



# CP-safe gravity mediation and $(g-2)_\mu$

[Sho IWAMOTO](#) (岩本 祥)

[Kavli IPMU](#), the University of Tokyo, JAPAN

30th Jul. 2014

[PPP2014](#) @ YITP, Kyoto University

Reference)

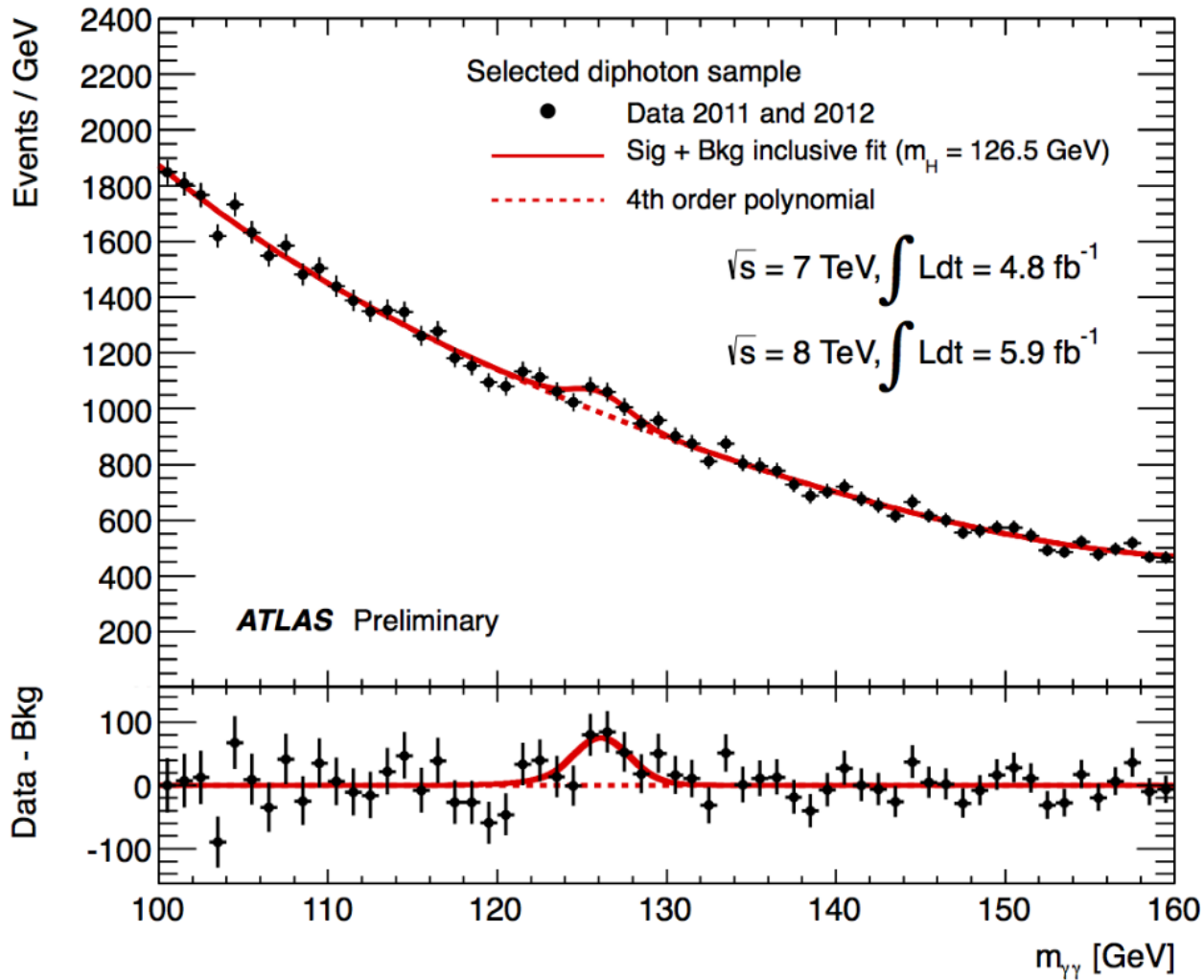
S.I., Tsutomu T. Yanagida, Norimi Yokozaki [[1407.4226](#)].

これまで  
の  
あらすじ

2012年

7月4日

$$h \rightarrow \gamma\gamma$$



その後



SUSYとは  
何だったのか

LHC  $\longrightarrow$  SUSY  $> \mathcal{O}(1)$  TeV

$m_h = 126$  GeV  
 $\Rightarrow \tilde{t} = \mathcal{O}(1-10)$  TeV

$\tilde{q}, \tilde{g}$  探索

$\Rightarrow \tilde{q}, \tilde{g} > 1-2$  TeV



LHC  $\longrightarrow$  SUSY  $>$   $\mathcal{O}(1)$  TeV

▶ あきらめる  
たたかう

LHC  $\longrightarrow$  SUSY  $> \mathcal{O}(1)$  TeV

▶ あきらめる  
たたかう

$\longrightarrow$  100 TeV collider

の話は次回。無事帰国できたら。

(すみません.....)

LHC  $\longrightarrow$  SUSY  $> \mathcal{O}(1)$  TeV

あきらめる

▶ たたかう

最後の希望

$(g - 2)_\mu$

# CP-safe gravity mediation and $(g-2)_\mu$

[Sho IWAMOTO](#) (岩本 祥)

[Kavli IPMU](#), the University of Tokyo, JAPAN

30th Jul. 2014

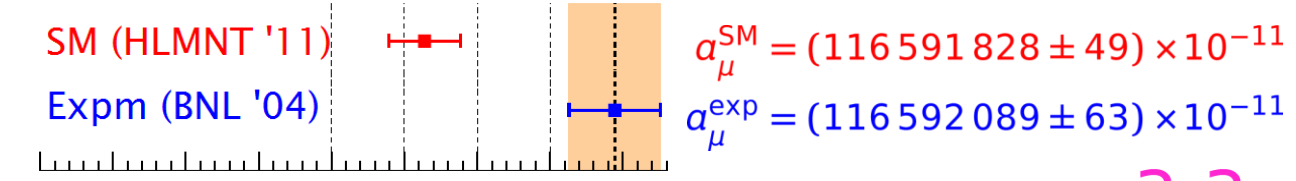
[PPP2014](#) @ YITP, Kyoto University

Reference)

S.I., Tsutomu T. Yanagida, Norimi Yokozaki [[1407.4226](#)].

$$\left( a_\mu := \frac{g_\mu - 2}{2} \right)$$

Muon  $g-2$  (anomalous magnetic moment)



Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner [[1105.3149](#)]

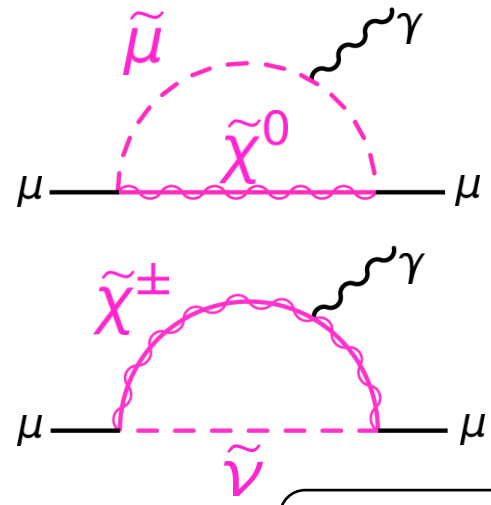
3.3 $\sigma$  discrepancy

**SUSY with**

**$O(100)\text{GeV}$  electroweakino.**

Lopez, Nanopoulos, Wang [[ph/9308336](#)]  
 Chattopadhyay, Nath [[ph/9507386](#)]  
 Moroi [[ph/9512396](#)]

$(\tilde{l}, \tilde{\nu}, \tilde{\chi}^0, \tilde{\chi}^\pm)$



$$a_\mu^{\text{SUSY}}(\tilde{\chi}^0, \tilde{\mu}) \approx \frac{g_Y^2}{(4\pi)^2} \frac{m_\mu^2}{m_{\text{soft}}^2} \text{sgn}(\mu) \tan \beta + \dots,$$

$$a_\mu^{\text{SUSY}}(\tilde{\chi}^\pm, \tilde{\nu}) \approx \frac{g_2^2}{(4\pi)^2} \frac{m_\mu^2}{m_{\text{soft}}^2} \text{sgn}(\mu) \tan \beta.$$

$W \ni \mu H_u H_d$  (Higgsino mass term),  $\tan \beta = \langle H_u \rangle / \langle H_d \rangle$ ,  
 $m_{\text{soft}}$  : SUSY-particle mass-scale,  $g_i$  : Gauge couplings.

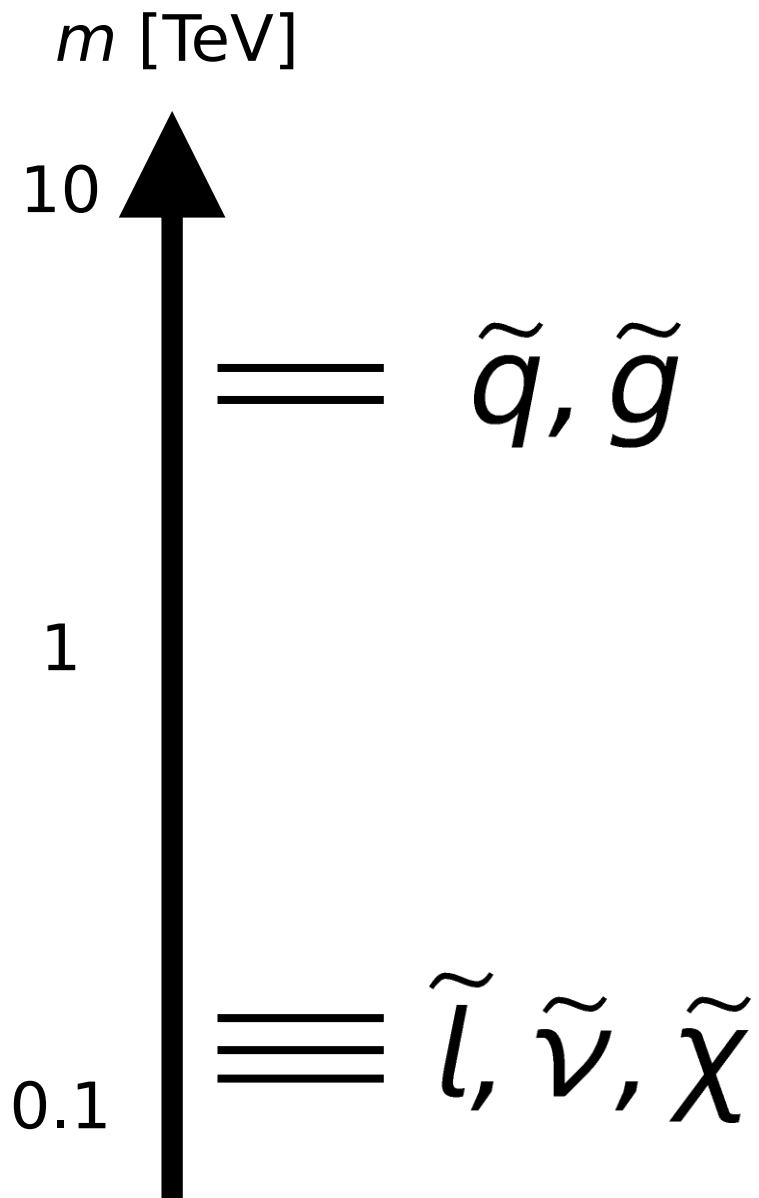
LHC  $\longrightarrow$  SUSY  $> \mathcal{O}(1)$  TeV

$m_h = 126$  GeV       $\tilde{q}, \tilde{g}$  探索  
 $\Rightarrow \tilde{t} = \mathcal{O}(1-10)$  TeV       $\Rightarrow \tilde{q}, \tilde{g} > 1-2$  TeV

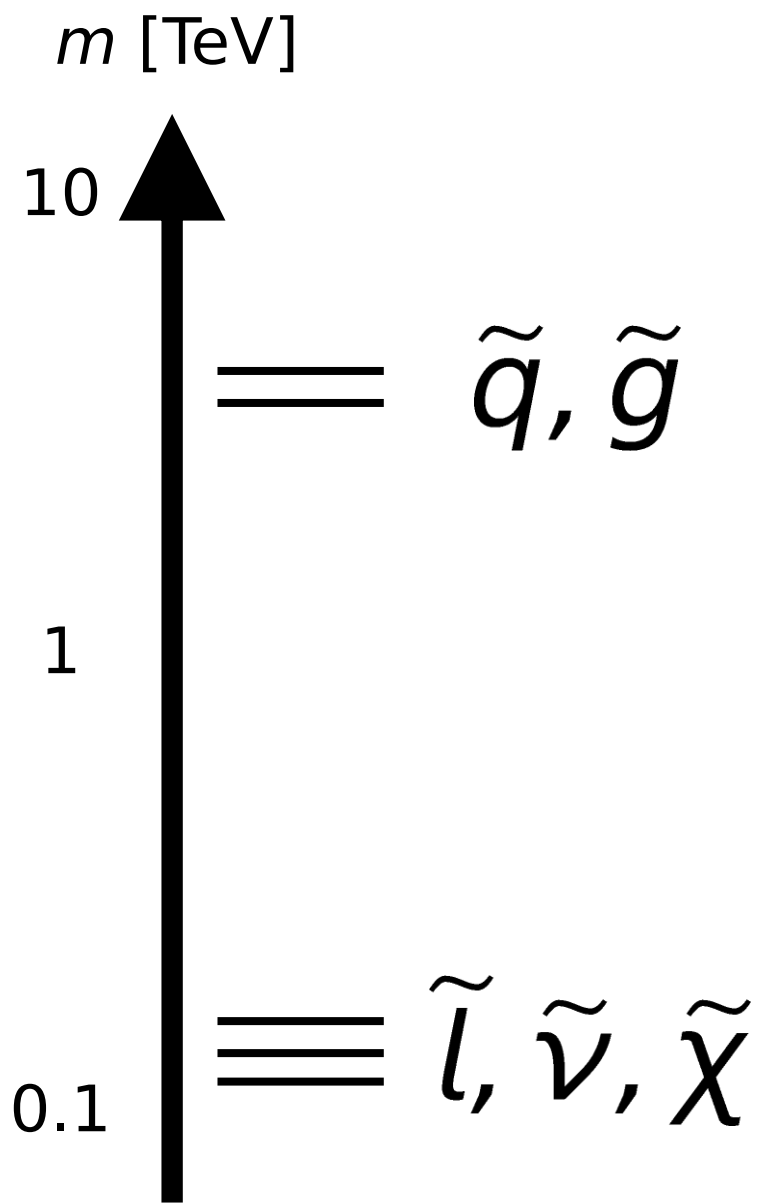
$(g-2)_\mu$

$\longrightarrow (\tilde{l}, \tilde{\nu}, \tilde{\chi}^0, \tilde{\chi}^+)$

$= \mathcal{O}(100)$  GeV



解



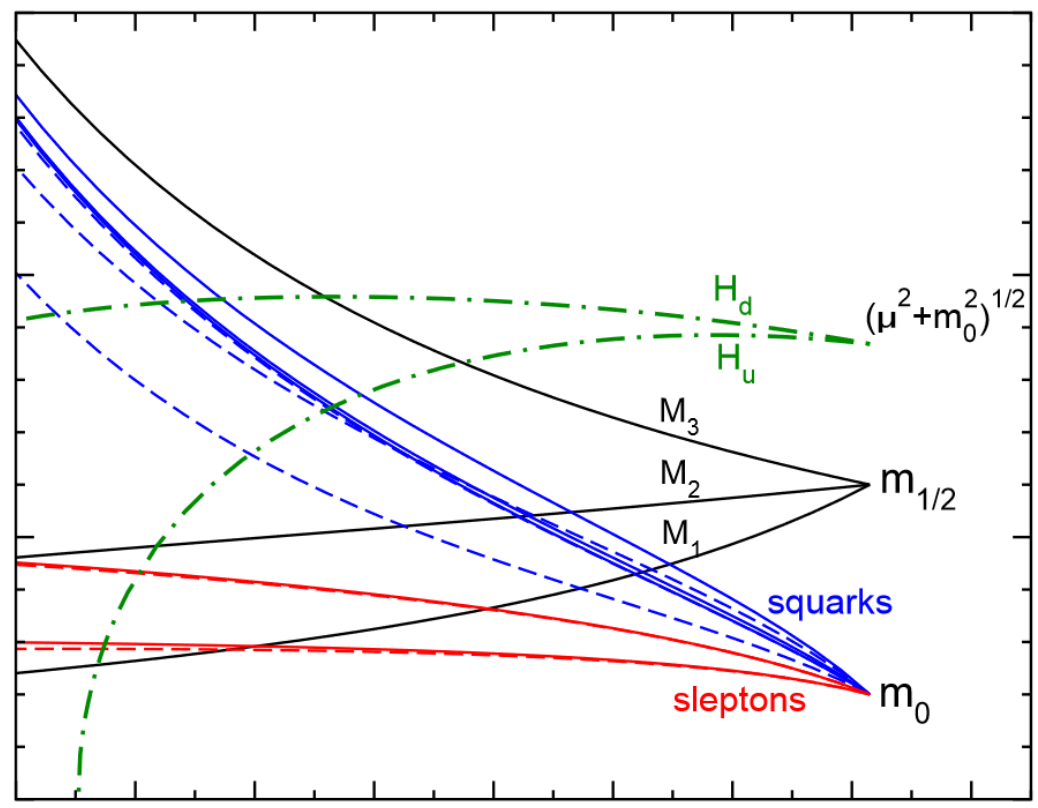
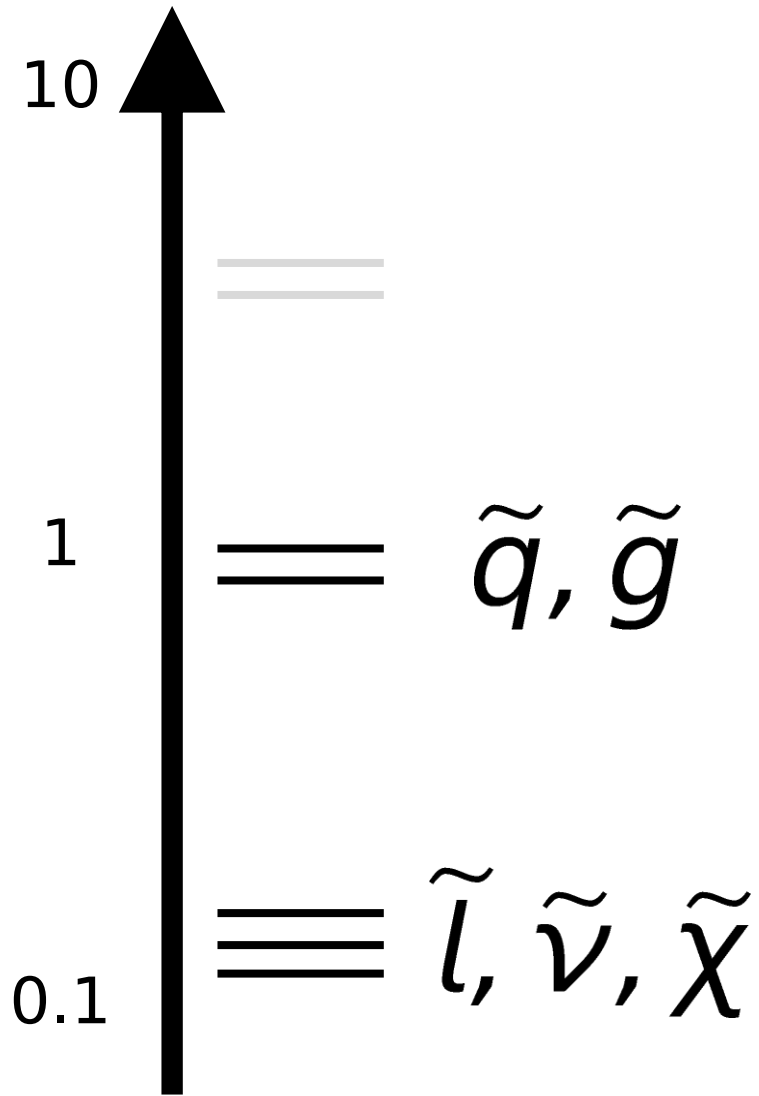
よくある質問：  
~~SUSY~~ 模型はあるの？

解答



◎ 単純なモデルでは困難 (~~CMSSM~~, ~~mGMSB~~)

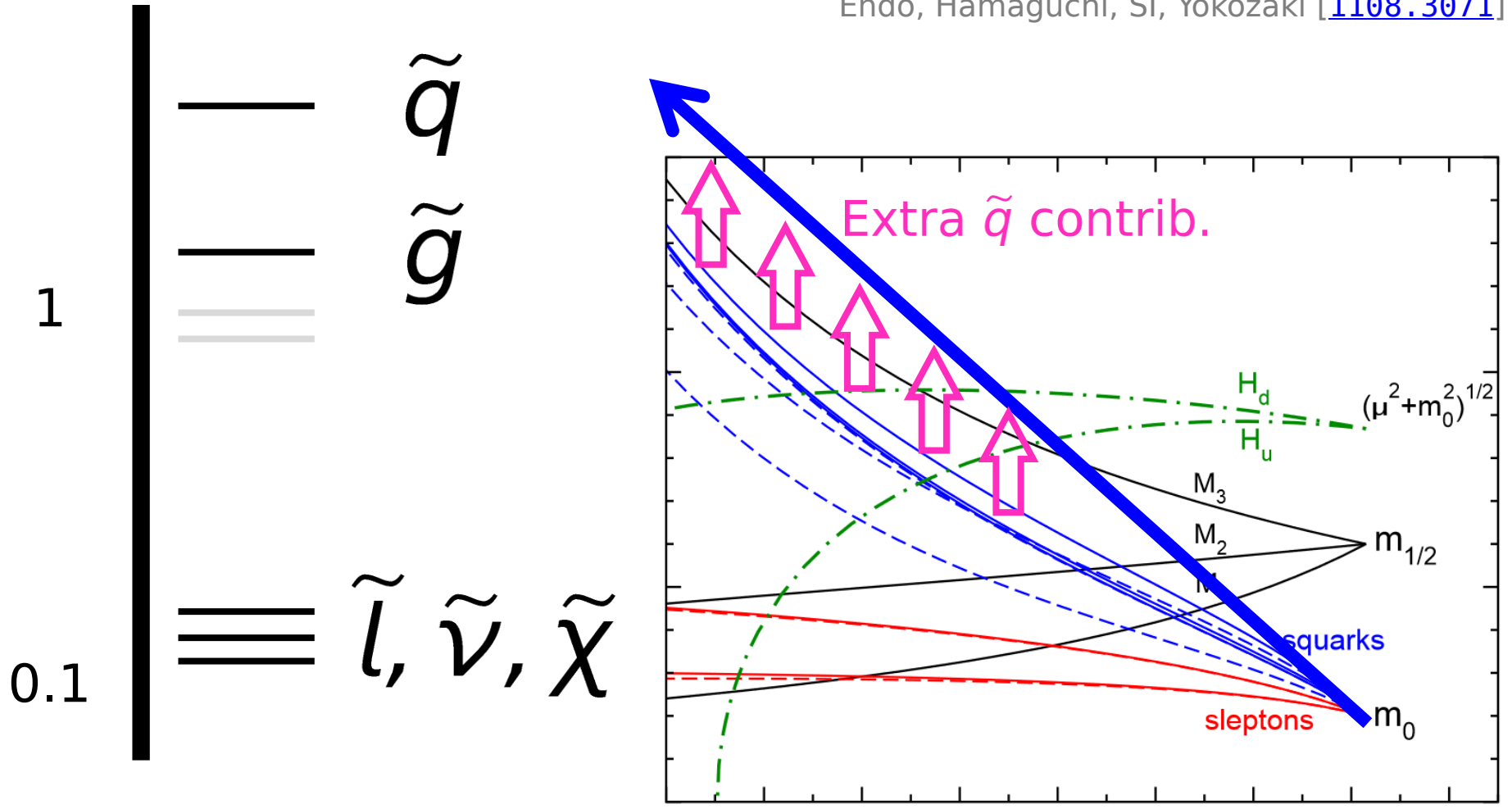
[constrained MSSM]  
[minimal gauge-mediated SUSY breaking]



◎ 単純なモデルでは困難 (~~CMSSM~~, ~~mGMSB~~)

◎ GMSB + Extra Quarks (4<sup>th</sup> gen., vector-like)

Endo, Hamaguchi, Si, Yokozaki [[1108.3071](#)]



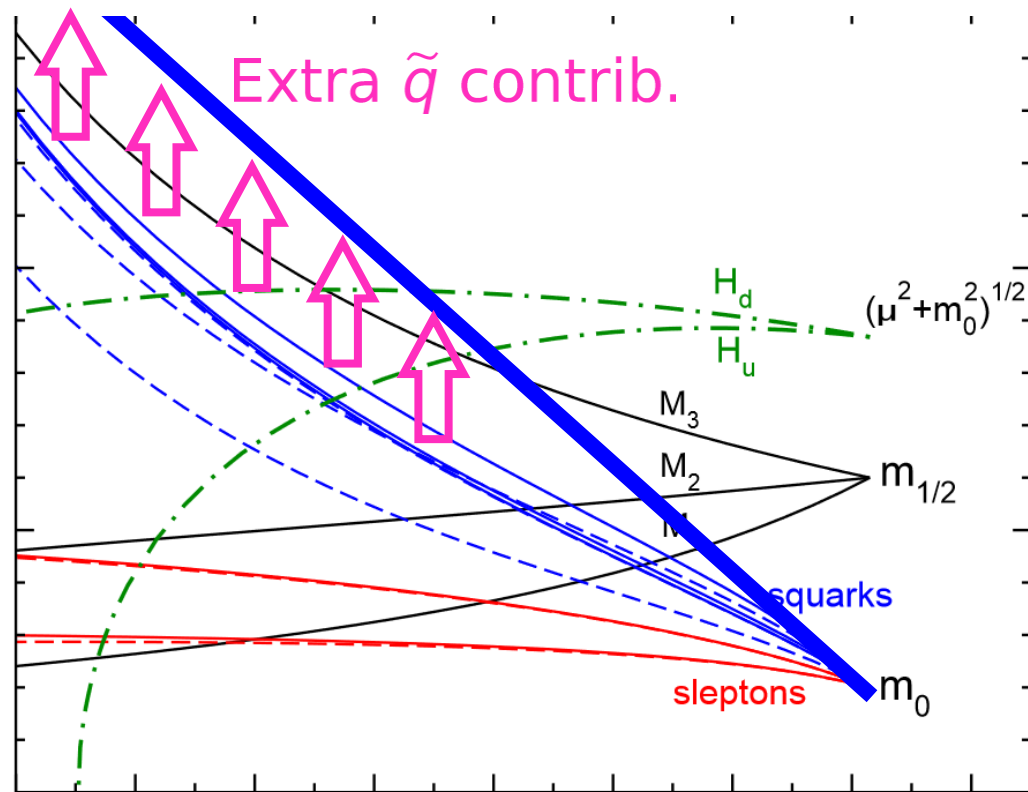
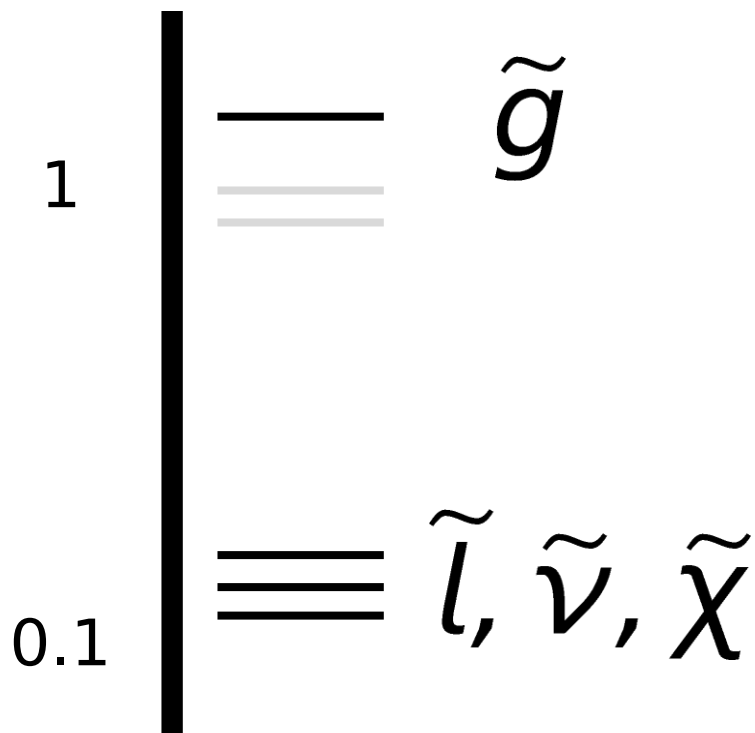
◎ 単純なモデルでは困難 (~~CMSSM~~, ~~mGMSB~~)

◎ GMSB + Extra Quarks (4<sup>th</sup> gen., vector-like)

➤  $\tilde{g}$  探索で厳しめ。

Endo, Hamaguchi, SI, Yokozaki [[1108.3071](#)]

Endo, Hamaguchi, Ishikawa, SI, Yokozaki [[1212.3935](#)]



◎ 単純なモデルでは困難 (~~CMSSM~~, ~~mGMSB~~)

◎ GMSB + Extra Quarks (4<sup>th</sup> gen., vector-like)

➤  $\tilde{g}$  探索で厳しめ。

◎ NUGM [Non-universal gaugino mass]

➤ CMSSM で

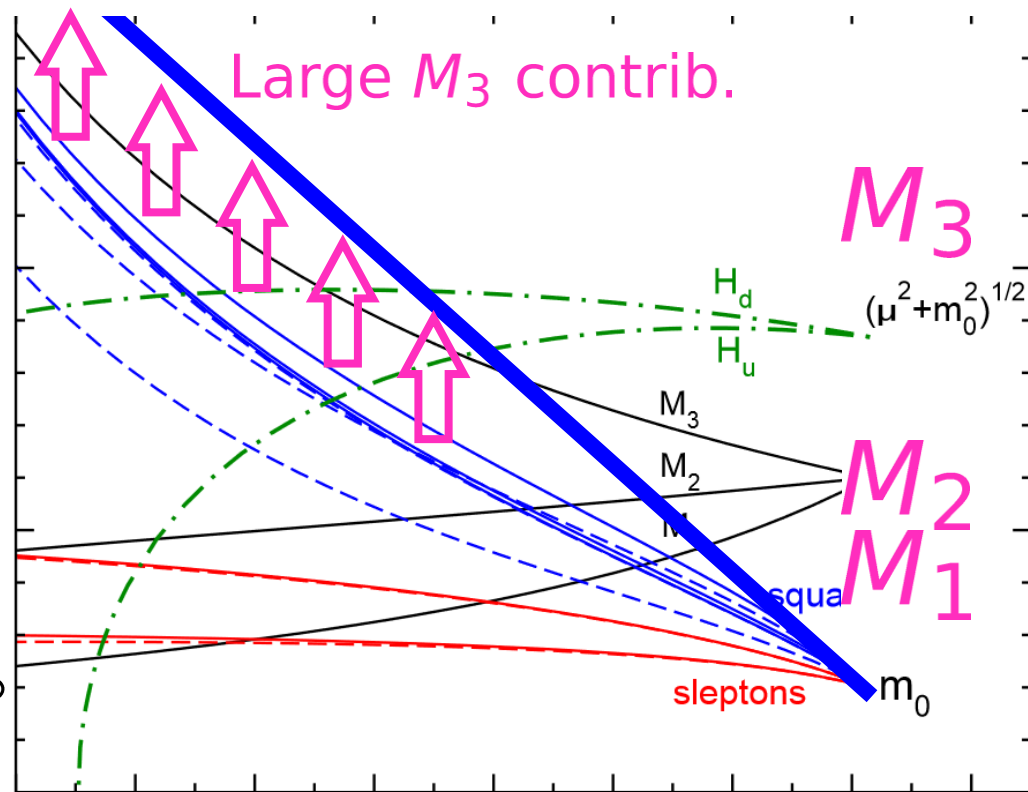
$M_i$  をバラす模型。

$(m_0, A_0, \text{sgn } \mu, \tan \beta,$   
 $M_1, M_2, M_3)$

➤ 実現可能。

Ghilenca, Lee, Park [[1203.0569](#)]

➤ Flavor & CP 問題。



◎ 単純なモデルでは困難 (~~CMSSM~~, ~~mGMSB~~)

◎ GMSB + Extra Quarks (4<sup>th</sup> gen., vector-like)

➤  $\tilde{g}$  探索で厳しめ。

◎ NUGM [Non-universal gaugino mass]

➤ CMSSM で

parameter set

rib.

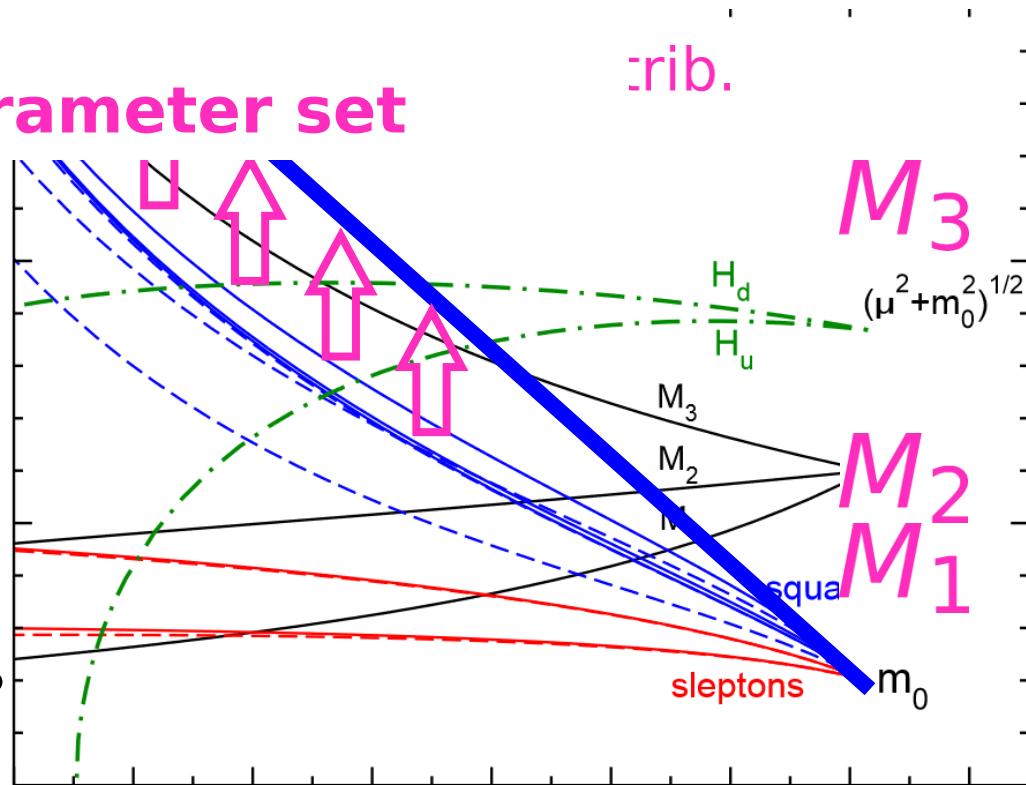
$M_i$  をバラす ~~模型~~。

$(m_0, A_0, \text{sgn } \mu, \tan \beta,$   
 $M_1, M_2, M_3)$

➤ 実現可能。

Ghilenca, Lee, Park [[1203.0569](#)]

➤ Flavor & CP 問題。



## ◎ CP 問題 ?

- MSSM: Many complex parameters ( $A_{u,d,e}, M_{1,2,3}, \mu, B$ )
- Phase の不一致  $\rightarrow$  CP-violation

ACME collab. [[1310.7534](#)]

$$\text{EDM} \propto \text{Im} \left[ \text{Diagram} \right] < 8.7 \times 10^{-29} \text{ e cm (electron)}$$

[electric dipole moment]

$\rightarrow$  質量  $O(100)\text{GeV}$  なら  $\Delta\theta \lesssim 10^{-3} - 10^{-4}$

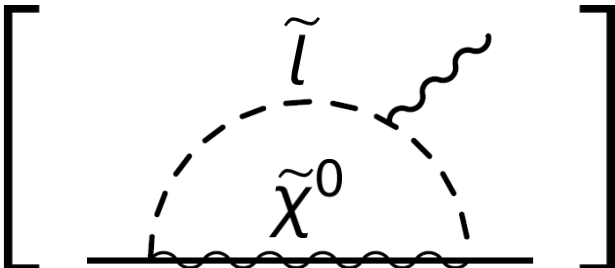
## ◎ CP 問題 ?

- MSSM: Many complex parameters ( $A_{u,d,e}, M_{1,2,3}, \mu, B$ )
- Phase の不一致 → CP-violation

ACME collab. [[1310.7534](#)]

$$\text{EDM} \propto \text{Im} \left[ \text{Diagram} \right] < 8.7 \times 10^{-29} \text{ e cm (electron)}$$

[electric dipole moment]



→ 質量  $O(100)\text{GeV}$  なら  $\Delta\theta \lesssim 10^{-3} - 10^{-4}$

fine-tune

$$g - 2 \propto \text{Re} \left[ \text{Diagram} \right]$$


→ 質量  $O(100)\text{GeV}$  !

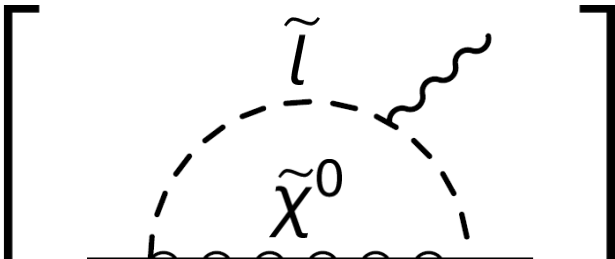
## ◎ CP 問題 ?

- MSSM: Many complex parameters ( $A_{u,d,e}, M_{1,2,3}, \mu, B$ )
- Phase の不一致 → CP-violation
- **O(100)GeV SUSY では不可避の問題。**

ACME collab. [[1310.7534](#)]

$$\text{EDM} \propto \text{Im} \left[ \text{diagram} \right] < 8.7 \times 10^{-29} \text{e cm (electron)}$$

[electric dipole moment]



→質量 O(100)GeV なら  $\Delta\theta \lesssim 10^{-3} - 10^{-4}$

**fine-tune**

$$g - 2 \propto \text{Re} \left[ \text{diagram} \right]$$


→質量 O(100)GeV !



## ◎ CP 問題 ?

- MSSM: Many complex parameters ( $A_{u,d,e}, M_{1,2,3}, \mu, B$ )
- Phase の不一致 → CP-violation
- $O(100)\text{GeV SUSY}$  では不可避の問題。

→ 解きました。

## CP-safe gravity mediation

- ✓ SUSY CP 問題を かなり 解いた。
  - ✓ NUGM-like scenario が実現可能。
- $O(100)\text{GeV SUSY}$  の理論的裏付け。  
(応用例 :  $(g-2)_\mu$  anomaly)

- ◎ Scalar mass  $(m_0^2)_{ij}$  の部分は  
解いていない。  
→ Flavor 問題との関連。  
同時に解決する必要アリ。  
(OR:  $m_0^2 = 0$  の可能性)

parameters ( $A_{u,d,e}, M_{1,2,3}, \mu, B$ )

問題。

→ 解きました。

## CP-safe gravity mediation

- ✓ SUSY CP 問題をかなり解いた。
- ✓ NUGM-like scenario が実現可能。  
→  $O(100)\text{GeV}$  SUSY の理論的裏付け。  
(応用例:  $(g-2)_\mu$  anomaly)

- 1. Introduction**
- 2. なぜ CP は破れるのか**
- 3. CP-safe Gravity Mediation**
- 4.  $g-2$  への応用と 14TeV LHC**

Reference)

S.I., Tsutomu T. Yanagida, Norimi Yokozaki [[1407.4226](#)].

1. Introduction
2. なぜ CP は破れるのか
3. CP-safe Gravity Mediation
4.  $g-2$  への応用と 14TeV LHC

Reference)

S.I., Tsutomu T. Yanagida, Norimi Yokozaki [[1407.4226](#)].

$$\mathcal{L} = \int d^2\theta d^2\bar{\theta} K(\Phi, \bar{\Phi}) + \left( \int d^2\theta W(\Phi) + \text{h.c.} \right) + \dots$$

◎ 例) Polonyi model

SUSY を破る superfield

$$K = |Z|^2 + |Q_a|^2$$

MSSM の superfields

$$W = \mu_Z^2 Z + C + W_{\text{vis}}$$

定数項

Hidden sector

Visible sector (つまり MSSM)

(ここで  $\langle Z \rangle \neq 0$  となって SUSY が破れる)

$$\mathcal{L} = \int d^2\theta d^2\bar{\theta} K(\Phi, \bar{\Phi}) + \left( \int d^2\theta W(\Phi) + \text{h.c.} \right) + \dots$$

◎ 例) Polonyi model

SUSY を破る superfield

$$K = |Z|^2 + |Q_a|^2$$

$\in \mathbb{R}$

MSSM の superfields

定数項

$$W = \mu_Z^2 Z + C + W_{\text{vis}}$$

$\in \mathbb{C}$

Hidden sector

Visible sector (つまり MSSM)

(ここで  $\langle Z \rangle \neq 0$  となって SUSY が破れる)

$$\mathcal{L} = \int d^2\theta d^2\bar{\theta} K(\Phi, \bar{\Phi}) + \left( \int d^2\theta W(\Phi) + \text{h.c.} \right) + \dots$$

◎ 例) Polonyi model

$$K = |Z|^2 + |Q_a|^2$$

$\in \mathbb{R}$

$$W = \mu_Z^2 Z + C + W_{\text{vis}}$$

$\in \mathbb{C}$

$\in \mathbb{C}$

→ 位相の不一致

$$\langle Z \rangle \neq 0$$

$\in \mathbb{C}$

1. Introduction
2. なぜ CP は破れるのか
3. **CP-safe Gravity Mediation**
4.  $g-2$  への応用と 14TeV LHC

Reference)

S.I., Tsutomu T. Yanagida, Norimi Yokozaki [[1407.4226](#)].



◎ CP-safe gravity mediation :

Shift sym. of  $Z$  & ~~SUSY~~ in  $K$

$$(Z \rightarrow Z + i\mathcal{R}) \quad (\mathcal{R} \in \mathbb{R})$$

Izawa, Kugo, Yanagida [1008.4641]

$$\Rightarrow \langle Z \rangle \in \mathbb{R}$$

$$K = s(Z + Z^*) + |Q_a|^2$$

$s \in \mathbb{R}$  : 複雑な関数

→ SUSY breaking

$$W = \underline{C} + W_{\text{vis}}$$

唯一の complex

◎ CP-safe gravity mediation :

Shift sym. of  $Z$  & ~~SUSY~~ in  $K$

$$(Z \rightarrow Z + i\mathcal{R}) \quad (\mathcal{R} \in \mathbb{R})$$

$$\Rightarrow \langle Z \rangle \in \mathbb{R}$$

$$K = s(Z + Z^*) + |Q_a|^2$$

$s \in \mathbb{R}$  : 複雑な関数

→ SUSY breaking

具体例 :

$$s(x) = -3 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 + c_4 x^4$$

$$\text{with } c_2 = 3c_3^2/8c_4, 768c_4^3 + 64c_1c_3c_4^2 - 3c_3^4 > 0.$$

$$\implies \langle x \rangle = -c_3/4c_4.$$

## Scalar potential $V$ についての条件

$$\langle V \rangle = 0 \quad (\text{vanishing cosmo const}), \quad \left\langle \frac{\partial V}{\partial Z} \right\rangle = 0 \quad (\text{Z-stationary cond.})$$

を解析し,  $M_i, A_0, B/\mu$  を求める。

$$V = e^{K/M_P^2} \left( \frac{s'(x)^2}{M_P^2 s''(x)} - 3 \right) \frac{|W|^2}{M_P^2} + e^{K/M_P^2} \left| \frac{\partial W}{\partial Q_a} + \frac{\partial W}{\partial Q_a} \frac{W}{M_P^2} \right|$$

where  $x = \langle Z + Z^* \rangle$ .

$$\Rightarrow \frac{s'(x)^2}{M_P^2 s''(x)} = 3, \quad \frac{\partial}{\partial x} \frac{s'(x)^2}{s''(x)} = 0.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B_\mu/\mu = 2m_{3/2} e^{-i \arg C} \\ A_0 = 3m_{3/2} e^{-i \arg C} \\ m_0^2 = m_{3/2}^2 \end{array} \right. \quad \text{where } m_{3/2}^2 = |C|^2 e^{s/M_P^2} / M_P^4$$

Gaugino mass term:

$$\mathcal{L} \ni \int d^2\theta \left( \frac{1}{4g_i^2} + \underline{k_i \frac{Z}{M_P}} \right) W^\alpha W_\alpha$$

Shift sym. により禁止。

$k_i \in \mathbb{R}$

(ただし値は未知)

$\langle Z \rangle \neq 0 \Rightarrow$  shift sym. 破れる。

$\Rightarrow$  shift sym. の anomaly により出てくる。

$$\Rightarrow M_i = k_i g_i^2 \frac{\langle F_Z \rangle}{M_P} = -3k_i g_i^2 m_{3/2} \frac{M_P C^*}{s'(x)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B_\mu / \mu = 2m_{3/2} e^{-i \arg C} \\ A_0 = 3m_{3/2} e^{-i \arg C} \\ m_0^2 = m_{3/2}^2 \quad \text{where } m_{3/2}^2 = |C|^2 e^{s/M_P^2} / M_P^4 \end{array} \right.$$

Gaugino mass term:

$$\mathcal{L} \ni \int d^2\theta \left( \frac{1}{4g_i^2} + \underline{k_i \frac{Z}{M_P}} \right) W^\alpha W_\alpha$$

Shift sym. により禁止。

$k_i \in \mathbb{R}$

(ただし値は未知)

$\langle Z \rangle \neq 0 \Rightarrow$  shift sym. 破れる。

$\Rightarrow$  shift sym. の anomaly により出てくる。

$$\Rightarrow M_i = k_i g_i^2 \frac{\langle F_Z \rangle}{M_P} = -3k_i g_i^2 m_{3/2} \frac{M_P C^*}{s'(x)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B_\mu / \mu = 2m_{3/2} e^{-i \arg C} \\ A_0 = 3m_{3/2} e^{-i \arg C} \end{array} \right.$$

(unphysical phase)

$$m_0^2 = m_{3/2}^2 \quad \text{where } m_{3/2}^2 = |C|^2 e^{s/M_P^2} / M_P^4$$

1. Introduction
2. なぜ CP は破れるのか (基礎編)
3. CP-safe Gravity Mediation
4.  $g-2$  への応用と 14TeV LHC

Reference)

S.I., Tsutomu T. Yanagida, Norimi Yokozaki [[1407.4226](#)].

# Parameters: $M_i, \tan \beta, \text{sgn } \mu$

$k_i \in \mathbb{R}$

(ただし値は未知)

→ Parameters

$\langle Z \rangle \neq 0 \Rightarrow$  shift sym. 破れる。

$\Rightarrow$  shift sym. の anomaly により出てくる。

$$\Rightarrow M_i = k_i g_i^2 \frac{\langle F_Z \rangle}{M_P} = -3k_i g_i^2 m_{3/2} \frac{M_P C^*}{s'(x)}$$

$$B_\mu / \mu = 2m_{3/2} e^{-i \arg C}$$

$$A_0 = 3m_{3/2} e^{-i \arg C}$$

$$m_0^2 = m_{3/2}^2 \quad \text{where } m_{3/2}^2 = |C|^2 e^{s/M_P^2} / M_P^4$$

→ EWSB 条件から決まる。

不自由由



◎ CP-safe gravity mediation :

Shift sym. of  $Z$  & ~~SUSY~~ in  $K$

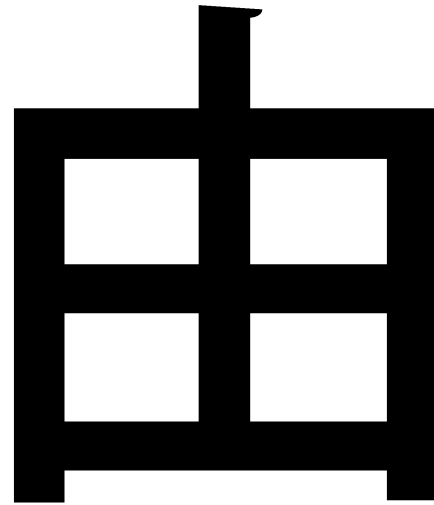
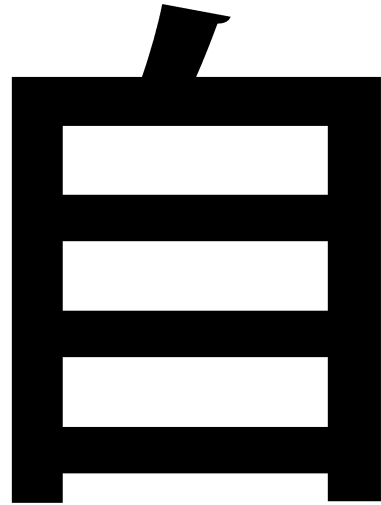
$$\left\{ \begin{array}{l}
 K = s(Z + Z^*) + \cancel{|Q_a|^2} \\
 \quad + \frac{1 + \alpha_1(Z + Z^*) + \alpha_2(Z + Z^*)^2}{r} |Q_a|^2 \\
 \\
 W = C + W_{\text{vis}}
 \end{array} \right.$$

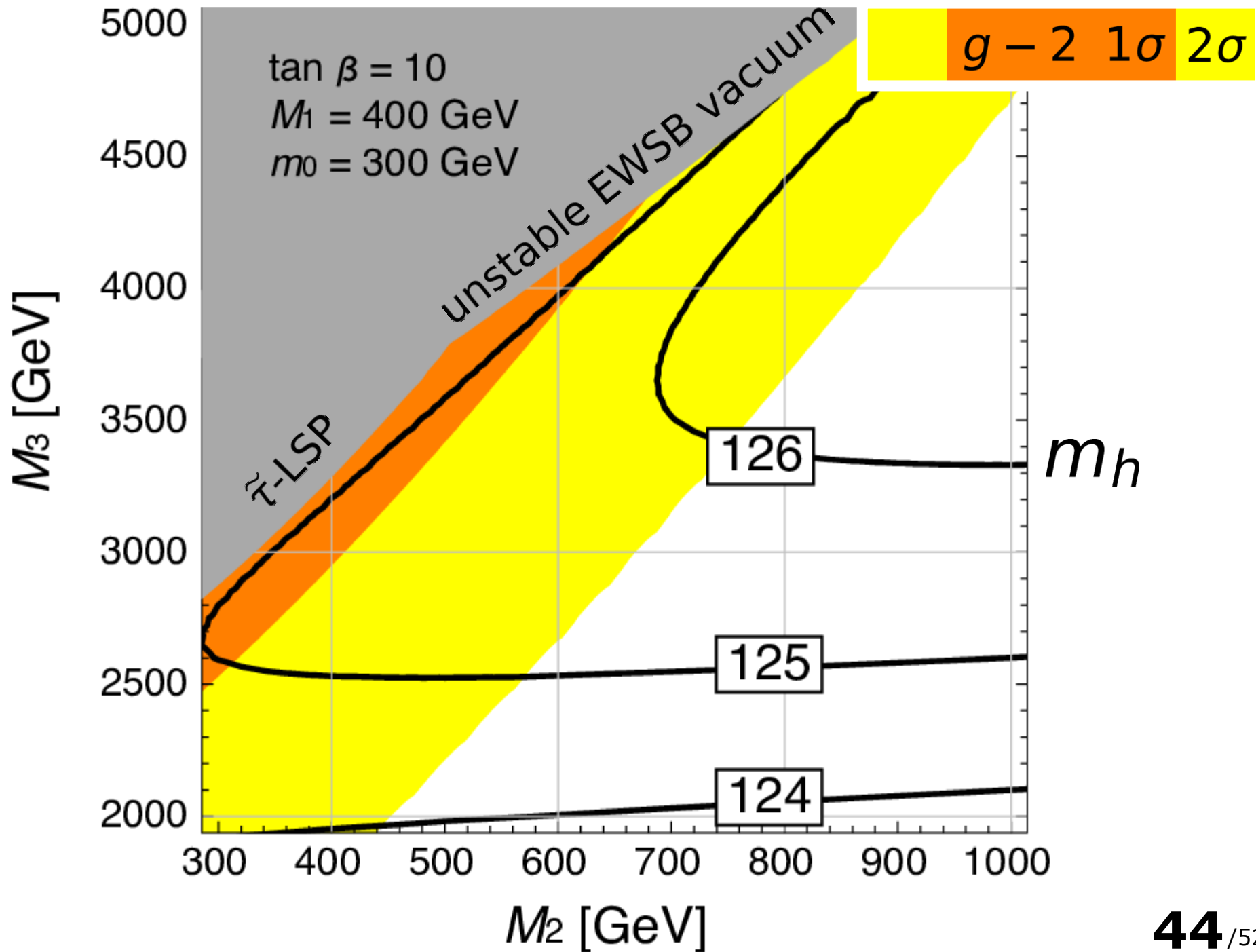
$(r = 1 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2)$   
 ↑ ↑  
 Kähler なのので real。

Parameters:  $M_i, \tan \beta, \text{sgn } \mu$   
 and  $m_0^2$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 K = s(Z + Z^*) + \cancel{|Q_a|^2} \\
 \quad + \frac{1 + \alpha_1(Z + Z^*) + \alpha_2(Z + Z^*)^2}{r} |Q_a|^2 \\
 \\
 W = C + W_{\text{vis}}
 \end{array} \right.$$

$(r = 1 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2)$   
 Kähler なのので real。





Parameters:  $M_i$ ,  $\tan \beta$ ,  $\text{sgn } \mu$  and  $m_0^2$

$$\begin{cases} m_0 = 300 \text{ GeV}, \\ M_1 = 400 \text{ GeV}, \\ M_2 \simeq 500 \text{ GeV}, \end{cases}$$

$$M_3 = 2000\text{--}5000 \text{ GeV}$$

$\Rightarrow$  heavy  $\tilde{g}$

$\mathcal{O}(100) \text{ GeV } \tilde{l}, \tilde{\nu}, \tilde{\chi}^{\pm,0}$

RGE

heavy  $\tilde{q}$

( $\sim 5 \text{ TeV}$ )

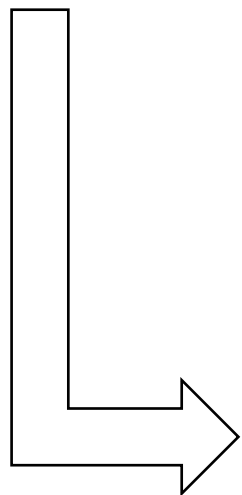
large  $\mu$

$\Rightarrow$  large  $\tilde{l}_L\text{--}\tilde{l}_R$  mix.

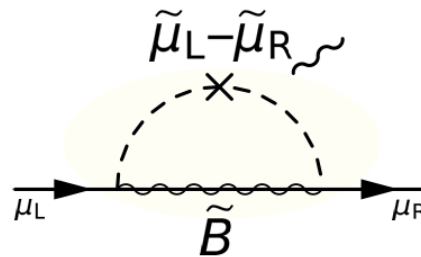
126 GeV  
Higgs

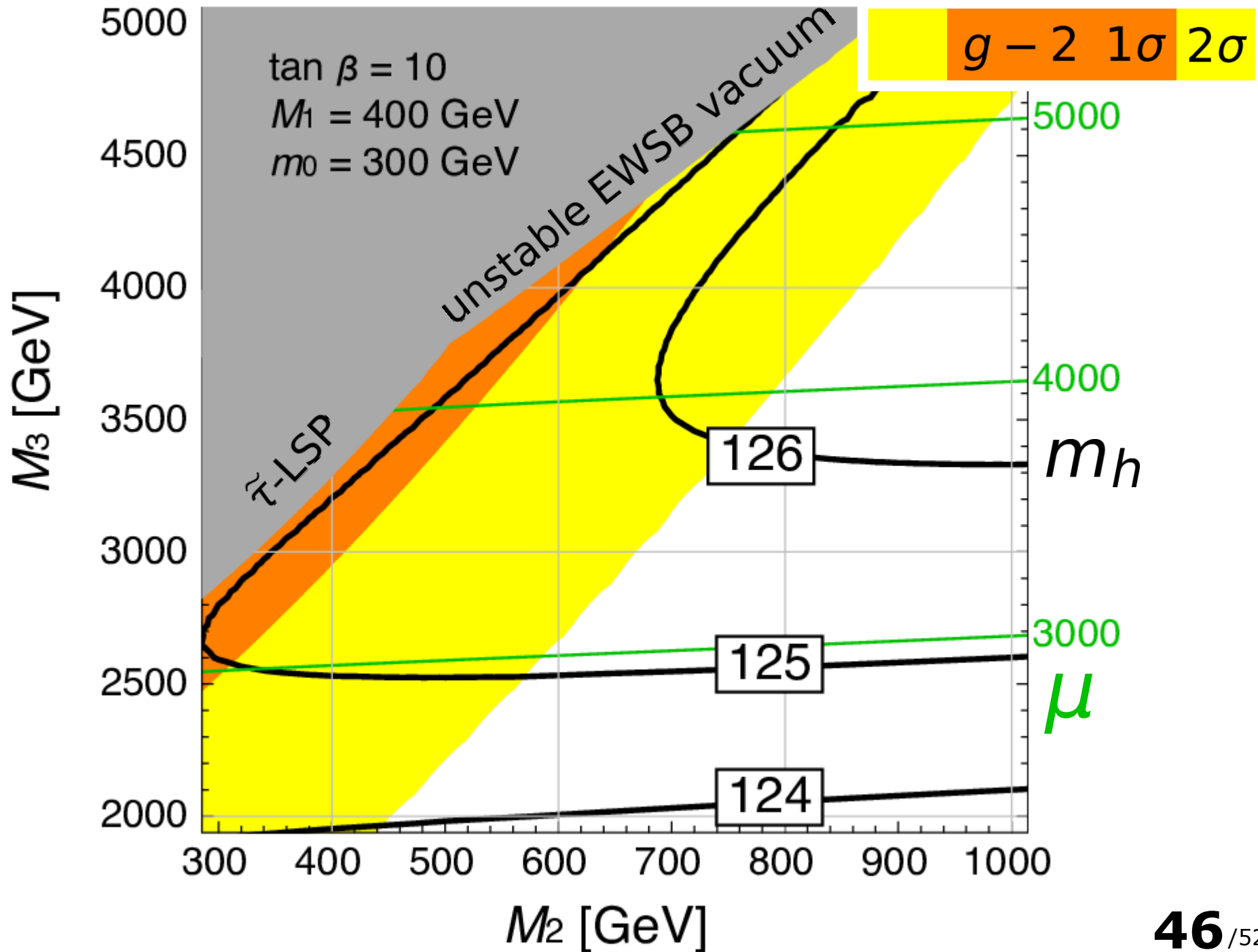
(Note:  $A_0 \lesssim 1 \text{ TeV}$ )

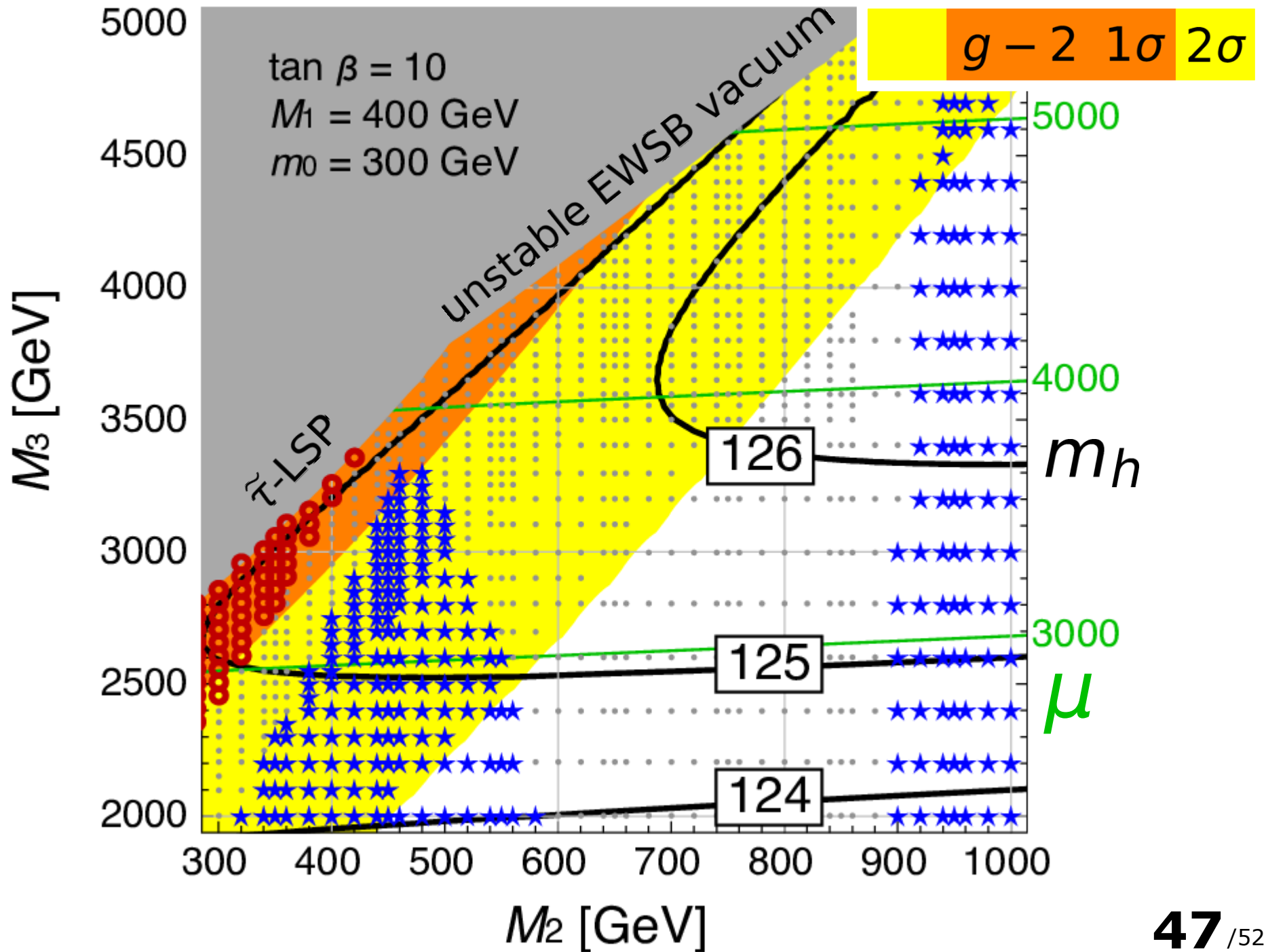
通常の NUGM ではない!

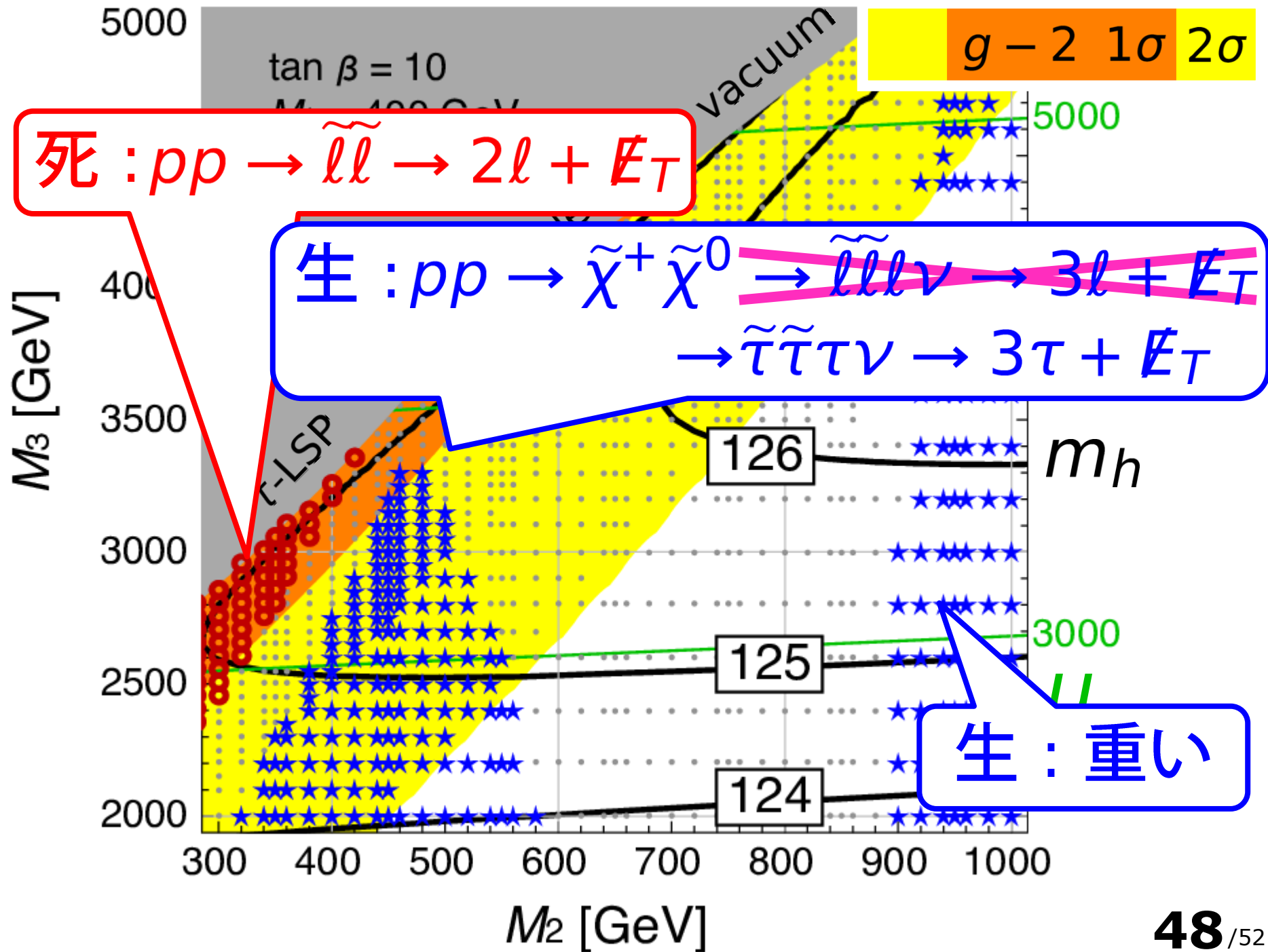


$(g-2)_\mu$

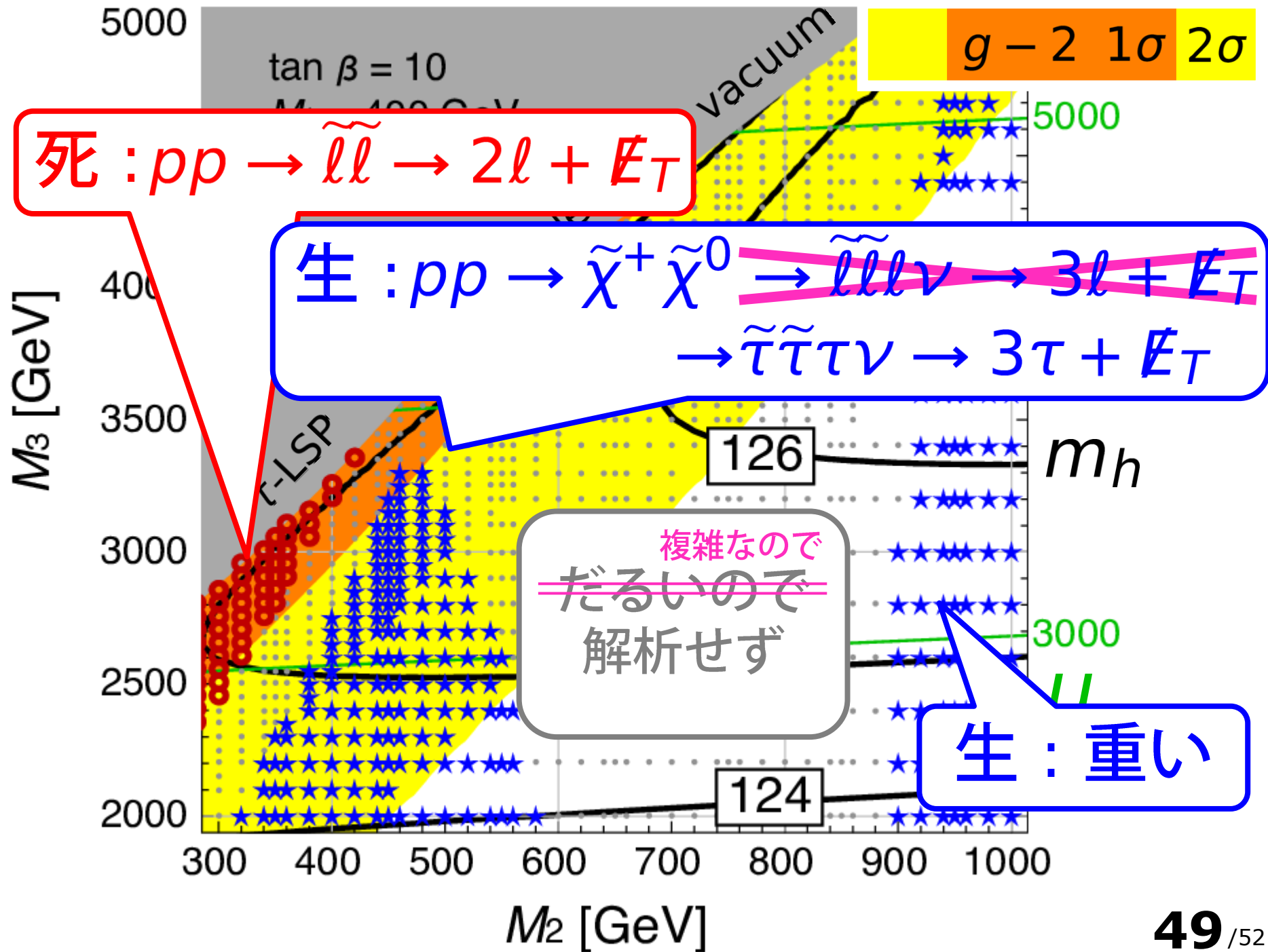










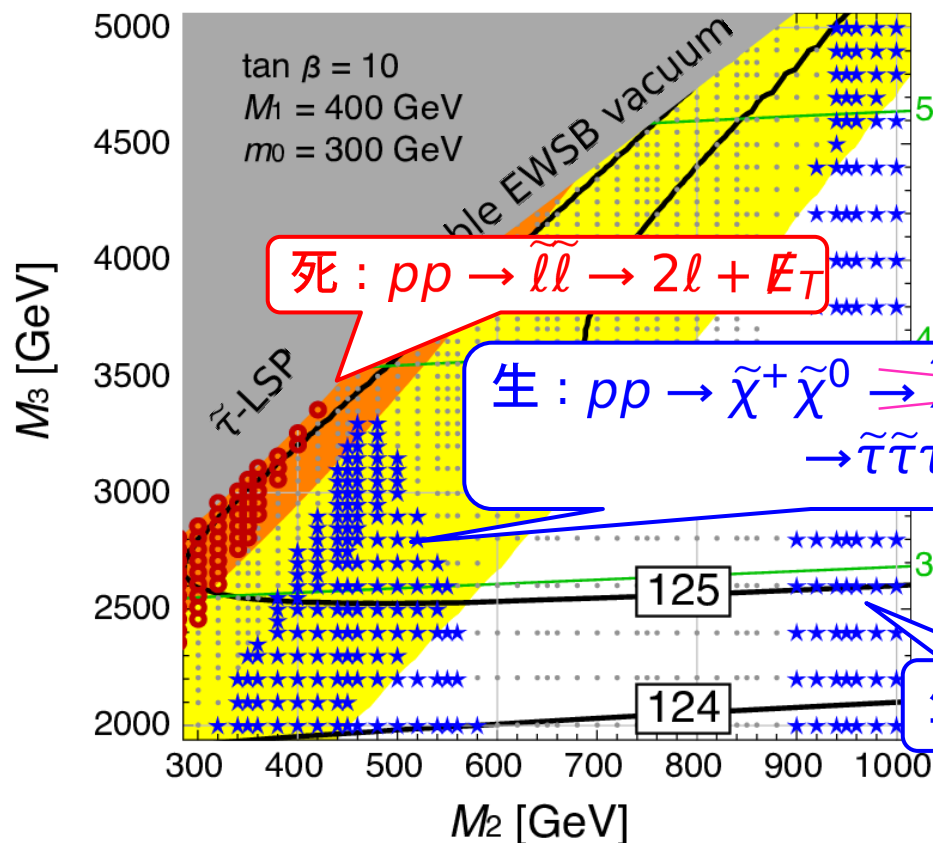


◎  $(g - 2)_\mu$  + Universal  $(\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau})$  mass

➤  $pp \rightarrow \tilde{\ell}\tilde{\ell}$  : 少ないが, 確実。BKG を理解する必要あり。

➤  $pp \rightarrow \tilde{\chi}^+\tilde{\chi}^0$  : 大量。しかし  $\tau$  に行きたがる。

どうやって  $\tau$  を見るか?



Considered constraints

- $2l + E_T$  ATLAS [[1403.5294](#)]
  - $pp \rightarrow \tilde{\ell}_{L/R}\tilde{\ell}_{L/R}$
  - $pp \rightarrow \tilde{\chi}^+\tilde{\chi}^- (WW)$
  - $pp \rightarrow \tilde{\chi}^+\tilde{\chi}^- (0.5\text{-slep med.})$
- $2\tau + E_T$  ATLAS [[1407.0350](#)]
  - $pp \rightarrow \tilde{\tau}_{1,2}\tilde{\tau}_{1,2}$
  - $pp \rightarrow \tilde{\chi}^+\tilde{\chi}^- (WW)$
  - $pp \rightarrow \tilde{\chi}^+\tilde{\chi}^- (0.5\text{-stau med.})$
- $3(l, \tau) + E_T$  ATLAS [[1402.7029](#)]
  - $pp \rightarrow \tilde{\chi}^+\tilde{\chi}^0 (0.5\text{-slep med.})$
- $2l + E_T$  and  $3(l, \tau) + E_T$ 
  - $pp \rightarrow \tilde{\chi}^+\tilde{\chi}^0 (WZ)$
- $4l + E_T$  ATLAS [[1405.5086](#)]
  - $pp \rightarrow \tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_2^0 (0.5\text{-slep med.})$

# 結論三合

$$K = s(Z + Z^*) + |Q_a|^2$$

$$W = C + W_{\text{vis}}$$

◎ CP-safe gravity mediation  
 = Shift sym. of  $Z$  & ~~SUSY~~ in  $K$

◎ SUSY CP 問題をかなり解決。 ( $A_{u,d,e}, M_{1,2,3}, \mu, B$ )

- ⇒
- $\mathcal{O}(100)$  GeV SUSY
  - Non-universal  $M_i$

を安心して考えることができる。

⇒ 例：  $(g - 2)_\mu$  解決可能！

Message

CPV なし & Light EWKino 発見 → きっこのこの模型！