

9月6日, 京都大学

Splitting Mass spectra and muon $g-2$ in Higgs-Anomaly Mediation

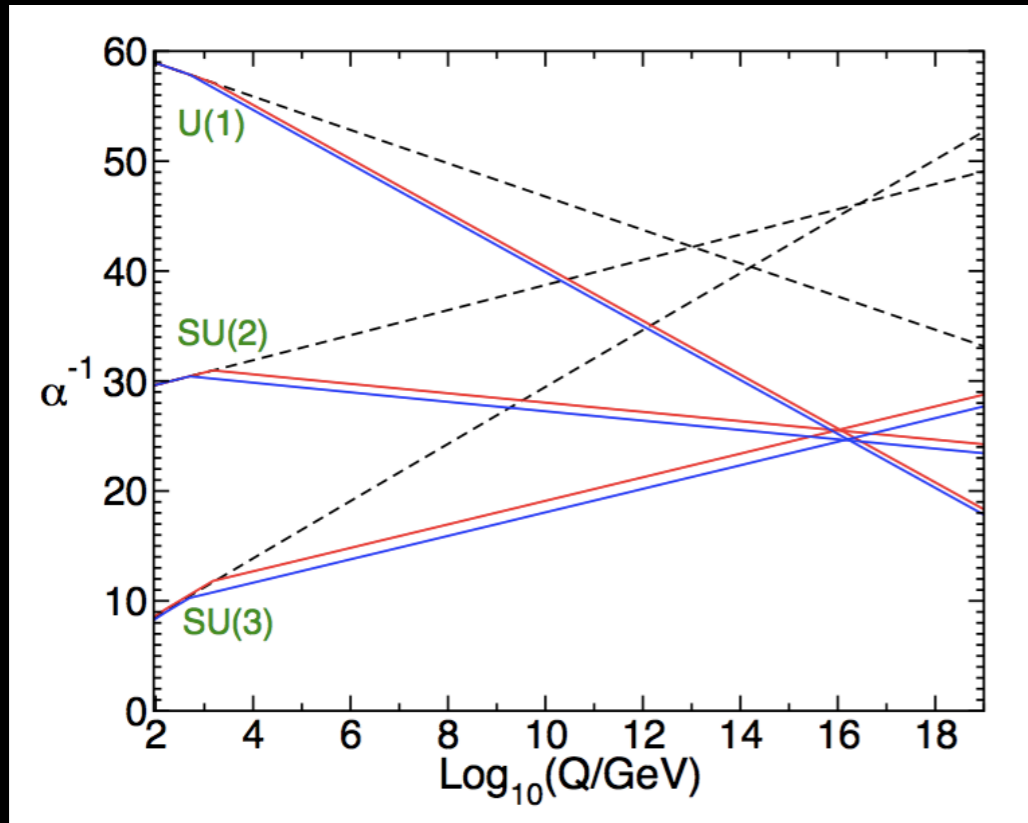
横崎 統三 (東北大)

Wen Yin (Tohoku U.), Norimi Yokozaki, arXiv:1607.05705

See also

Tsutomu T. Yanagida (IPMU), Wen Yin, Norimi Yokozaki, arXiv:1608.06618

Why SUSY?

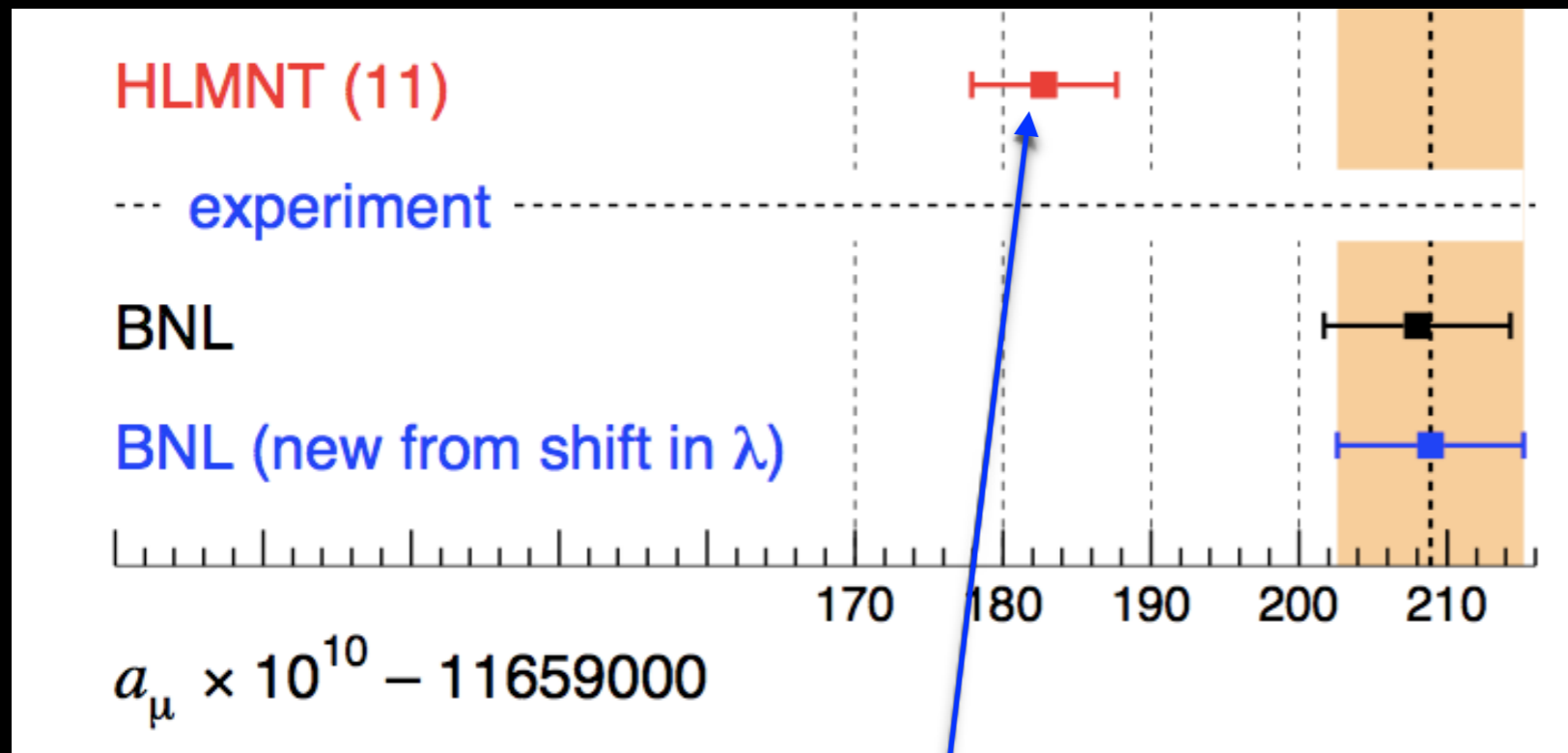


[from SUSY primer, S. Martin]

- Gauge coupling unification
→ 大統一理論(GUT)の存在を示唆
→ 電荷の量子化

- スカラー場の2次発散を消去
(ヒッグス, PQ-breakingスカラー, インフラトン)
- 他の実験的なモチベーションとして . . .

Muon g-2 anomaly



**>3 σ deviation
from SM
prediction!**

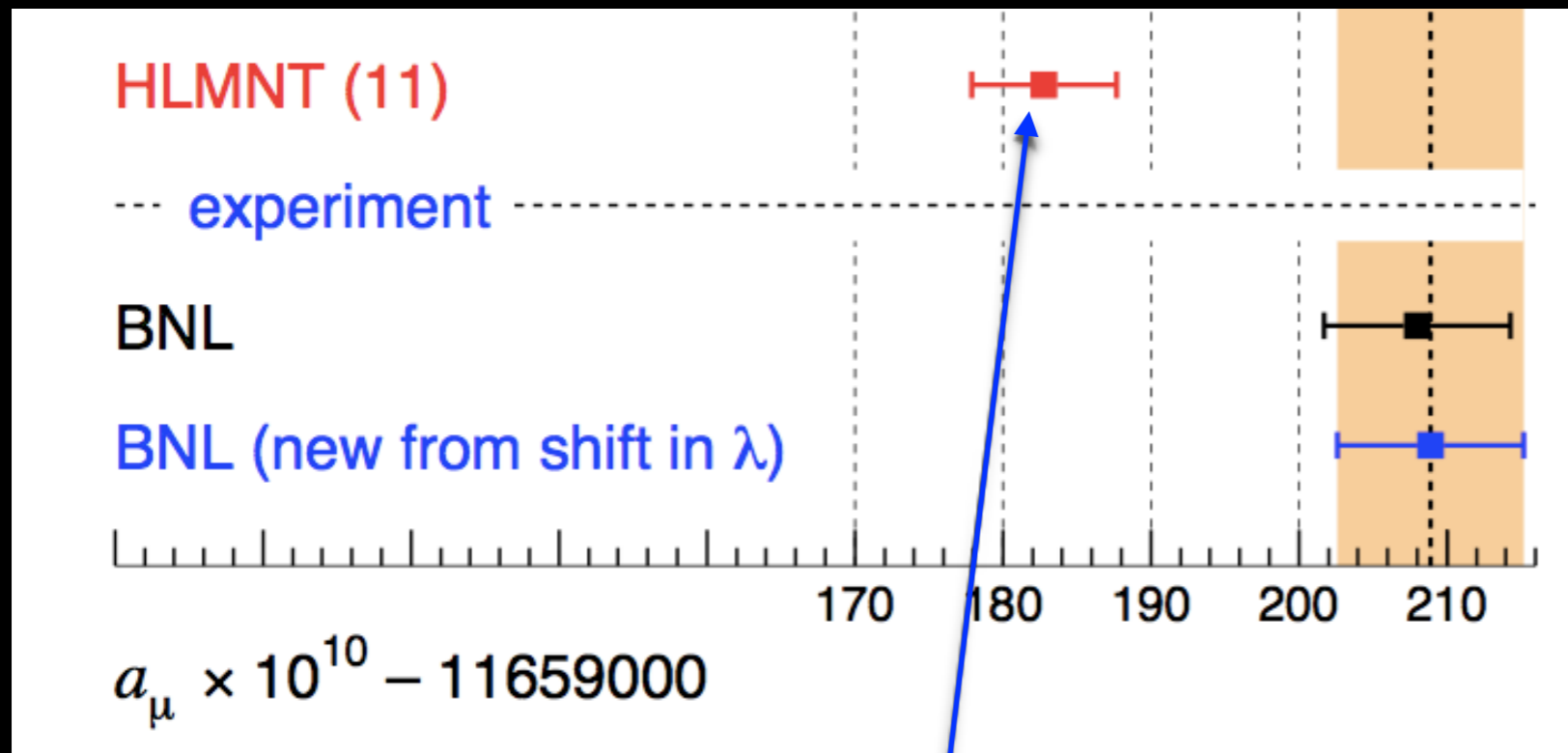
[Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner, J.Phys. G38 (2011) 085003]

SM value

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

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

Muon g-2 anomaly



**>3 σ deviation
from SM
prediction!**

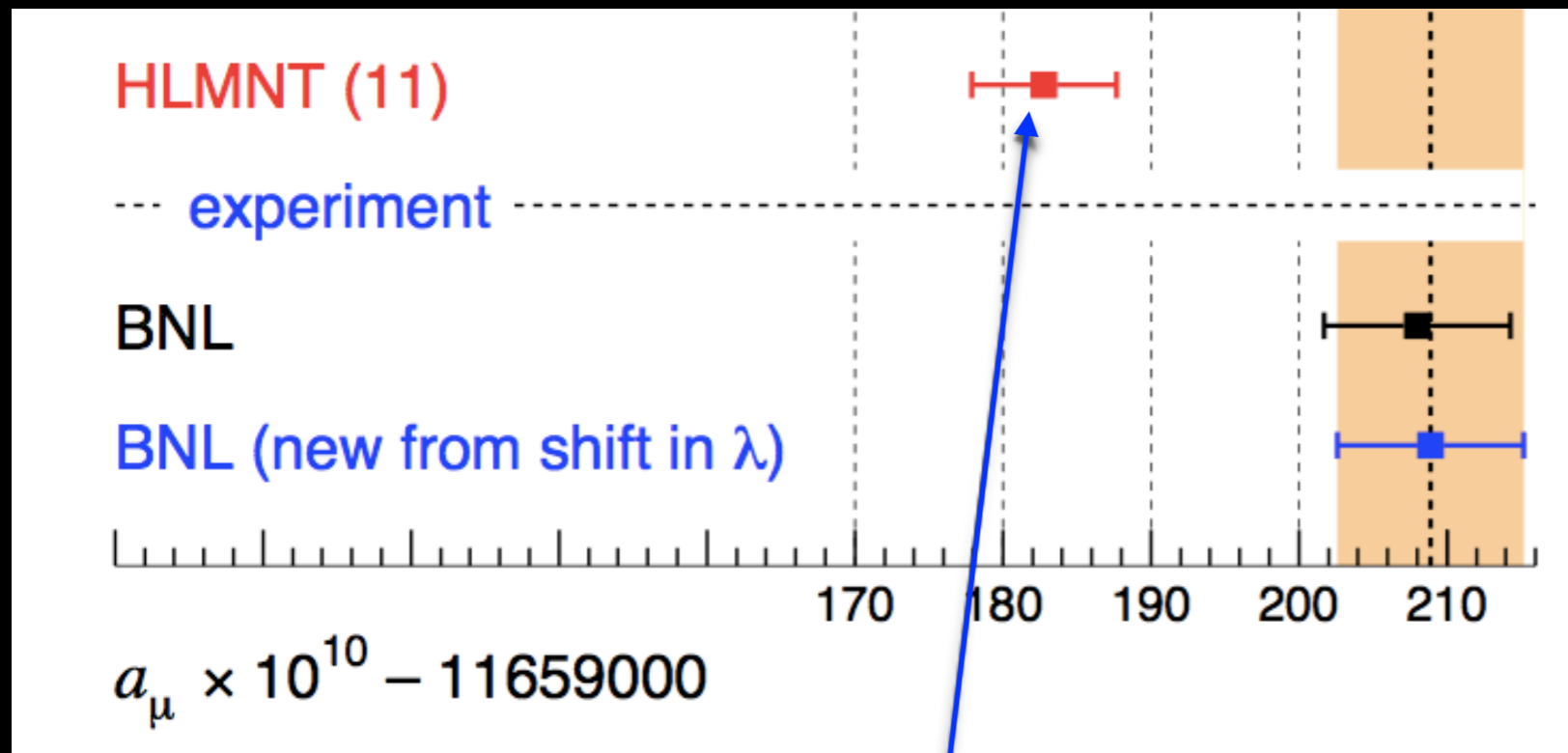
[Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner, J.Phys. G38 (2011) 085003]

SM value

$$(a_\mu)^{\text{NP}} \sim \frac{g^2}{16\pi^2} \frac{m_\mu^2}{m_{\text{NP}}^2} \approx 2.5 \times 10^{-9} \left(\frac{g}{0.65} \right)^2 \left(\frac{110 \text{ GeV}}{m_{\text{NP}}} \right)^2$$

ループで出てくるとすると

Muon g-2 anomaly



**>3 σ deviation
from SM
prediction!**

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

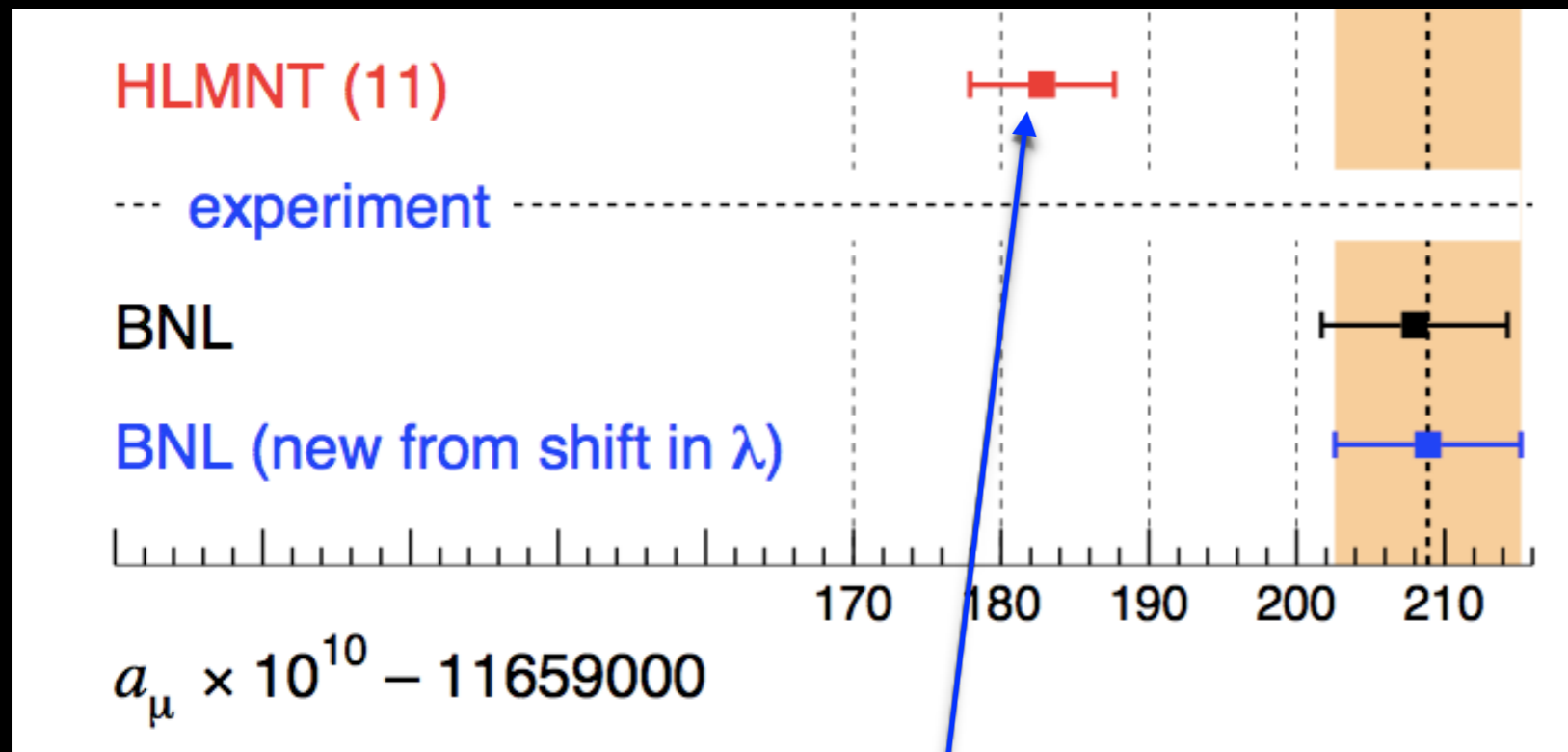
SM value

$$(a_\mu)^{\text{NP}} \sim \frac{g^2}{16\pi^2} \frac{m_\mu^2}{m_{\text{NP}}^2} \approx 2.5 \times 10^{-9} \left(\frac{g}{0.65}\right)^2 \left(\frac{110 \text{ GeV}}{m_{\text{NP}}}\right)^2 \times \tan \beta$$

ループで出てくるとすると

in SUSY

Muon g-2 anomaly



>3 σ deviation
from SM
prediction!

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

SM value

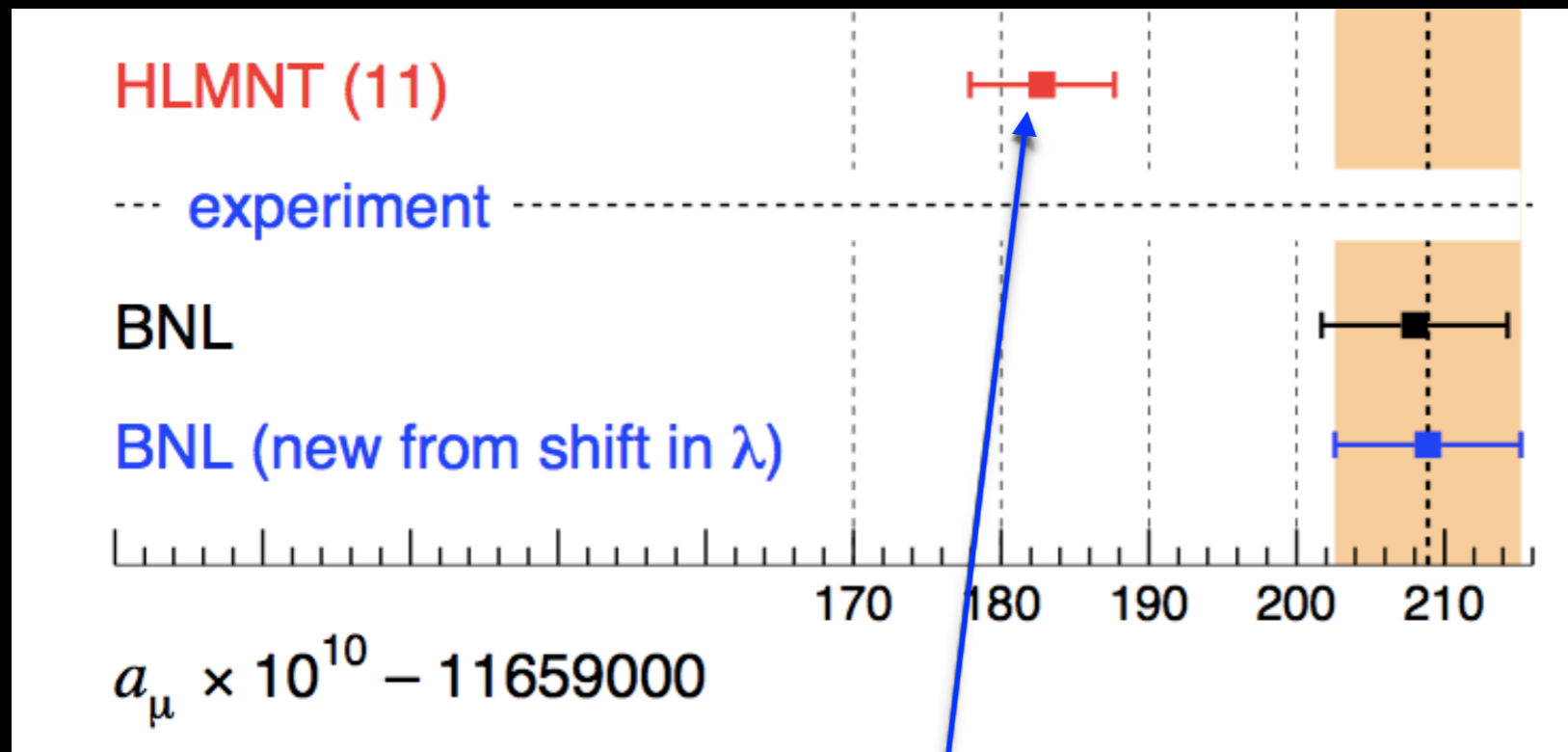
can be 50

$$(a_\mu)^{\text{NP}} \sim \frac{g^2}{16\pi^2} \frac{m_\mu^2}{m_{\text{NP}}^2} \approx 2.5 \times 10^{-9} \left(\frac{g}{0.65}\right)^2 \left(\frac{110 \text{ GeV}}{m_{\text{NP}}}\right)^2 \times \tan \beta$$

ループで出てくるとすると

in SUSY

Muon g-2 anomaly



>3σ deviation from SM prediction!

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

SM value

can be 600 GeV

can be 50

$$(a_\mu)^{\text{NP}} \sim \frac{g^2}{16\pi^2} \frac{m_\mu^2}{m_{\text{NP}}^2} \approx 2.5 \times 10^{-9} \left(\frac{g}{0.65}\right)^2 \left(\frac{110 \text{ GeV}}{m_{\text{NP}}}\right)^2 \times \tan \beta$$

ループで出てくるとすると

in SUSY

- ・ $\tan \beta$ のエンハンスがあるので他のNPよりも有利であるように思える。
- ・ GUTとコンシステントに、 $g-2$ を説明できるか？
- ・ 簡単では無いように思える。

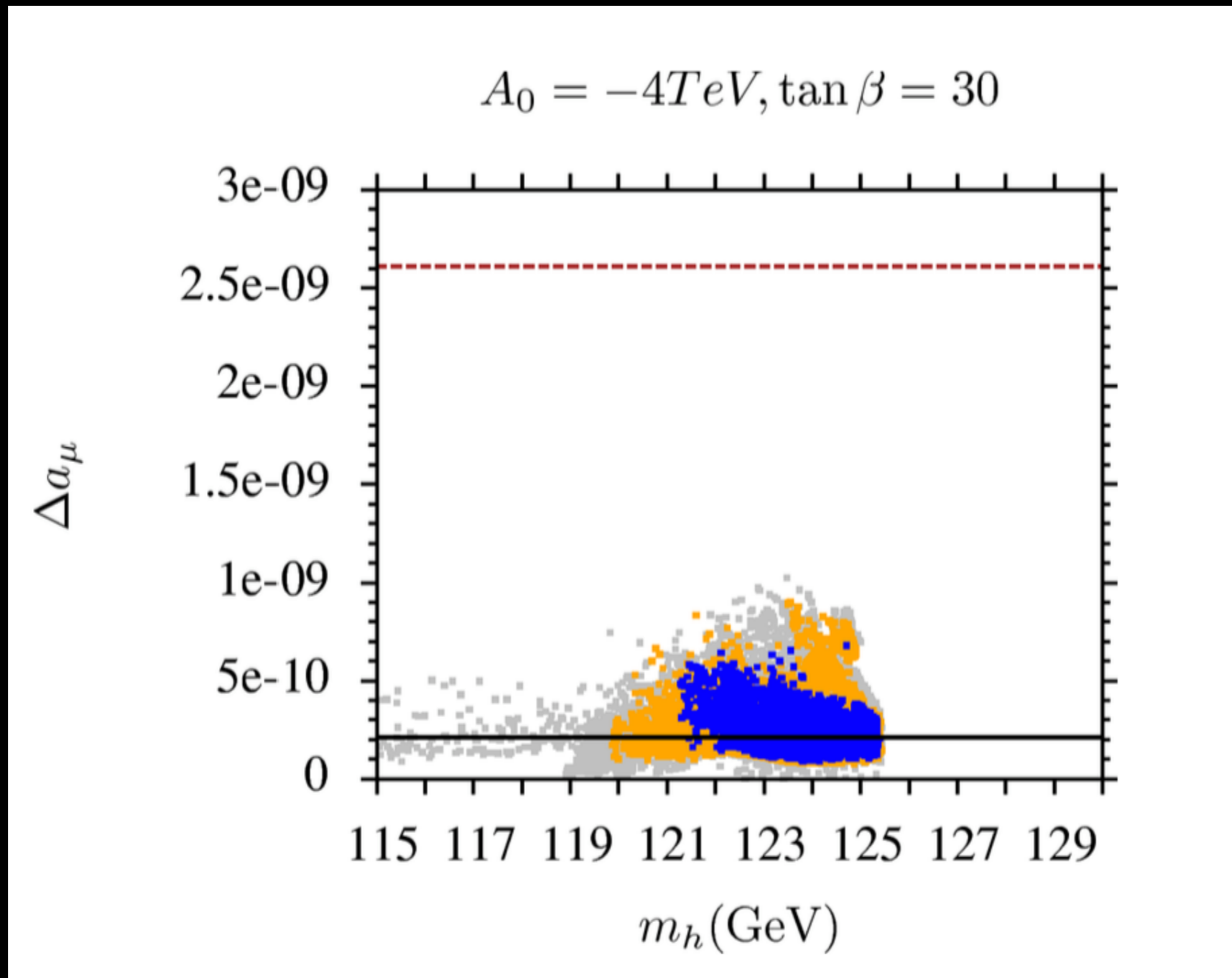
なぜ難しいのか？

- LHC SUSY search
→ 重いスクォーク・グルイーノ 1.4 -1.8 TeV以上
- Higgs boson mass → 重いストップ ~10 TeV
- Muon g-2
→ 軽いスレプトン/ニュートラリーノ ~100-500 GeV

なぜ難しいのか？

- ・ LHC SUSY search
→ 重いスクォーク・グルイーノ 1.4 -1.8 TeV以上
- ・ Higgs boson mass → 重いストップ ~10 TeV
- ・ Muon g-2
→ 軽いスレプトン/ニュートラリーノ ~100-500 GeV
- ・ Grand Unification → スレプトンとスクォークは同じGUTマルチプレット, $10=(Q, U^*, E^*)$ $5^*=(L, D^*)$
Treeでは同じくらいの質量を持つのが自然
- ・ ゲージノ質量もナイーブにはUnifyする。
 $g_1=g_2=g_3=g_5 \rightarrow M_1=M_2=M_3=M_5$

SU(5) case



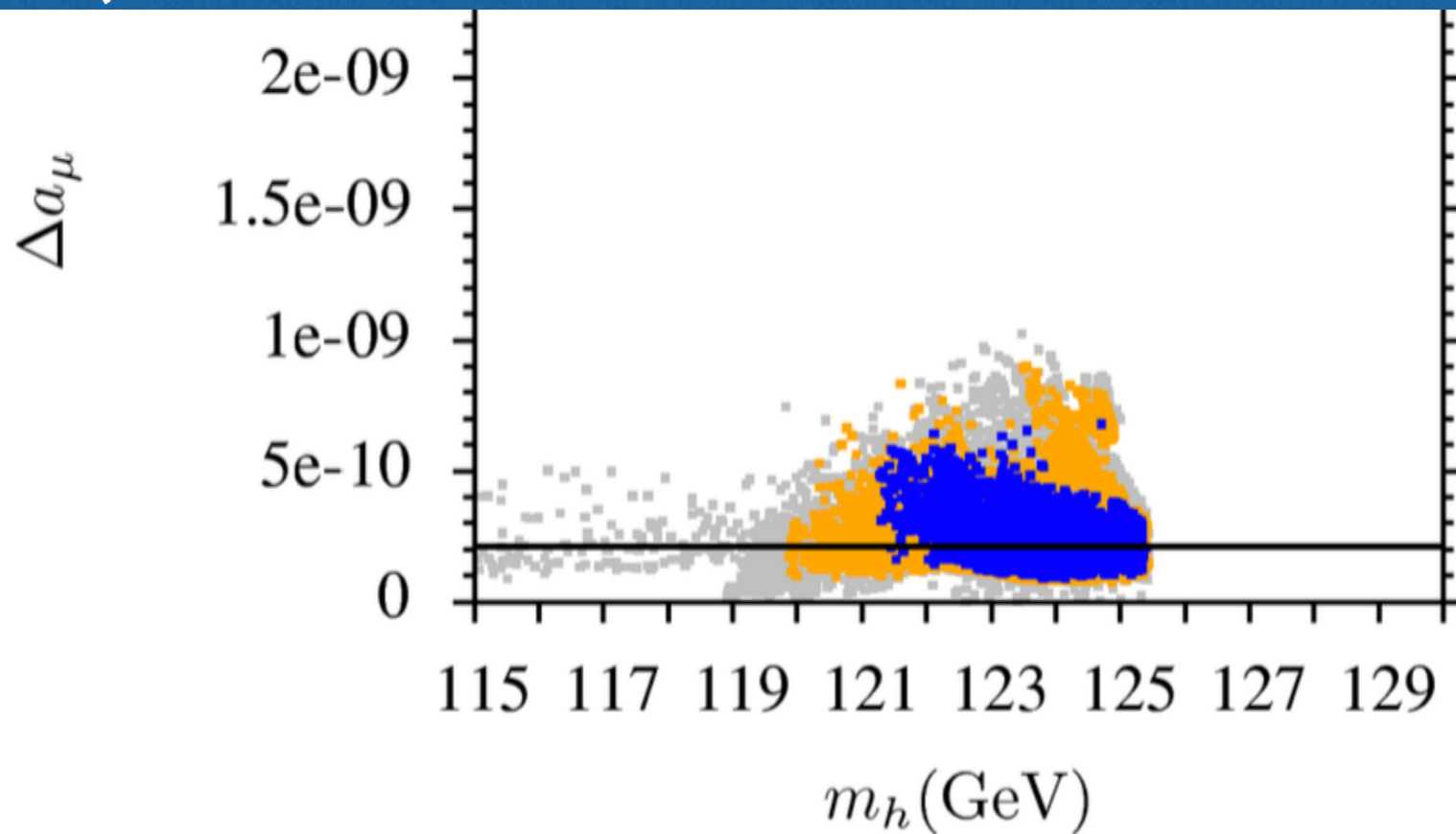
yellow: B-physics constraintを満たす
($b \rightarrow s \gamma$)

[Okada, Raza, Shafi, PRD, arXiv:1307.0461]

SU(5) case

$$A_0 = -4\text{TeV}, \tan\beta = 30$$

Higgsとmuon $g-2$ を同時に説明できるリージョンなし!?
(グライティーンノ質量がTeVのリージョン)



yellow: B-physics constraintを満たす
($b \rightarrow s \gamma$)

[Okada, Raza, Shafi, PRD, arXiv:1307.0461]

ではどうすればよいか？

- ・ GUT breakingを含むような理論を考える。
- ・ スレプトン・ニュートラリーノは軽く、スクォーク・グルイーノは重く
- ・ 世代間の質量にヒエラルキーを持たせる。
- ・ 1、2世代とゲージノは軽く、3世代目(ストップ)は重く

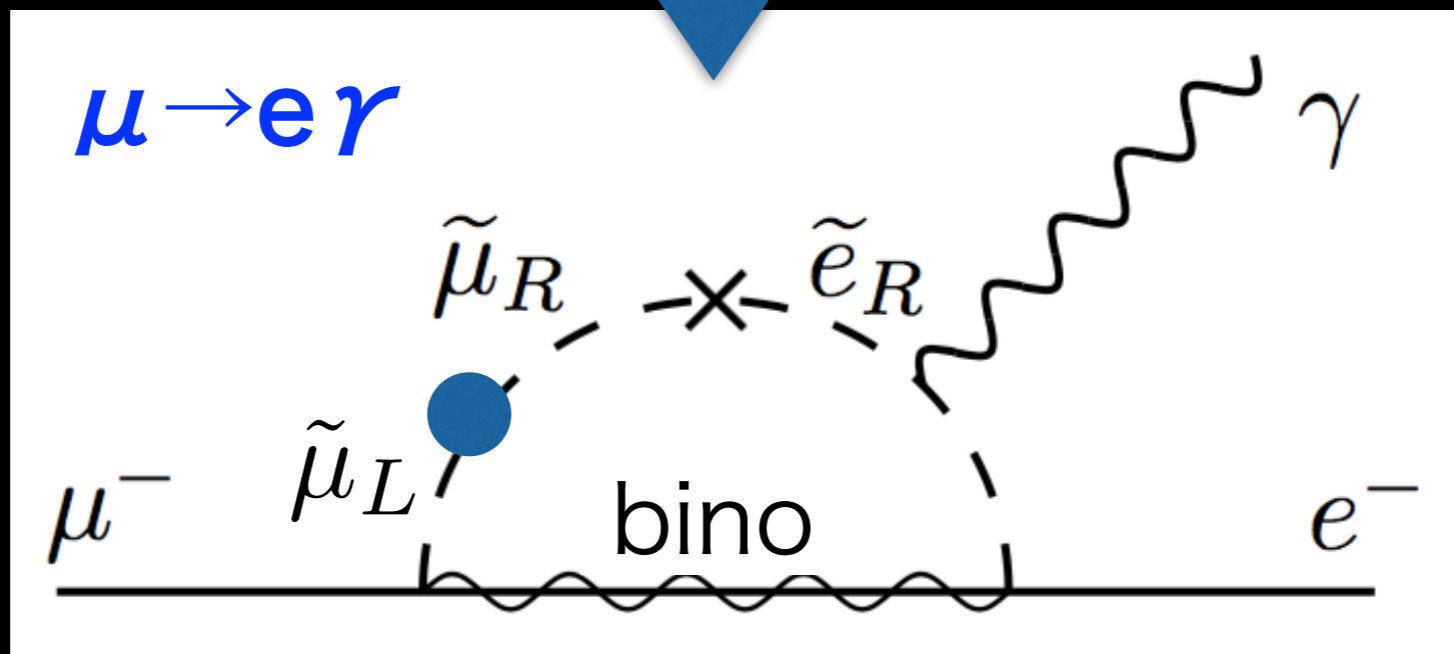
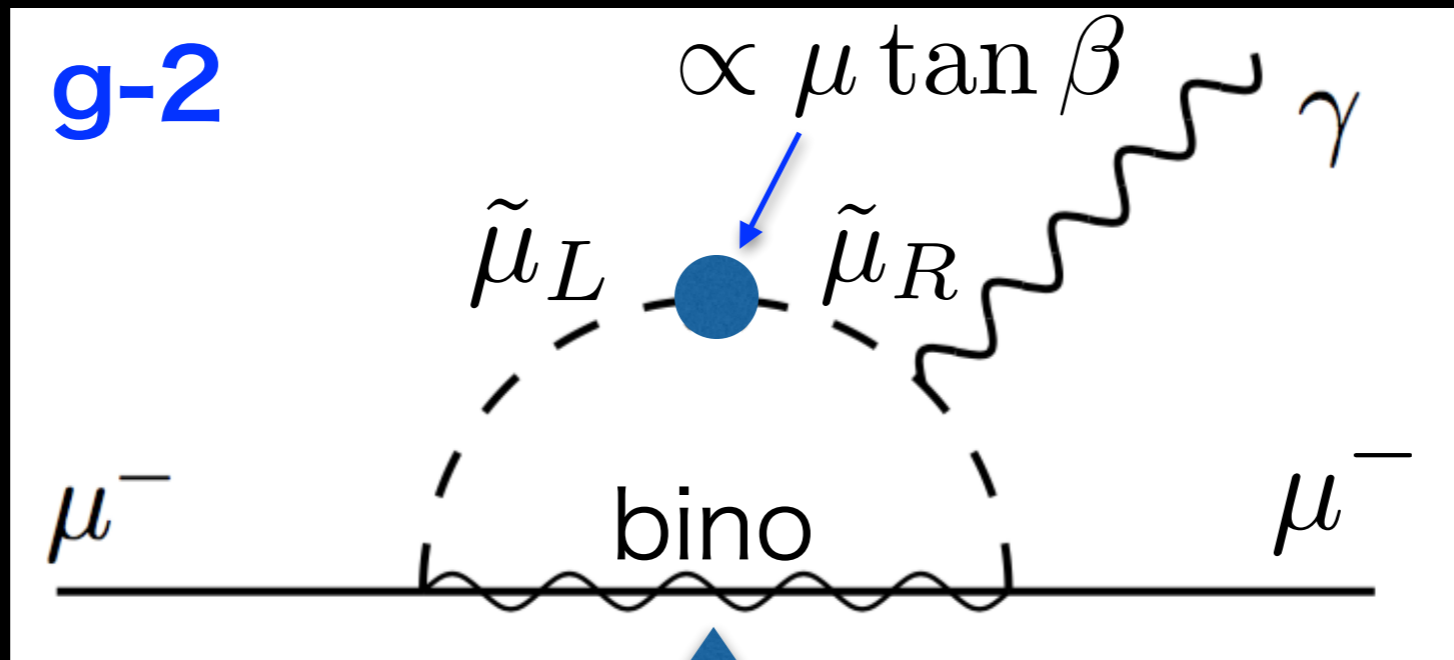
ではどうすればよいか？

- ・ GUT breakingを含むような理論を考える。
- ・ スレプトン・ニュートラリーノは軽く、スクォーク・グルイーノは重く
- ・ **シンプルなGUTとコンシステントなのか！？**
- ・ 世代間の質量にヒエラルキーを持たせる。
- ・ 1、2世代とゲージノは軽く、3世代目(ストップ)は重く

ではどうすればよいか？

- ・ GUT breakingを含むような理論を考える。
- ・ スレプトン・ニュートラリーノは軽く、スクォーク・グルイーノは重く
- ・ **シンプルなGUTとコンシステントなのか！？**
- ・ 世代間の質量にヒエラルキーを持たせる。
- ・ 1、2世代とゲージノは軽く、3世代目(ストップ)は重く
- ・ **フレーバーを破るようなプロセスは大丈夫なのか！？**

たとえば



g-2がエンハンスするとLFVもエンハンスする傾向がある

Higgs-Anomaly Mediation

- ・ 我々は、前述の困難を解決し、ミューオン $g-2$ を説明するシンプルなモデルを提案した。(Yin-Yokozaki, 2016)

Anomaly MediationとHiggsからのループのみでスクォーク・スレプトン・ゲージノの SUSY breaking massが出てくる。

Refs for Anomaly mediation:

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

Higgs-Anomaly Mediation

- 我々は、前述の困難を解決し、ミューオン $g-2$ を説明するシンプルなモデルを提案した。(Yin-Yokozaki, 2016)

レシピ:

- 1, 物質場とSUSY breaking fieldをsequesteringする
→ スクォーク・スレプトンがTreeで質量0
- 2, グラビティーノを重くする (~ 100 TeV)
→ Anomaly Mediationを効かせる
- 3, HiggsとSUSY breaking fieldだけをcoupleさせる
(ただしHiggs soft massはタキオニック)

フレーバー問題を解く

グラビティーノ問題も大幅にリラックス

Our model

(almost sequestered form)

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

SUSY breaking field (クォーク・レプトン・ヒッグス)

Treeでは、スレプトン・スクォークの質量0

SUSYフレーバーの問題を解くのにシンプルかつ重要な
仮定

(ゲージノもTreeでは質量0)

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

Our model

(almost sequestered form)

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

(クォーク・レプトン・ヒッグス)

Treeでは、スレプトン・スクォークの質量0
Anomaly Mediationによって、それらは2-loopで質
量を持つがスレプトンの質量はタキオニック

$$m_{E_1}^2 \approx -22g_Y^4 \frac{m_{3/2}^2}{(16\pi^2)^2}$$

(Left-handed スレプトンの質量もタキオニック)

Our model

(almost sequestered form)

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

(クォーク・レプトン・ヒッグス)

Treeでは、スレプトン・スクォークの質量0
Anomaly Mediationによって、それらは2-loopで質
量を持つがスレプトンの質量はタキオニック

Anomaly Mediationのタキオニックスレプトン問題

→ 逆に言うとスレプトンが軽く成り得る。

GUTの破れを手で入れなくても自然に内包している。

Our model

(almost sequestered form)

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

(クォーク・レプトン・ヒッグス)

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

$c_Z > 0$

ヒッグスだけSUSY breaking fieldと直接coupleする。

(タキオニックレプトン問題を解き、3世代目を重くする)

Our model

(almost sequestered form)

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

(クォーク・レプトン・ヒッグス)

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

$c_Z > 0$

ヒッグスのsoft mass二乗が負であることが重要！

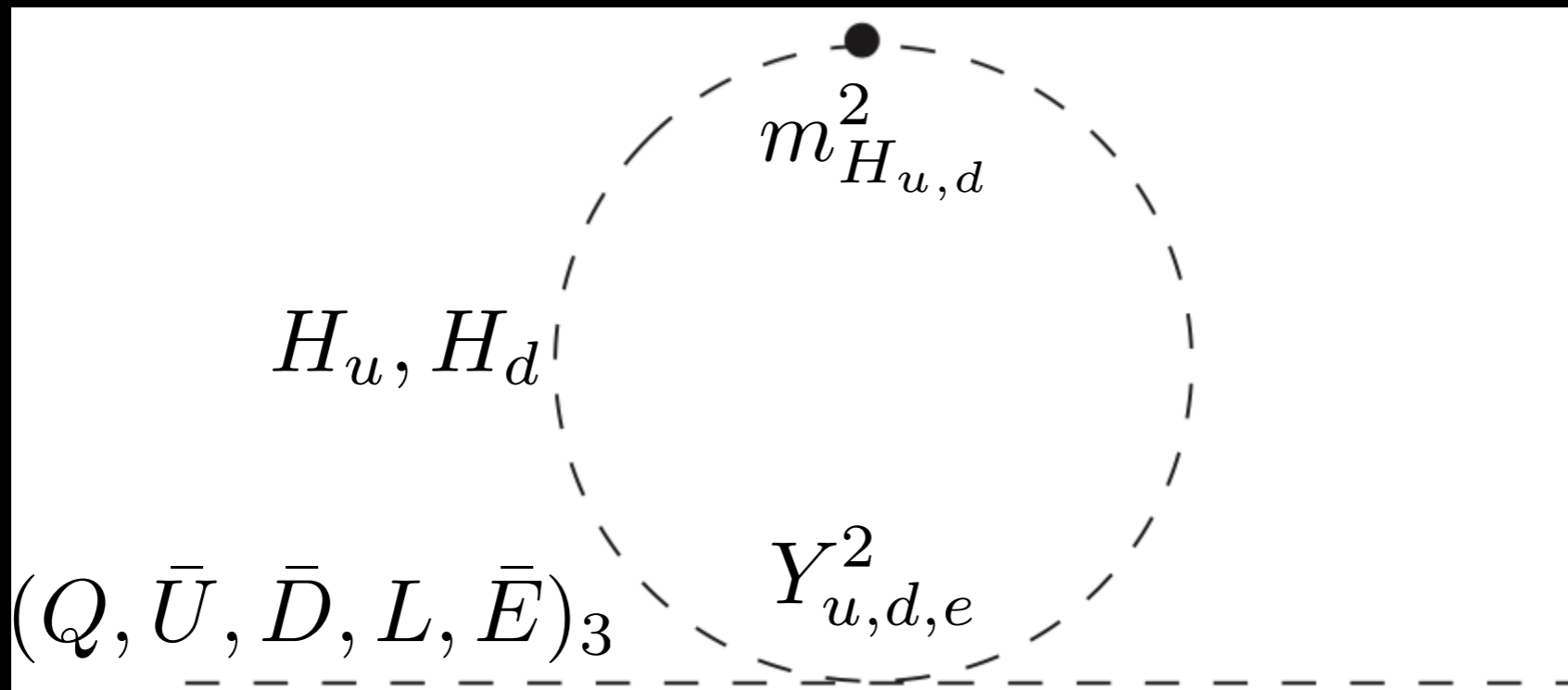
SUSY breaking mediated by Higgs-Anomaly mediation

- ・ スクォークやスレプトンはHiggsのsoft massから質量をもち、質量の階層性はYukawa結合によって決まっている。



- ・ クォーク、レプトンはHiggsの真空期待値によって質量をもち、質量の階層性はYukawa結合によって決まっている。
- ・ タキオニックスレプトンは、Higgsの2-loop効果で回避される（ゲージ相互作用）。

Higgs loops

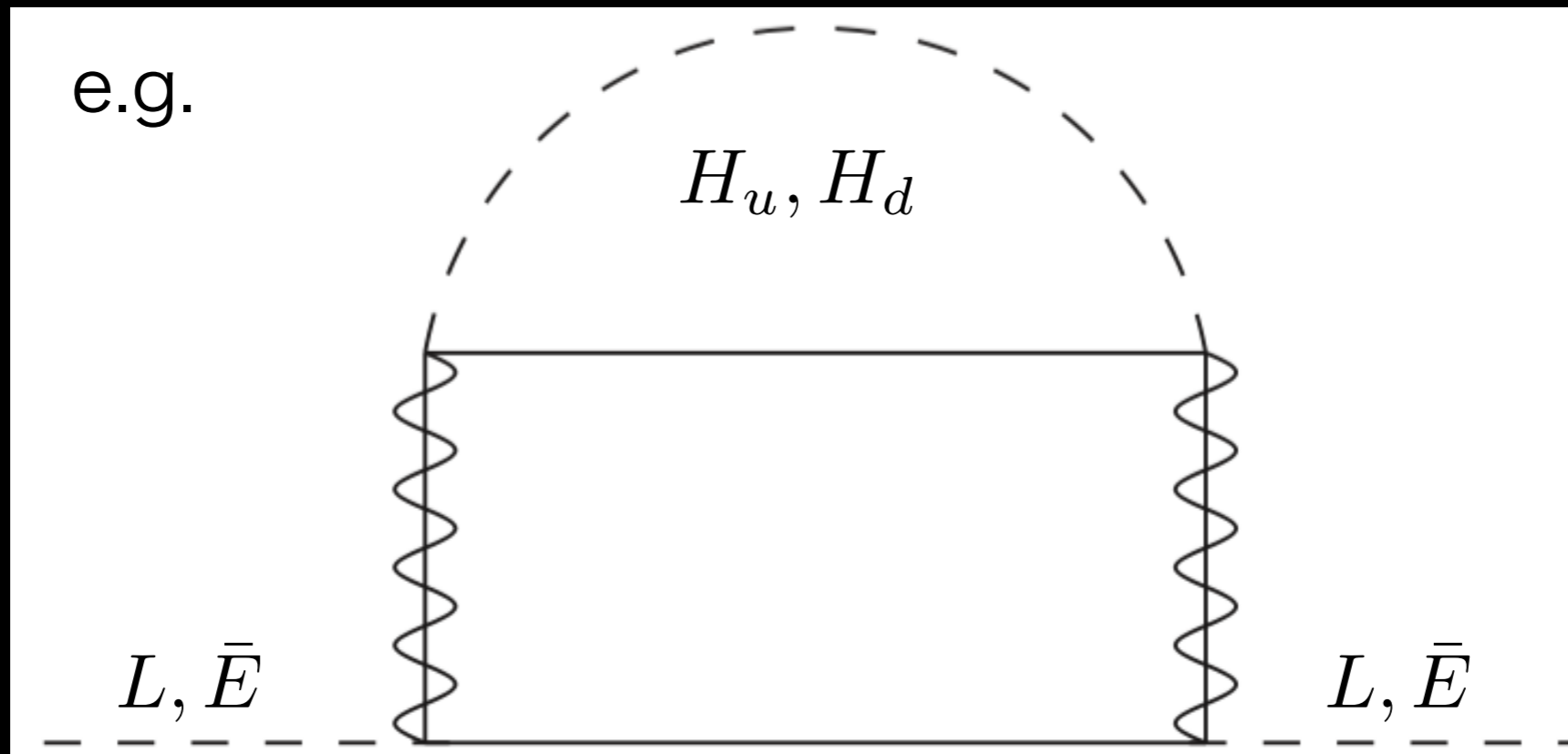


3世代目の質量を持ち上げる
ヒッグス質量にとって重要

$$\frac{dm_{Q_3}^2}{d \ln \mu_R} \ni \frac{1}{16\pi^2} (2Y_t^2 m_{H_u}^2 + 2Y_b^2 m_{H_d}^2) \quad \frac{dm_T^2}{d \ln \mu_R} \ni \frac{1}{16\pi^2} (4Y_t^2 m_{H_u}^2)$$

<0 <0

Higgs loops

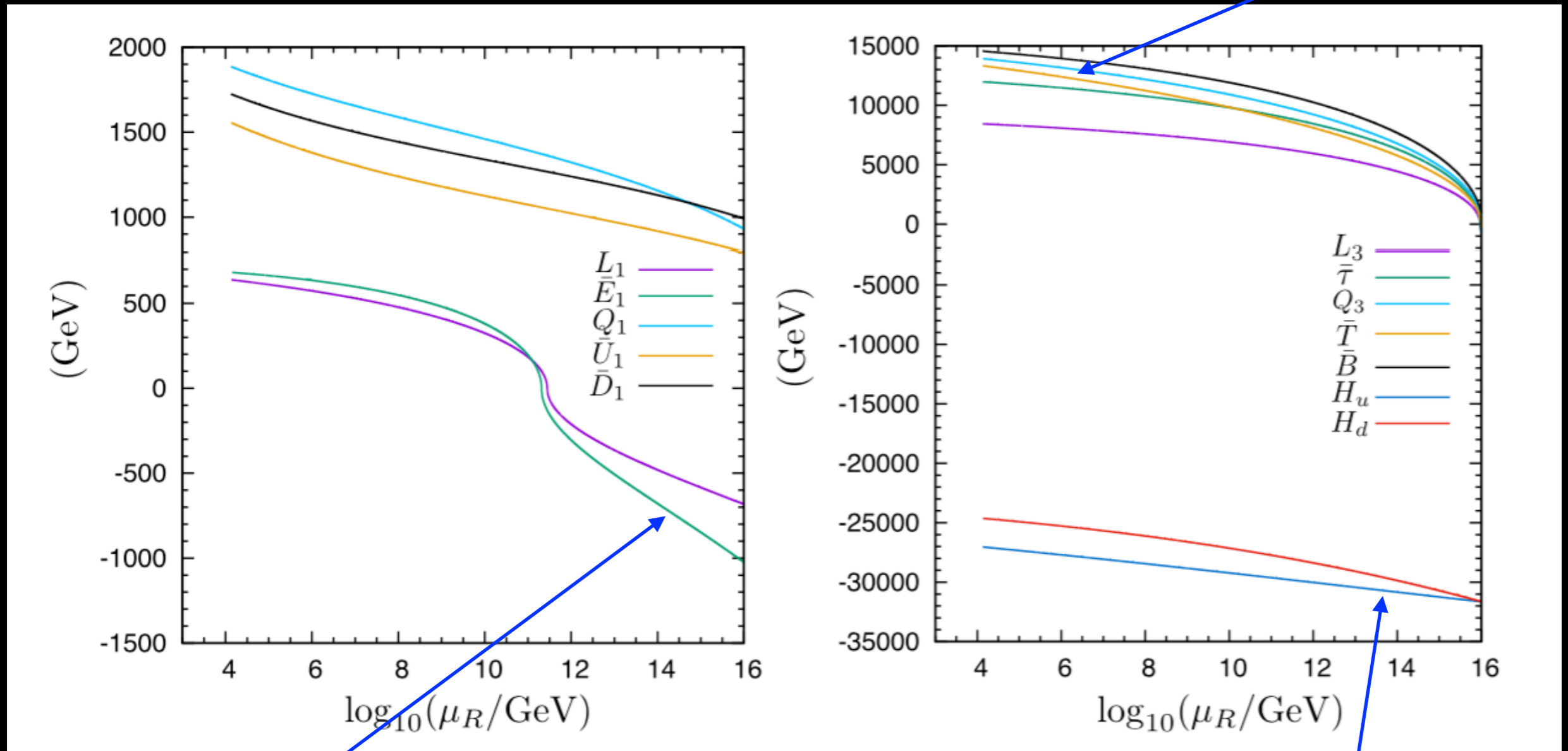


スレプトンの質量を持ち上げる

$$\frac{dm_L^2}{d \ln \mu_R} \ni \frac{1}{(16\pi^2)^2} \left[\left(3g_2^4 + \frac{9}{25}g_1^4 \right) (m_{H_u}^2 + m_{H_d}^2) \right] < 0$$

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

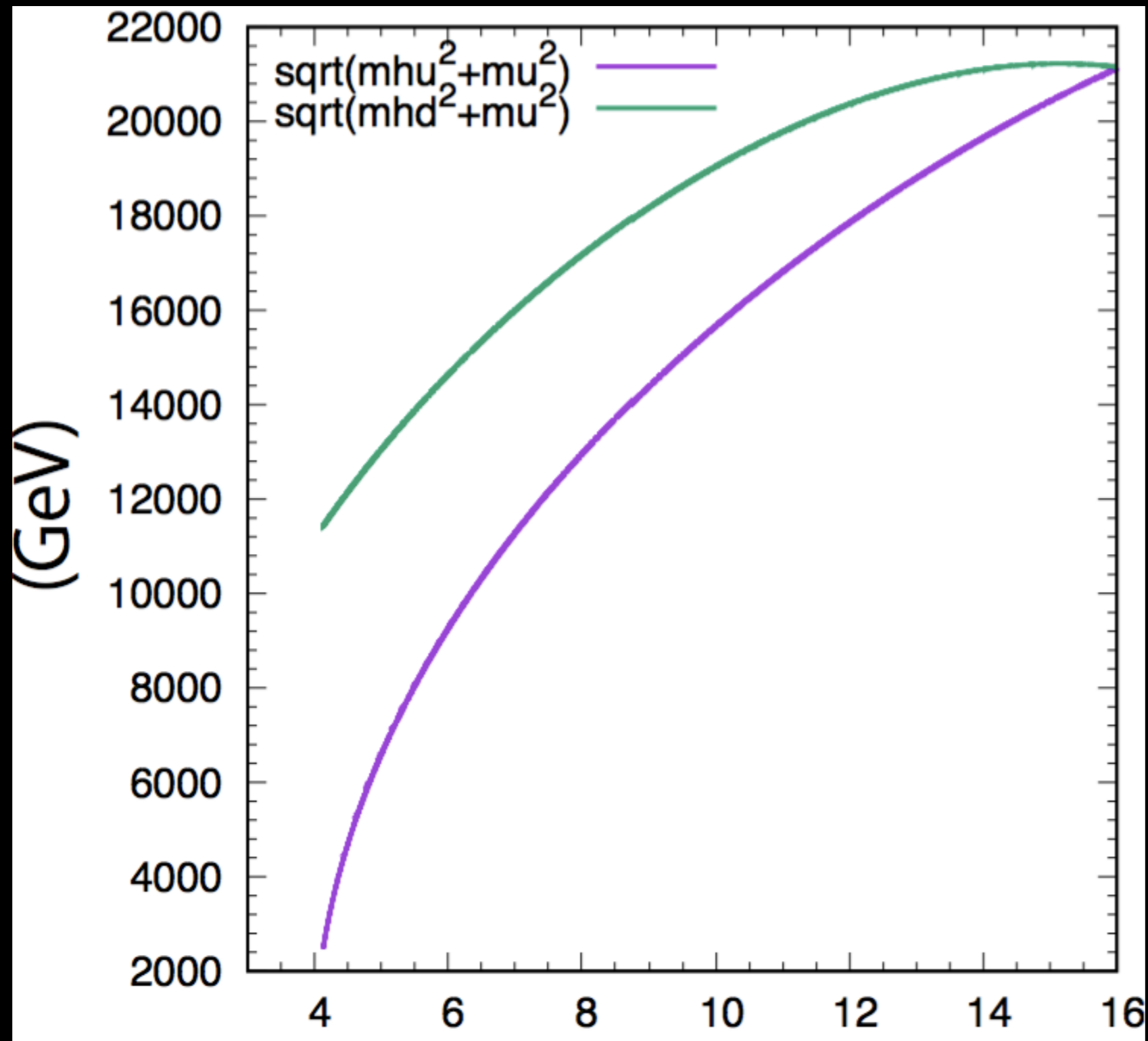
RGE runnings of soft masses



sleptons

Higgs doublets

(GUT scaleではただのAnomaly Mediation)



Higgs Potentialの2次の項自体はnegativeではない。

Parameters	Point I
$m_{3/2}$ (TeV)	120
m_H^2 (GeV ²)	-9×10^8
$\tan \beta$	48
Particles	Mass (GeV)
\tilde{g}	2550
\tilde{q}	1830 - 2110
$\tilde{\chi}_1^0 / \tilde{\chi}_1^\pm$	378
$\tilde{\chi}_2^0$	1100
$\tilde{e}_{L,R}$	549, 682
$\tilde{\mu}_{L,R}$	609, 778
$\tilde{t}_{2,1}$ (TeV)	13.1, 12.5
$\tilde{b}_{2,1}$ (TeV)	14.2, 13.4
$\tilde{\tau}_{2,1}$ (TeV)	11.4, 8.0
H^\pm (TeV)	10.9
μ (TeV)	25.8
$(a_\mu)_{\text{SUSY}}$ (10^{-10})	18.6

~wino

~bino

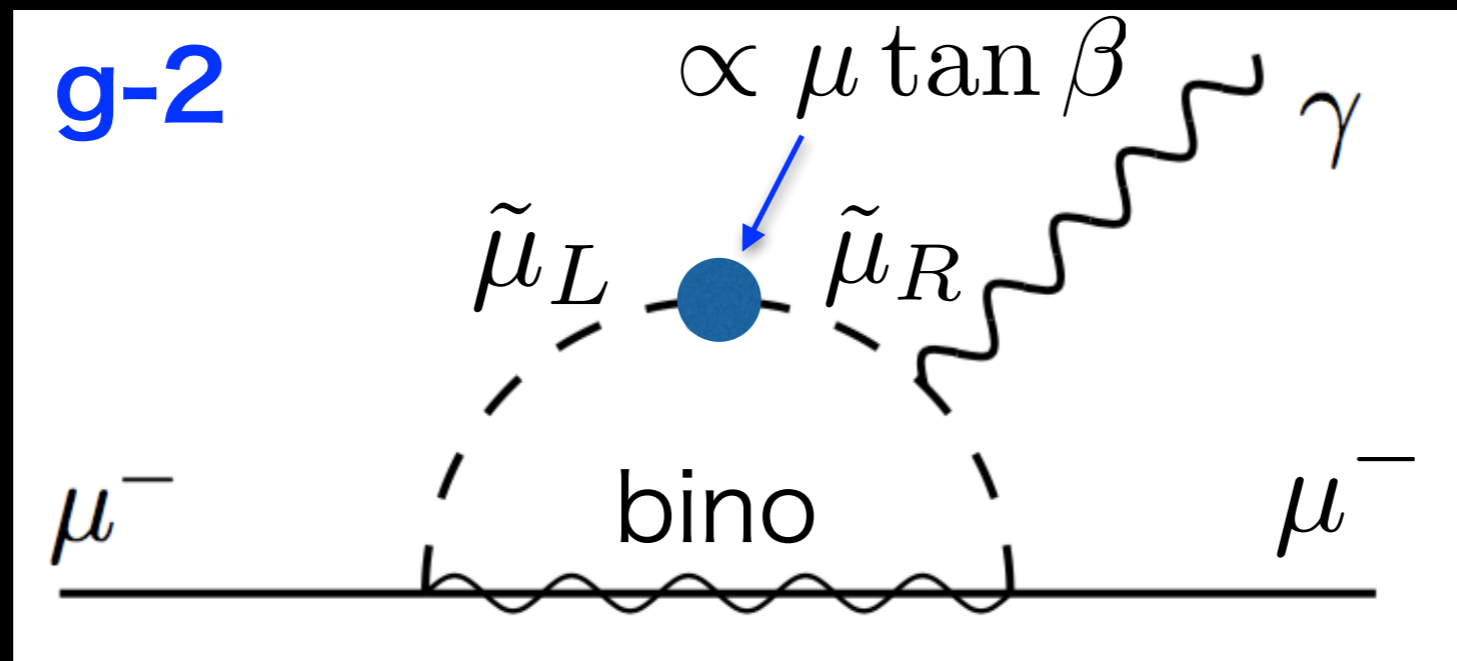
~ 2TeV

~ 600GeV

~ 10TeV

結果

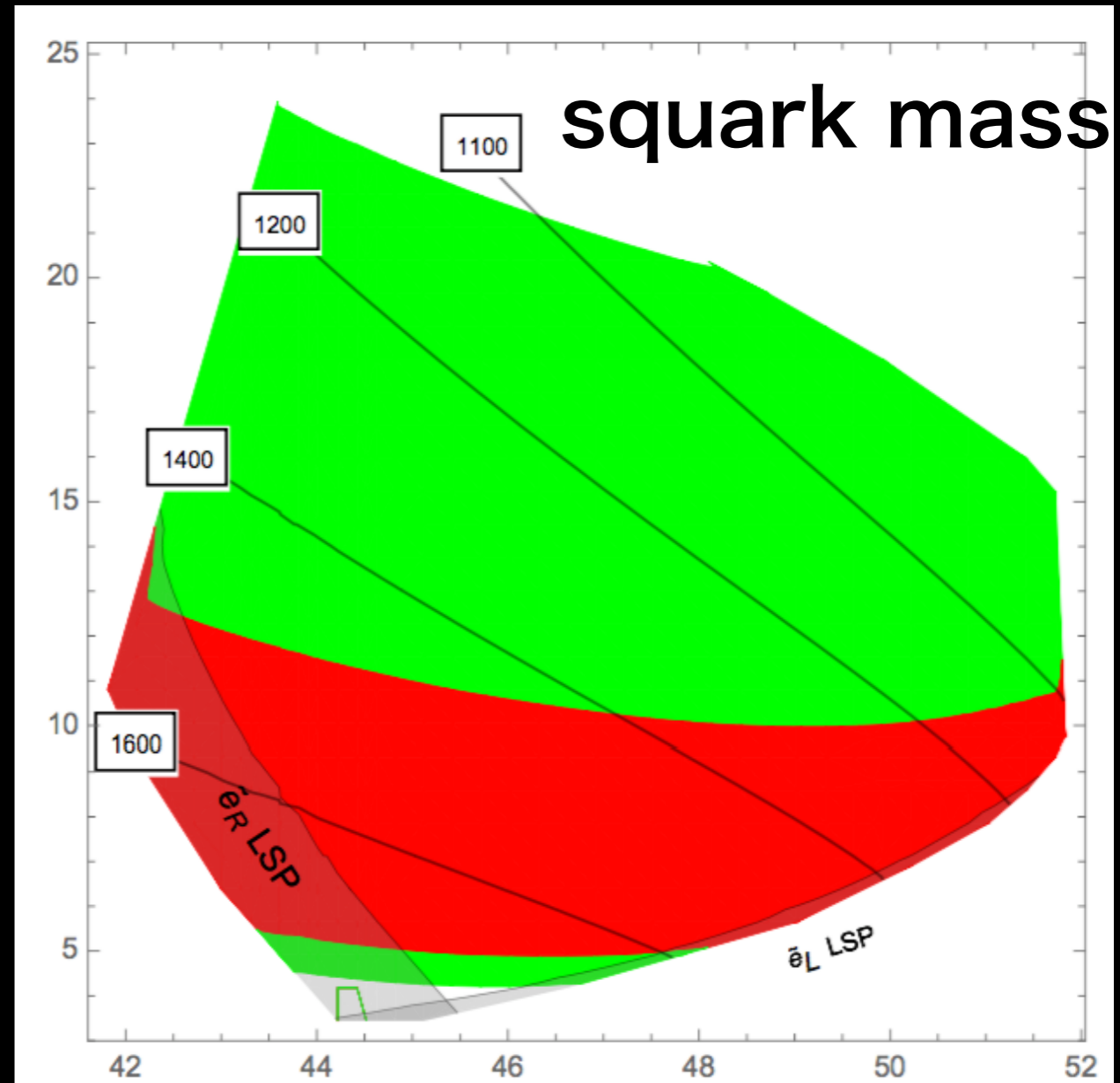
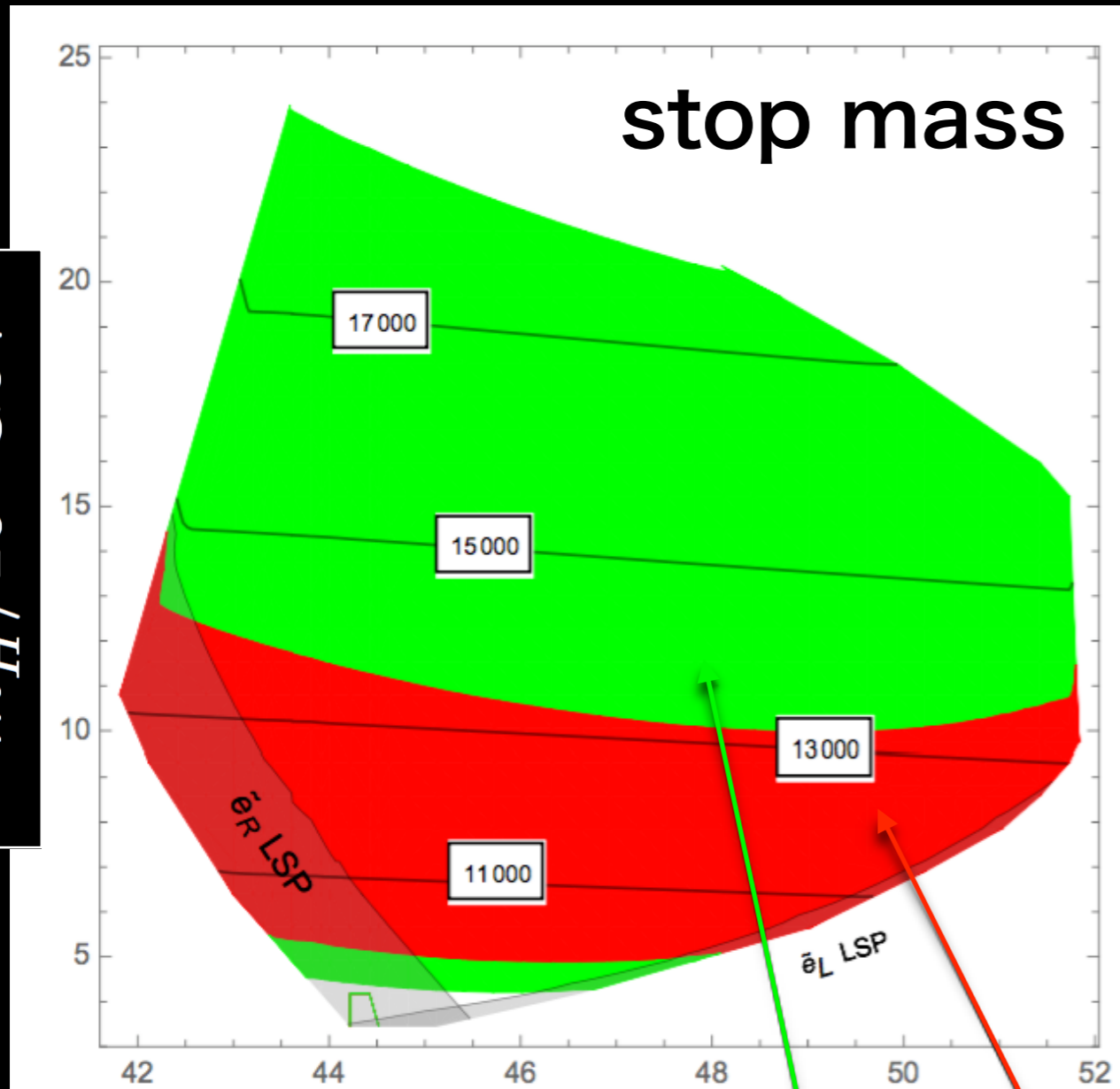
Muon $g-2$, stop mass and
(light flavor) squark mass



(including leading 2loop corrections)

$m_{3/2} = 100 \text{ TeV}$

$-m_H^2 / 10^8 \text{ GeV}^2$



$\tan \beta$

$\tan \beta$

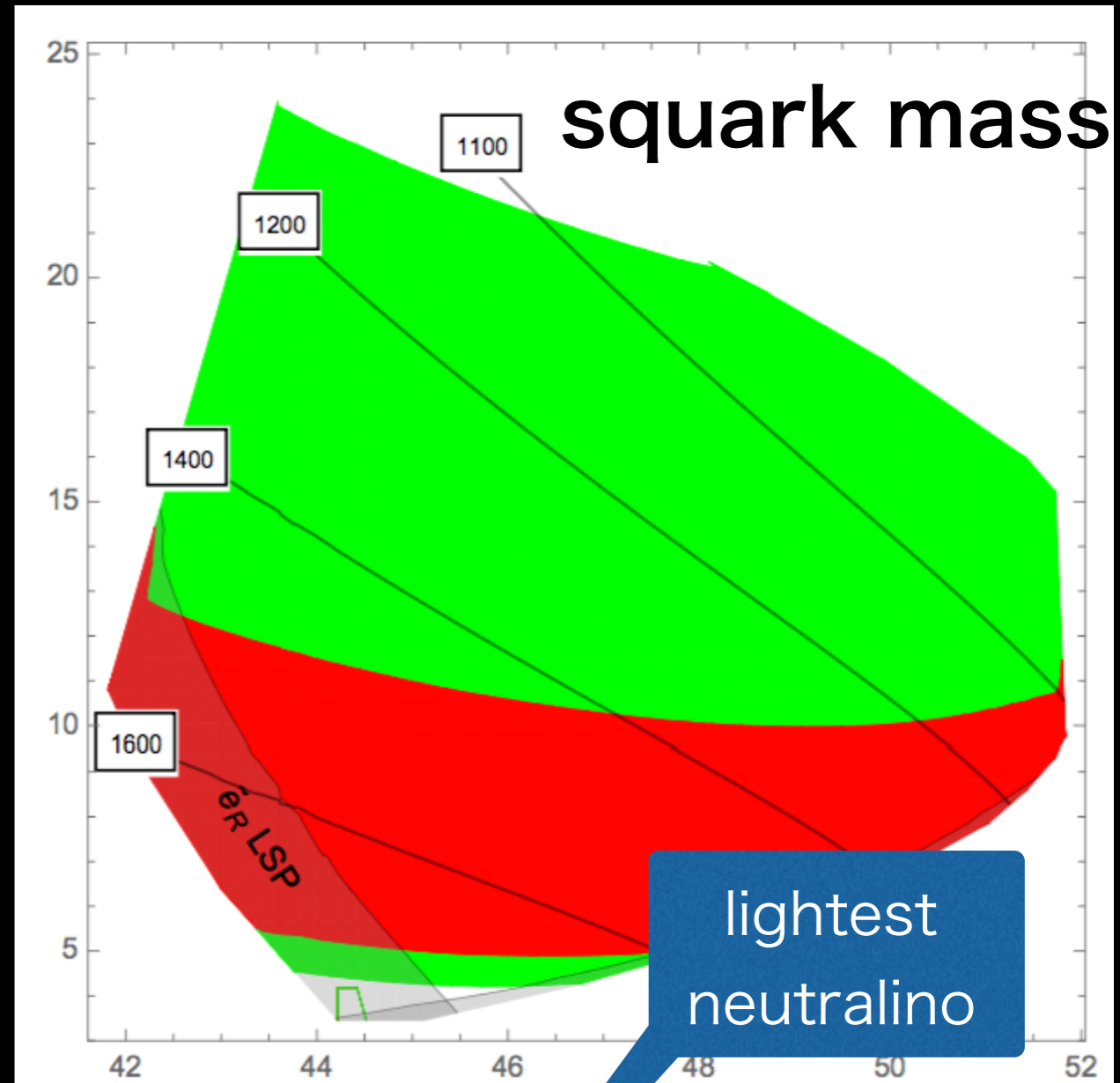
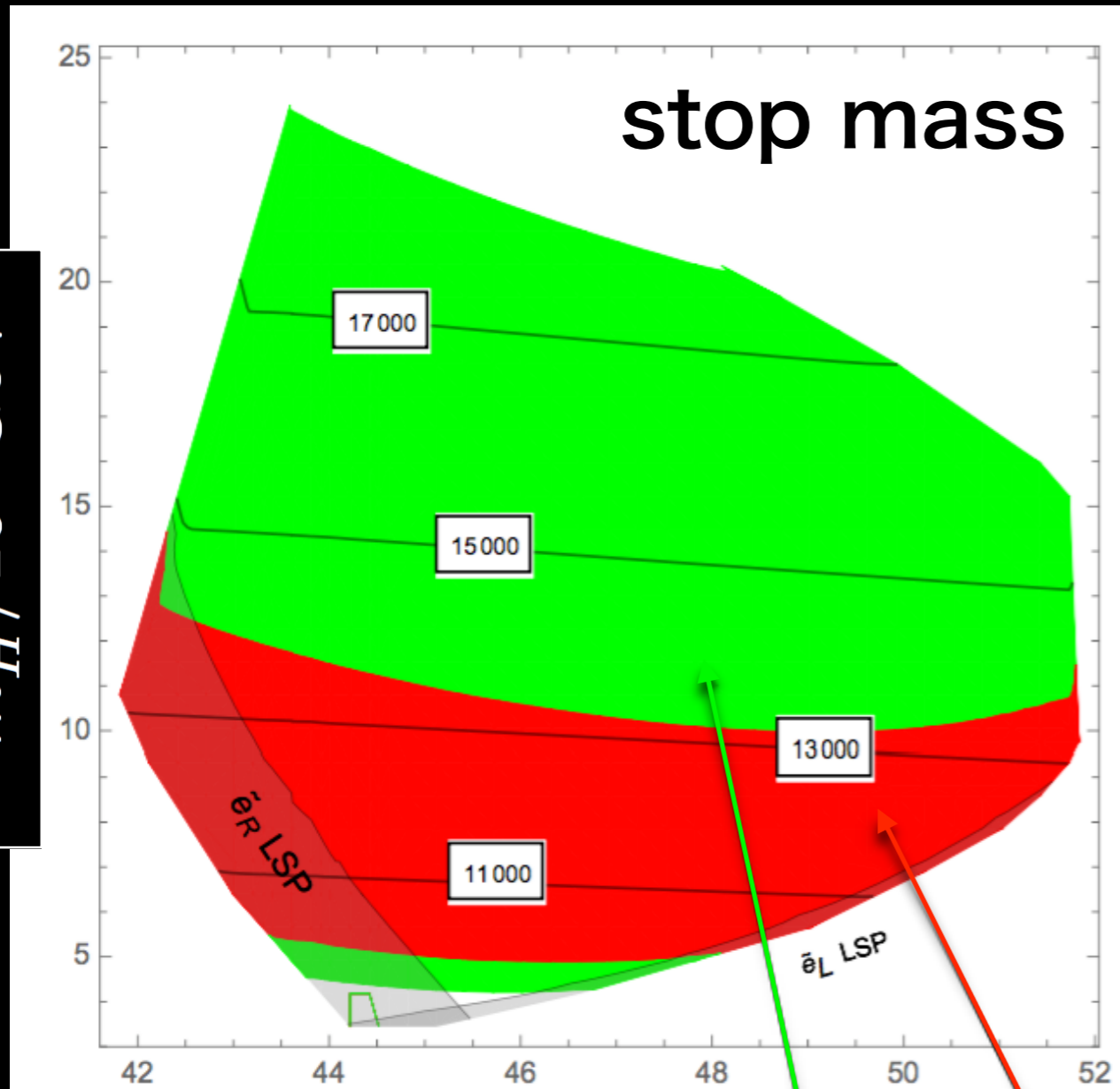
2σ

$g-2: 1\sigma$

gluino mass: 2.2 TeV
wino mass: 320 TeV

$m_{3/2} = 100 \text{ TeV}$

$-m_H^2 / 10^8 \text{ GeV}^2$



$\tan \beta$

$\tan \beta$

2σ

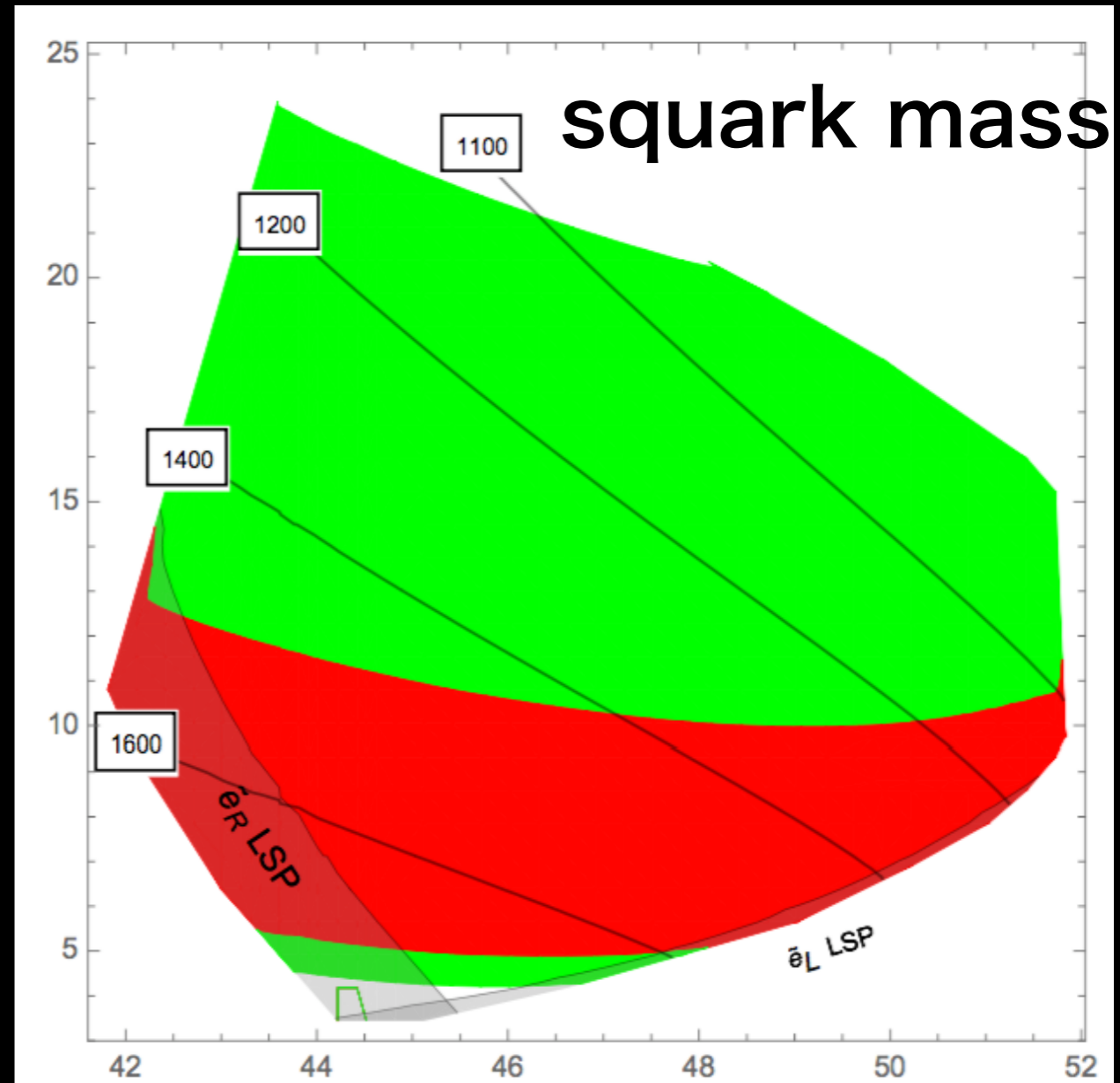
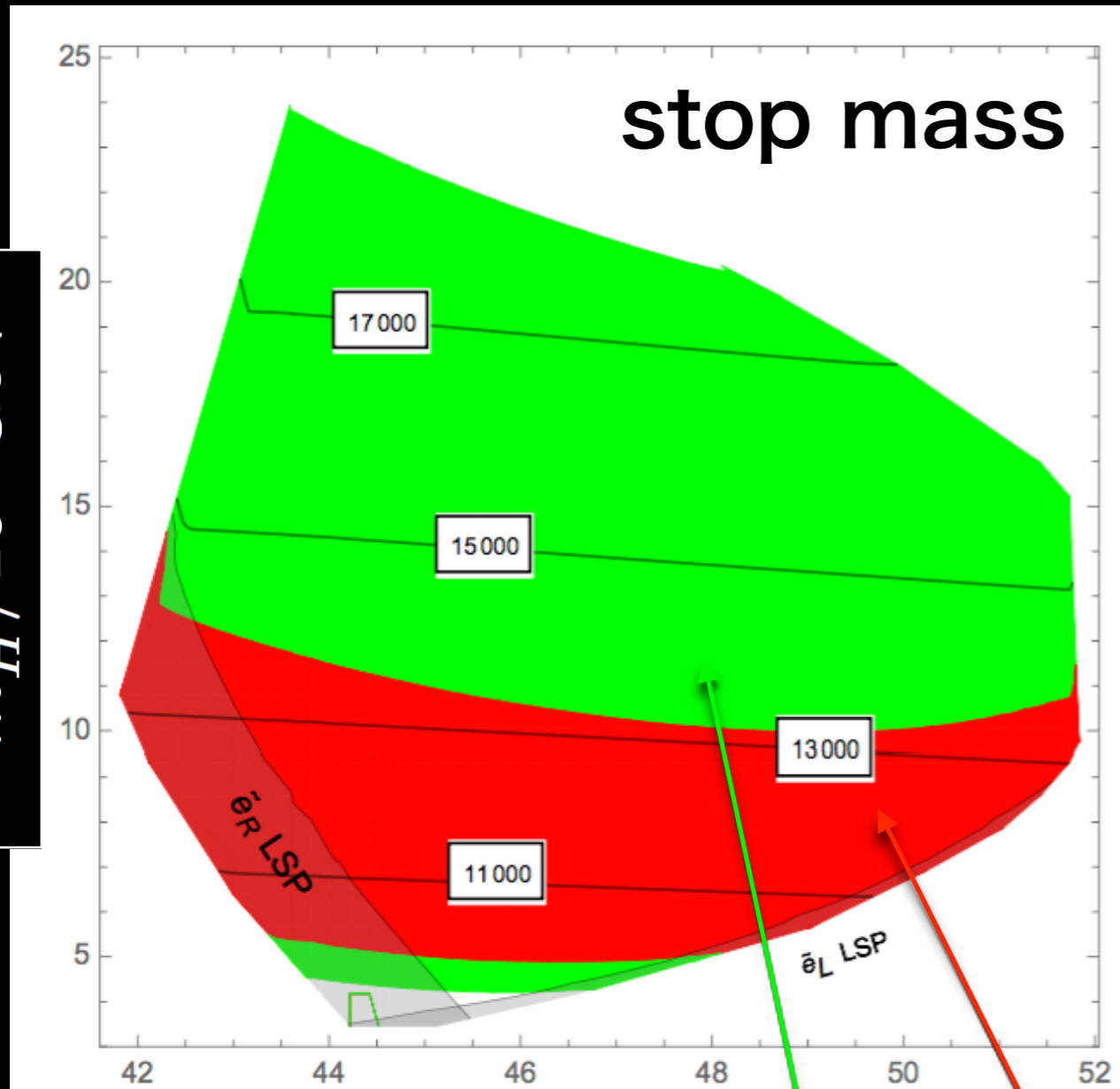
$g-2: 1\sigma$

lightest neutralino

gluino mass: 2.2 TeV
wino mass: 320 TeV

$m_{3/2} = 100 \text{ TeV}$

$-m_H^2 / 10^8 \text{ GeV}^2$



$\tan \beta$

$\tan \beta$

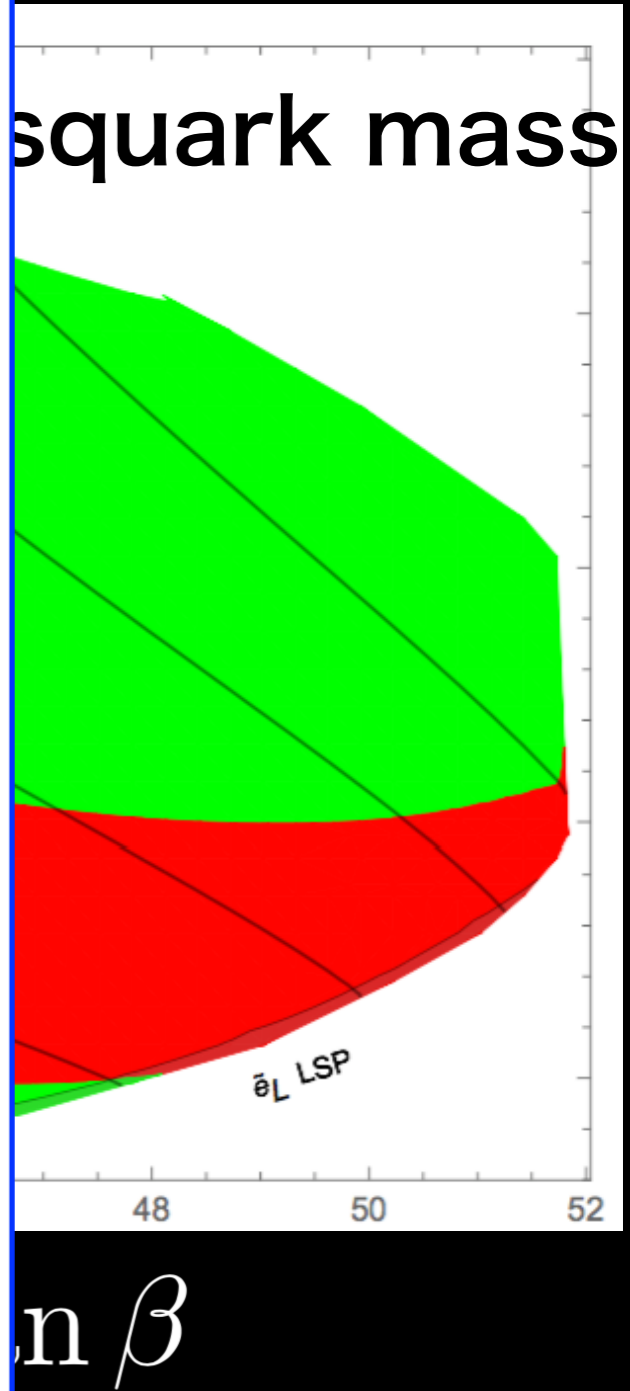
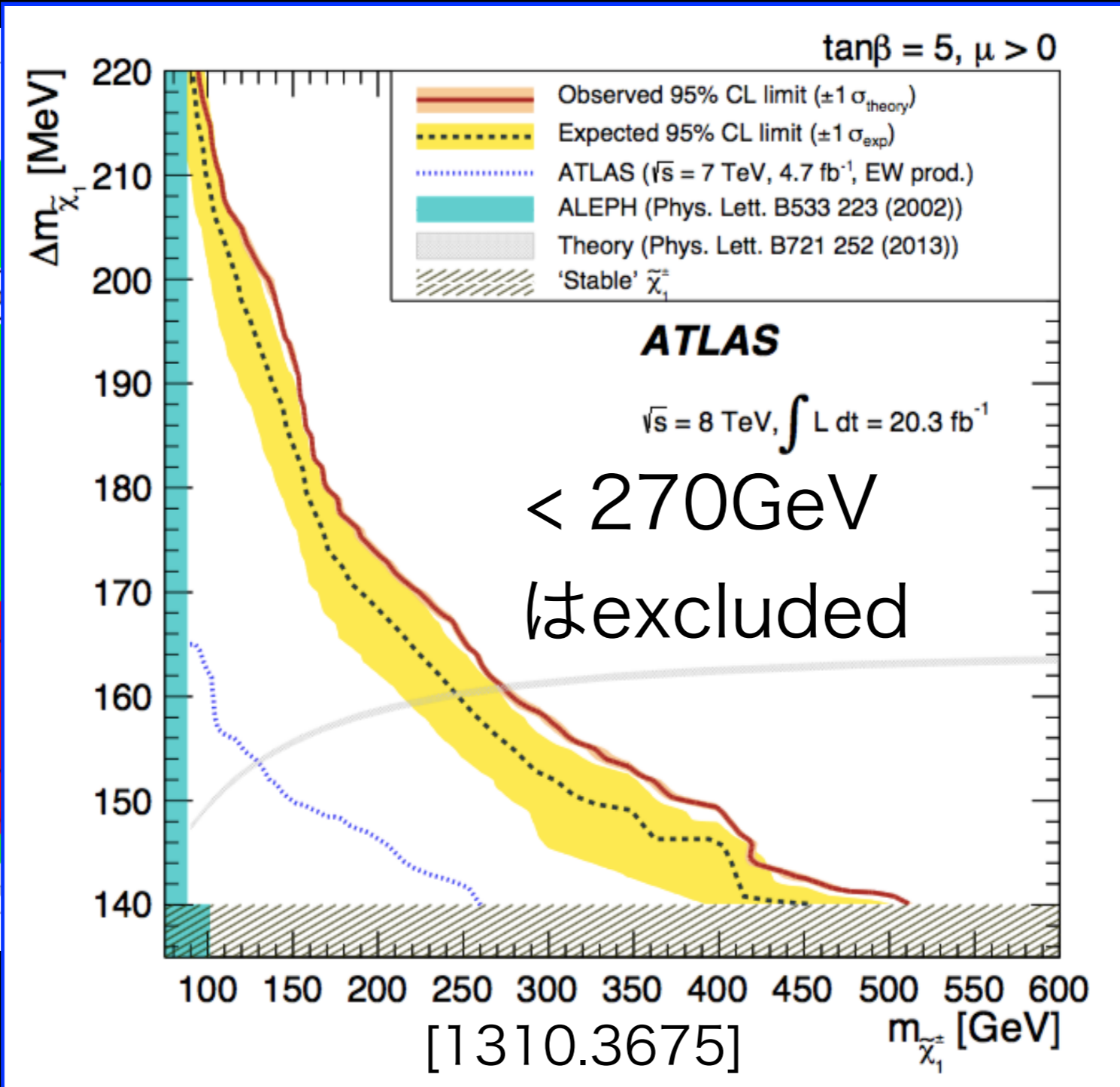
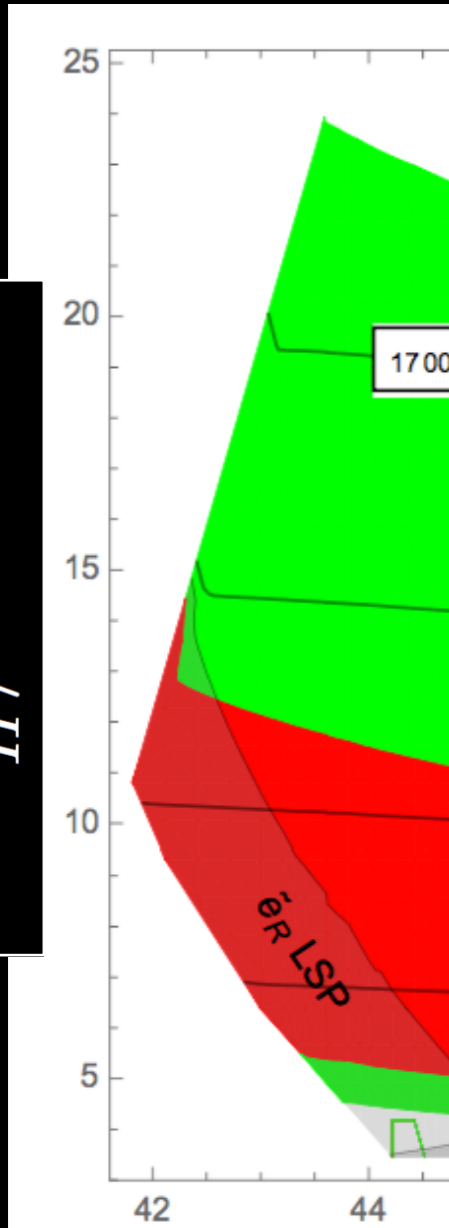
2σ

$g-2: 1\sigma$

gluino mass: 2.2 TeV
wino mass: 320 TeV

$m_{3/2} = 100 \text{ TeV}$

$-m_H^2 / 10^8 \text{ GeV}^2$

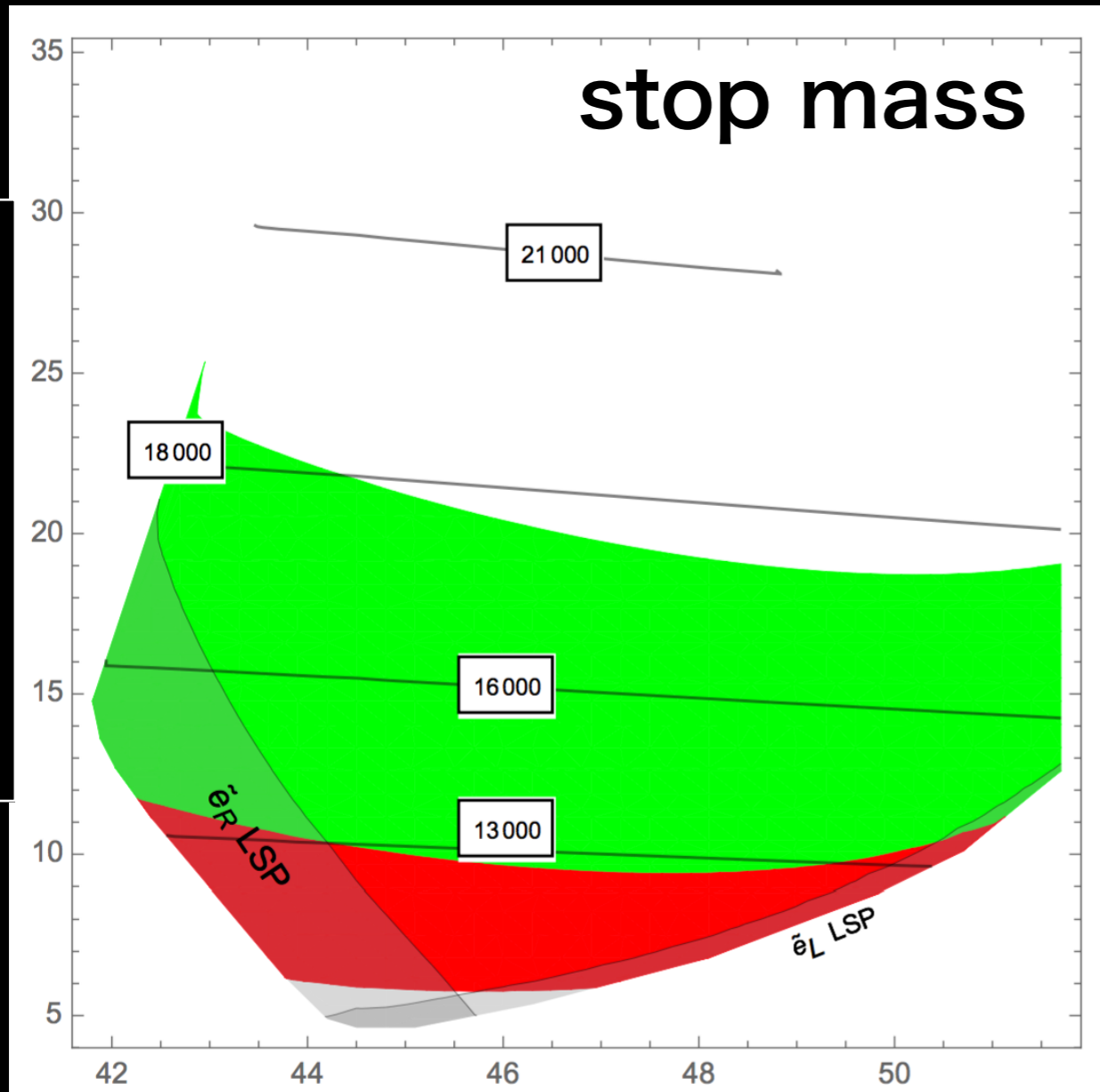


2σ $g-2: 1\sigma$

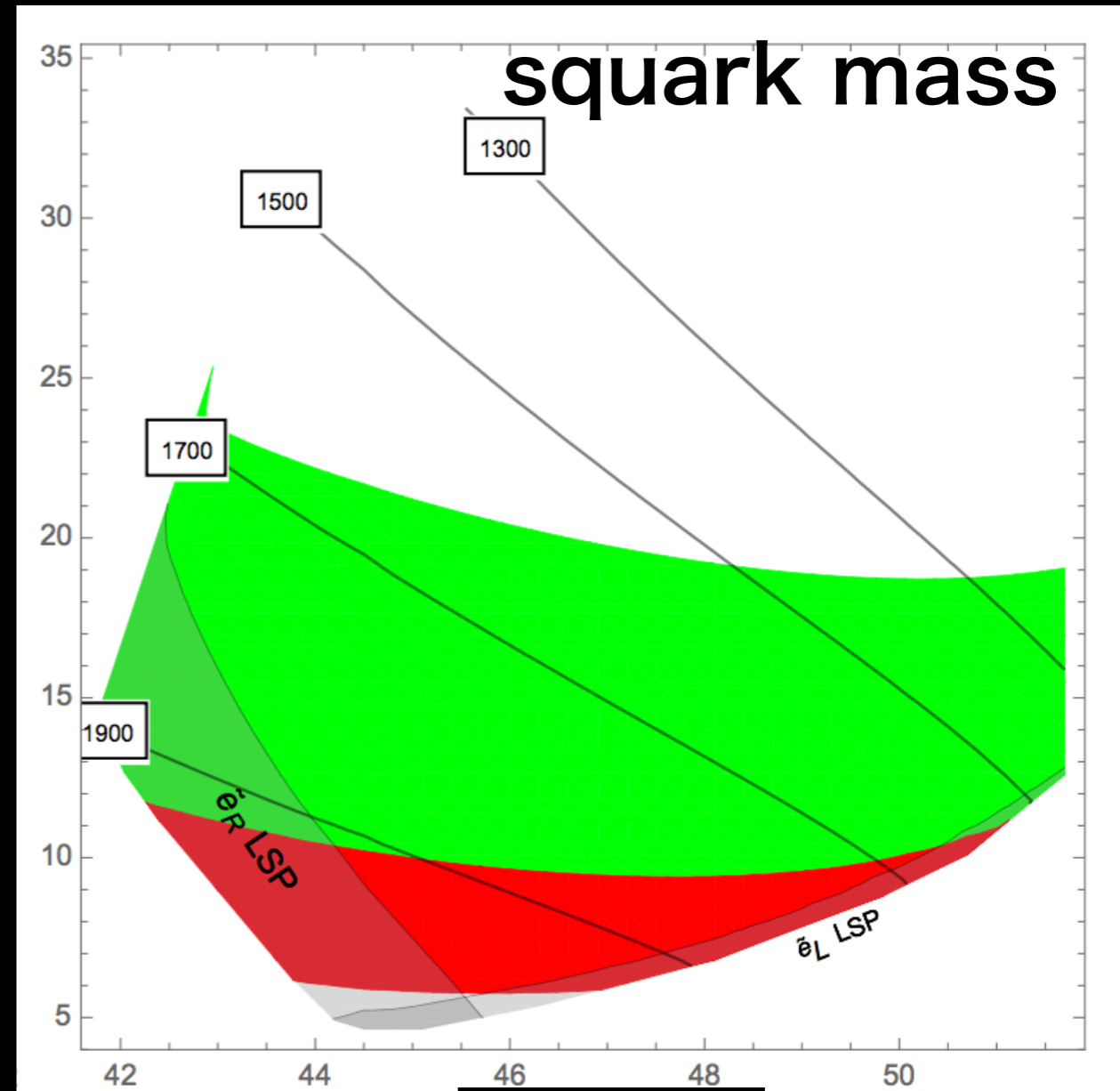
gluino mass: 2.2 TeV
 wino mass: 320 TeV

$m_{3/2} = 120 \text{ TeV}$

$-m_H^2 / 10^8 \text{ GeV}^2$



$\tan \beta$

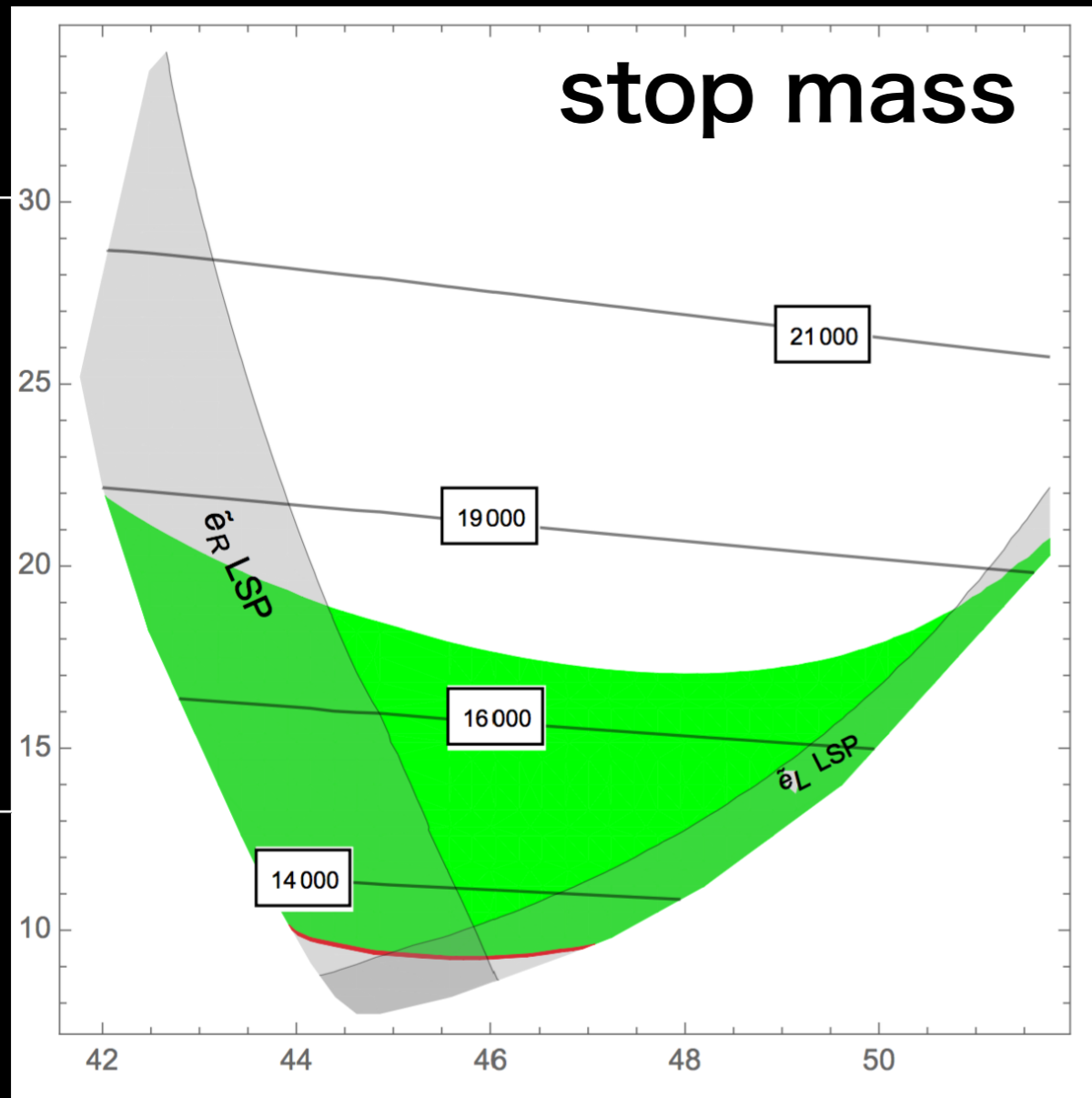


$\tan \beta$

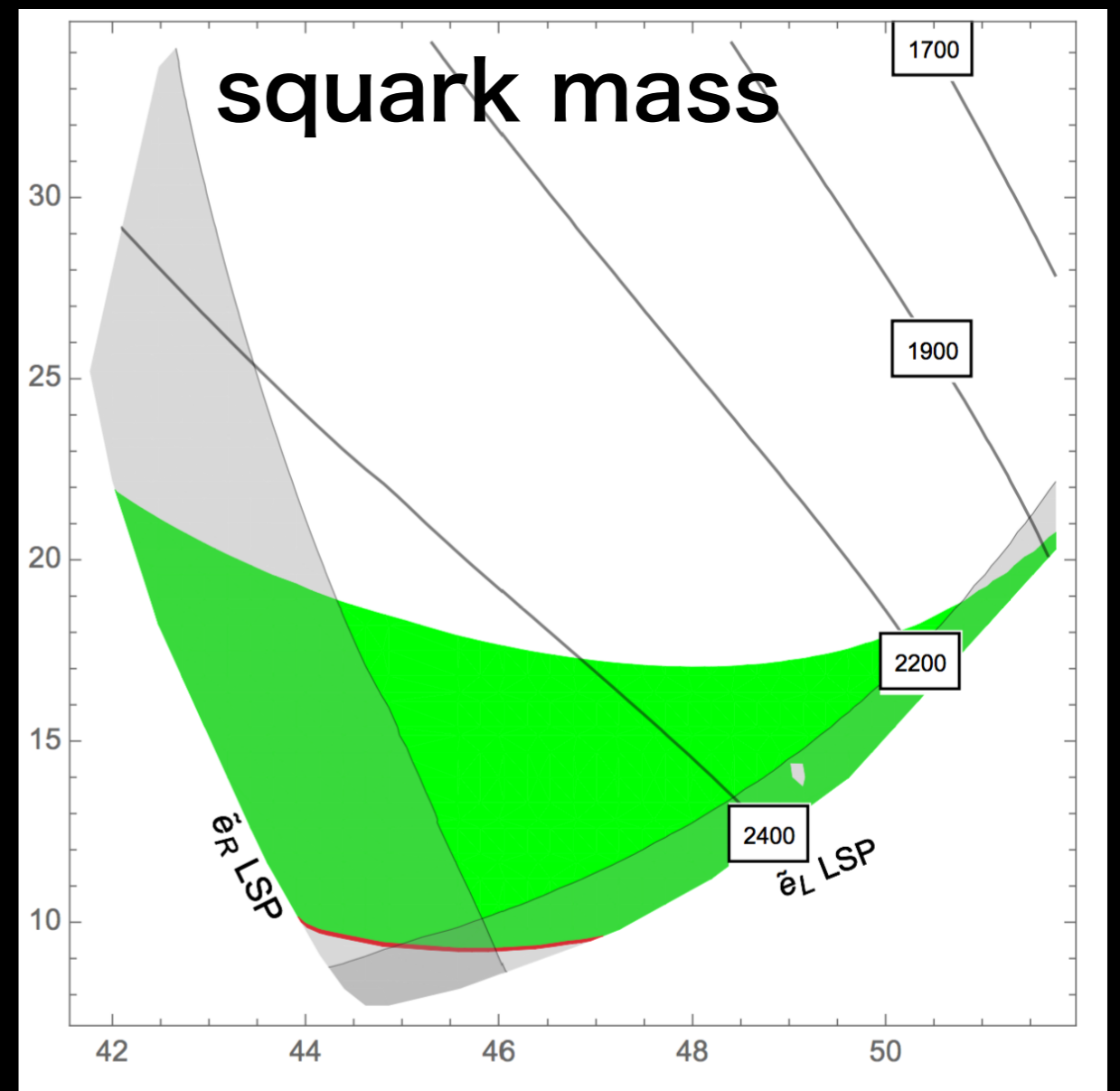
gluino mass: 2.5 TeV
wino mass: 380 GeV

$m_{3/2} = 160 \text{ TeV}$

$-m_H^2 / 10^8 \text{ GeV}^2$



$\tan \beta$

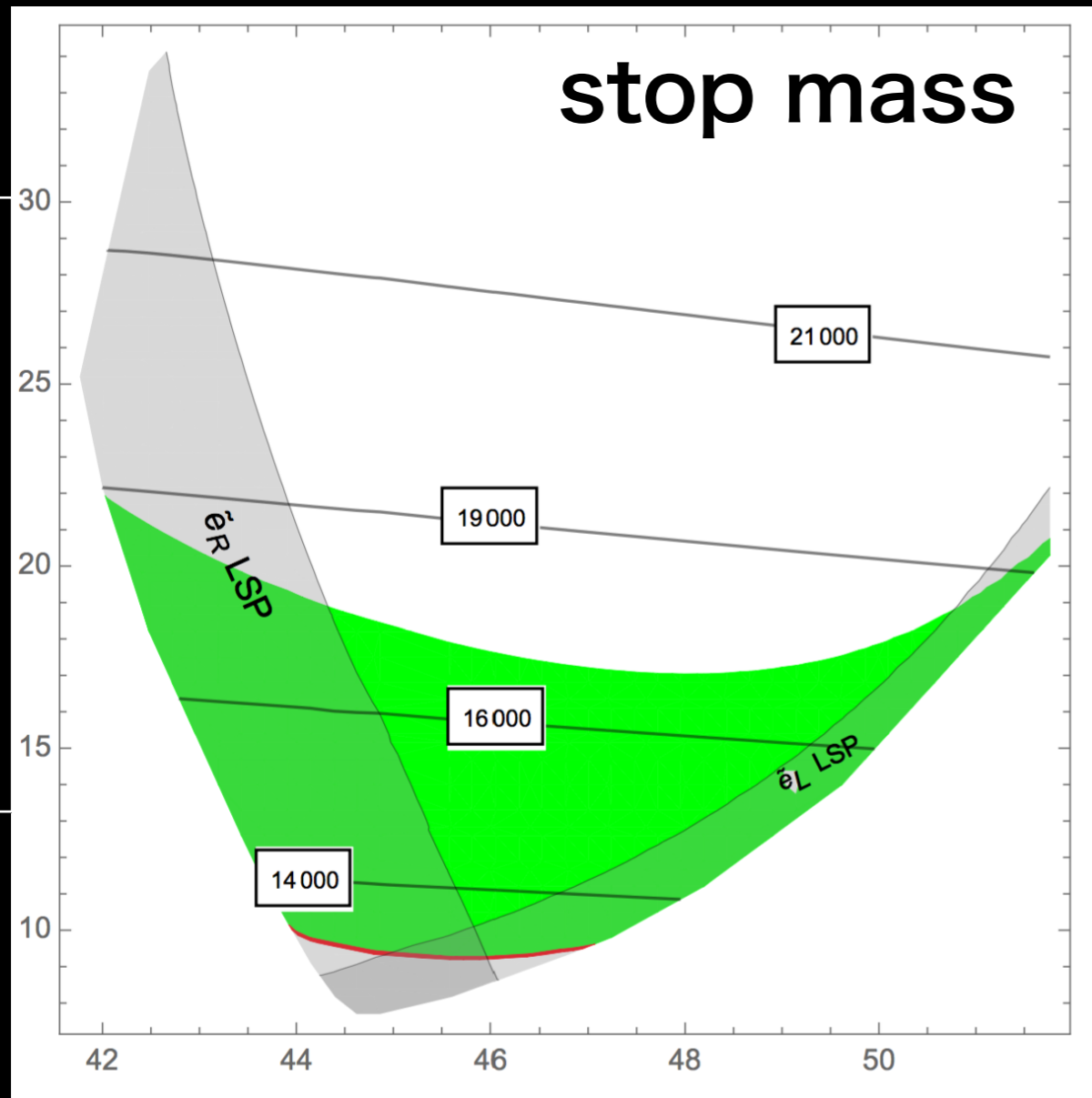


$\tan \beta$

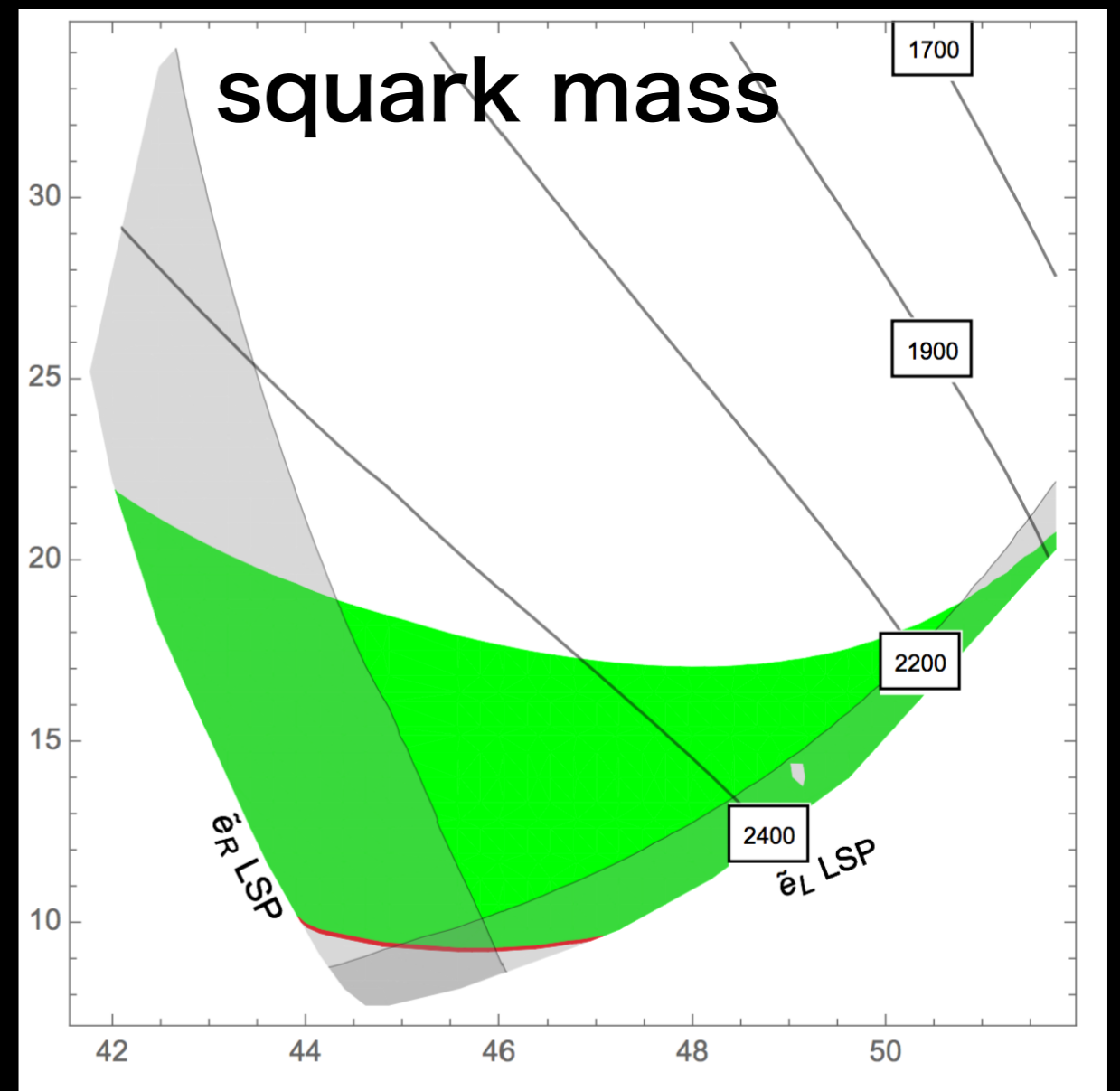
gluino mass: 3.3 TeV
wino mass: 500 GeV

$m_{3/2}=160 \text{ TeV}$

$-m_H^2/10^8 \text{ GeV}^2$



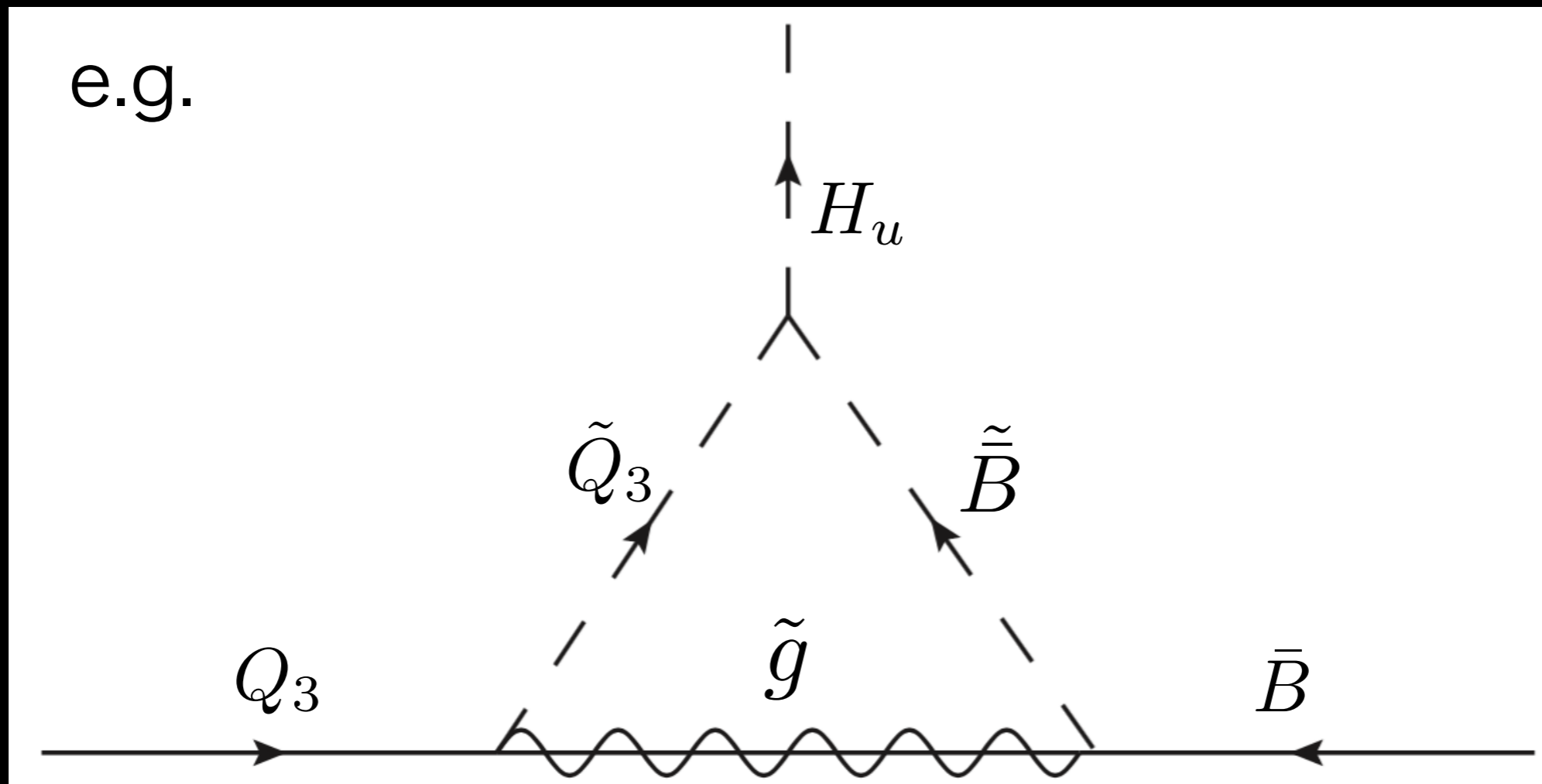
$\tan\beta$



$\tan\beta$

ウィーノもhigh luminosity LHCでおそらくカバーできる

Yukawa coupling unification



with important threshold corrections

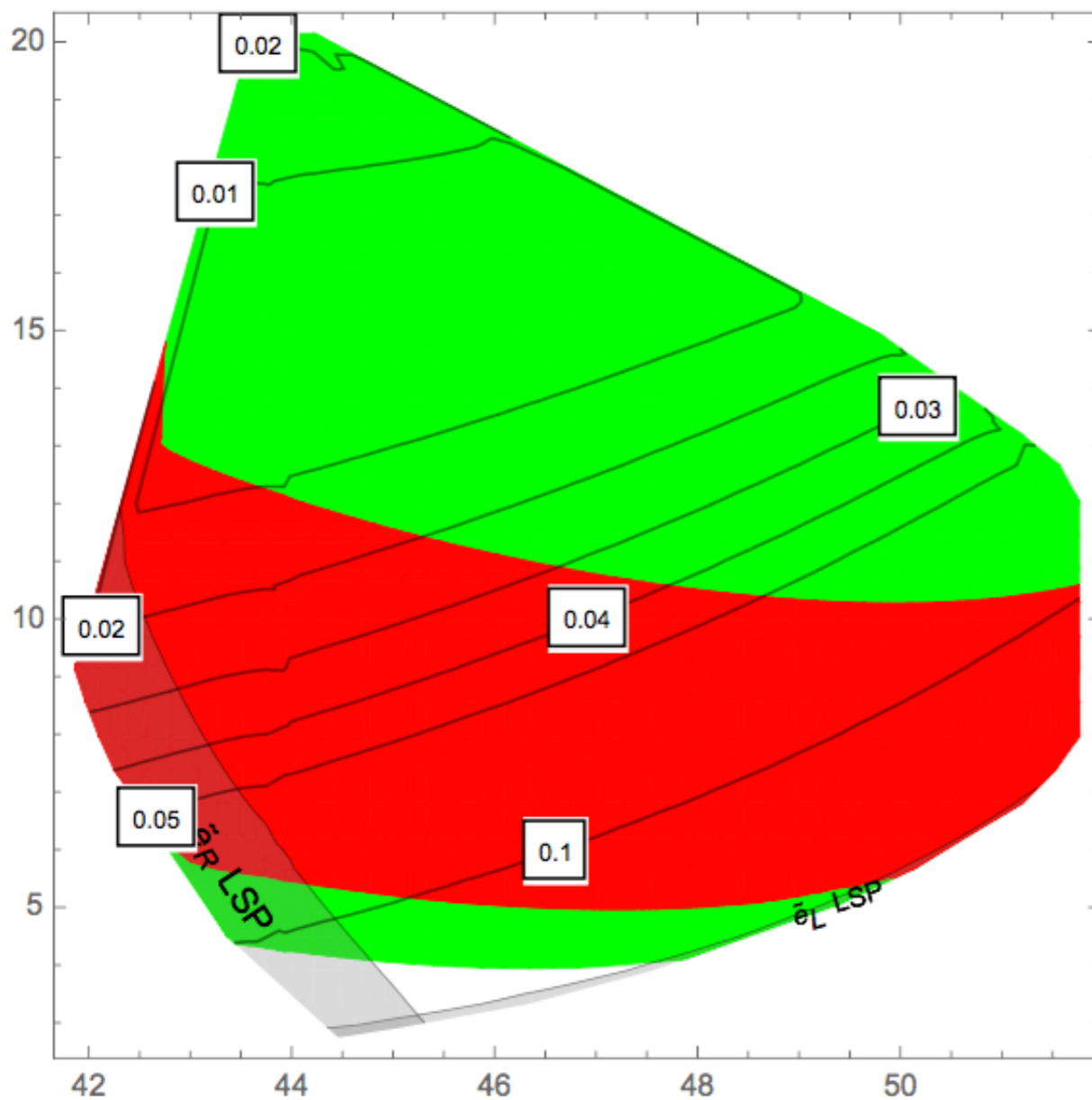
Bottom-Tau Unification

$$\sqrt{(Y_\tau - Y_b)^2}$$

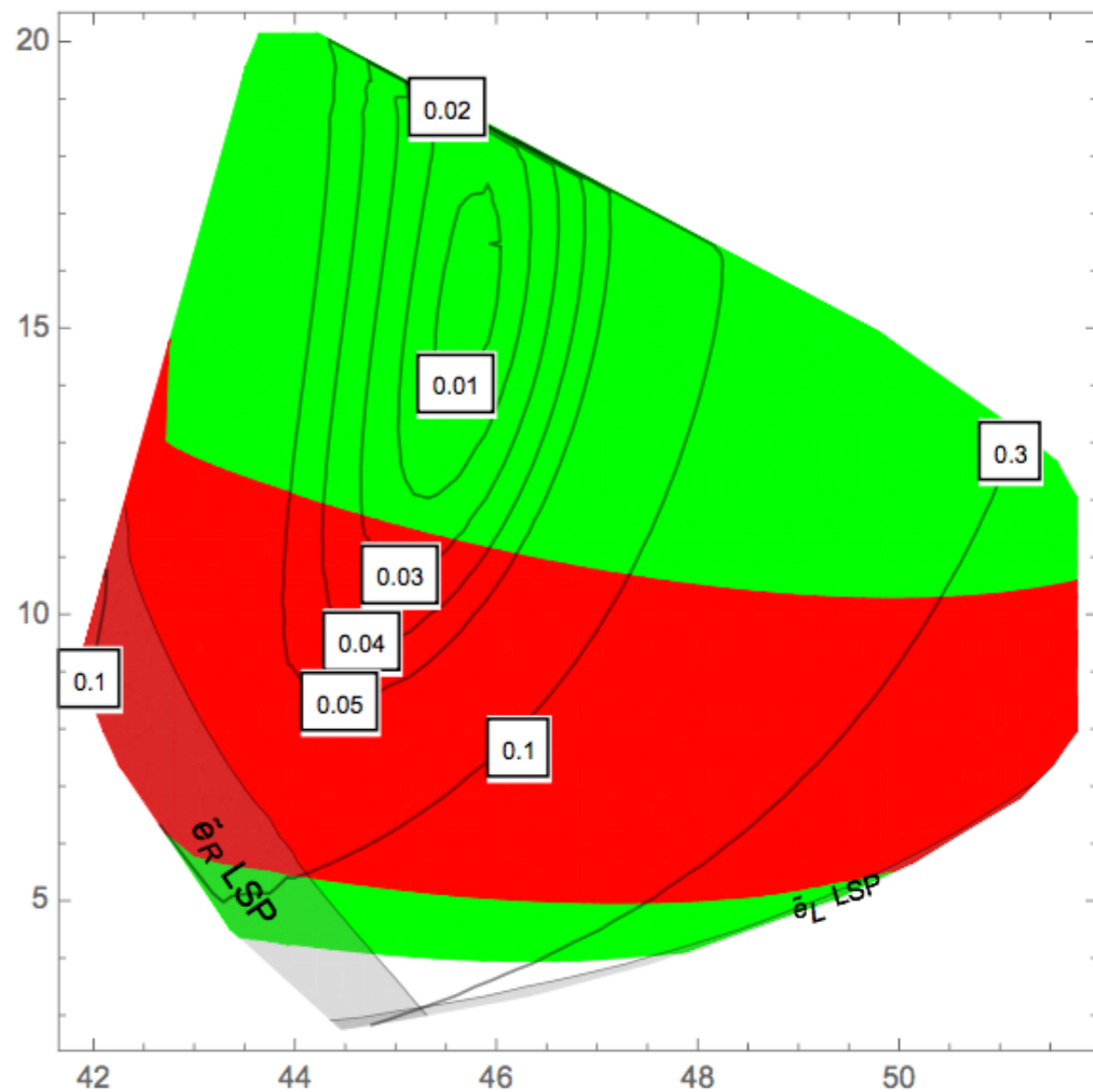
Bottom-Tau-Top Unification

$$\sqrt{(Y_\tau - Y_b)^2 + (Y_\tau - Y_t)^2 + (Y_t - Y_b)^2}$$

$-m_H^2 / 10^8 \text{ GeV}^2$



$\tan \beta$



$\tan \beta$

$(m_{3/2} = 90 \text{ TeV})$

Conclusion

- ・ シンプルかつ沢山の利益がある模型を見つけた。
- ・ Anomaly Mediationのタキオニックスレプトン問題をシンプルな方法で解いている。
- ・ SUSYフレーバーの問題なし。
- ・ グラビティーノ問題なし。
- ・ Muon $g-2$ OK!
- ・ 125GeV Higgs mass OK!

Conclusion

- ・ LHCで見える (ウィーノ、スクォーク)。
- ・ Yukawa結合定数が統一するリージョンもある。
(ボトム-タウ unification, ボトム-トップ-タウ unification)
- ・ スクォーク・スレプトンが南部ゴールドストーンボソンだとすると (古典的に質量0)、3世代のクォーク・レプトンの起源を説明できる可能性がある。 [Yanagida, Yin, Yokozaki, 2016]
- ・ ゲージノ質量を出すためのシングレットが必要ない。
→ ポロニー問題(モジュライ問題)のリラックス。
- ・ Muon $g-2$ アノマリーの説明を除いても魅力的な模型。

Conclusion

- ・ LHCで見える (ウィーノ、スクォーク)。
- ・ Yukawa結合定数が統一するリージョンも $E_7/SU(5)_{GUT} \times U(1)^3$
(ボトム-タウ unification, ボトム-トップ) [Kugo, Yanagida, 1984; Yanagida, Yasui, 1985]
- ・ スクォーク・スレプトンが南部ゴールドストーンボソンだとすると (古典的に質量0)、3世代のクォーク・レプトンの起源を説明できる可能性がある。 [Yanagida, Yin, Yokozaki, 2016]
- ・ ゲージノ質量を出すためのシングレットが必要ない。
→ ポロニー問題(モジュライ問題)のリラックス。
- ・ Muon g-2 アノマリーの説明を除いても魅力的な模型。

Conclusion

- ・ LHCで見える (ウィーノ、スクォーク)。
- ・ Yukawa結合定数が統一するリージョンもある。
(ボトム-タウ unification, ボトム-トップ-タウ unification)
- ・ スクォーク・スレプトンが南部ゴールドストーンボソンだとすると (古典的に質量0)、3世代のクォーク・レプトンの起源を説明できる可能性がある。 [Yanagida, Yin, Yokozaki, 2016]
- ・ ゲージノ質量を出すためのシングレットが必要ない。
→ ポロニー問題(モジュライ問題)のリラックス。
- ・ Muon g-2 アノマリーの説明を除いても魅力的な模型。

- クォーク、レプトンはHiggsの真空期待値によって質量をもち、質量の階層性はYukawa結合によって決まっている。



- スクォークやスレプトンはHiggsのsoft massから質量をもち、質量の階層性はYukawa結合によって決まっている。

自然な構造なのではないか？

ありがとうございました。