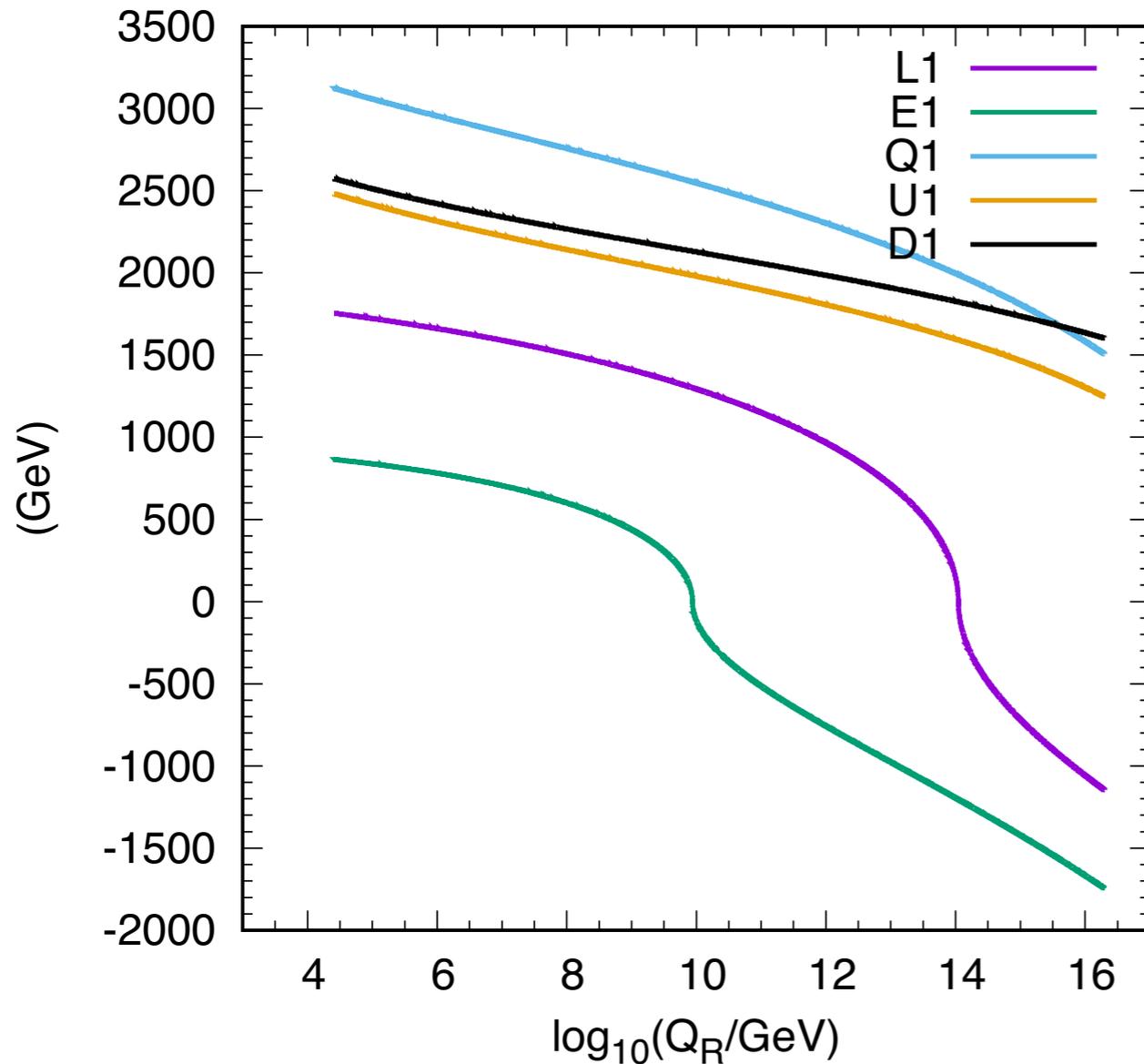


$$\frac{dm^2_{\bar{E}}}{d \ln \mu_R} \ni \frac{1}{(16\pi^2)^2} \left[ \frac{36}{25} g_1^4 (m^2_{H_u} + m^2_{H_d}) \right] < 0$$

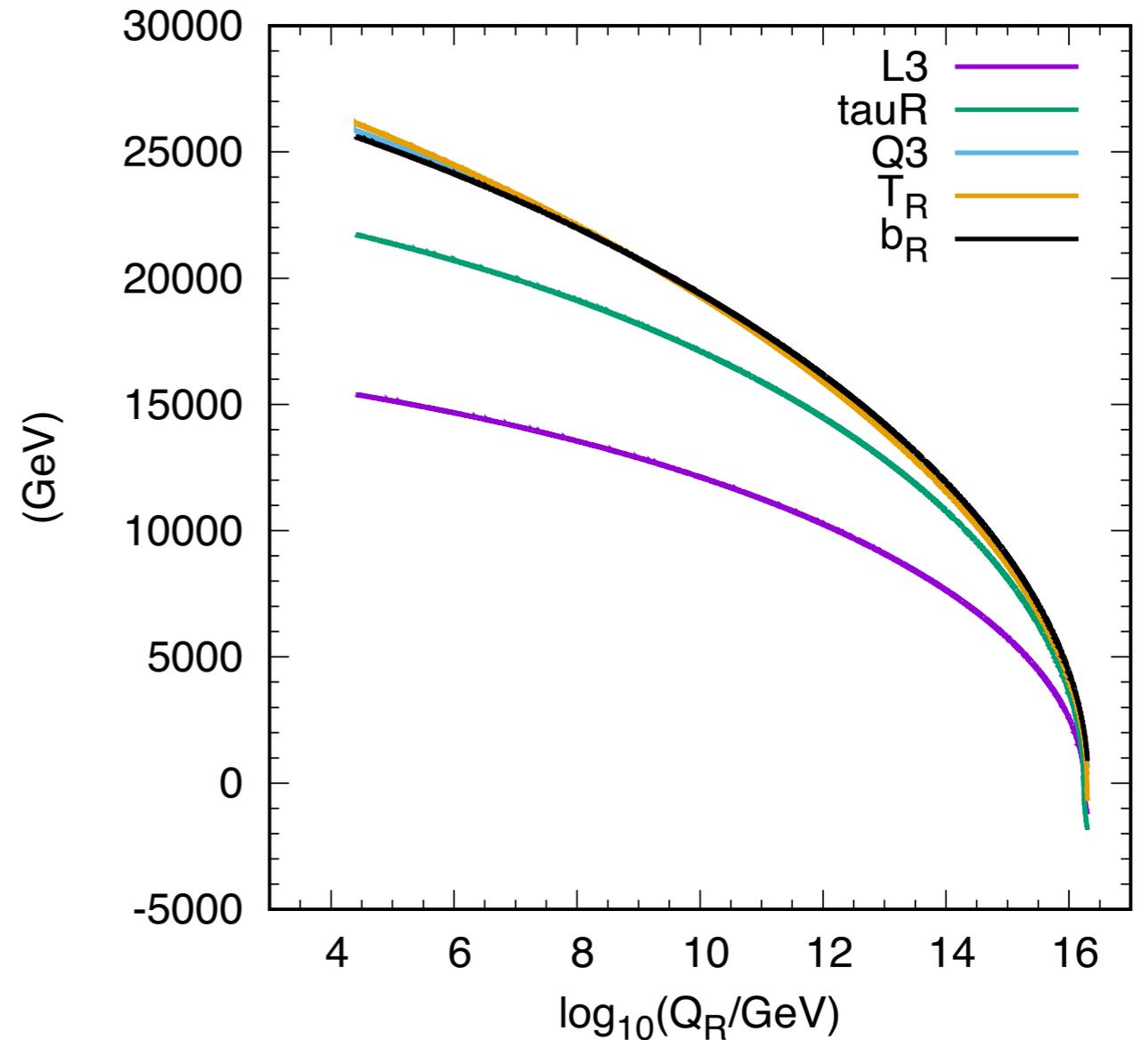
スレプトンの質量を持ち上げる。タキオニックスレプトン問題を解く。

# RGE runnings

1st/2nd generation



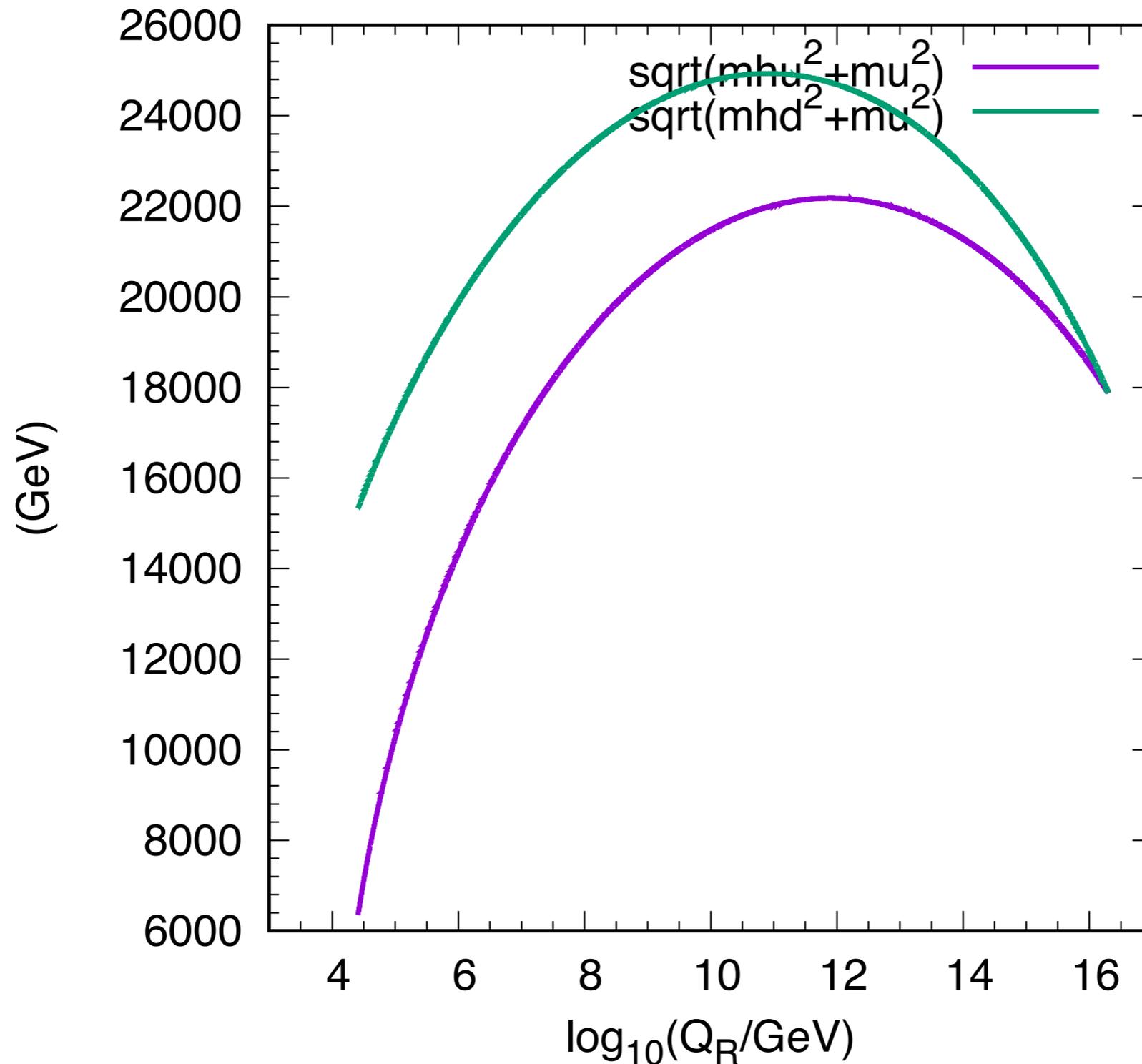
3rd generation



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

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

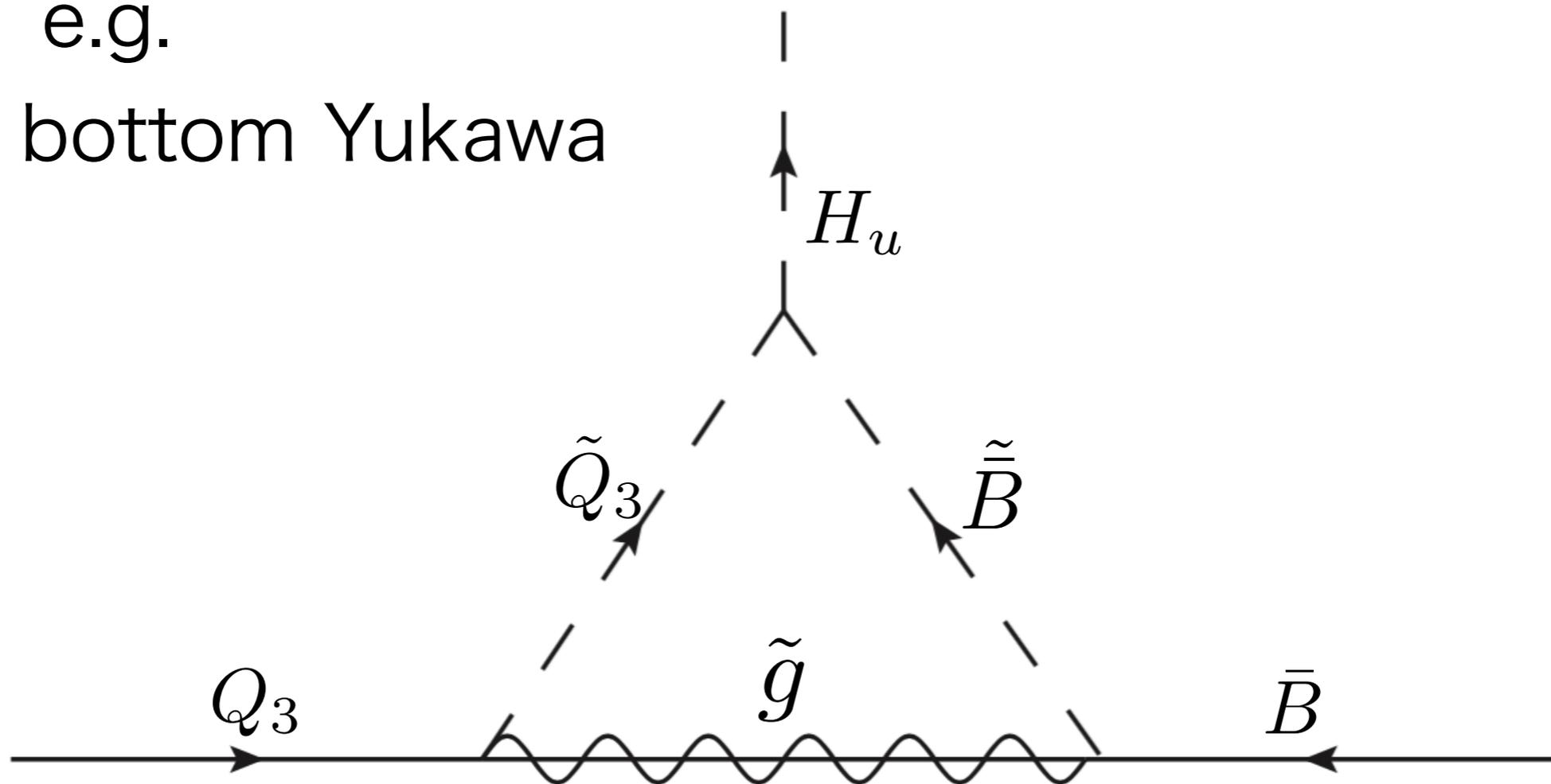
**Glino: 4 TeV, Wino: 630 GeV**



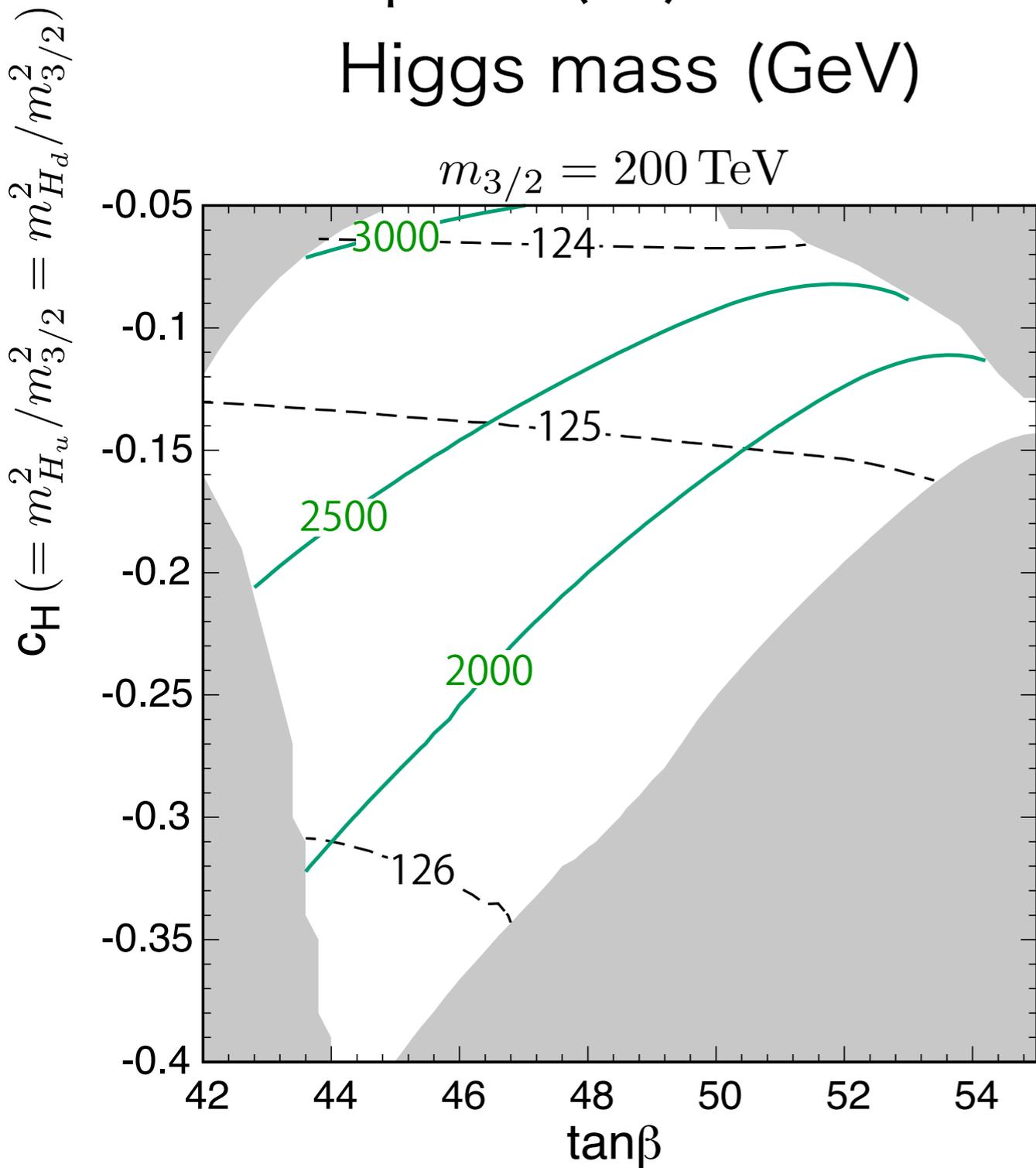
ヒッグスポテンシャルの2次の項自体はポジティブ  
(D-flat direction ( $H_u=H_d$ ) は安全!)

# Higgs mass, squark mass and unification of Yukawa couplings

e.g.  
bottom Yukawa



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

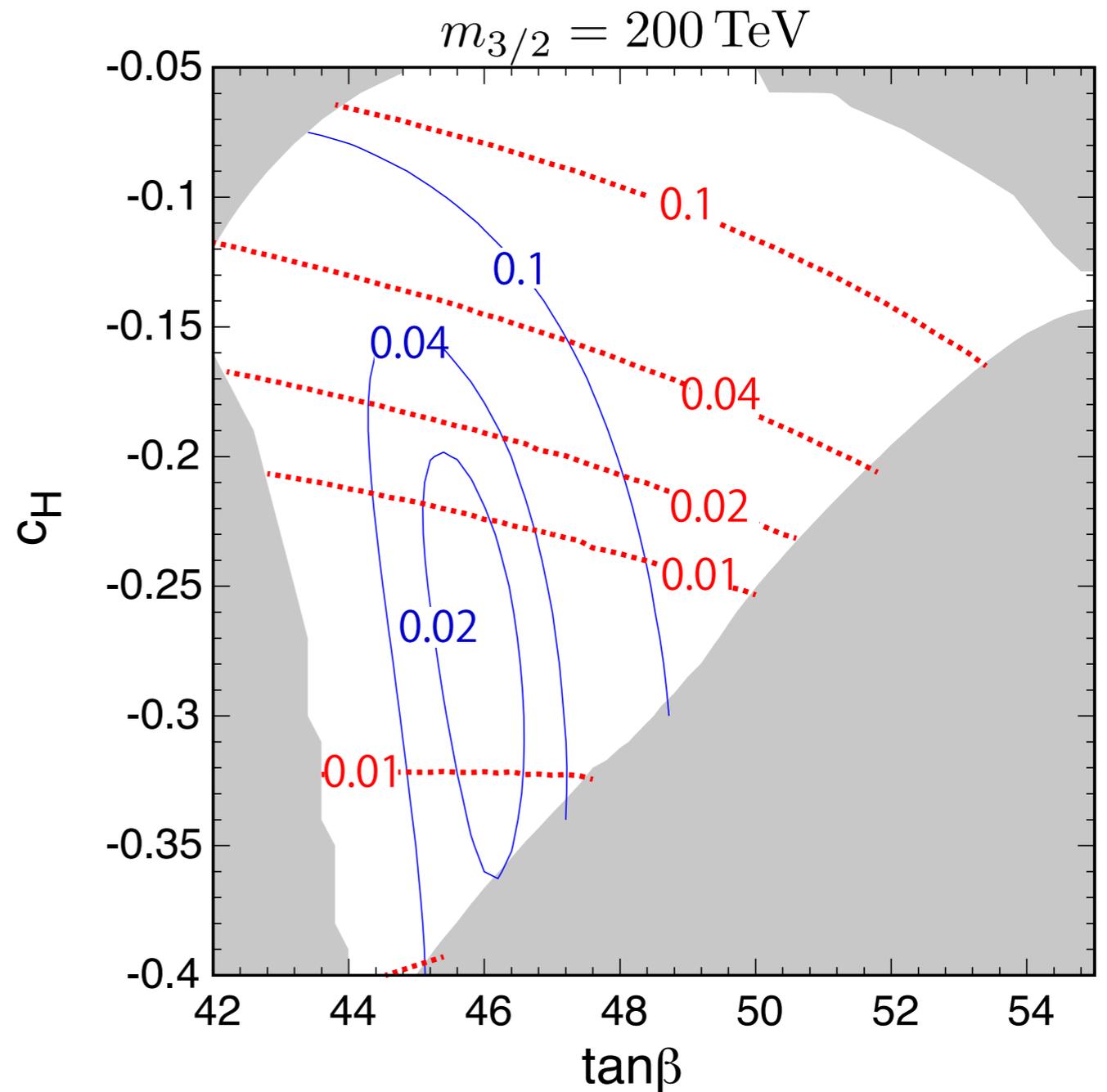


black: Higgs boson mass

green: squark mass

グルイーン: 4TeV, ウィーン: 630GeV

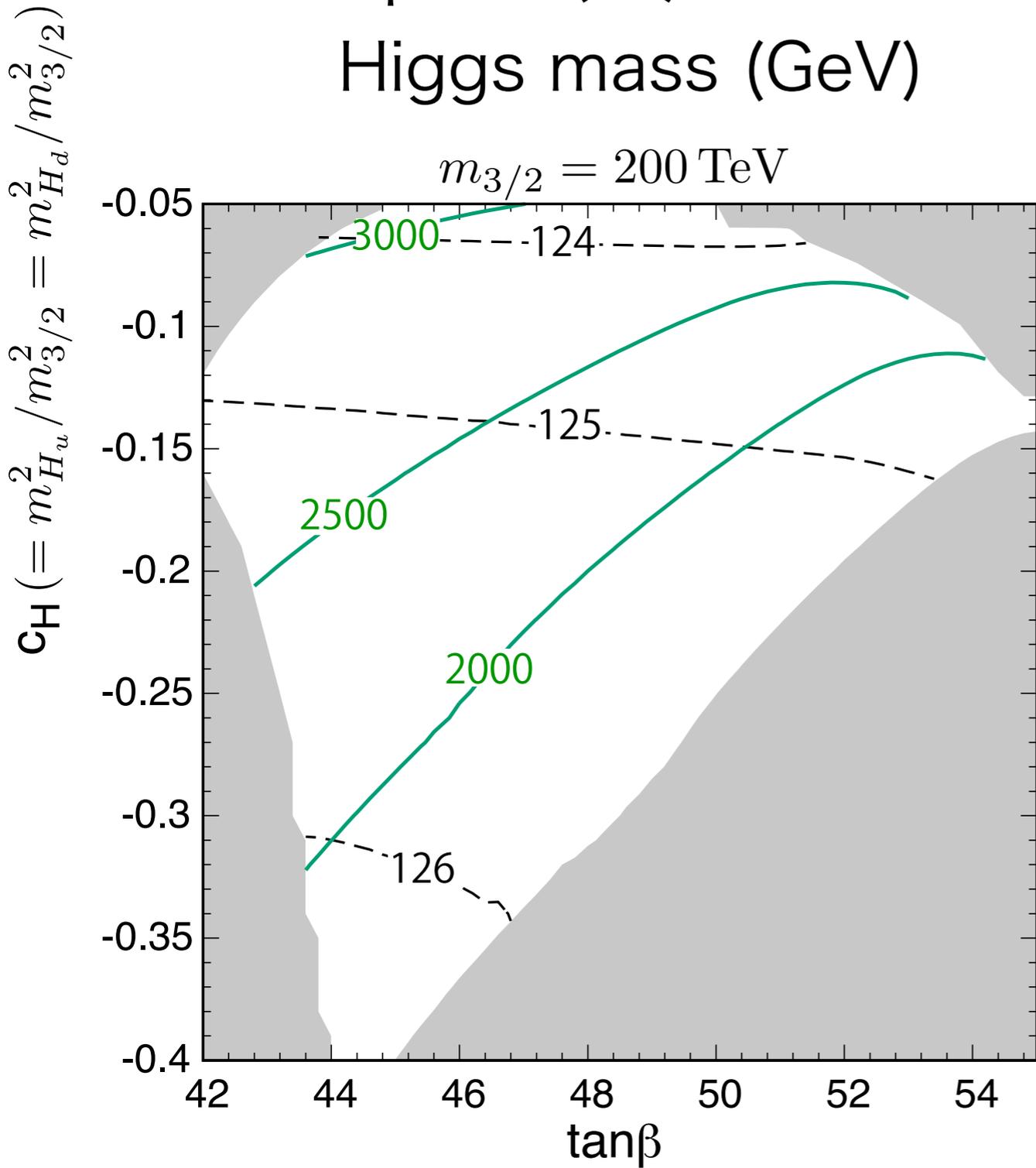
# Unification of Yukawa couplings



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)

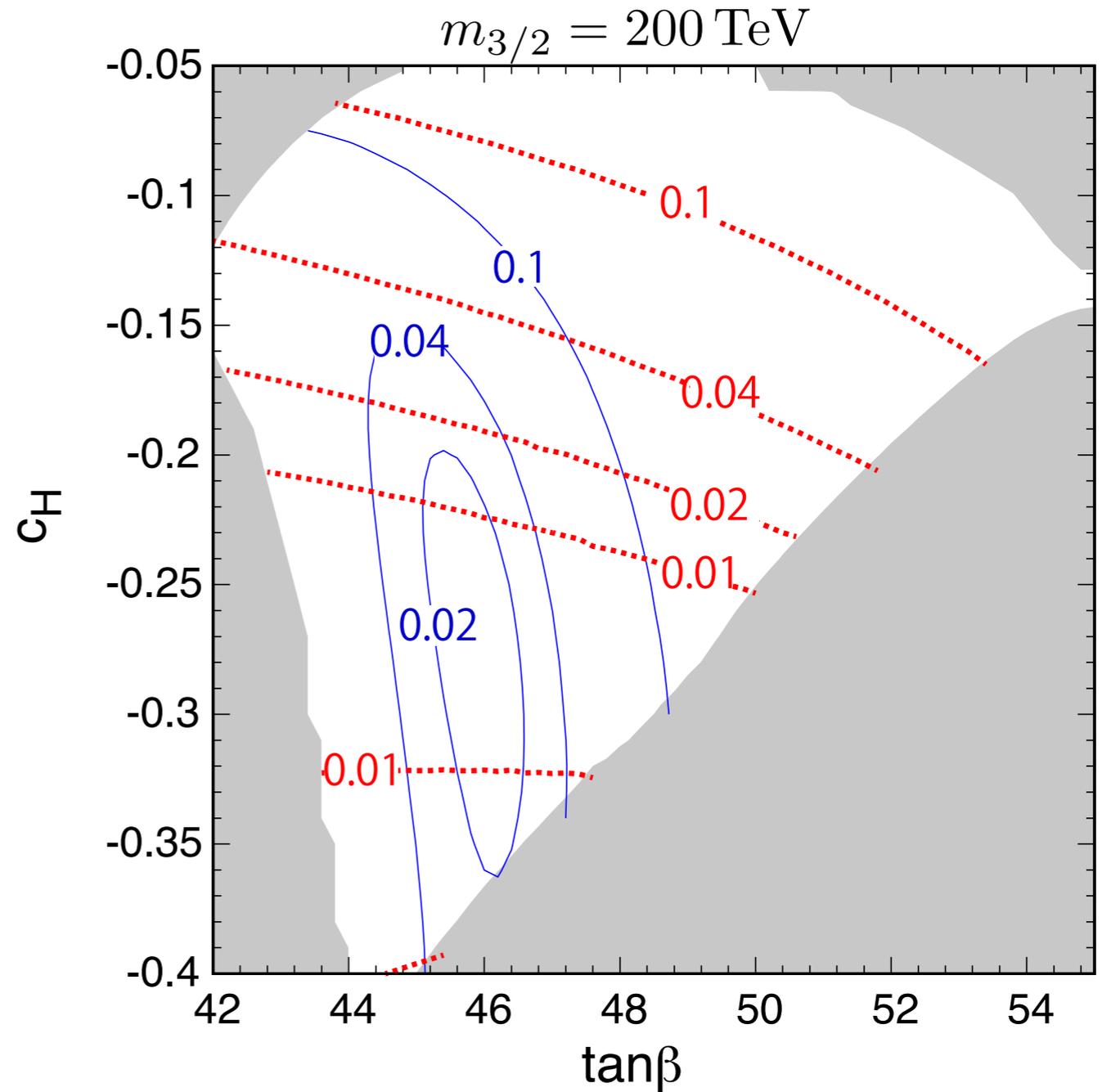


black: Higgs boson mass

green: squark mass

グルイーノ: 4TeV, ウィーノ: 630GeV

# Unification of Yukawa couplings



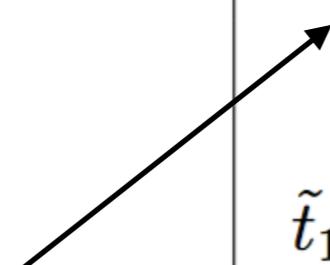
マッチングの精度を上げるとリージョンが少し上にずれそう

[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

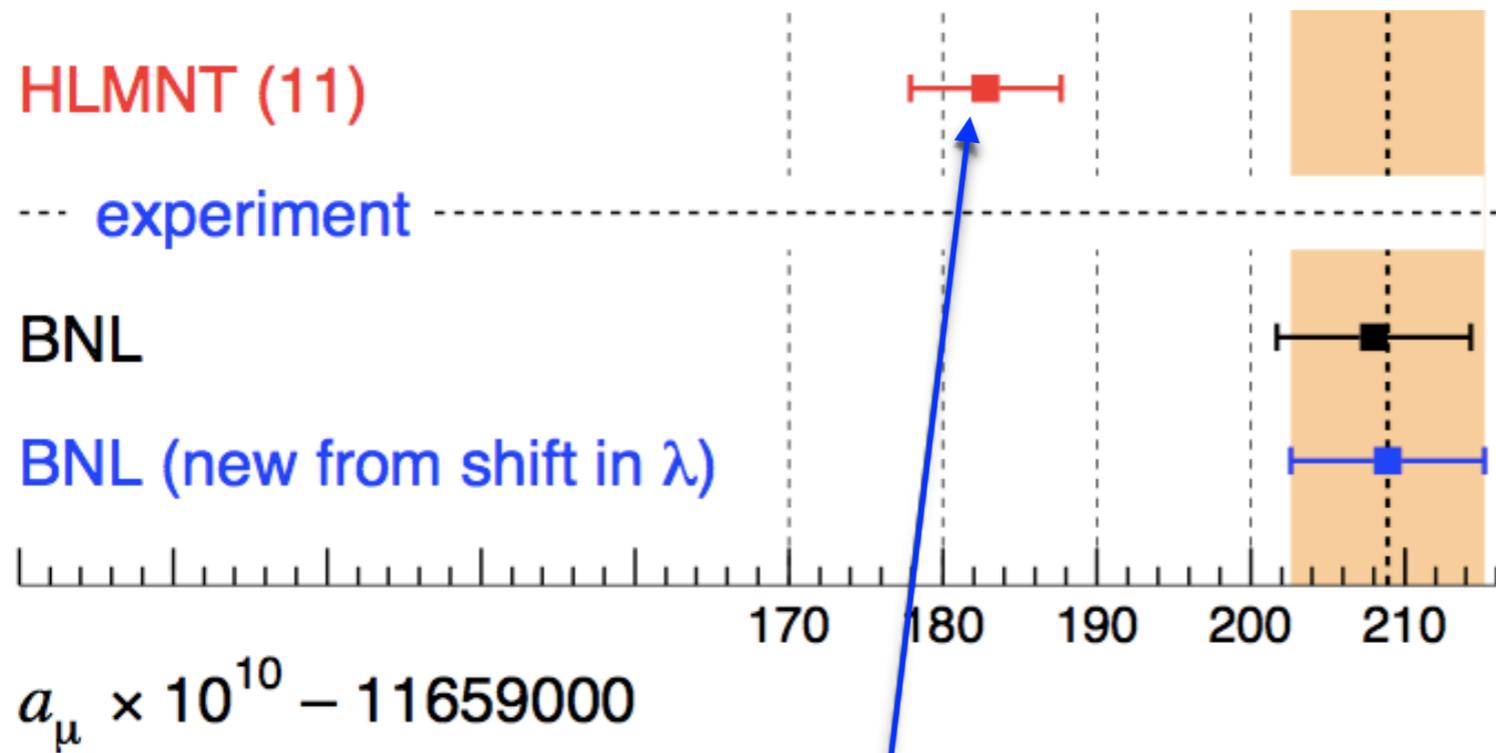
## Muon $g-2$ in GMSB models revisited

(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  $\sigma$ ]

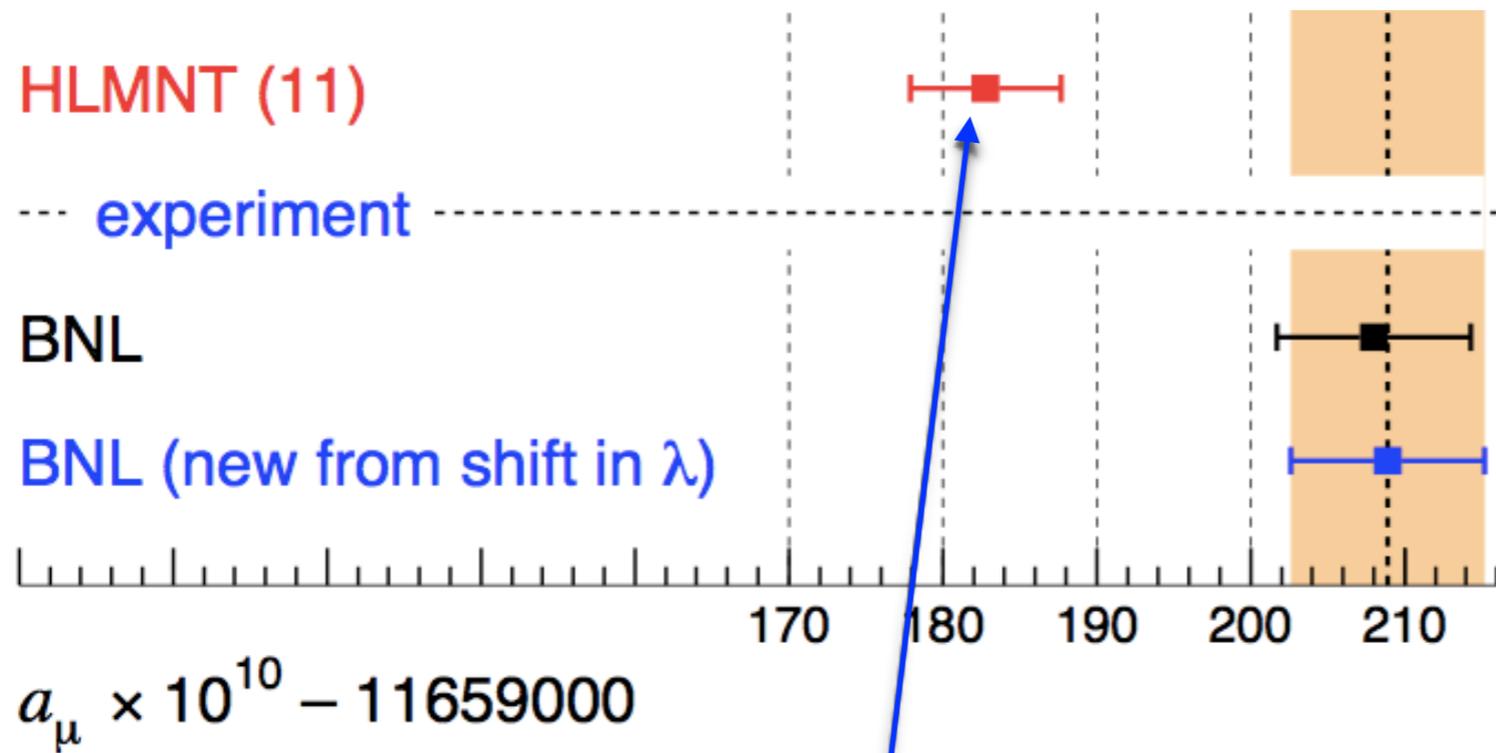
[Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner, J.Phys. G38 (2011) 085003]

SM value

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

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

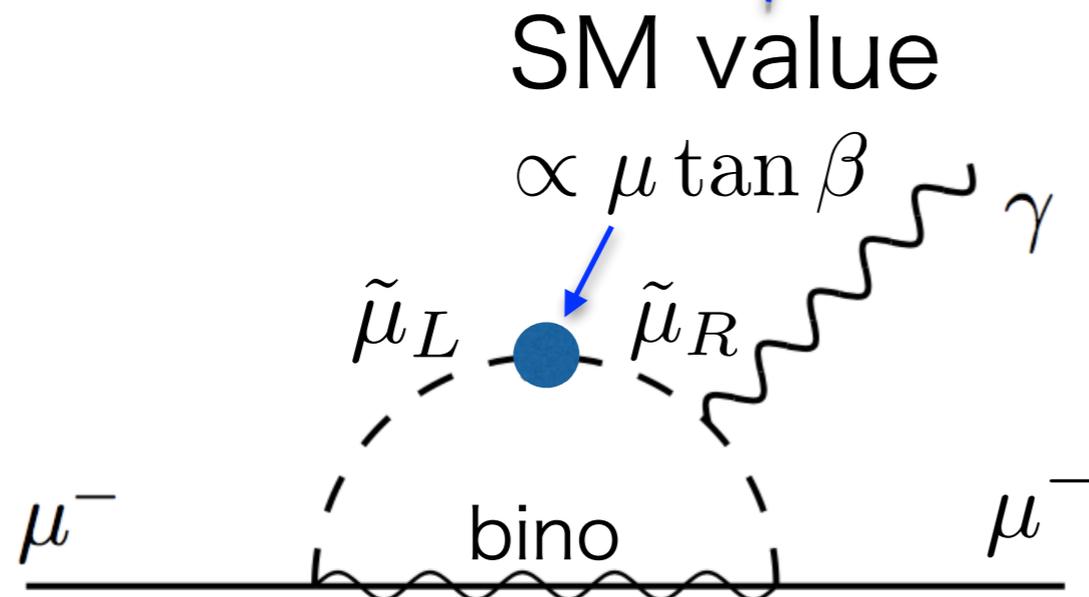
# ミューオン $g-2$ アノマリー



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

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

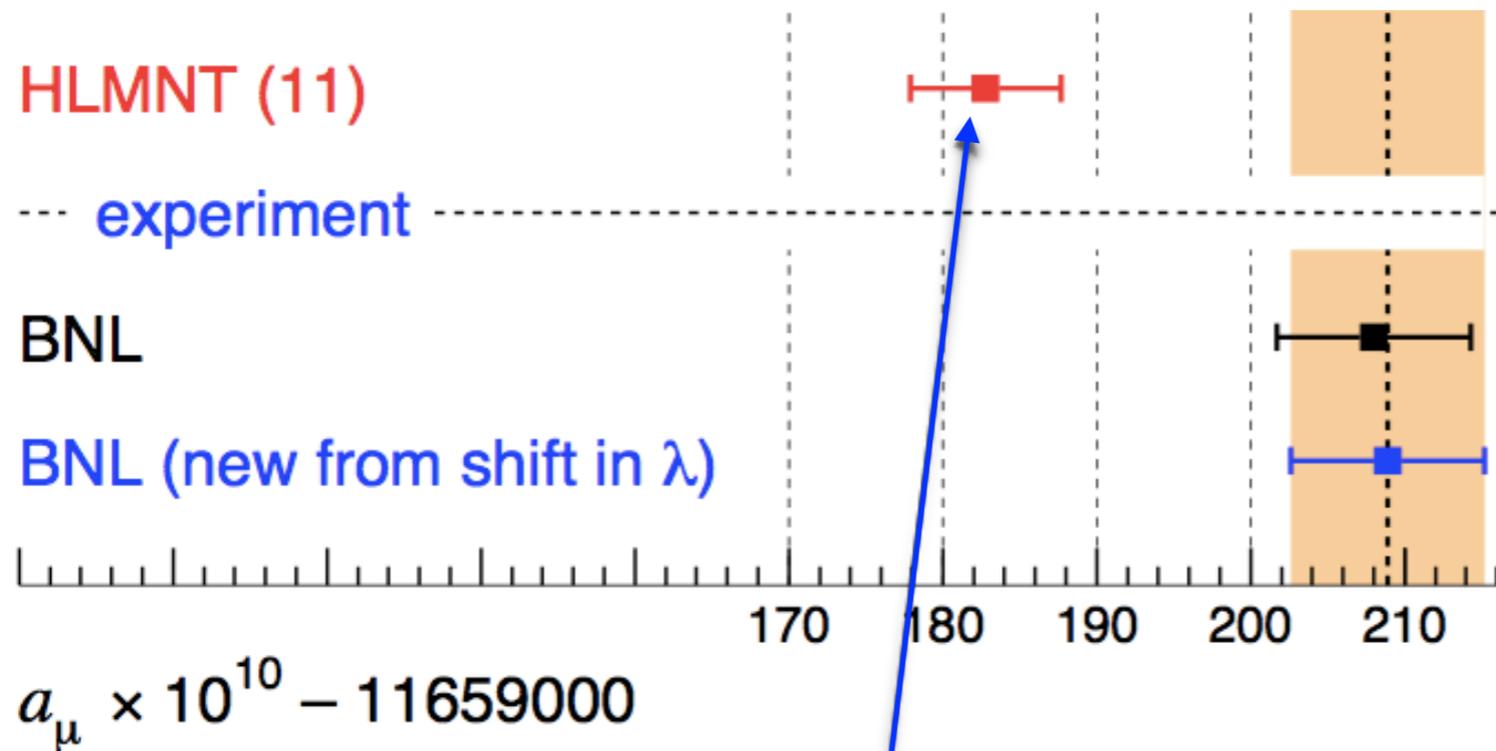
[Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner, J.Phys. G38 (2011) 085003]



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!**

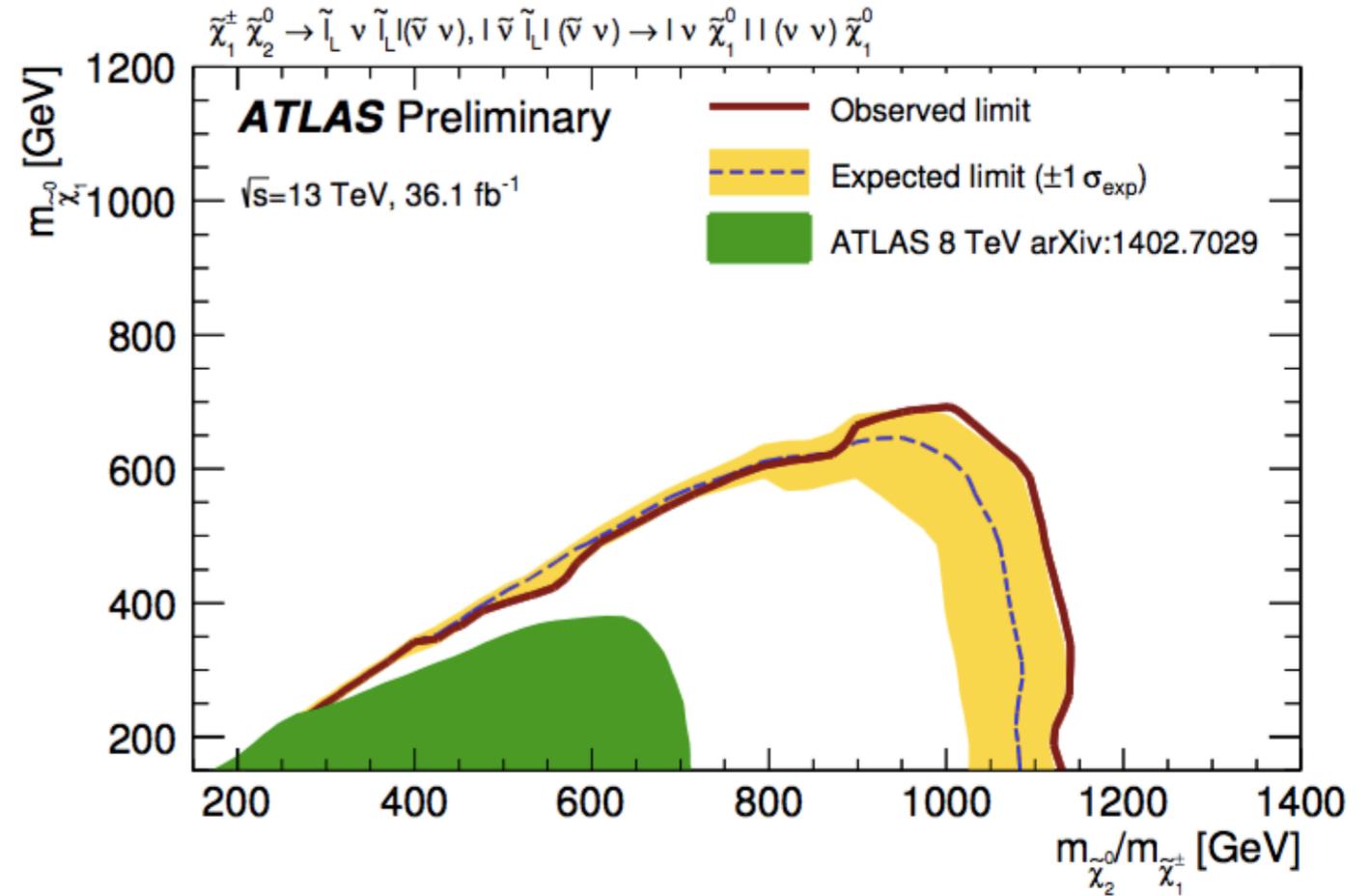
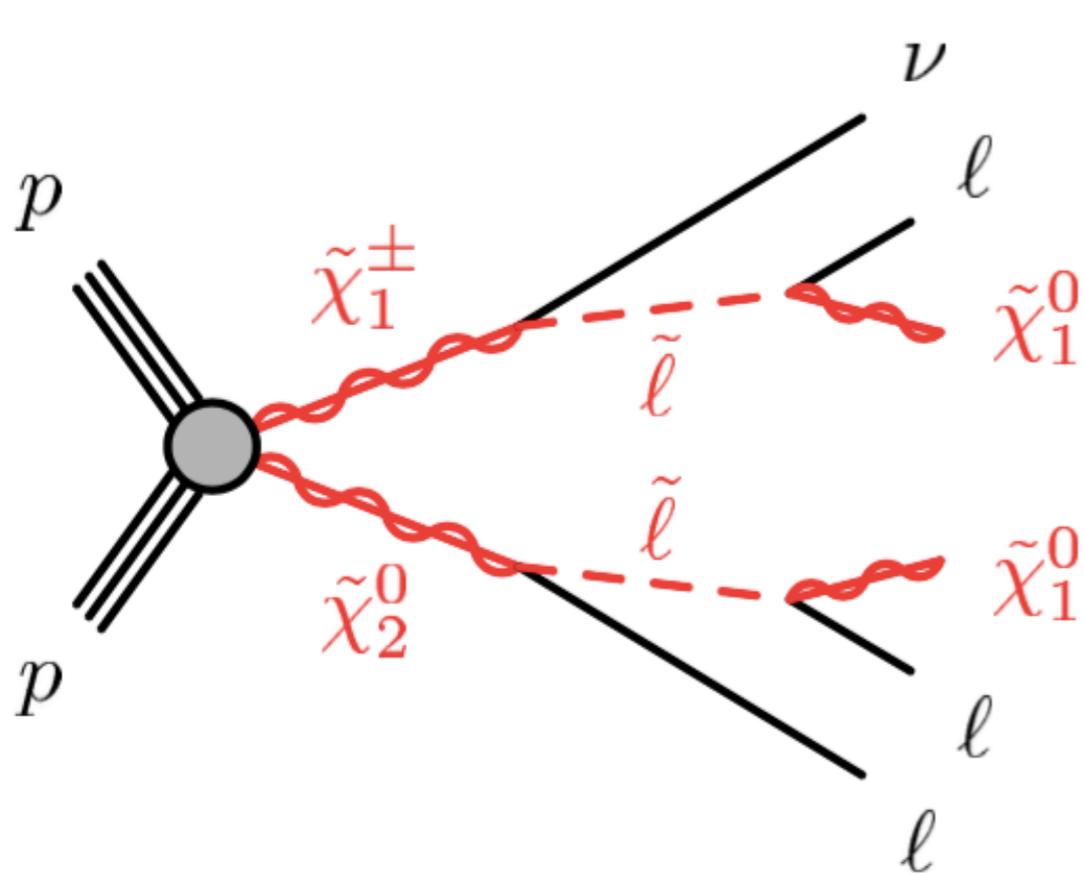
[Also, Davier et al., 2016  
→ 3.6  $\sigma$ ]

[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、 $\sim 10\text{TeV}$ 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。

# スレプトンが軽いとき



(a) Direct  $\tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_2^0$  pair production with  $\tilde{\ell}$ -mediated decays

このようなバウンドを逃れられるのか。

# 5 + 5\* GMSB model

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

The diagram shows three arrows pointing upwards from the SU(5) representations below to the fields in the superpotential equation above. The first arrow points from the representation  $(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, 1/3)$  to the  $\Psi_D$  field in the first term. The second arrow points from the same representation to the  $\Psi_{\bar{D}}$  field in the first term. The third arrow points from the representation  $(\mathbf{1}, \mathbf{2}, -1/2)$  to the  $\Psi_L$  field in the second term.

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

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

The diagram shows three arrows pointing upwards from the SU(5) representations below to the fields in the superpotential equation above. The first arrow points from  $(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, 1/3)$  to  $\Psi_D$ . The second arrow points from  $(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, 1/3)$  to  $\Psi_{\bar{D}}$ . The third arrow points from  $(\mathbf{1}, \mathbf{2}, -1/2)$  to  $\Psi_L$ .

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

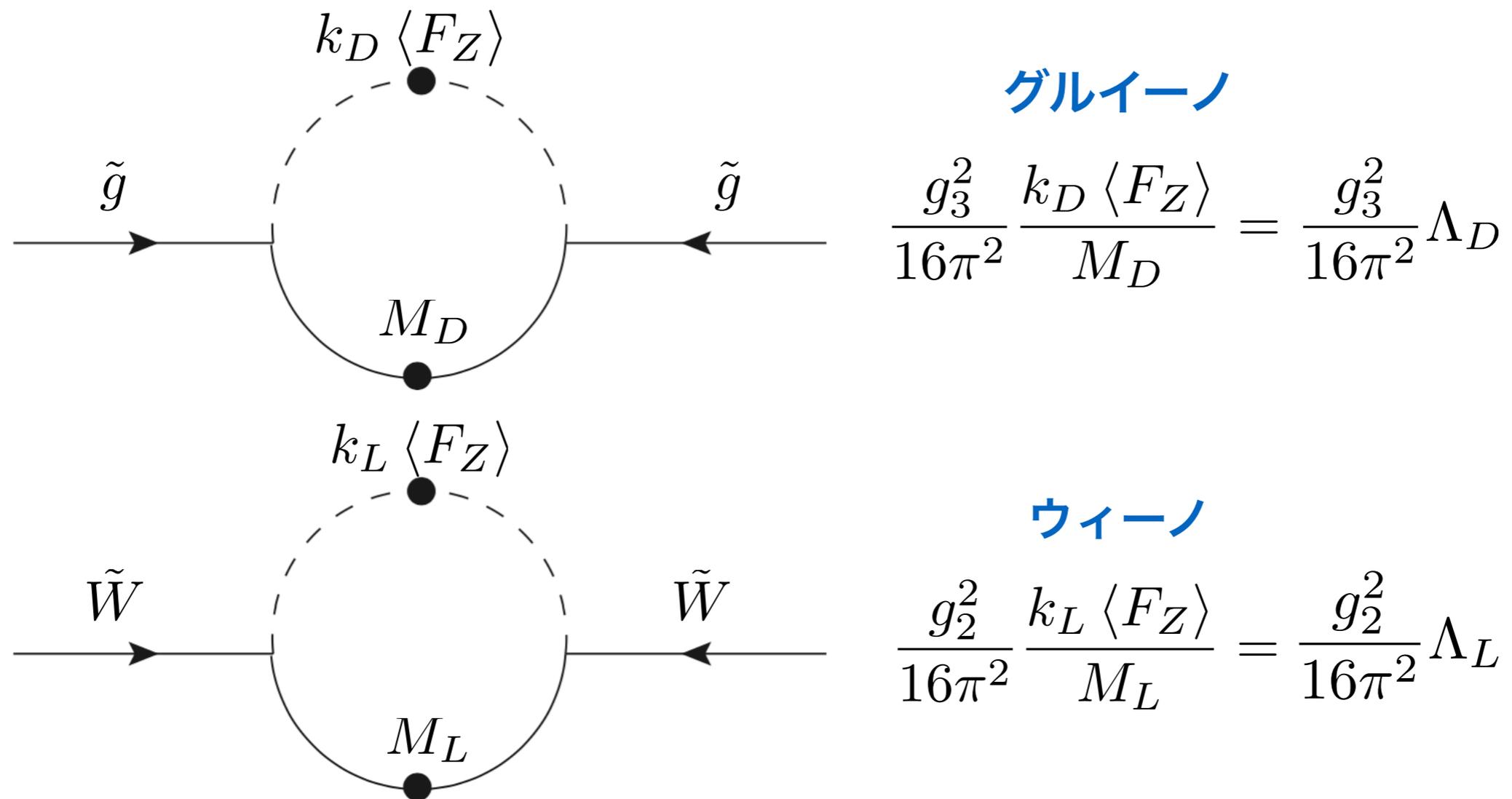
$\Psi_{\bar{D}}, \Psi_L$  はメッセンジャー場  
SUSY breaking を伝達する。

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

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

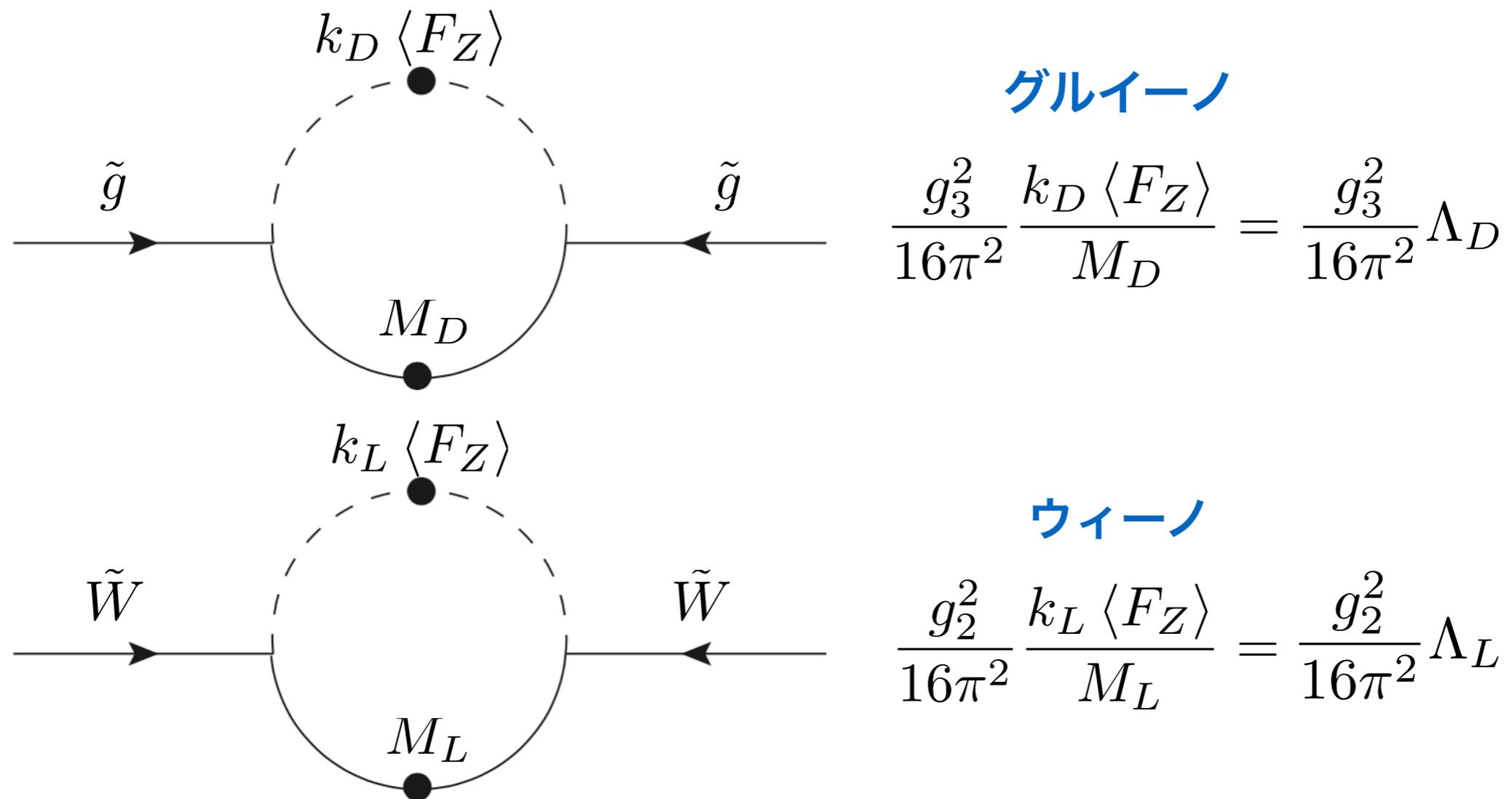


GUTの破れがない場合  $\Lambda_D = \Lambda_L$ 。

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

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

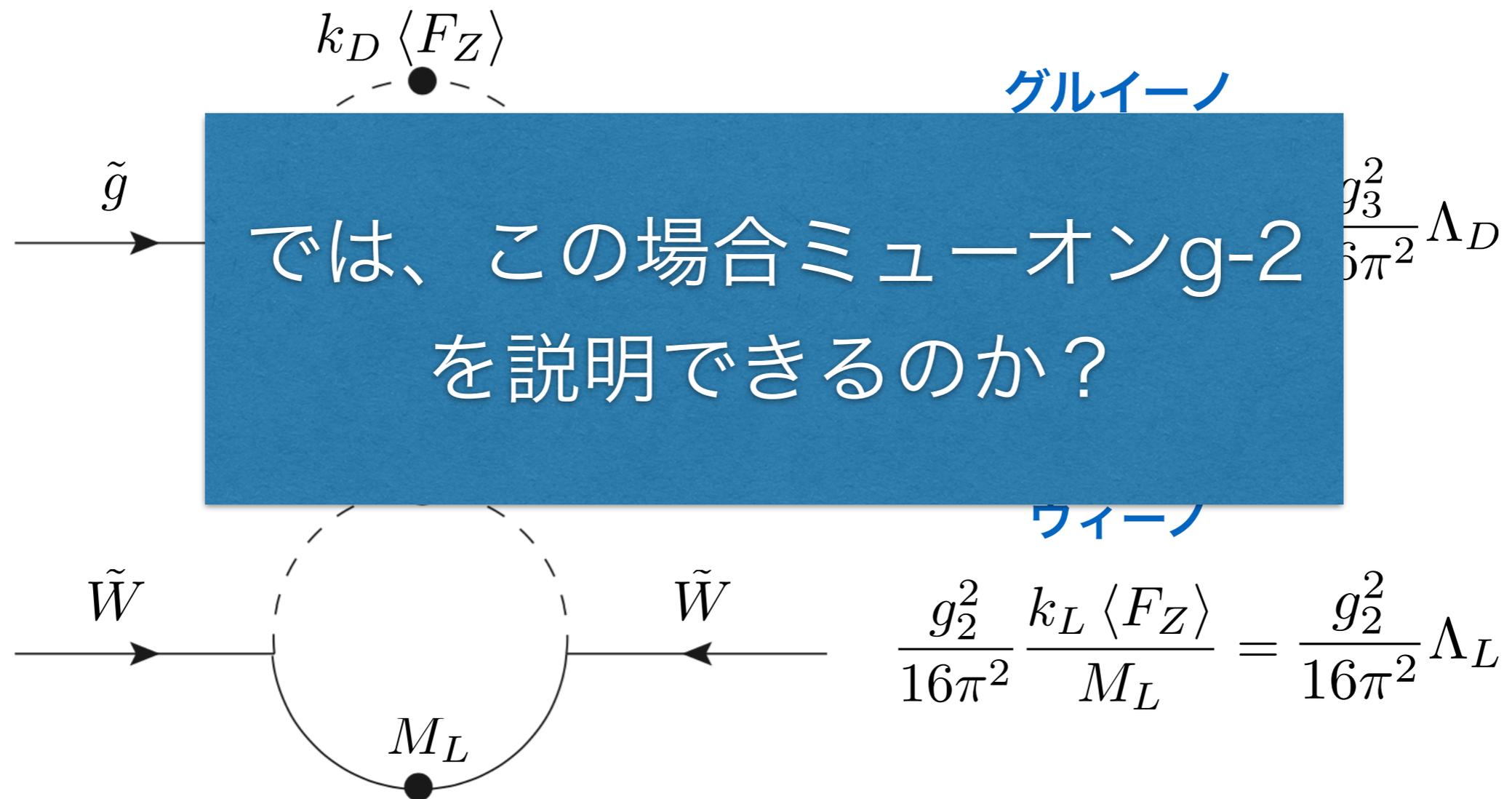


GUTの破れがある場合  $\Lambda_D \gg \Lambda_L$ 。

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

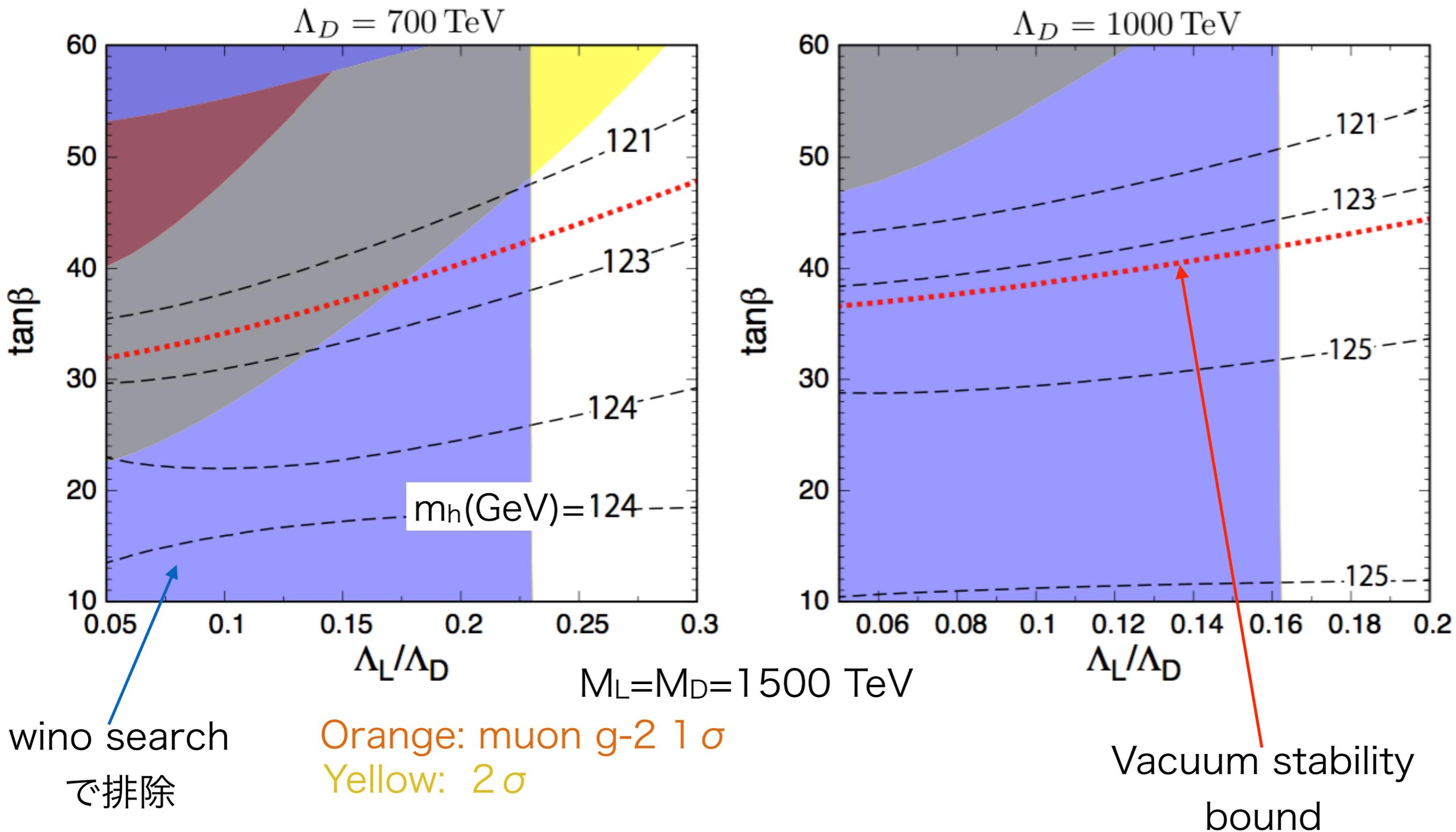
$$W = (M_D + k_D Z) \Psi_D \Psi_{\bar{D}} + (M_L + k_L Z) \Psi_L \Psi_{\bar{L}},$$



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。

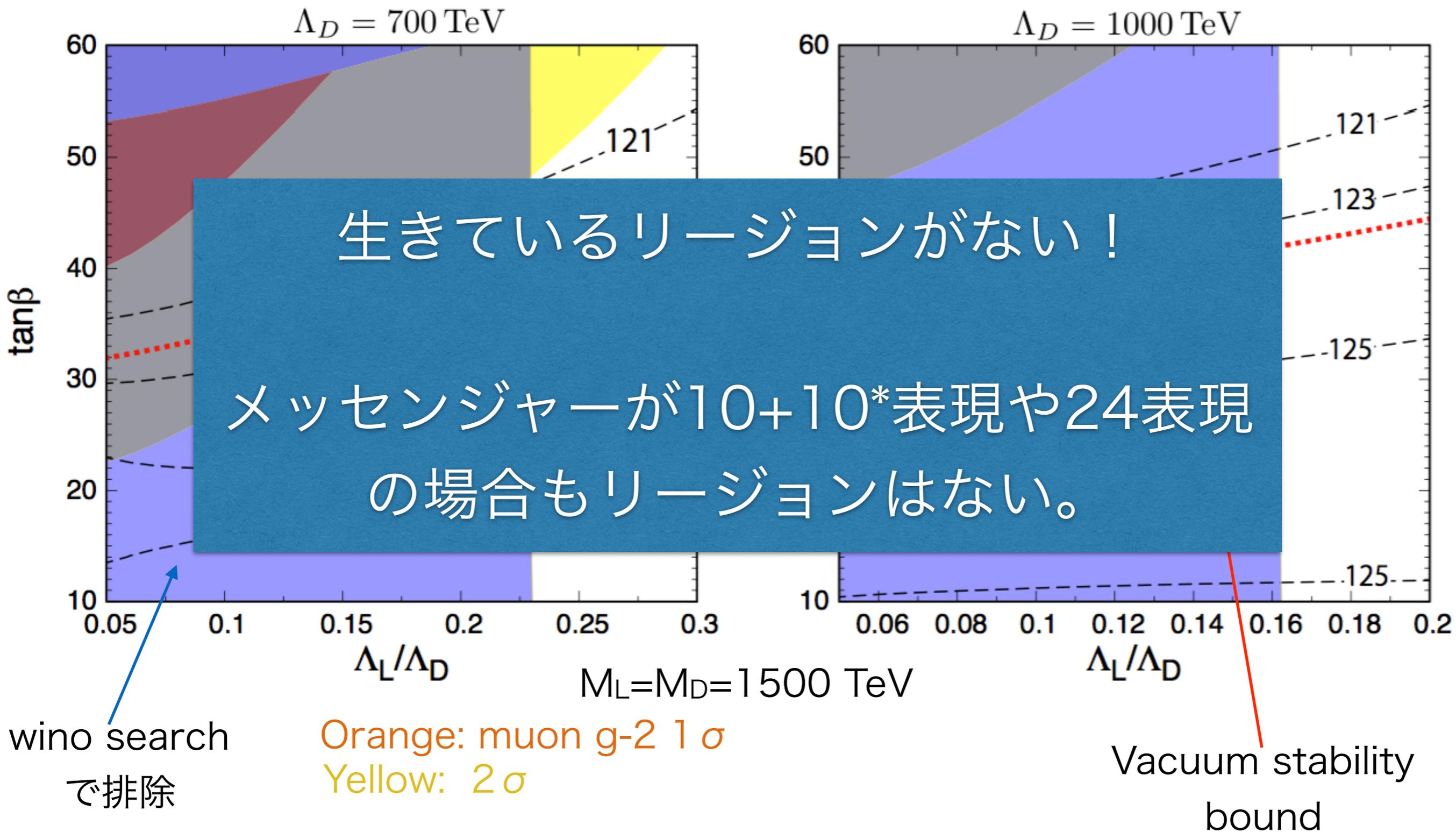
# Wino searchによるインパクト



LHCのWino search(<430GeV)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(<430GeV)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。)

# 他の表現の場合

$10 + \overline{10}$  case

5+5\*のケースに比べて必要なmass splittingを出すのが難しい。

$$W = (M_Q + k_Q Z) \Psi_Q \Psi_{\bar{Q}} + (M_U + k_U Z) \Psi_U \Psi_{\bar{U}} + (M_E + k_E Z) \Psi_E \Psi_{\bar{E}},$$

For  $(k_U/M_U) \gg (k_E/M_E) \rightarrow m_{\text{squarks}} \gg m_{\text{sleptons}}$

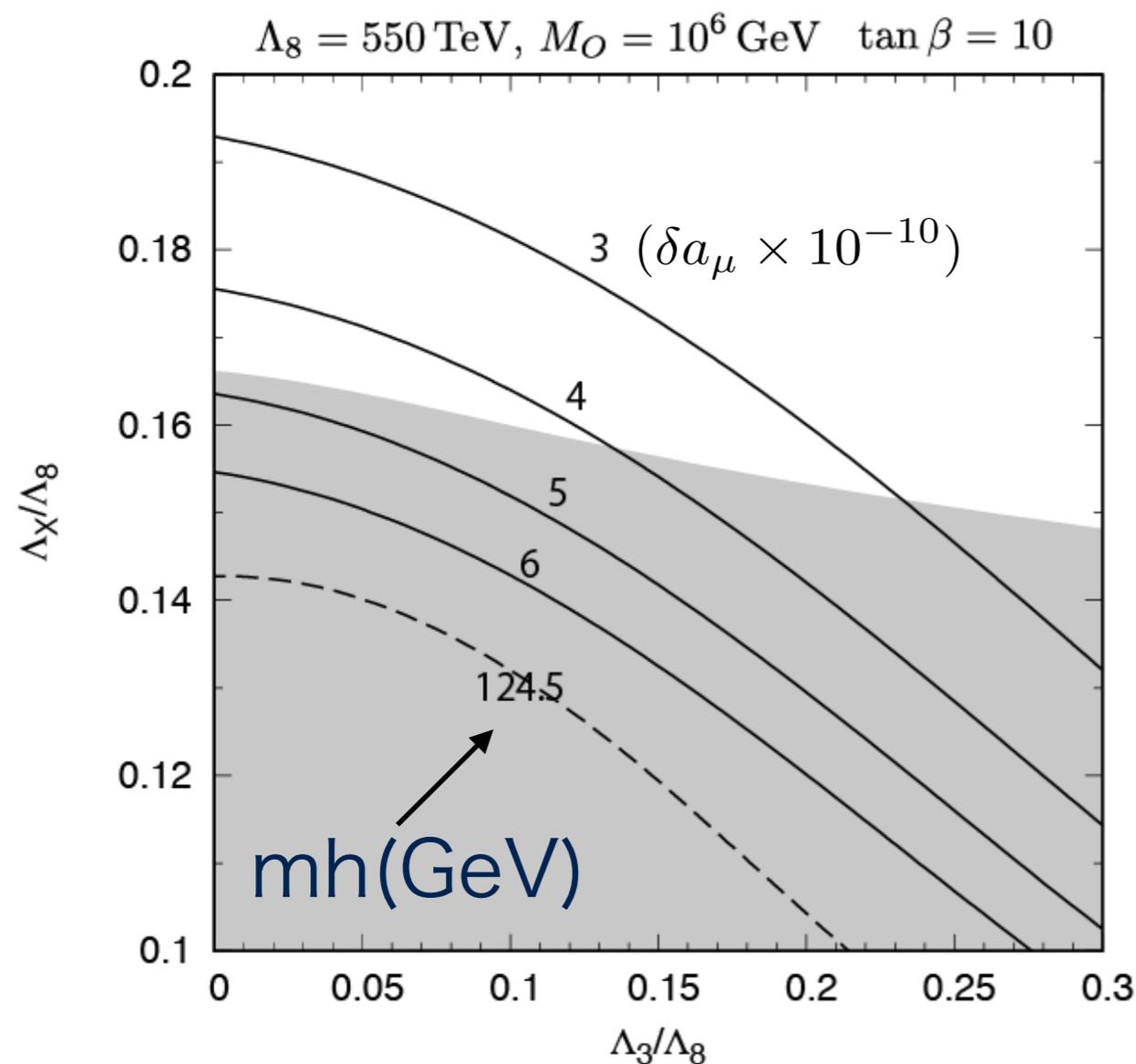
$$Q_Y(\Psi_U) > Q_Y(\Psi_{\bar{D}})$$

ストップ質量をfixしたときにスレプトンが5+5\*のケースに比べて重くなる。

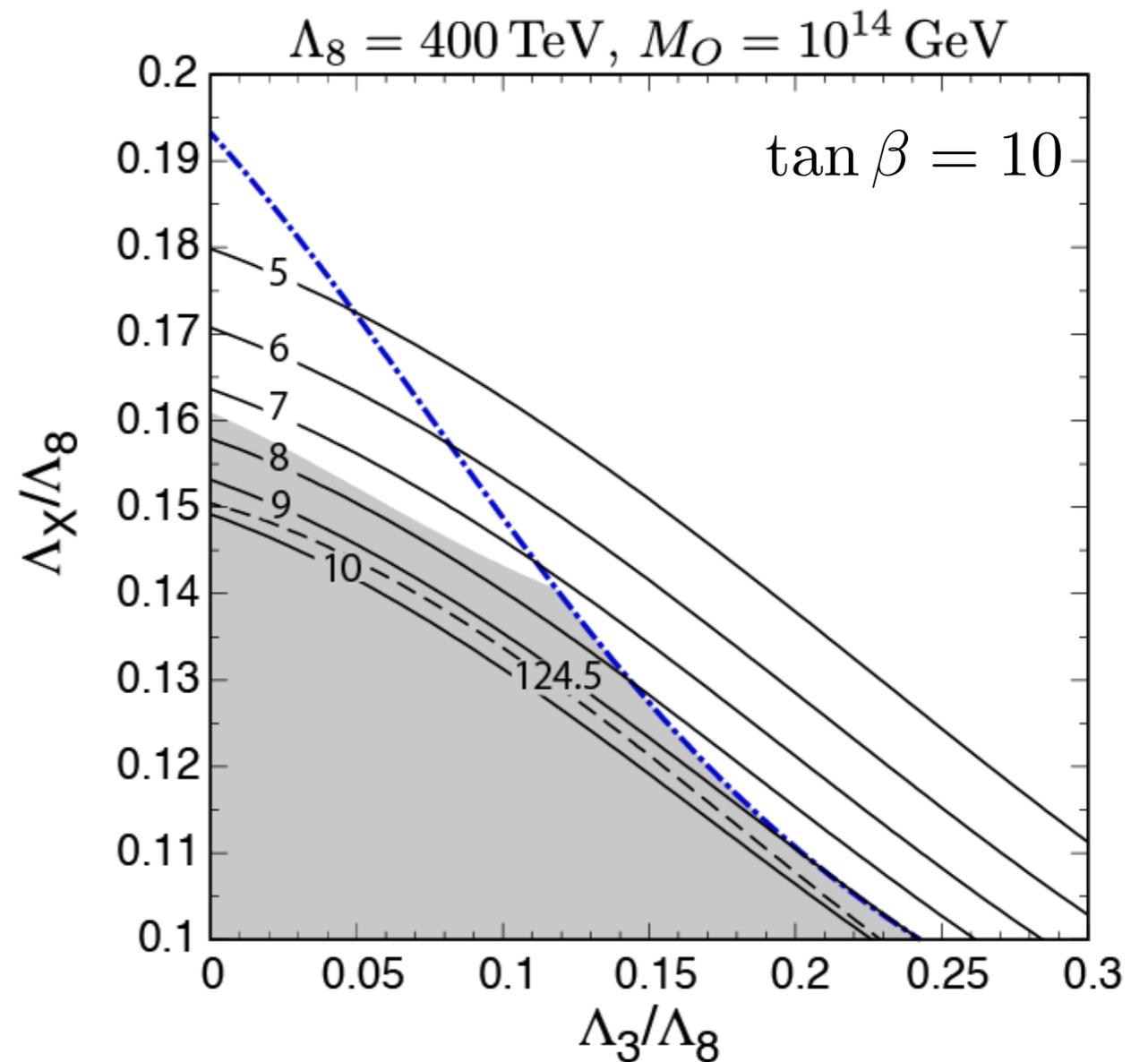
# 他の表現の場合

24 case

$$W = (M_O + k_O Z) \text{Tr}(\Sigma_8^2) + (M_T + k_T Z) \text{Tr}(\Sigma_3^2) + (M_X + k_X Z) X \bar{X},$$



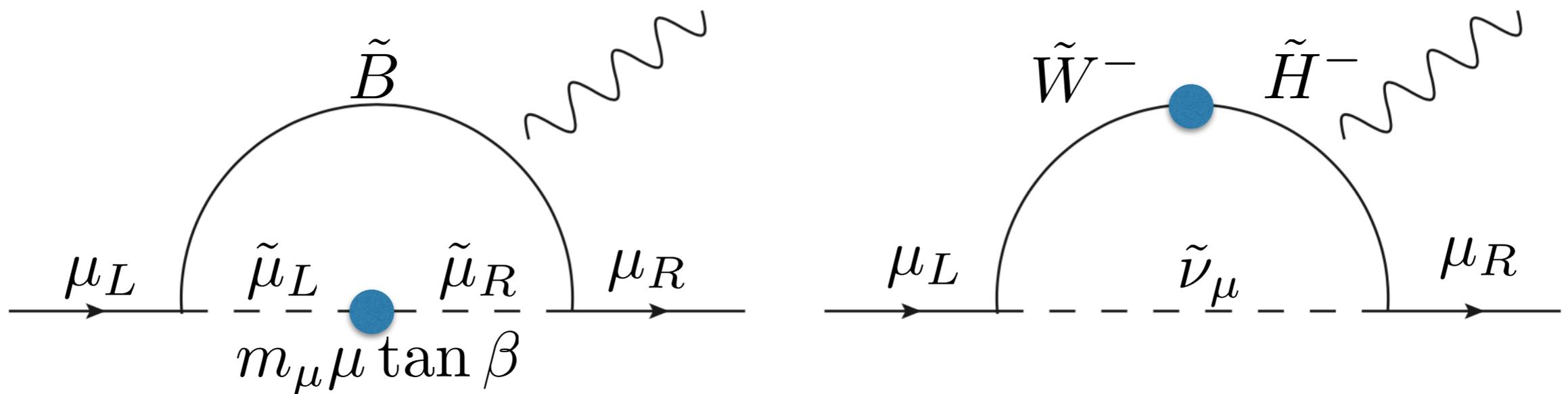
$$M_X = M_T = M_O$$



$$\Lambda_i = k_i \langle F_Z \rangle / M_i$$

# 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

# Additional Higgs soft masses

例えば、

$$W = \frac{\kappa}{2} Z S^2 + M_S S \bar{S} + \lambda_S S H_u H_d$$

Sを積分すると

$$\delta m_{H_u}^2 = \delta m_{H_d}^2 \simeq \frac{|\lambda_S|^2 \kappa^2 \langle F_Z \rangle^2}{32\pi^2 M_S^2}$$

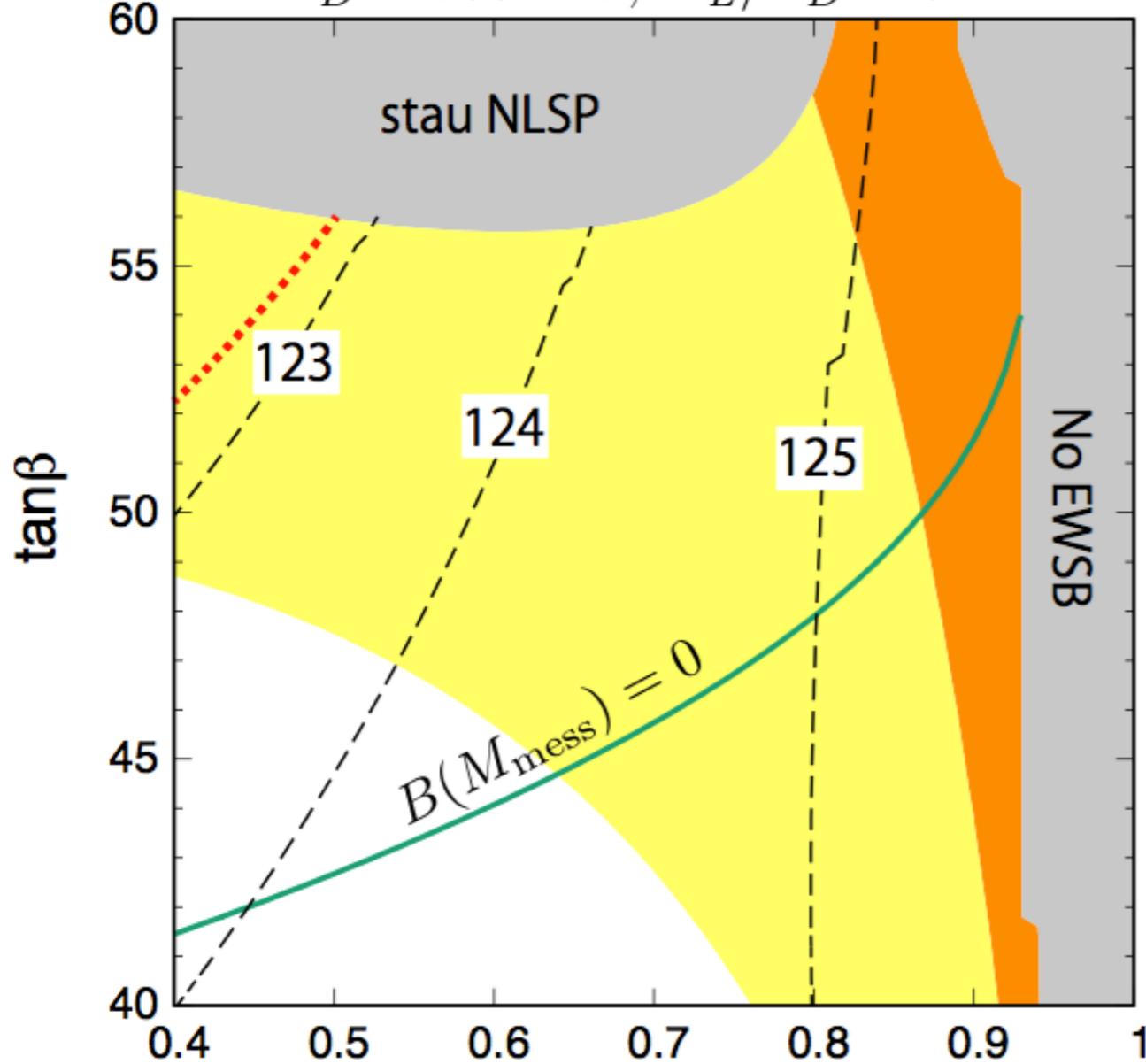
$$\sim 10^7 \text{ GeV}^2$$

A-termとB-termは生成されない。

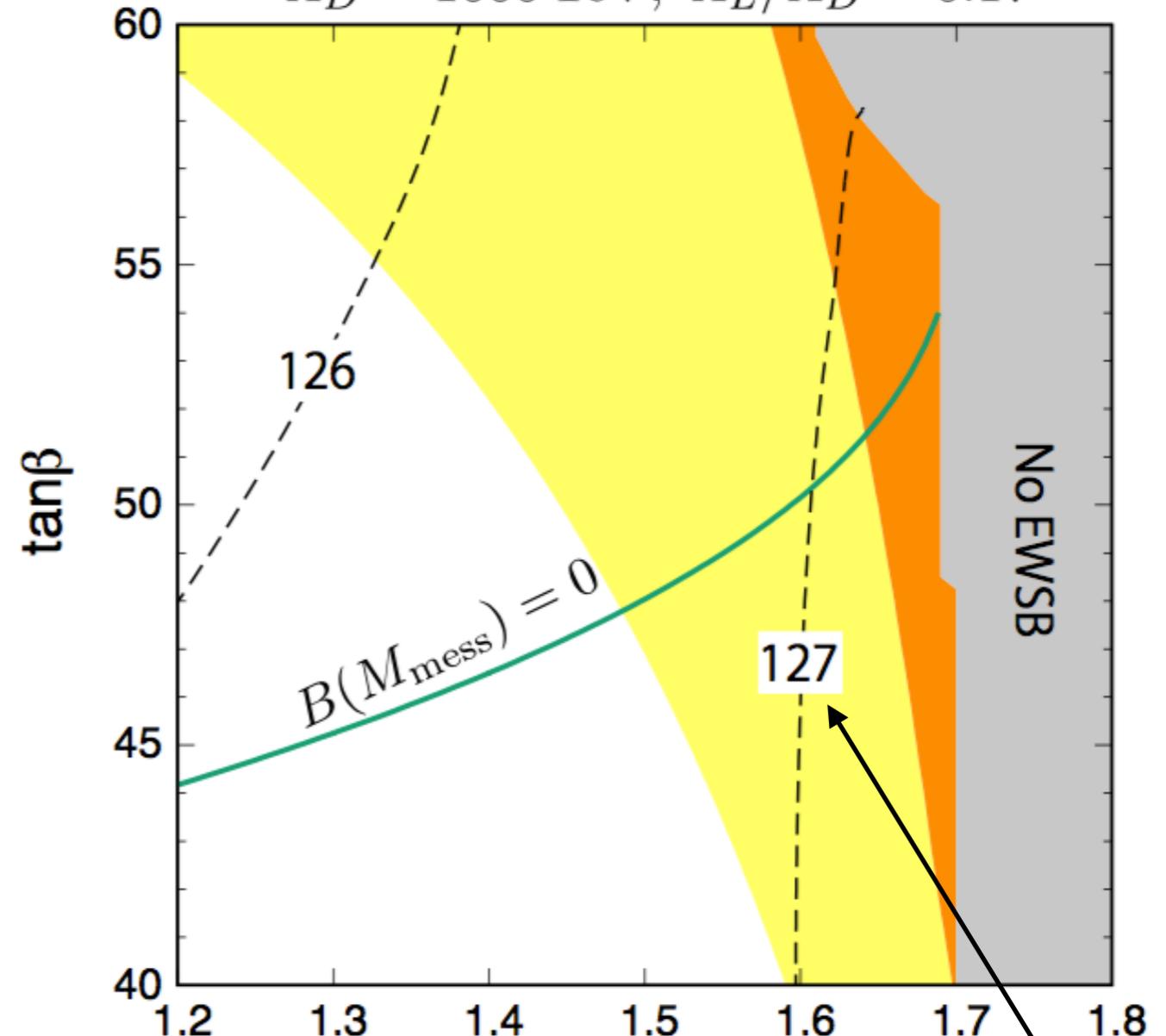
# Muon $g-2$ and Higgs mass

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

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



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



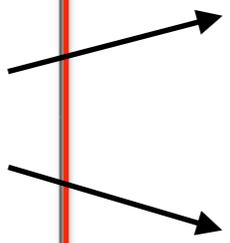
$m_{H_u}^2 = m_{H_d}^2 (10^7 \text{ GeV}^2)$  Orange: muon  $g-2$   $1 \sigma$   $m_{H_u}^2 = m_{H_d}^2 (10^7 \text{ GeV}^2)$   
 Yellow: muon  $g-2$   $2 \sigma$   $m_h \text{ (GeV)}$

$m_H^2$ 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
$m_H^2$ ( $10^7 \text{ GeV}^2$ )	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

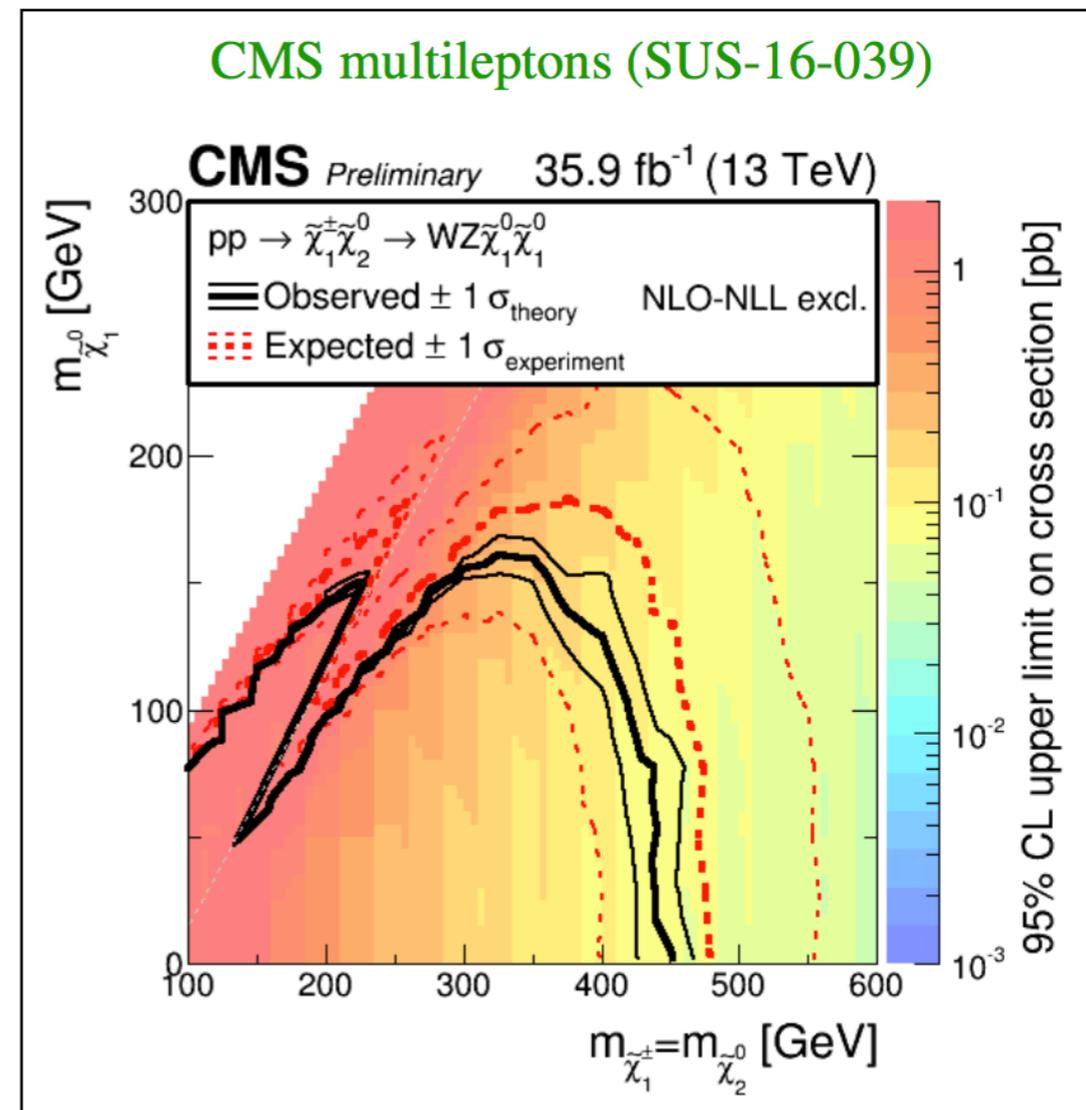
$\tan \beta$  は予言値 ( $B(M_D=M_L)=0$ )

# 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

$\tilde{\chi}_1^\pm$	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



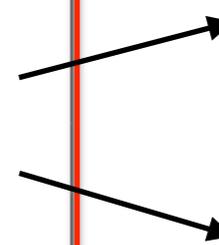
ウィーノライクなチャージーノとニュートラリーノはW, Z or h ボソンを放出してヒッグシーノに崩壊する。

$\tan \beta$  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 ( $B(M_D=M_L)=0$ )

# 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。

# 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。