



# 125 GeV, SUSY, その関係

[Sho IWAMOTO](#) (岩本 祥)

The University of Tokyo, JAPAN

19<sup>th</sup> Apr. 2012 @ 新潟大学

20<sup>th</sup> Apr. 2012 @ 富山大学

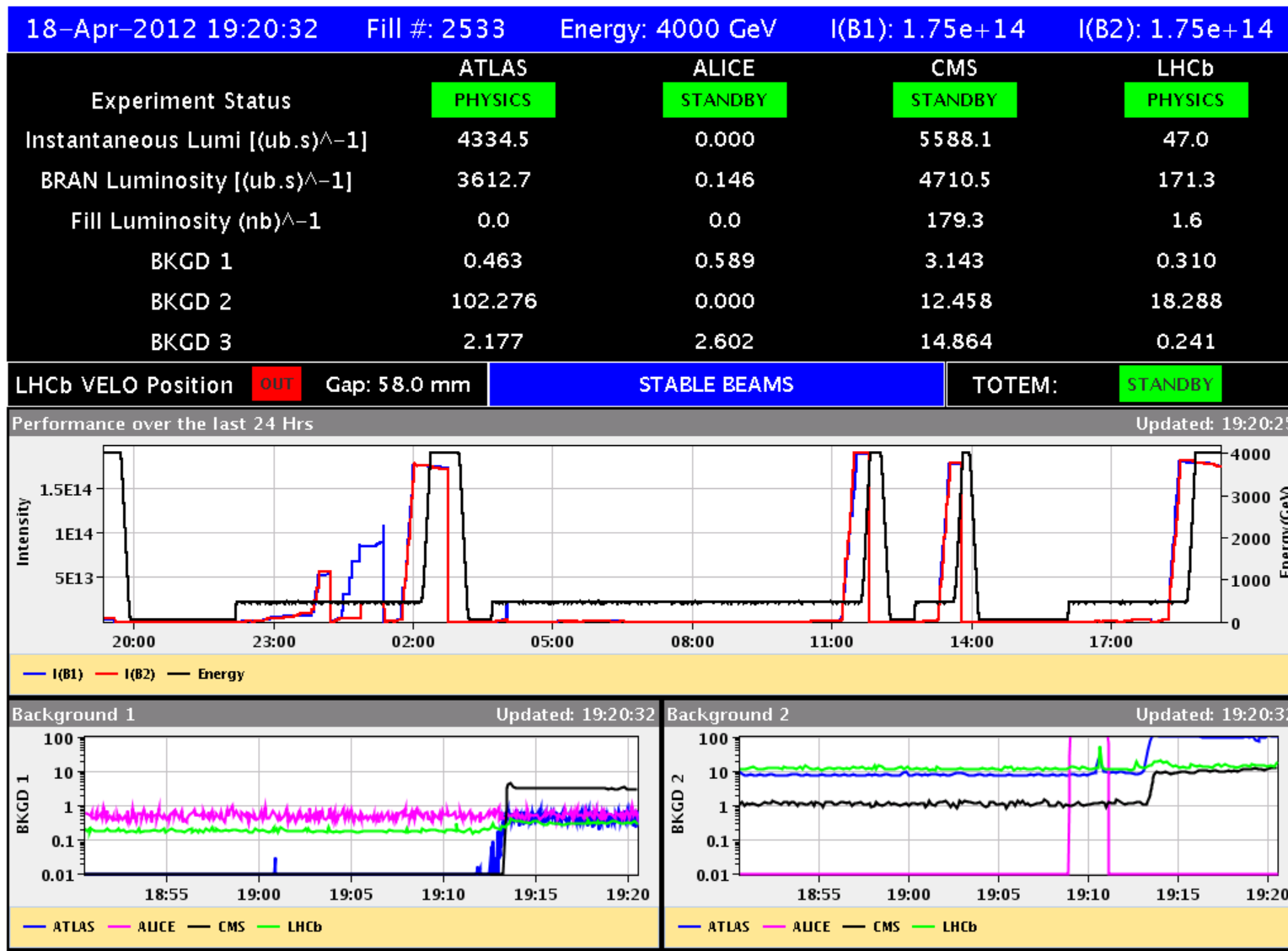
Based on

**M. Endo, K. Hamaguchi, SI, N. Yokozaki**

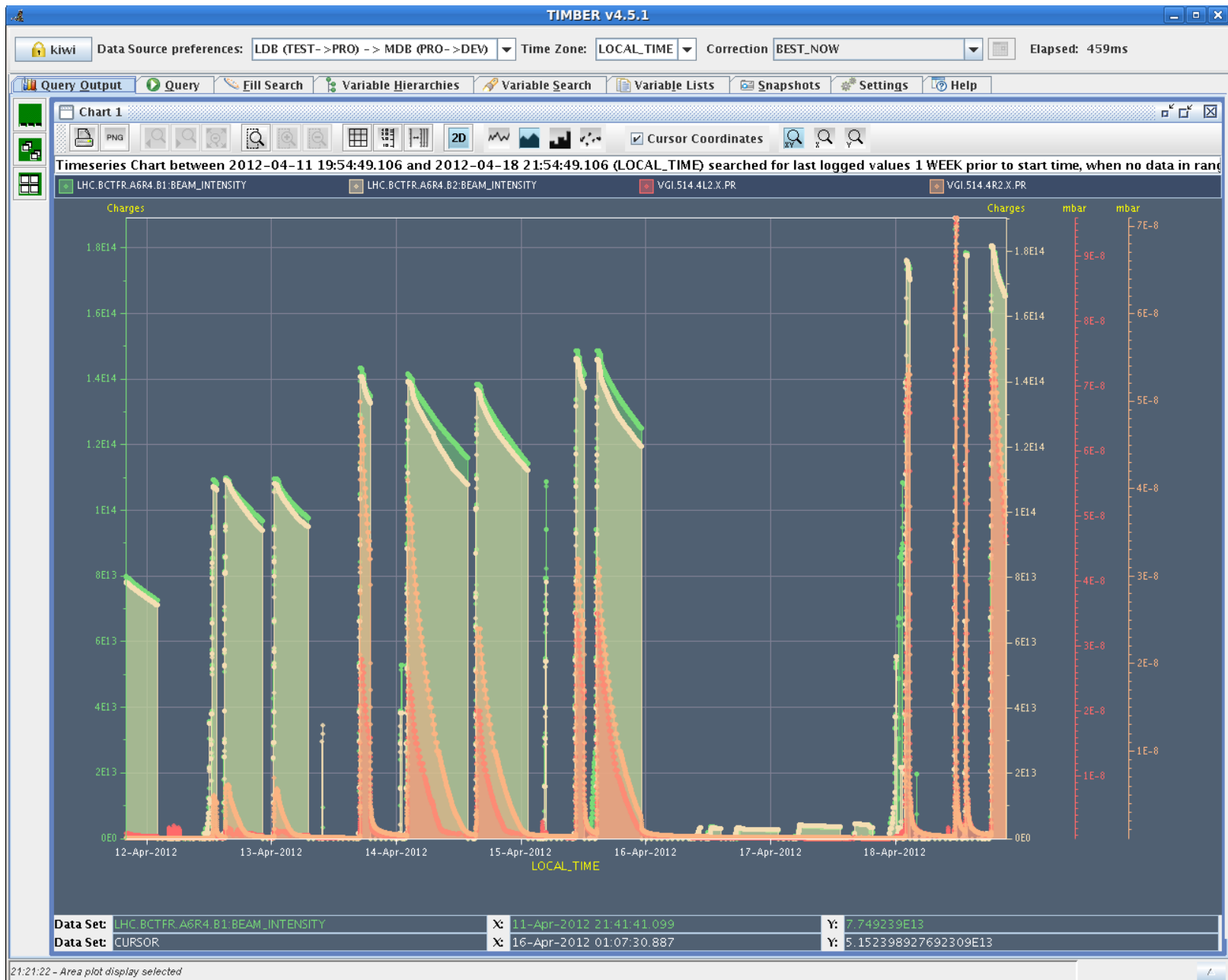
[1112.5653] [1108.3071] [1202.2751]

**M. Endo, K. Hamaguchi, K. Nakayama, SI, N. Yokozaki**

[1112.6412]



# History Last 6 Days (from LHC morning report 19 Apr. 2012)



19-04-2012

LHC morning report

# 125 GeV, SUSY, その関係

Sho IWAMOTO (岩本 祥)

The University of Tokyo, JAPAN

19<sup>th</sup> Apr. 2012 @ 新潟大学

20<sup>th</sup> Apr. 2012 @ 富山大学

Based on

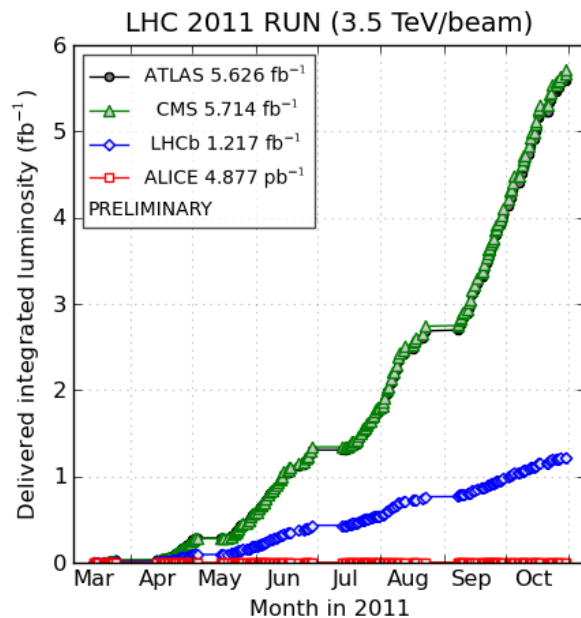
**M. Endo, K. Hamaguchi, SI, N. Yokozaki**

[1112.5653] [1108.3071] [1202.2751]

**M. Endo, K. Hamaguchi, K. Nakayama, SI, N. Yokozaki**

[1112.6412]

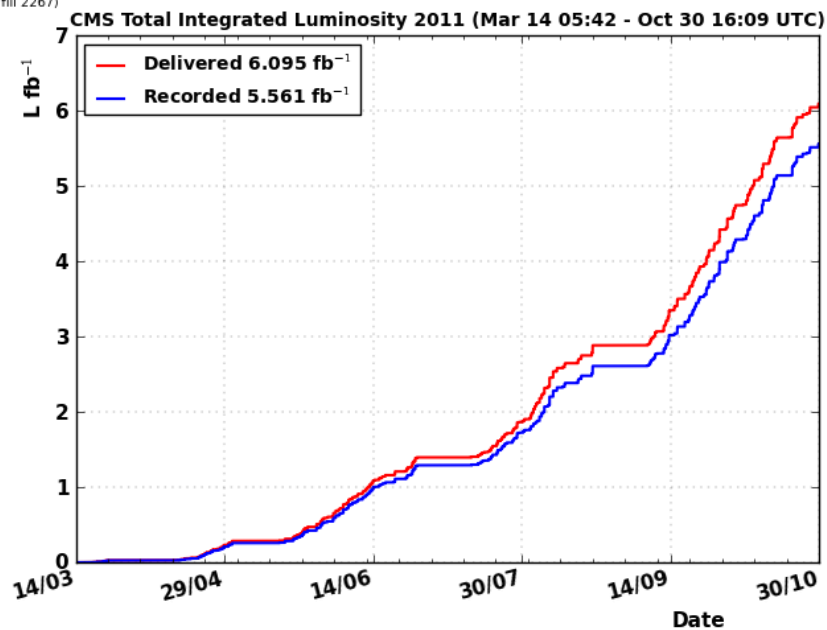
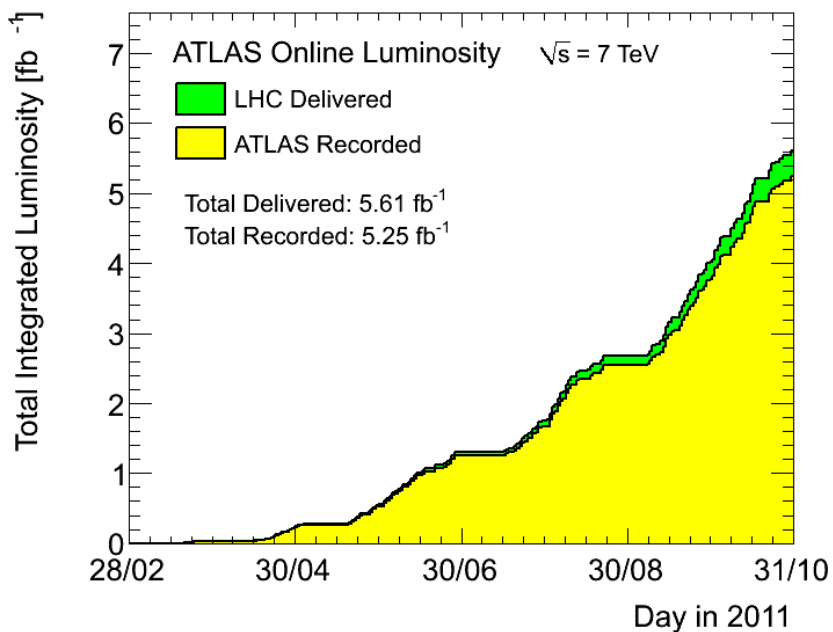
# LHC,



ようやく

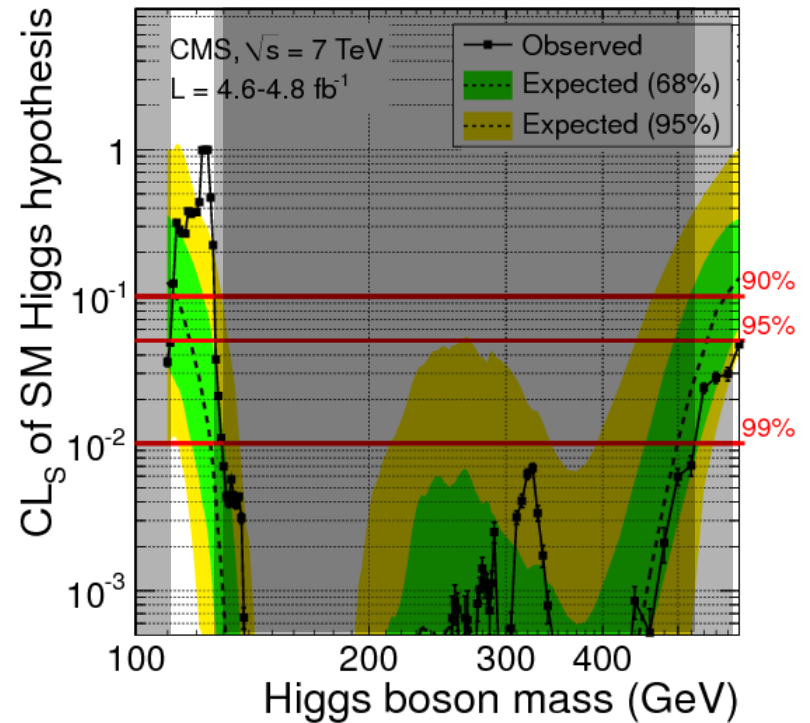
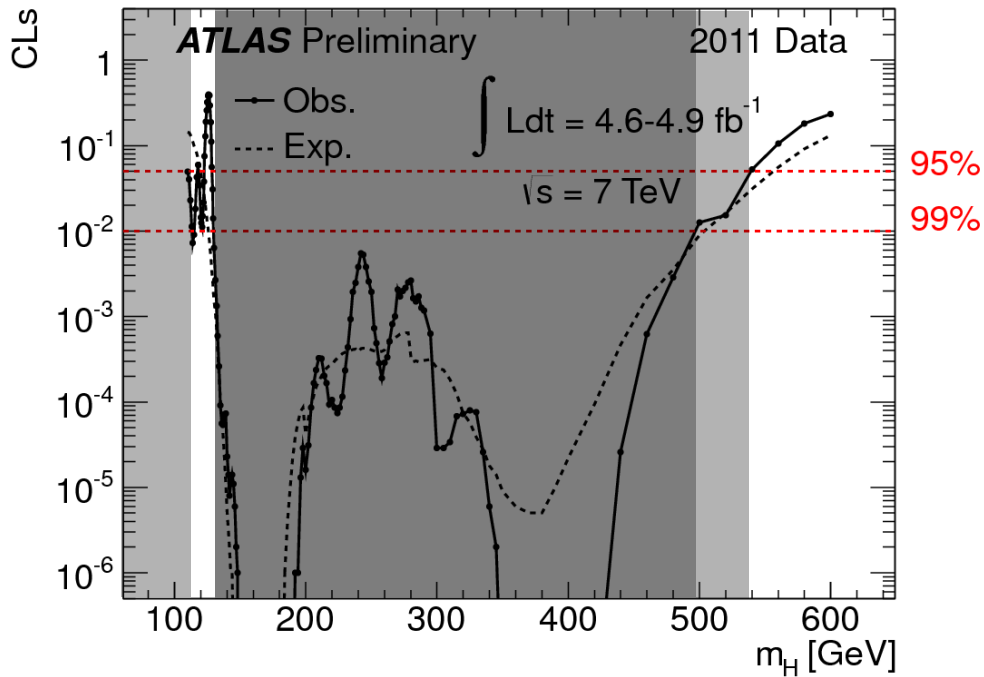
# 本気。

(generated 2011-12-01 19:35 including fill 2267)



# ◎Higgsは130-530 GeVでは無い!!

(95% CL)

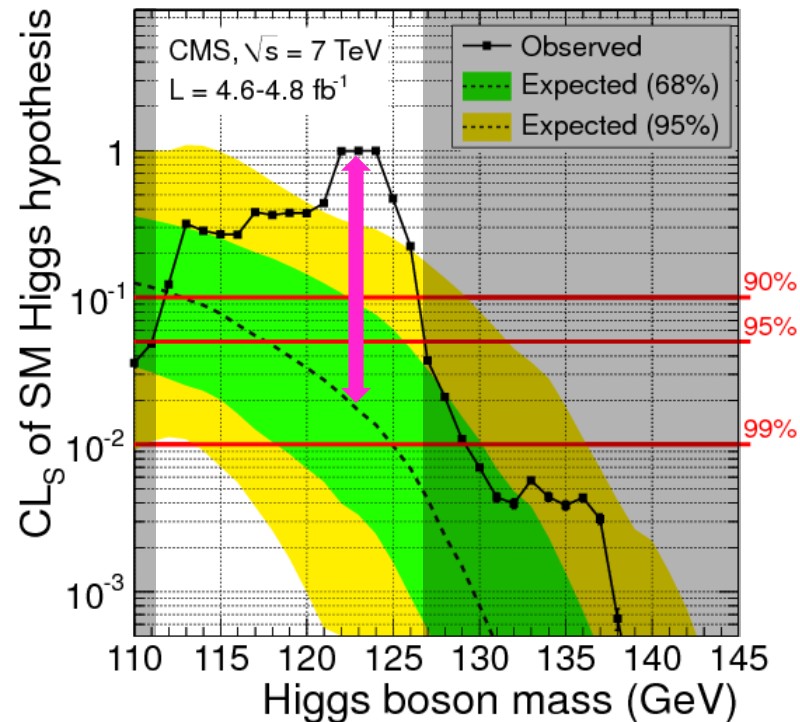
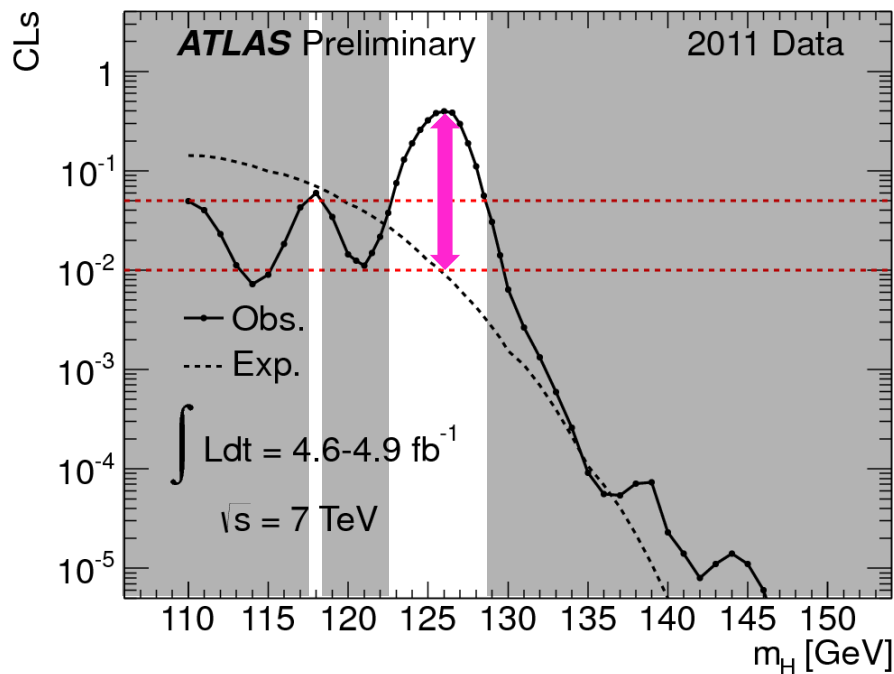


CLs  $\doteq$  “指定した質量に Higgs が有る”という主張の信頼度

More Precisely: (Higgsが有るという条件下でHiggsが有るつぼく見える( $\mu=1$ に見える)確率)  $\doteq$  (Higgsが無いにもかかわらずHiggsが有るつぼく見える確率)

◎ なかなか棄却されない領域。。

➤ 運が悪いだけ？ or 何か原因がある？

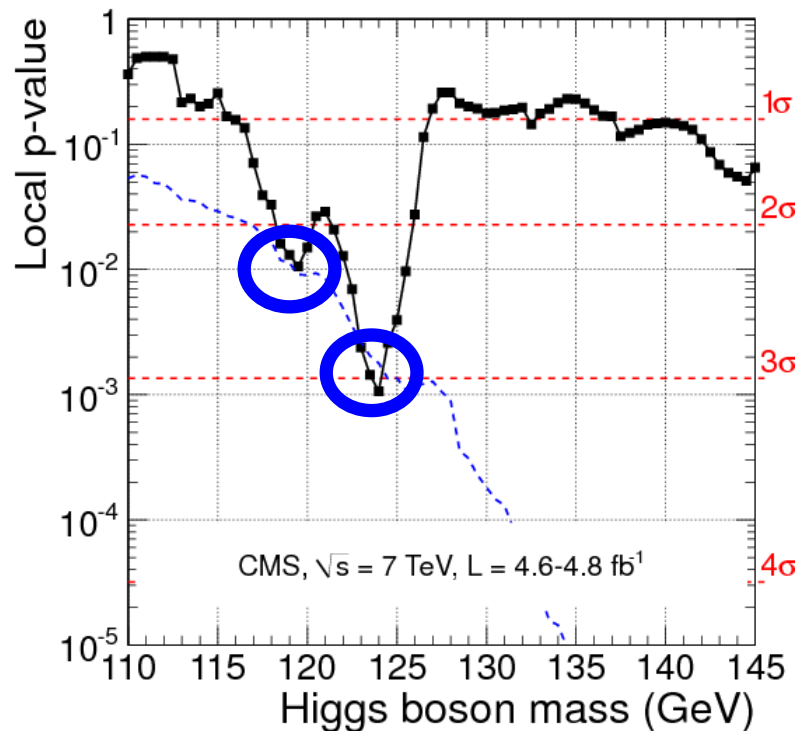
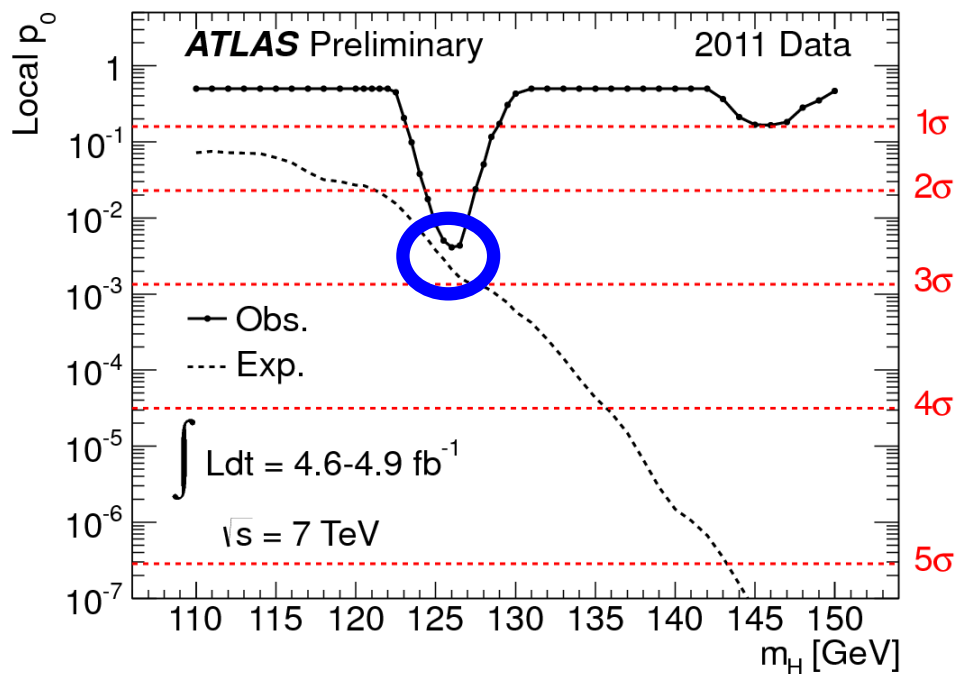


CLs ≡ “指定した質量に Higgs が有る”という主張の信頼度

More Precisely: (Higgsが有るという条件下でHiggsが有るつぼく見える( $\mu=1$ に見える)確率) ÷ (Higgsが無いにもかかわらずHiggsが有るつぼく見える確率)

# ◎棄却されないのは偶然ではない

→ Higgs かも？

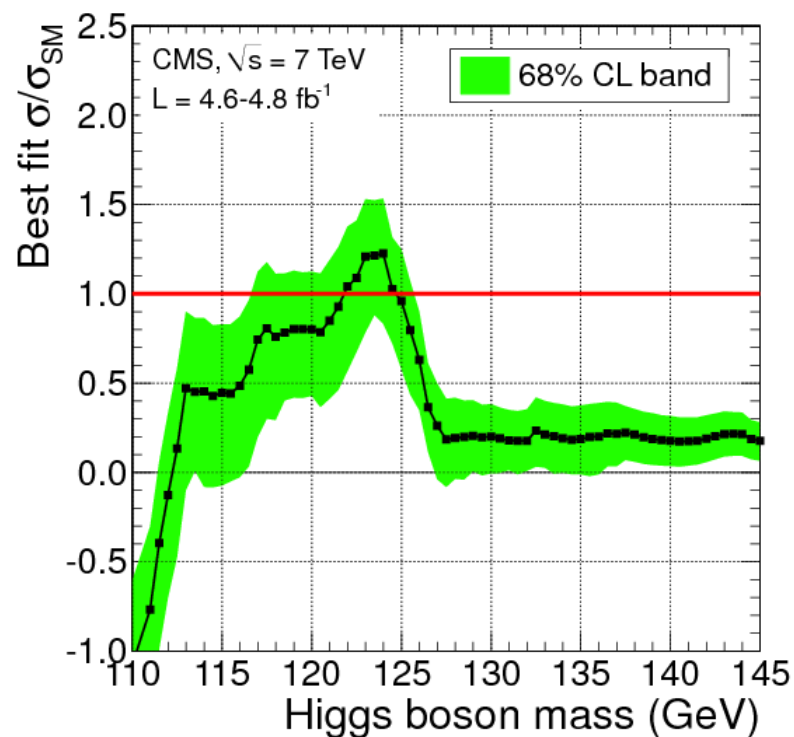
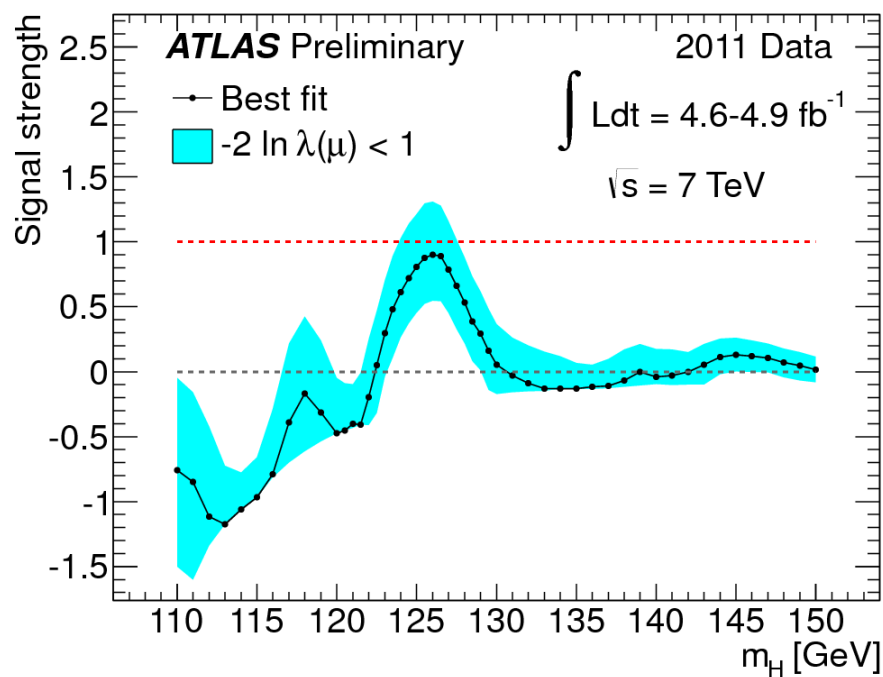


p-value ≡ “棄却できないのは運が悪いだけです”

という主張の信頼度



# ◎しかもこれ, Higgs っぽい。



Signal Strength は, BG only なら 0 , SM Higgs なら 1。

# 1. 125GeV Higgs !

Based on

**M. Endo, K. Hamaguchi, SI, N. Yokozaki**

[1112.5653] [1108.3071] [1202.2751]

**M. Endo, K. Hamaguchi, K. Nakayama, SI, N. Yokozaki**

[1112.6412]

SUSY

Boson

Fermion

$\tilde{q}$



$q$

$\gamma, Z, H_u^0, H_d^0$



$\tilde{\chi}_{1-4}^0$

$\tilde{\mu}, \tilde{\nu}_\mu$



$\mu, \nu_\mu$

超

对称性

## なぜ, 超対称性 (SUSY) ?

- ◎ 大統一理論 & 超弦理論
- ◎ GUTまで摂動的である。
- ◎ Dark matter
- ◎ muon  $g - 2$  anomaly を説明。
- ◎ Naturalness (階層性問題を解消)

Boson		Fermion
$\tilde{q}$	$\leftrightarrow$	$q$
$\gamma, Z, H_u^0, H_d^0$	$\leftrightarrow$	$\tilde{\chi}_{1-4}^0$
$\tilde{\mu}, \tilde{\nu}_\mu$	$\leftrightarrow$	$\mu, \nu_\mu$

超対称性

# TeV-SUSY 教

## 基本教義

TeV-Scale SUSY

こそが真理。

なぜ、超対称性 (SUSY) ?

これら『SUSYの信仰基盤』は  
『TeV-SUSY の信仰基盤』  
とも言えるか？

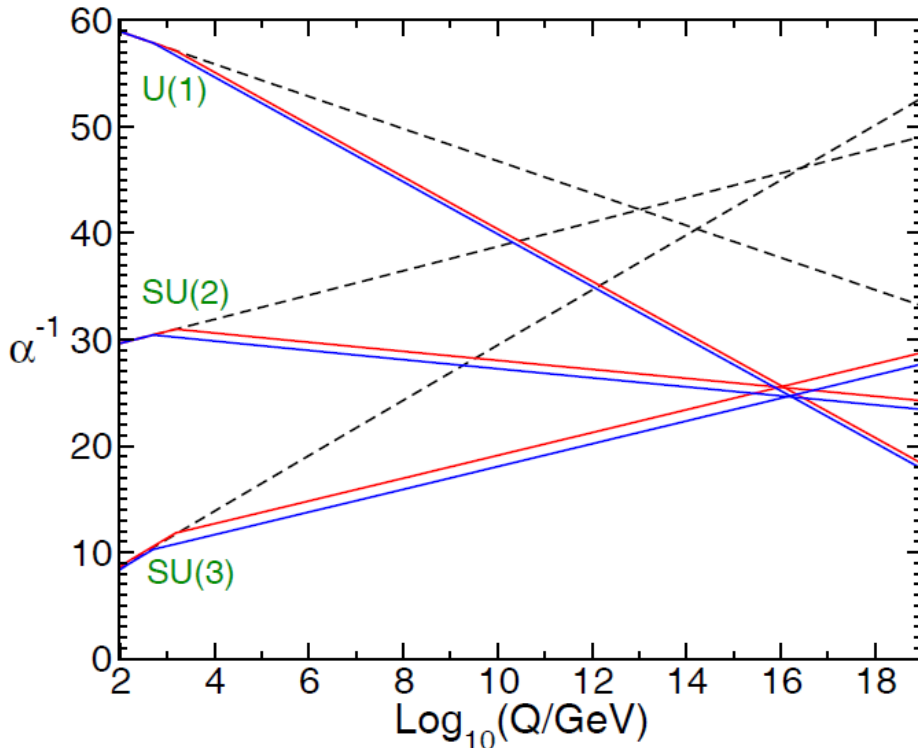
- ◎ 大統一理論 & 超弦理論
- ◎ GUTまで摂動的である。
- ◎ Dark matter
- ◎ muon  $g - 2$  anomaly を説明。
- ◎ Naturalness (階層性問題を解消)

超弦  
対称性

# なぜ、超対称性 (SUSY) ?

- ◎ 大統一理論 & 超弦理論
- ◎ GUTまで摂動的である

SUSY信仰の  
「最後の砦」



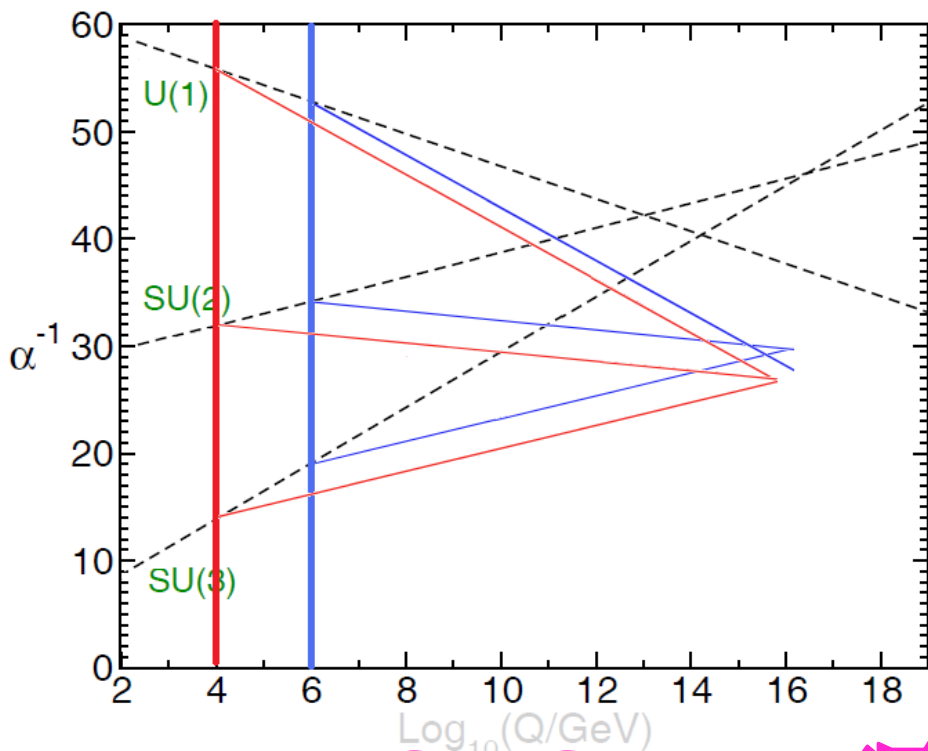
を説明。  
(問題を解消)



# なぜ、超対称性 (SUSY) ?

- ◎ 大統一理論 & 超弦理論
- ◎ GUTまで摂動的である

SUSY信仰の  
「最後の砦」



を説明。  
(問題を解消)

TeV-SUSY の理由にはならない [17]

## なぜ、超対称性 (SUSY) ?

◎大統一理論 & 超弦理論

◎GUTまで摂動的である

◎Dark matter → **やはり TeV の理由にはならない。**

◎muon  $g - 2$  anomaly を説明。

◎Naturalness (階層性問題を解消)

## なぜ, 超対称性 (SUSY) ?

- ◎ 大統一理論 & 超弦理論
- ◎ GUTまで摂動的である
- ◎ Dark matter
- ◎ muon  $g - 2$  anomaly を説明。
- ◎ Naturalness (階層性問題を解消)

## なぜ、超対称性 (SUSY @ TeV Scale ) ?

- ◎ 大統一理論 & 超弦理論
- ◎ GUTまで摂動的である
- ◎ Dark matter

◎ muon  $g - 2$  anomaly を説明。

◎ Naturalness (階層性問題を解消)

『SUSY が TeV scale にある。』

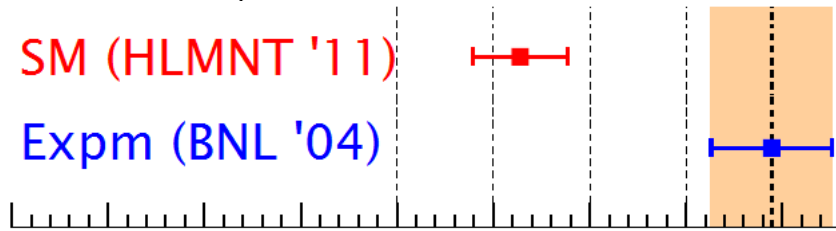
『だから LHC で見える！』

の根拠は

$(g - 2)_\mu$  と naturalness だけだった。

◎  $(g - 2)_\mu$  anomaly

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



SM (HLMNT '11)

Expm (BNL '04)

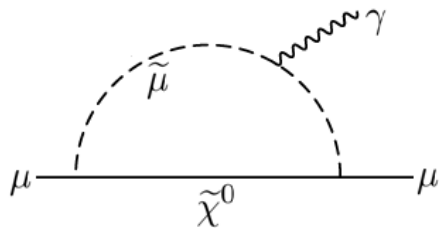
$$a_\mu^{\text{SM}} = (116\,591\,828 \pm 49) \times 10^{-11}$$

$$a_\mu^{\text{exp}} = (116\,592\,089 \pm 63) \times 10^{-11}$$

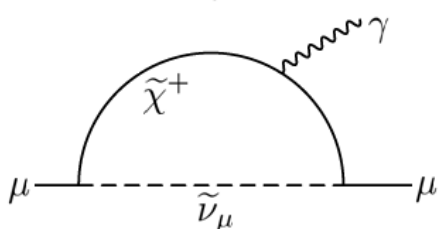
3.3 $\sigma$  discrepancy

Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner [1105.3149]

SUSY can explain this anomaly!



$$\Delta(\tilde{\chi}^0, \tilde{\mu}) \approx \frac{\alpha_Y m_\mu^2}{m_{\text{soft}}^2} \text{sgn}(\mu M_1) \tan \beta + \dots,$$



$$\Delta(\tilde{\chi}^\pm, \tilde{\nu}) \approx \frac{\alpha_w m_\mu^2}{m_{\text{soft}}^2} \text{sgn}(\mu M_2) \tan \beta.$$

◎  $(g - 2)_\mu$  anomaly

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

SM (HLMNT '11)



Expm (BNL '04)



$$a_\mu^{\text{SM}} = (116\,591\,828 \pm 49) \times 10^{-11}$$

$$a_\mu^{\text{exp}} = (116\,592\,089 \pm 63) \times 10^{-11}$$

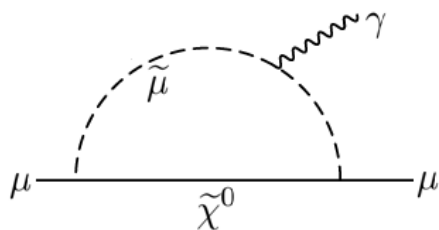
3.3σ discrepancy

Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner [1105.3149]

SUSY can explain

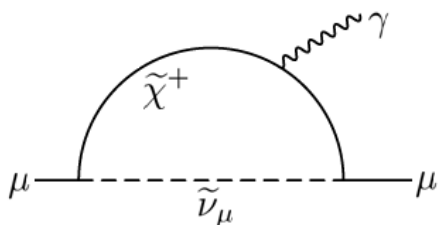
$$\left\{ \begin{array}{l} \tan \beta \sim \text{O}(10) \\ (\tilde{\chi}^0, \tilde{\chi}^\pm, \tilde{\mu}, \tilde{\nu}_\mu) \sim \text{O}(100 \text{ GeV}) \\ \mu > 0 \end{array} \right. \quad \text{で } (g - 2)_\mu \text{ がちょうど合う!}$$

## TeV-SUSYの証拠?



$$\Delta(\tilde{\chi}^0, \tilde{\mu})$$

$$m_{\text{soft}}^2$$



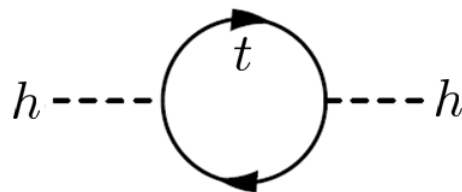
$$\Delta(\tilde{\chi}^\pm, \tilde{\nu}) \approx \frac{\alpha_w m_\mu^2}{m_{\text{soft}}^2} \text{sgn}(\mu M_2) \tan \beta.$$

## 標準模型 = 2 次発散 → 階層性問題

$$m_{\text{higgs}}^2 \sim m_{\text{bare}}^2 + \Delta m_{\text{higgs}}^2$$

$10^4 \text{ GeV}^2$

$$\text{SM} : \Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2} \Lambda^2 + \text{finite} \quad 10^{30} \text{ GeV}^2$$



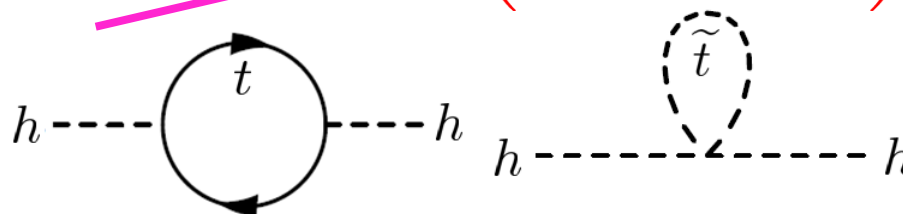
$$\Rightarrow O(10^{30}) - O(10^{30}) \rightarrow 10^4 \text{ !?}$$

## 超対称標準模型 = 対数発散

$$m_{\text{higgs}}^2 \sim m_{\text{bare}}^2 + \Delta m_{\text{higgs}}^2$$

MSSM :  $\Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2} \Lambda^2 + \left( 2 \times \frac{3|\lambda|^2}{16\pi^2} \Lambda^2 \right) + O(\log \Lambda)$

CANCEL





$$m_{\text{higgs}}^2 \sim m_{\text{bare}}^2 + \Delta m_{\text{higgs}}^2$$

$$\text{MSSM} : \Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim \mathcal{O}(\log \Lambda)$$

$$m_{\text{higgs}}^2 \sim m_{\text{bare}}^2 + \Delta m_{\text{higgs}}^2$$

$$\text{MSSM} : \Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim -\frac{3y_t^2}{4\pi^2} m_{\tilde{t}}^2 \log \frac{\Lambda}{m_{\tilde{t}}}$$

$$m_{\tilde{t}} = 1 \text{ TeV} \implies \Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim 10^6 \text{ GeV}^2$$

階層性問題の亡霊！

$$m_{\text{higgs}}^2 \sim m_{\tilde{t}}$$

$$\tilde{t} : 600 \text{ GeV} \Rightarrow 10\% \text{ tuning}$$

$$1.8 \text{ TeV} \Rightarrow 1\% \text{ tuning}$$

自然に考えれば SUSY は TeV にある！

TeV-SUSYの証拠？

$$\text{MSSM} : \Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim -\frac{3y_t^2}{4\pi^2} m_{\tilde{t}}^2 \log \frac{\Lambda}{m_{\tilde{t}}}$$

$$m_{\tilde{t}} = 1 \text{ TeV} \implies \Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim 10^6 \text{ GeV}^2$$

階層性問題の亡霊！

# TeV-SUSY 教とは

## ◎ 起源

- SUSY 教の分派(主流派)

## ◎ 信仰の基盤

- $(g - 2)_\mu$  至上主義
  - ◇  $\tilde{\chi}^0, \tilde{\chi}^\pm, \tilde{\mu}, \tilde{\nu}_\mu \sim O(100) \text{ GeV}$
- Naturalness 原理主義
  - ◇ 10%原理  $\Rightarrow \tilde{t} \lesssim 600 \text{ GeV}$

## ◎ よくある批判

- ← たった  $3\sigma$  でしょ
- ← 別に SUSY で解決しなくても
- ← 1% とか 0.1% でもいいじゃん

## TeV-SUSY

## ◎ 起源

➤ SUSY

## ◎ 最大の「敵」

“125 GeV Higgs”

## ◎ 信仰の基盤

➤  $(g - 2)_\mu$  至上主義◇  $\tilde{\chi}^0, \tilde{\chi}^\pm, \tilde{\mu}, \tilde{\nu}_\mu \sim O(100) \text{ GeV}$ 

➤ Naturalness 原理主義

◇ 10%原理  $\Rightarrow \tilde{t} \lesssim 600 \text{ GeV}$ 

## ◎ よくある批判

← たった  $3\sigma$  でしょ

← 別に SUSY で解決しなくても

← 1% とか 0.1% でもいいじゃん

$$m_h^2 \lesssim m_Z^2 + \frac{3g_W^2 m_t^4}{8\pi^2 m_W^2} \left[ \ln \frac{m_{\tilde{t}}^2}{m_t^2} - \frac{(\alpha^2 - 6)^2}{12} + 3 \right]$$

(1-loop level)

where  $\alpha := A_t/m_{\tilde{t}}$ .

◎  $125\text{GeV} = \tilde{t}$  が非常に重い  $10\text{--}100\text{ TeV}$  and/or  $A_t$  がデカイ。  
 $\sim \sqrt{6}m_{\tilde{t}}$

### TeV-SUSY 教

- $(g-2)_\mu$  至上主義
  - ◇  $\tilde{\chi}^0, \tilde{\chi}^\pm, \tilde{\mu}, \tilde{\nu}_\mu \sim 100\text{ GeV}$
- **Naturalness** 原理主義
  - ◇ 10%原理  $\Rightarrow \tilde{t} \lesssim 600\text{ GeV}$

GUT を考えると **やや困難**  
(後述)

一見明白に **矛盾**

# TeV-SUSY 教は 125GeV の脅威に直面している

(MSSM  $\Rightarrow$  very heavy  $\tilde{t}$  and/or large  $A_t$ )

## ◎ Naturalness 原理主義 ( $\tilde{t} \lesssim 600$ GeV)

### ➤ MSSM の放棄

#### ◇ NMSSM + mirage mediation

Asano, Higaki [1204.0508]  
Kobayashi, Makino, Okumura,  
Shimomura, Takahashi [1204.3561]

## ◎ $(g - 2)_\mu$ 至上主義 ( $\tilde{\chi}^0, \tilde{\chi}^\pm, \tilde{\mu}, \tilde{\nu}_\mu \sim O(100)$ GeV)

### ➤ CMSSM や GMSB では困難

### ➤ Parameter の調整 : • $M_1 \neq M_2 \neq M_3$ @GUT

Ghilencea, Lee, Park [1203.0569]

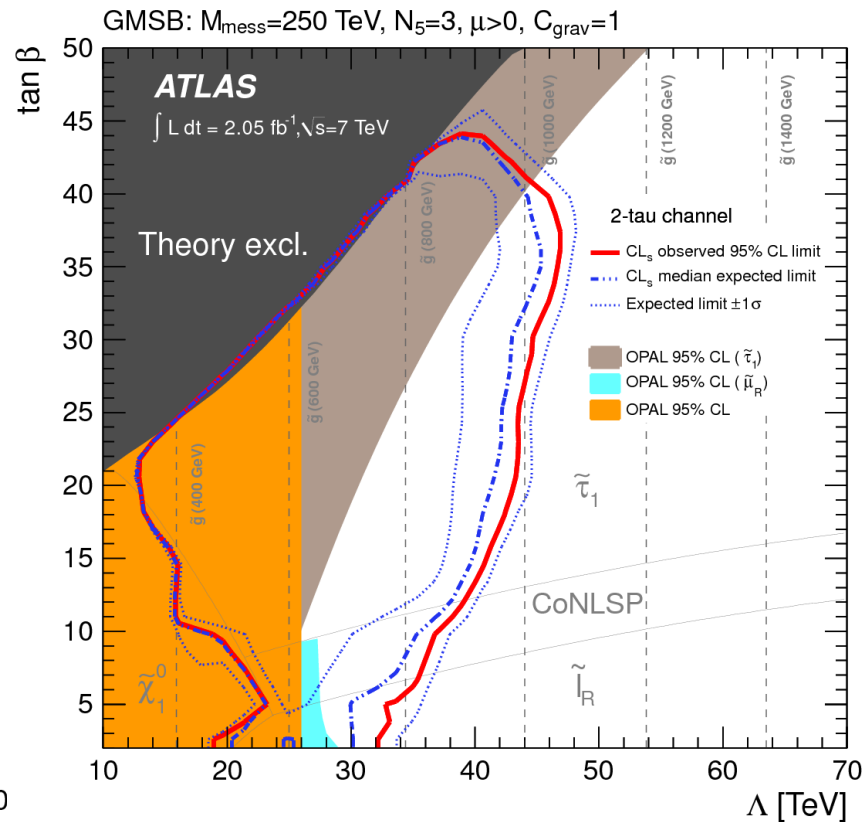
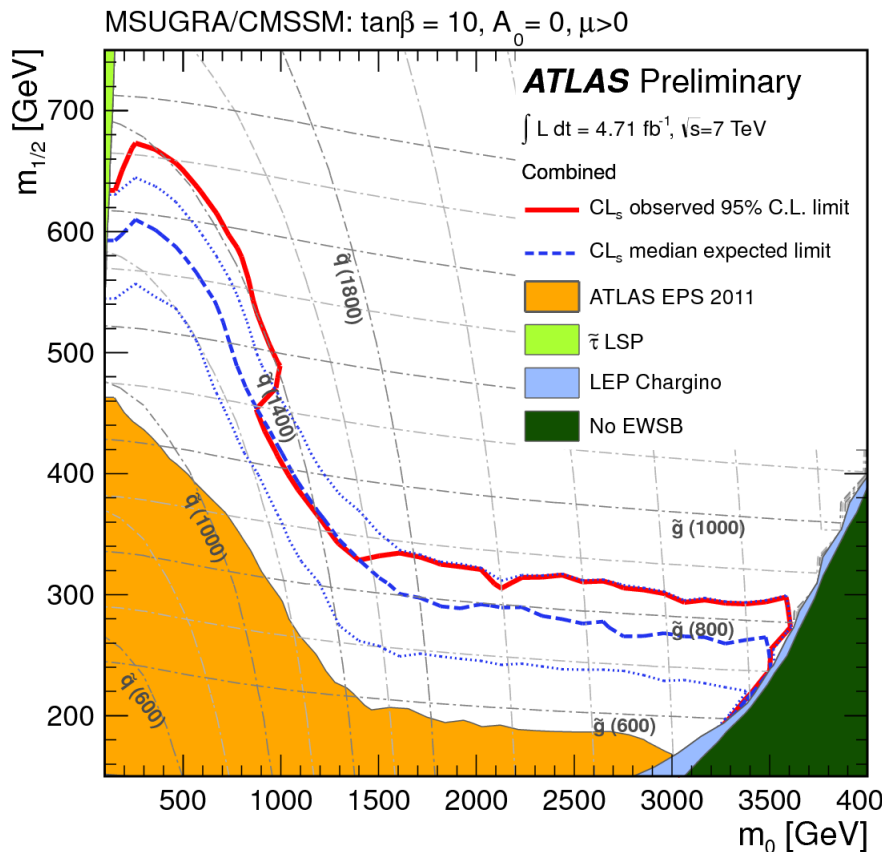
### • $m_0^{1,2\text{-gen.}} < m_0^{3\text{rd}}$ @GUT

Confirmed by myself

### ➤ MSSM の放棄 …… 今日の MAIN TOPIC

(余談) TeV-SUSY 教 最終戦争

# = LHC SUSY SEARCH

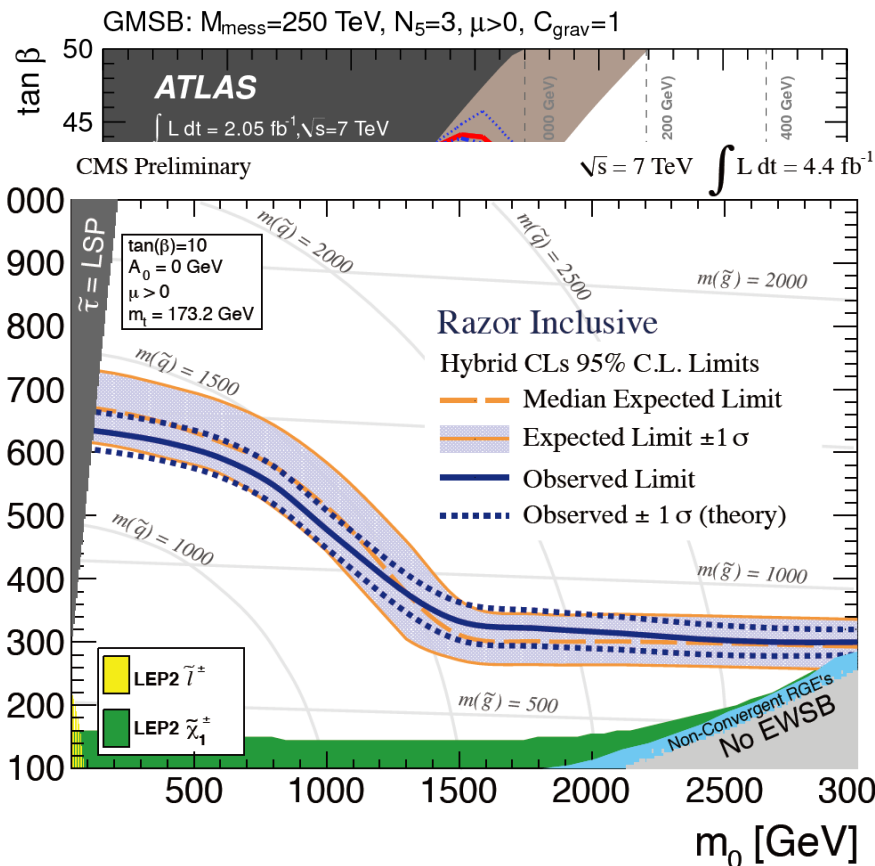
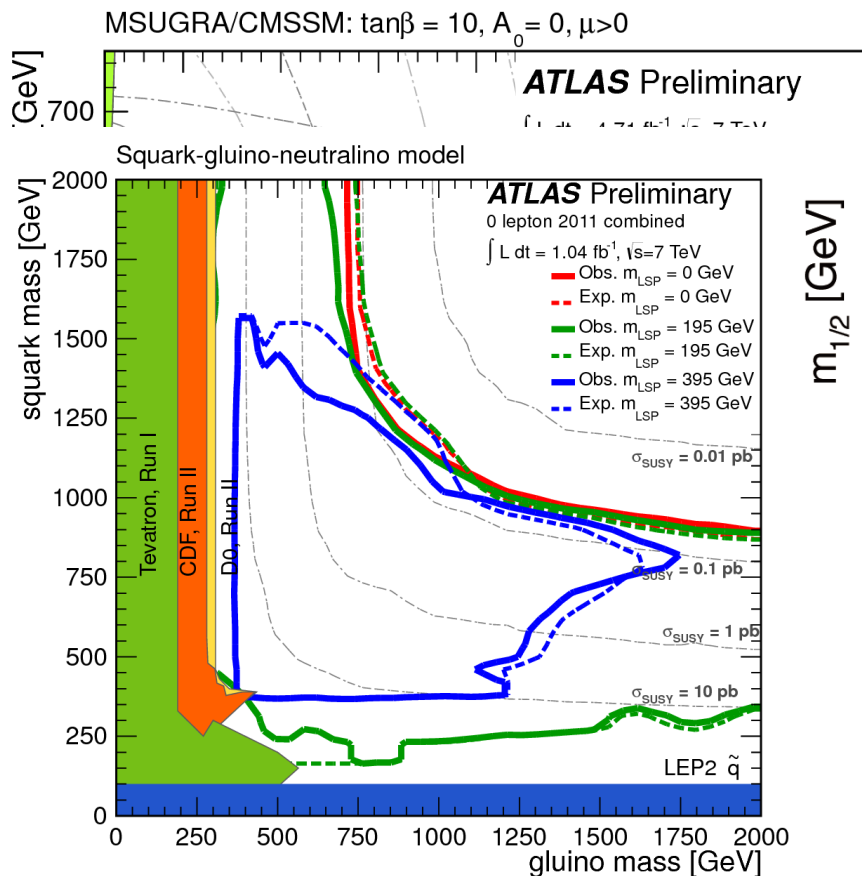


8 TeV 15fb<sup>-1</sup> が待ち遠しい



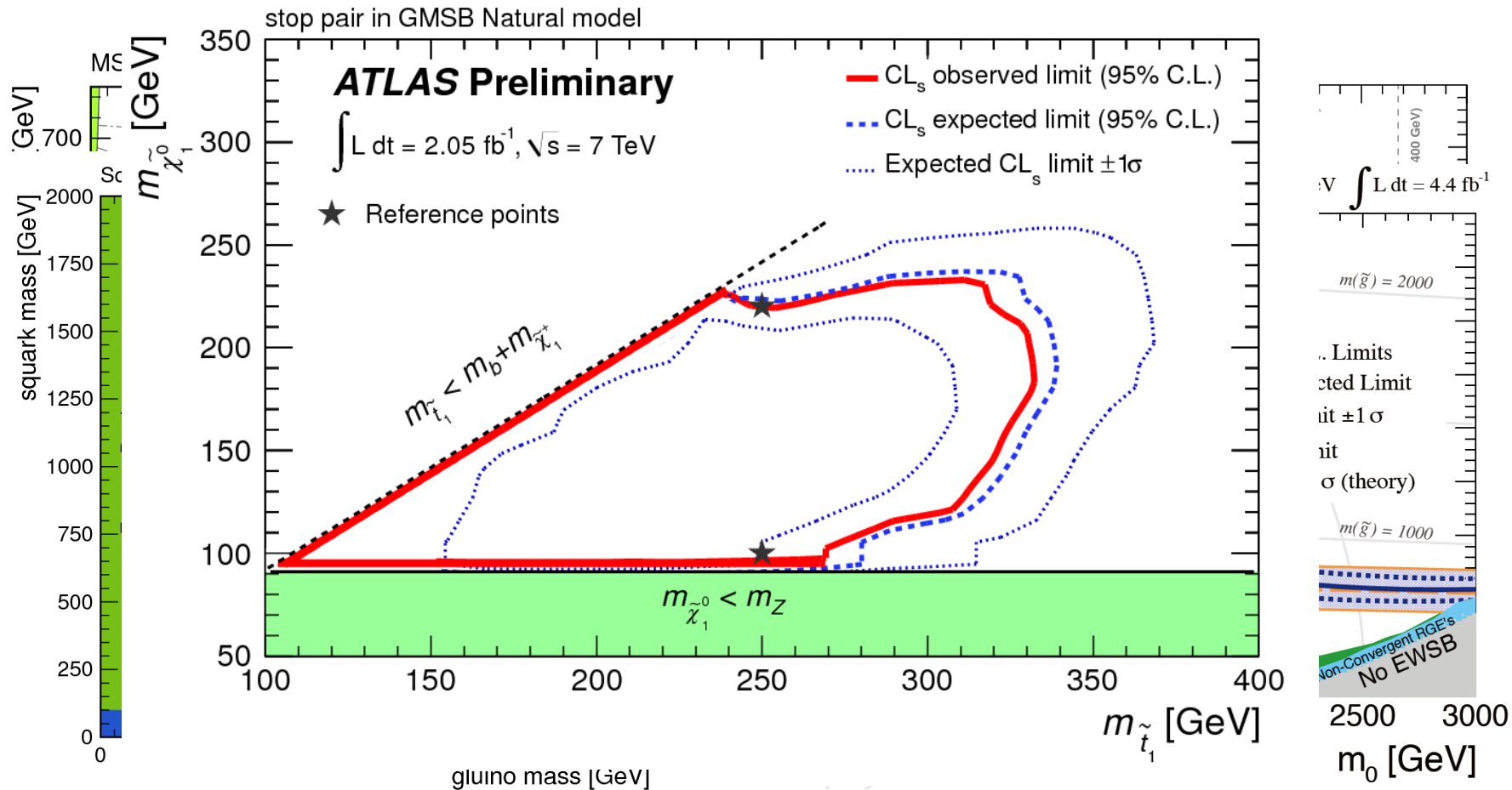
# (余談) TeV-SUSY 教 最終戦争

# = LHC SUSY SEARCH



8 TeV  $15 \text{ fb}^{-1}$  が待ち遠しい

# (余談) TeV-SUSY 教 最終戦争



8 TeV 15fb<sup>-1</sup> が待ち遠しい

# 1. 125GeV Higgs !

## 2. TeV-SUSY 教

- a. 指導原理は naturalness と  $g-2$ 。
- b. 125GeV Higgs により危機に瀕している。

Based on

M. Endo, K. Hamaguchi, SI, N. Yokozaki

[1112.5653] [1108.3071] [1202.2751]

M. Endo, K. Hamaguchi, K. Nakayama, SI, N. Yokozaki

[1112.6412]

1. 125GeV Higgs !
2. TeV-SUSY 教
  - a. 指導原理は naturalness と  $g-2$ 。
  - b. 125GeV Higgs により危機に瀕している。
3. MSSMの拡張で, TeV-SUSY 教  $g-2$  至上主義を救済

Based on

M. Endo, K. Hamaguchi, SI, N. Yokozaki

[1112.5653] [1108.3071] [1202.2751]

M. Endo, K. Hamaguchi, K. Nakayama, SI, N. Yokozaki

[1112.6412]

## ◎ 思想

- SUSY は TeV にある
- $(g-2)_\mu$  は SUSY により解決される
- Naturalness は気にしない
- Parameter の調節はしない (CMSSM or mGMSB)

## ◎ 目標

- CMSSM or mGMSB の枠組みで  $(g-2)_\mu$  と 125 GeV を同時に達成

## ◎ 手法 (=MSSM を放棄し, 新しく場を導入)

- ~~NMSSM~~
- ~~Add  $5 + \bar{5}$~~
- Add  $10 + \bar{10}$  Endo, Hamaguchi, SI, Yokozaki [1108.3071] [1112.5653][1202.2751]
- Add a new gauge symmetry Endo, Hamaguchi, Nakayama, SI, Yokozaki [1112.6412]

◎  $(g - 2)_\mu \rightsquigarrow$  large  $\tan \beta$

◎ NMSSM の寄与は

$$\Delta m_h^2 \Big|_{\text{tree}}^{\text{NMSSM}} \sim |\lambda|^2 v^2 \sin^2 2\beta \sim \frac{4|\lambda|^2}{\tan \beta} v^2$$

(mass matrixを用いて議論しようとしたけど難しそうだった。。。)



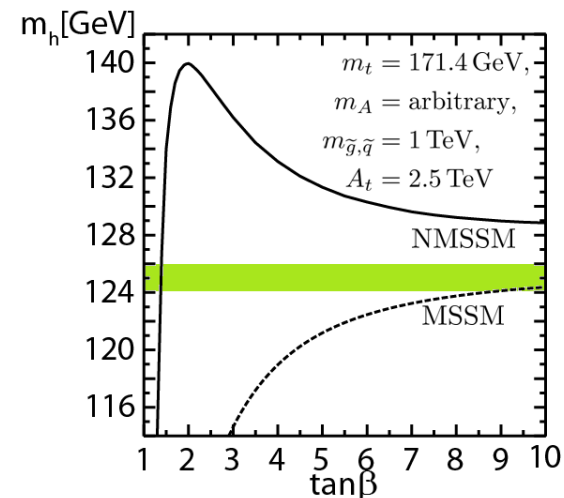
NMSSM は役に立たない

Gunion, Jiang, Kraml [1201.0982]

Ellwanger, Hugonie [1203.5048]

$$\Delta(\tilde{\chi}^0, \tilde{\mu}) \approx \frac{\alpha_Y m_\mu^2}{m_{\text{soft}}^2} \text{sgn}(\mu M_1) \tan \beta + \dots,$$

$$\Delta(\tilde{\chi}^\pm, \tilde{\nu}) \approx \frac{\alpha_w m_\mu^2}{m_{\text{soft}}^2} \text{sgn}(\mu M_2) \tan \beta.$$



Ellwanger, Hugonie [0612133]

➤ もちろん CMSSM/mSUGRA の枠組みを離れれば,

$(g - 2)_\mu$  と 125GeV を同時に達成できる。(MSSMでも出来るので当然)

Cao, Heng, Yang, Zhang, Zhu [1202.5821]

## ◎ 思想

- SUSY は TeV にある
- $(g - 2)_\mu$  は SUSY により解決される
- Naturalness は気にしない
- Parameter の調節はしない (CMSSM or mGMSB)

## ◎ 目標

- CMSSM or mGMSB の枠組みで  $(g - 2)_\mu$  と 125 GeV を同時に達成

## ◎ 手法 (=MSSM を放棄し, 新しく場を導入)

- ~~NMSSM~~
- Add  $5 + \bar{5}$
- Add  $10 + \bar{10}$  Endo, Hamaguchi, SI, Yokozaki [1108.3071] [1112.5653][1202.2751]
- Add a new gauge symmetry Endo, Hamaguchi, Nakayama, SI, Yokozaki [1112.6412]

# $10 + \overline{10}$ による $g-2$ + 125GeV

---

M. Endo, K. Hamaguchi, SI, N. Yokozaki

[1112.5653] [1108.3071] [1202.2751]



$$\text{MSSM} + (\mathbf{10} \quad \quad \quad), \text{ i.e. } \begin{cases} \mathbf{10} = (Q', U', E') \end{cases}$$

$$W_{\text{add}} = Y' Q' H_u U'$$

$$m_h^2 \lesssim m_Z^2 + \frac{3g_W^2 m_t^4}{8\pi^2 m_W^2} \left[ \ln \frac{M_{\text{stop}}^2}{m_t^2} + \alpha^2 \left( 1 - \frac{\alpha^2}{12} \right) \right]$$

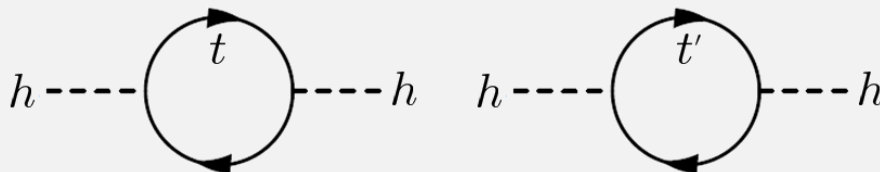
where  $M_{\text{stop}}^2 := \frac{m_{\tilde{t}_1}^2 + m_{\tilde{t}_2}^2}{2}$ ,  $\alpha := \frac{A_t - \mu \cot \beta}{M_{\text{stop}}}$ .

**IDEA**

MSSM では top (s)quark が Higgs mass を持ち上げた。

$$(W_{\text{MSSM}} = y_t Q_3 H_u \bar{t})$$

もう1つ top を入れよう！



$$\text{MSSM} + (\mathbf{10} + \overline{\mathbf{10}}), \text{ i.e. } \begin{cases} \mathbf{10} = (Q', U', E') \\ \overline{\mathbf{10}} = (\bar{Q}', \bar{U}', \bar{E}') \end{cases}$$

$$W_{\text{add}} = Y' Q' H_u U' + Y'' \bar{Q}' H_d \bar{U}' \\ + M_V Q' \bar{Q}' + M_V U' \bar{U}' + M_V E' \bar{E}'$$

**IDEA**

MSSM では top (s)quark が Higgs mass を持ち上げた。

$$(W_{\text{MSSM}} = y_t Q_3 H_u \bar{t})$$

もう1つ top を入れよう！

⇒ Gauge anomaly...

⇒ Vector-like にしよう。

「F-term で持ち上げている」

$$\text{MSSM} + (\mathbf{10} + \overline{\mathbf{10}}), \text{ i.e. } \begin{cases} \mathbf{10} = (Q', U', E') \\ \overline{\mathbf{10}} = (\bar{Q}', \bar{U}', \bar{E}') \end{cases}$$

$$W_{\text{add}} = Y' Q' H_u U' + Y'' \bar{Q}' H_d \bar{U}' + M_V Q' \bar{Q}' + M_V U' \bar{U}' + M_V E' \bar{E}'$$

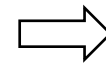
$m_h \uparrow$        $m_h \downarrow \rightarrow Y'' \ll 1$  を仮定

$$W_{\text{mix}} = \underline{\underline{\epsilon_i Q_i H_u U' + \epsilon'_i Q' H_u \bar{U}_i + \epsilon''_i Q' H_d \bar{D}_i}}$$

### Mixing between SM- & vector-like quark

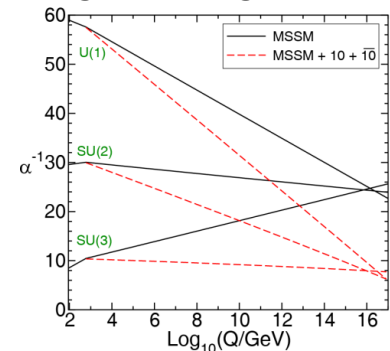
➤ Too large  $\rightarrow$  flavor problem.

➤ No mixing  $\rightarrow$  stable colored particle.



十分小さいと仮定

- No gauge anomaly.
- Gauge couplings unification.



Martin [0910.2732]

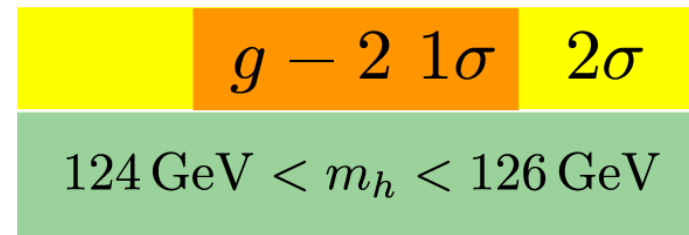
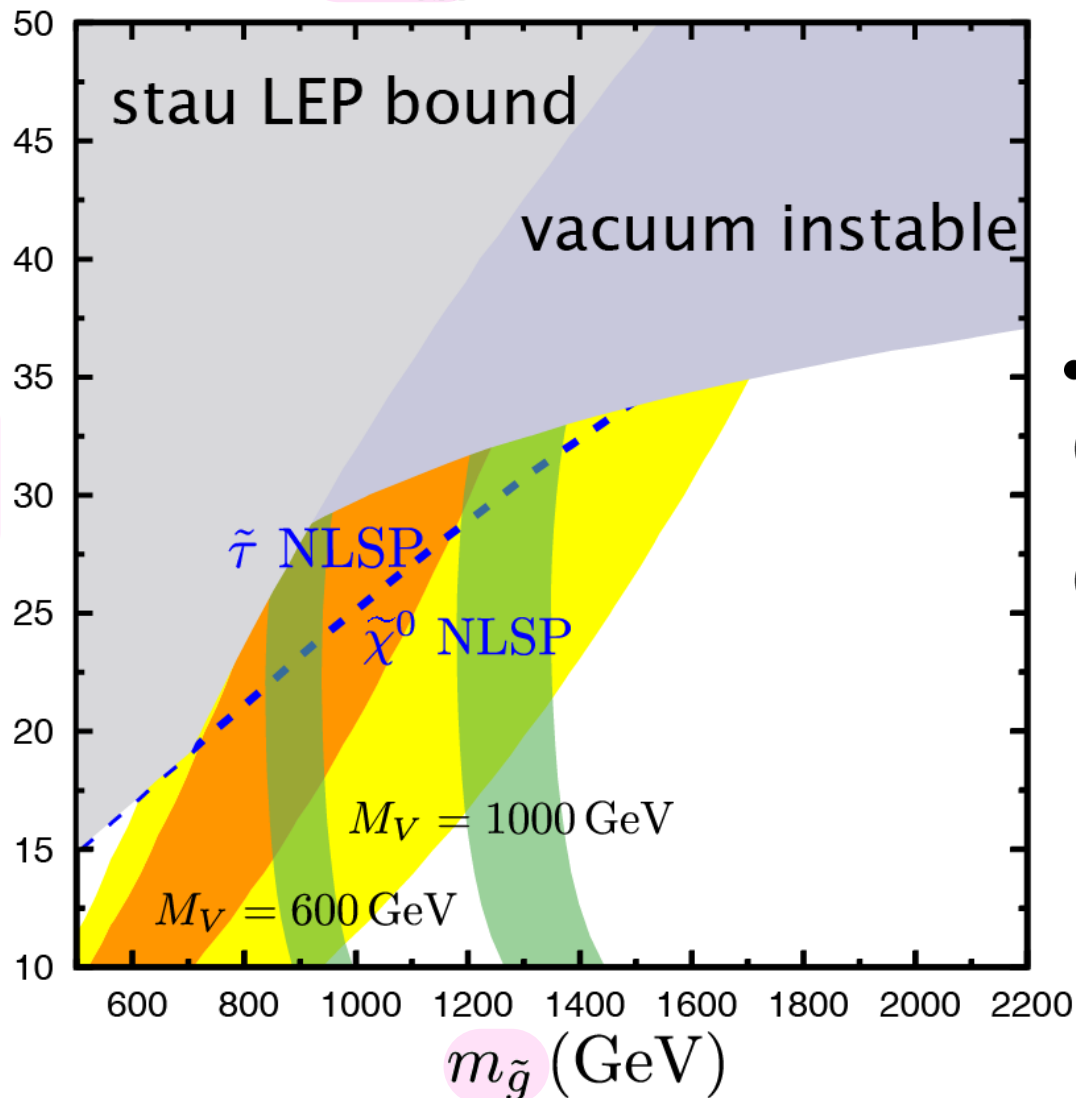
- ◎  $Y' = 1.05$  : infrared fixed point  $\Rightarrow$  nice for 125 GeV  
(also  $A_t$  and  $A'$  go to IR fixed point.)

- ◎ 微妙な仮定が入っている...

➤ うまいこと UV の理論が作れないか? (future work)

# 実際、持ち上がりました。(mGMSB)

$$M_{\text{mess}} = 10^6 \text{ GeV}$$



• Parameters

$(\Lambda, M_{\text{mess}}, \tan \beta, N_{\text{mess}}, \text{sgn } \mu)$  ;

$(Y', M_V)$

$\parallel$   
1.05 (IR fixed point)

$\parallel$   
1  $\parallel$   
+

to keep perturbative till  $M_{\text{GUT}}$

to explain  $(g - 2)_\mu$

# Vector-like matter $\mathcal{E} g-2 + 125\text{GeV}$ : GMSB framework

$g-2$   $1\sigma$   $2\sigma$   
 $124\text{ GeV} < m_h < 126\text{ GeV}$

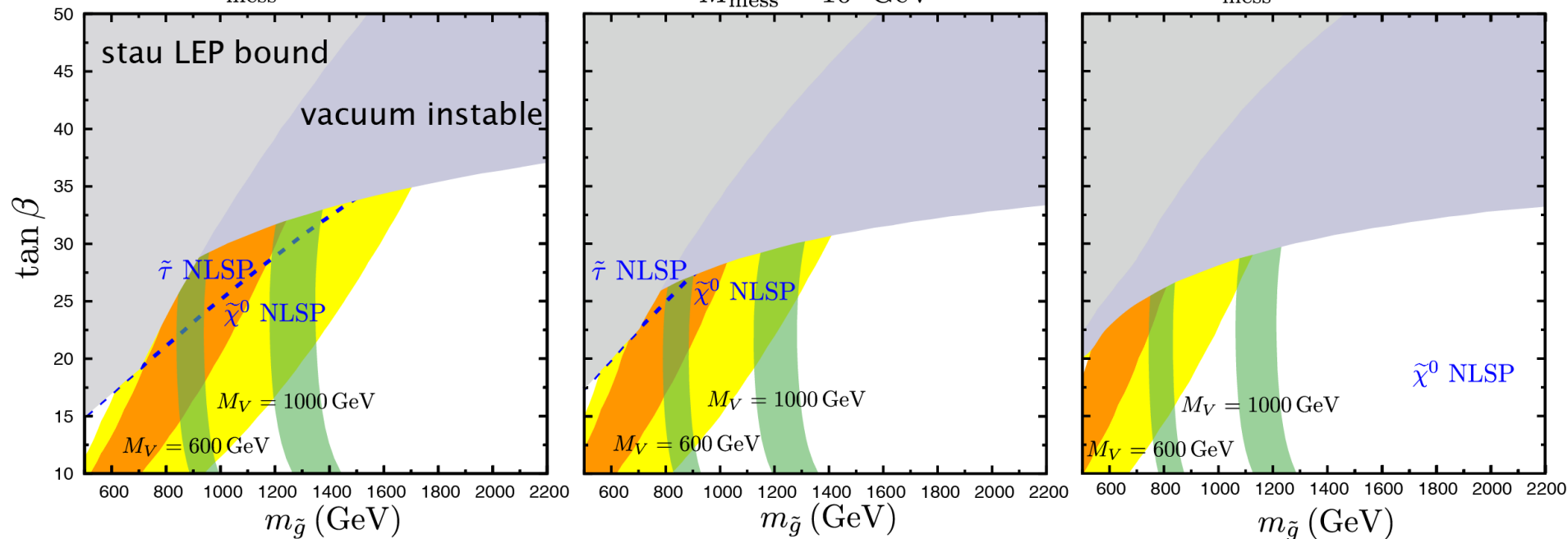
params:  $(\Lambda, M_{\text{mess}}, \tan\beta, N_{\text{mess}}, \text{sgn}\mu; Y', M_V)$

$\parallel$   $\parallel$   $\parallel$   
 $1$   $+$   $1.05$

$M_{\text{mess}} = 10^6\text{ GeV}$

$M_{\text{mess}} = 10^8\text{ GeV}$

$M_{\text{mess}} = 10^{10}\text{ GeV}$



NLSP	すぐ崩壊する場合 ( $M_{\text{mess}} \lesssim 10^5\text{ GeV}$ )	長寿命 ( $M_{\text{mess}} \gtrsim 10^6\text{ GeV}$ )
$\tilde{\chi}_1^0$	$m_{\tilde{g}} \gtrsim 1.2\text{ TeV}$ ( $1.0\text{ fb}^{-1}$ ) ATLAS $2\gamma + \cancel{E}_T$ [1111.4116]	$m_{\tilde{g}} \gtrsim 900\text{ GeV}$ ( $4.7\text{ fb}^{-1}$ ) ATLAS [2012-033], CMS [SUS12005]
$\tilde{\tau}_1$	$m_{\tilde{g}} \gtrsim 1.0\text{ TeV}$ ( $2.0\text{ fb}^{-1}$ ) ATLAS $2\tau + \text{jets} + \cancel{E}_T$ [1203.6580]	$m_{\tilde{\tau}_1} \gtrsim 232\text{ GeV}$ ( $4.7\text{ fb}^{-1}$ ) (上図全滅) CMS long-lived search [EX011022]

# Vector-like matter $\mathcal{E} g-2 + 125\text{GeV}$ : GMSB framework

$g - 2$   $1\sigma$   $2\sigma$   
 $124\text{ GeV} < m_h < 126\text{ GeV}$

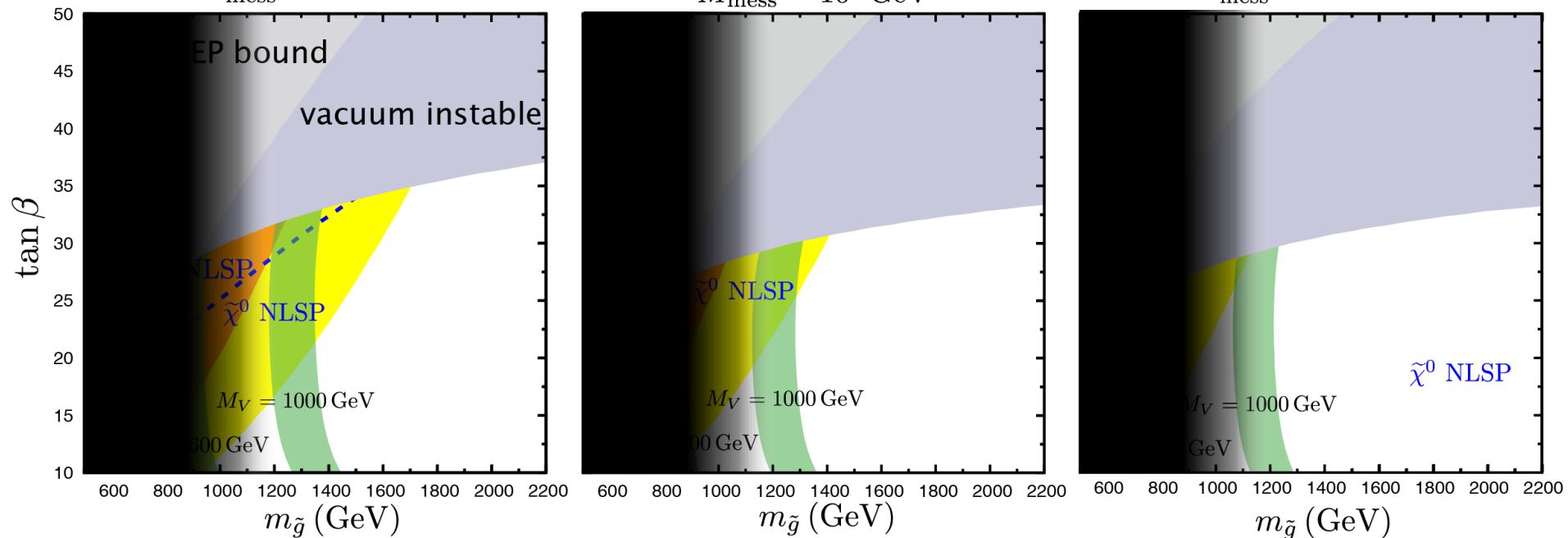
params:  $(\Lambda, M_{\text{mess}}, \tan\beta, N_{\text{mess}}, \text{sgn}\mu; Y', M_V)$

$\parallel$   
 $1$   $+$   $1.05$

$M_{\text{mess}} = 10^6\text{ GeV}$

$M_{\text{mess}} = 10^8\text{ GeV}$

$M_{\text{mess}} = 10^{10}\text{ GeV}$



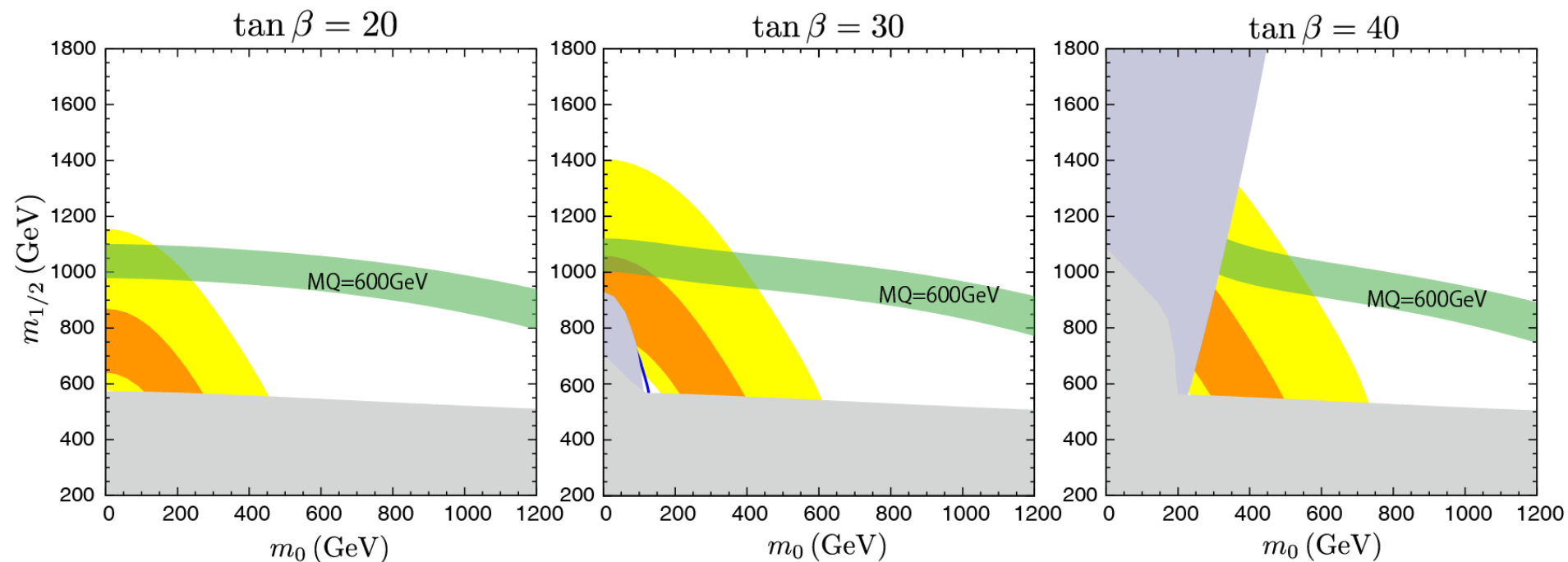
NLSP	すぐ崩壊する場合 ( $M_{\text{mess}} \lesssim 10^5\text{ GeV}$ )	長寿命 ( $M_{\text{mess}} \gtrsim 10^6\text{ GeV}$ )
$\tilde{\chi}_1^0$	$m_{\tilde{g}} \gtrsim 1.2\text{ TeV}$ ( $1.0\text{ fb}^{-1}$ ) ATLAS $2\gamma + \cancel{E}_T$ [1111.4116]	$m_{\tilde{g}} \gtrsim 900\text{ GeV}$ ( $4.7\text{ fb}^{-1}$ ) ATLAS [2012-033], CMS [SUS12005]
$\tilde{\tau}_1$	$m_{\tilde{g}} \gtrsim 1.0\text{ TeV}$ ( $2.0\text{ fb}^{-1}$ ) ATLAS $2\tau + \text{jets} + \cancel{E}_T$ [1203.6580]	$m_{\tilde{\tau}_1} \gtrsim 232\text{ GeV}$ ( $4.7\text{ fb}^{-1}$ ) (上図全滅) CMS long-lived search [EX011022]

$g-2$  1 $\sigma$  2 $\sigma$   
 $124 \text{ GeV} < m_h < 126 \text{ GeV}$

params:  $(m_0, m_{1/2}, \tan \beta, A_0, \text{sgn } \mu; Y', M_V)$

$\parallel$  0  $\parallel$  +  $\parallel$  1.05

# 実際、持ち上がりました。(mSUGRA)



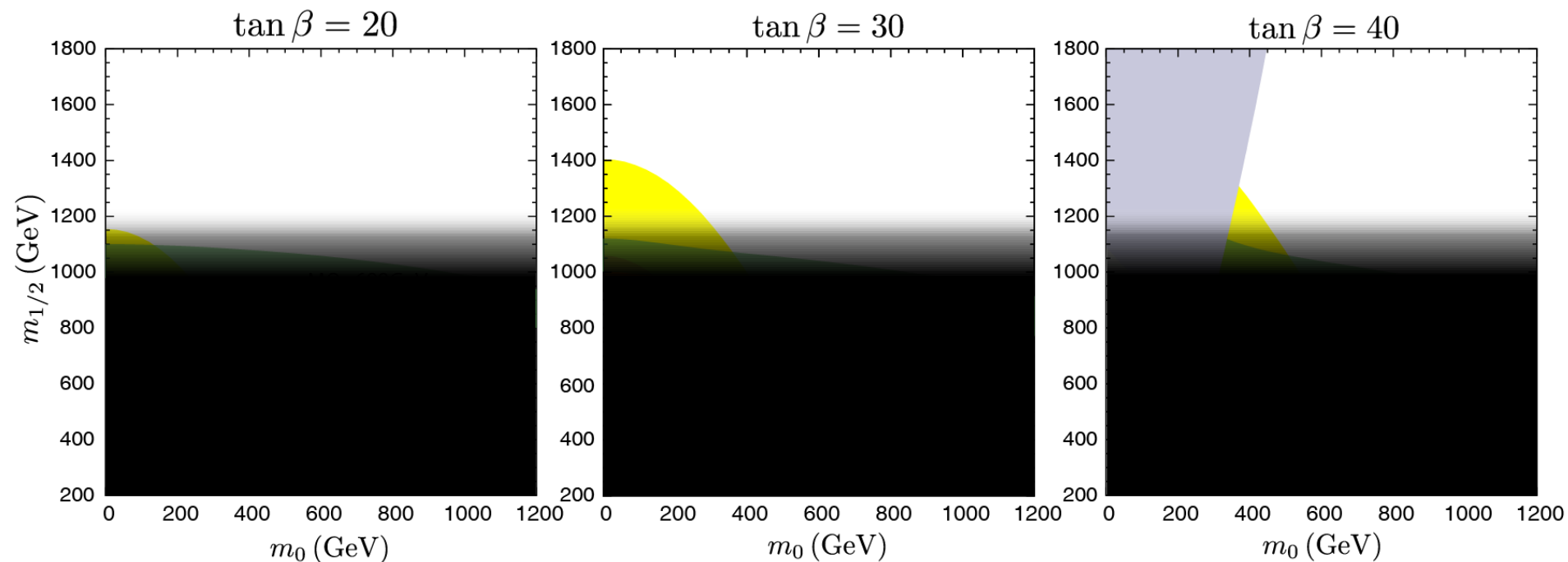
ATLAS [2012-033], CMS [SUS12005]

g - 2  $1\sigma$   $2\sigma$   
 $124 \text{ GeV} < m_h < 126 \text{ GeV}$

params:  $(m_0, m_{1/2}, \tan \beta, A_0, \text{sgn } \mu; Y', M_V)$

$\parallel$   $\parallel$   $\parallel$   
 0 + 1.05

# 実際、持ち上がりました。(mSUGRA)



ATLAS [2012-033], CMS [SUS12005]



1. 125GeV Higgs !

2. TeV-SUSY 教

- a. 指導原理は naturalness と  $g-2$ 。
- b. 125GeV Higgs により危機に瀕している。

3. MSSMの拡張で, TeV-SUSY 教  $g-2$  至上主義を救済

- a. Vector-like matter ( $10 + \overline{10}$ )

Based on

M. Endo, K. Hamaguchi, SI, N. Yokozaki

[1112.5653] [1108.3071] [1202.2751]

M. Endo, K. Hamaguchi, K. Nakayama, SI, N. Yokozaki

[1112.6412]

# $U(1)'$ による $g-2 + 125\text{GeV}$

---

M. Endo, K. Hamaguchi, K. Nakayama, SI, N. Yokozaki  
[1112.6412]

$$\left( \text{MSSM} + \bar{N} \right) + \text{U}(1)' + S + \bar{S} + X$$

$$W_{\text{add}} = \lambda X (S\bar{S} - \tilde{v}^2)$$

↑  
O(TeV)

$$m_h^2 \lesssim m_Z^2 + \frac{3g_W^2 m_t^4}{8\pi^2 m_W^2} \left[ \ln \frac{M_{\text{stop}}^2}{m_t^2} + \alpha^2 \left( 1 - \frac{\alpha^2}{12} \right) \right]$$

where  $M_{\text{stop}}^2 := \frac{m_{t_1}^2 + m_{t_2}^2}{2}$ ,  $\alpha := \frac{A_t - \mu \cot \beta}{M_{\text{stop}}}$ .

## IDEA

MSSM の Higgs mass は “D-term” の寄与から来る。

$$V \supset (|\mu|^2 + m_{H_u}^2) |H_u^0|^2 + (|\mu|^2 + m_{H_d}^2) |H_d^0|^2 - (bH_u^0 H_d^0 + \text{c.c.})$$

$$+ \frac{1}{8} (g^2 + g'^2) (|H_u^0|^2 - |H_d^0|^2)^2$$

$+g_X^2$

⇒ Additional U(1) gauge!

- Singlet を入れて, ちゃんと spontaneous break させる。
- Anomaly free な U(1) でないと。

$$\left( \text{MSSM} + \bar{N} \right) + \text{U}(1)' + S + \bar{S} + X$$

$$W_{\text{add}} = \lambda X (S\bar{S} - \tilde{v}^2)$$

↑  
O(TeV)

	U(1) <sub>χ</sub>	U(1) <sub>T</sub>
Q	-1	0
$\bar{U}$	-1	-1
$\bar{D}$	3	-1
L	3	0
$\bar{E}$	-1	1
$\bar{N}$	-5	-1
H <sub>u</sub>	2	1
H <sub>d</sub>	-2	-1
S	-y	+y
$\bar{S}$	+y	-y

◎ Anomaly free  $\rightsquigarrow$  U(1)<sub>B-L</sub> (with  $\bar{N}$ )

⇒ Higgs が 0 なので NG

⇒  $\alpha \cdot \text{U}(1)_Y + \beta \cdot \text{U}(1)_{B-L}$

	U(1) <sub>Y</sub>	U(1) <sub>B-L</sub>
Q	1/6	+1/3
$\bar{U}$	-2/3	-1/3
$\bar{D}$	+1/3	-1/3
L	-1/2	-1
$\bar{E}$	+1	+1
$\bar{N}$	0	+1
H <sub>u</sub>	+1/2	0
H <sub>d</sub>	-1/2	0

### Working Examples

U(1)<sub>χ</sub> : motivated by SO(10) GUT.

$$\text{SO}(10) \rightarrow \text{SU}(5) \times \text{U}(1)_\chi$$

U(1)<sub>T</sub> : motivated by Pati-Salam theory.

$$\text{SO}(10) \rightarrow \text{SU}(4) \times \text{SU}(2)_L \times \text{SU}(2)_R$$

♣ We assume  $G_{\text{SM}} \times \text{U}(1)_\chi$  below the GUT scale.

(どうせ GUT には埋め込めないのです、あまりマジメに考えないで下さい。。。)

$$\left( \text{MSSM} + \bar{N} \right) + \text{U}(1)' + S + \bar{S} + X$$

$$W_{\text{add}} = \lambda X (S\bar{S} - \tilde{v}^2)$$

$$V \supset (|\mu|^2 + m_{H_u}^2) |H_u^0|^2 + (|\mu|^2 + m_{H_d}^2) |H_d^0|^2 - (bH_u^0 H_d^0 + \text{c.c.})$$

$$+ \frac{1}{8} (g^2 + g'^2) (|H_u^0|^2 - |H_d^0|^2)^2$$

$$+ \frac{1}{2} g_X^2 x^2 \left( |H_u^0|^2 - |H_d^0|^2 \right)^2 \frac{m_S^2}{m_S^2 + m_{Z'}^2/2}$$

$$\Delta m_h^2 \sim \frac{4x^2 g_X^2}{g^2 + g'^2} m_Z^2 \cos^2 2\beta \cdot \left( \frac{m_S^2}{m_S^2 + m_{Z'}^2/2} \right)$$

$$\left( \text{cf. } m_h^2(\text{MSSM}) \lesssim m_Z^2 \cos^2 2\beta \right)$$

	U(1) <sub>χ</sub>	U(1) <sub>T</sub>
Q	-1	0
Ū	-1	-1
Ā	3	-1
L	3	0
Ē	-1	1
N̄	-5	-1
H <sub>u</sub>	2	1
H <sub>d</sub>	-2	-1
S	-y	+y
S̄	+y	-y

(詳細)

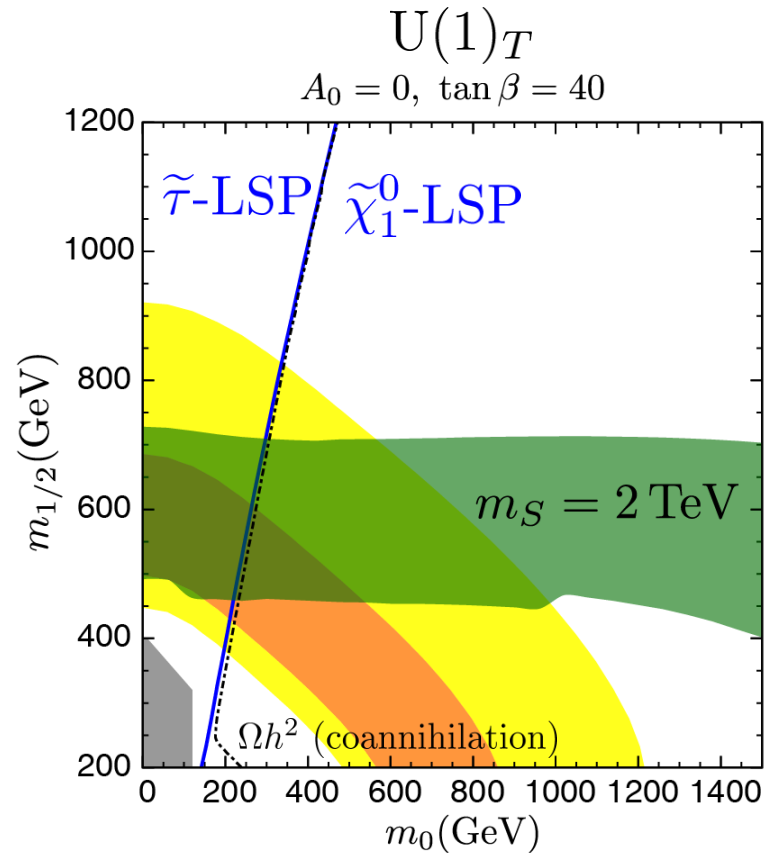
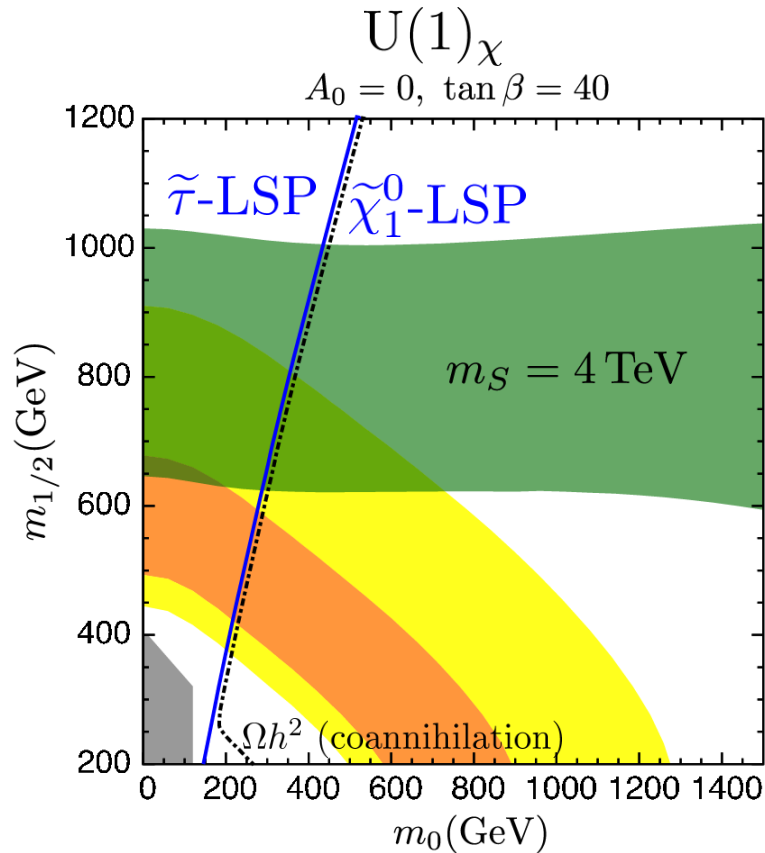
$$\Delta V \supset |\lambda|^2 |S\bar{S} - \tilde{v}^2|^2 + |\lambda|^2 |X|^2 (|S|^2 + |\bar{S}|^2) \text{ [F-term]}$$

$$+ \frac{1}{2} g_X^2 \left[ x (|H_u^0|^2 - |H_d^0|^2) + y (|S|^2 - |\bar{S}|^2) \right]^2 \text{ [D-term]}$$

$$+ m_S^2 |S|^2 + m_{\bar{S}}^2 |\bar{S}|^2 \text{ [SUSY]}$$

# 実際、持ち上がりました。(mSUGRA)

$g - 2 \ 1\sigma \ 2\sigma$   
 $124 \text{ GeV} < m_h < 126 \text{ GeV}$



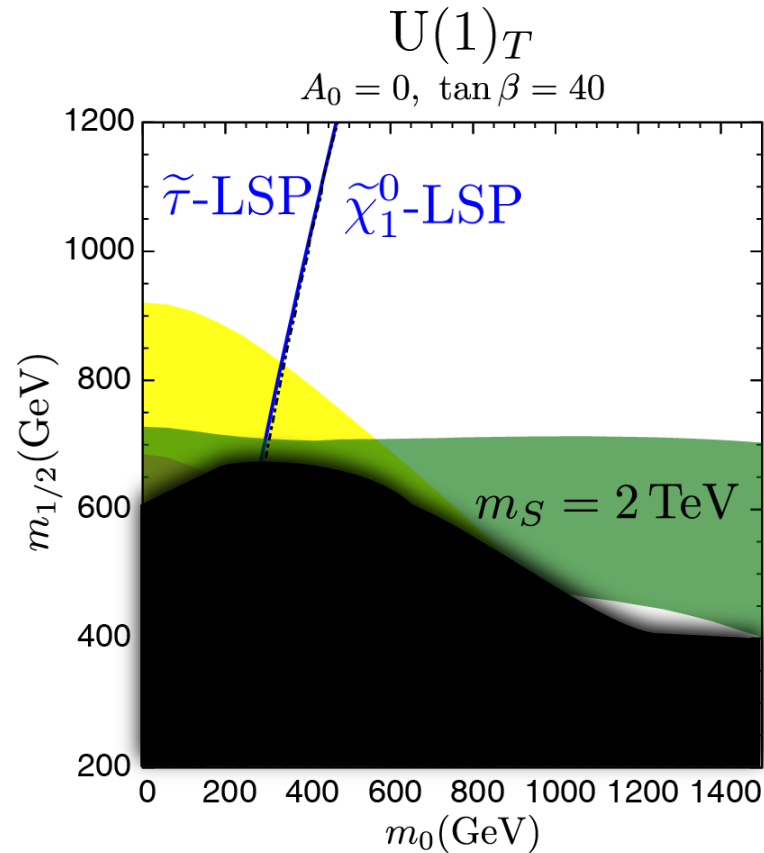
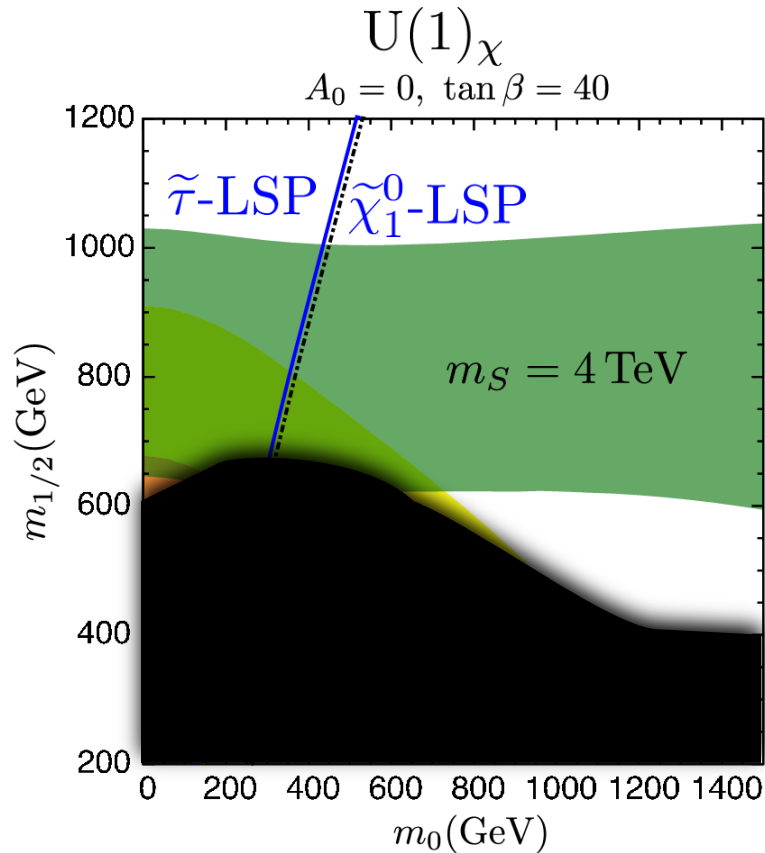
- $\mu > 0$
- $m_S = m_{\bar{S}} = (2, 4) \text{ TeV@GUT}$
- $m_{Z'} = 2 \text{ TeV (fixed)}$
- $g_X = g_{\text{SU}(5)} @ \text{GUT}$

(参考)

$$\Delta m_h^2 \sim \frac{4x^2 g_X^2}{g^2 + g'^2} m_{Z'}^2 \cos^2 2\beta \cdot \left( \frac{m_S^2}{m_S^2 + m_{Z'}/2} \right)$$

# 実際、持ち上がりました。(mSUGRA)

$g - 2\ 1\sigma$	$2\sigma$
$124\text{ GeV} < m_h < 126\text{ GeV}$	



- $\mu > 0$
- $m_S = m_{\bar{S}} = (2, 4)\text{ TeV@GUT}$
- $m_{Z'} = 2\text{ TeV (fixed)}$
- $g_X = g_{\text{SU}(5)}\text{@GUT}$

(参考)

$$\Delta m_h^2 \sim \frac{4x^2 g_X^2}{g^2 + g'^2} m_Z^2 \cos^2 2\beta \cdot \left( \frac{m_S^2}{m_S^2 + m_{Z'}/2} \right)$$

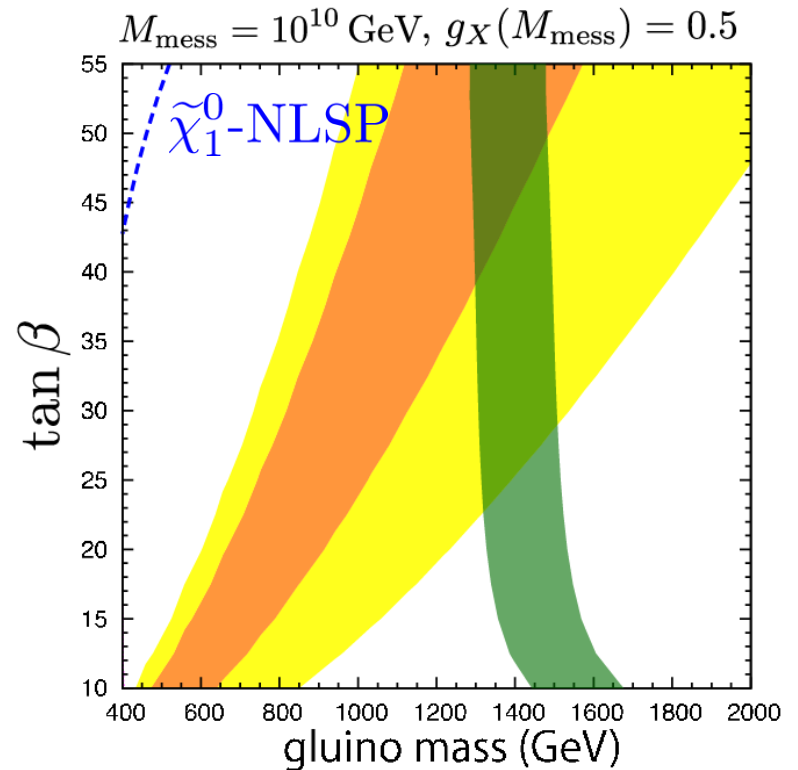
# 実際、持ち上がりました。(mGMSB)

$g - 2$	$1\sigma$	$2\sigma$
$124 \text{ GeV} < m_h < 126 \text{ GeV}$		

$U(1)_X$

$U(1)_T$

Coupling unification @ GUT  
を仮定すると  
Higgs 持ち上がりません。



- $\mu > 0$
- $m_{Z'} = 2 \text{ TeV}$  (fixed)
- $m_S, m_{\bar{S}}$  (from usual GMSB)
- $g_X(M_{\text{mess}}) = 0.5$

↑  
GUT な値より大きめ

(参考)

$$\Delta m_h^2 \sim \frac{4x^2 g_X^2}{g^2 + g'^2} m_Z^2 \cos^2 2\beta \cdot \left( \frac{m_S^2}{m_S^2 + m_{Z'}/2} \right)$$



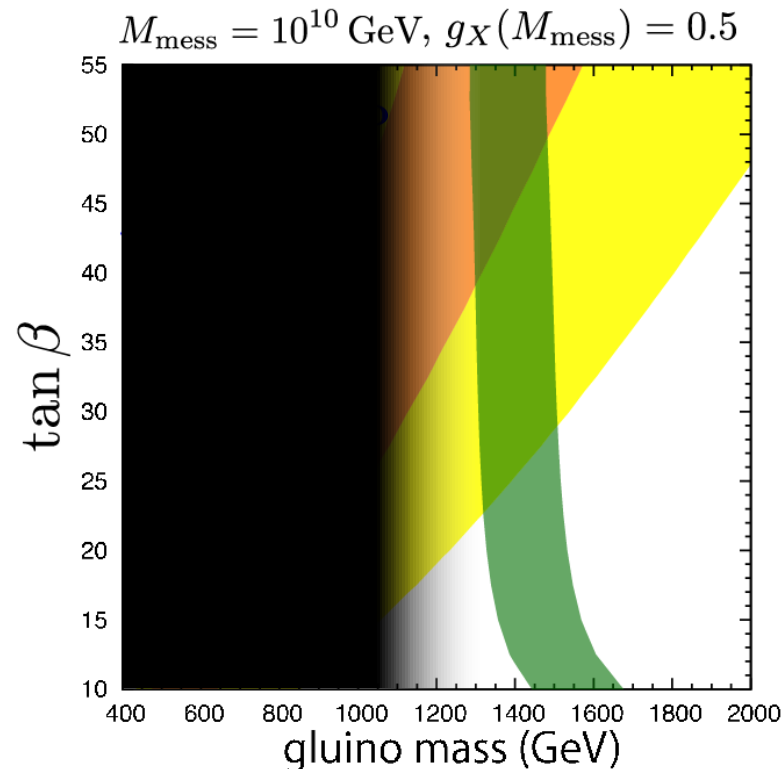
# 実際、持ち上がりました。(mGMSB)

$g - 2\ 1\sigma$	$2\sigma$
$124\text{ GeV} < m_h < 126\text{ GeV}$	

$U(1)_X$

$U(1)_T$

Coupling unification @ GUT  
を仮定すると  
Higgs 持ち上がりず。



- $\mu > 0$
- $m_{Z'} = 2\text{ TeV}$  (fixed)
- $m_S, m_{\bar{S}}$  (from usual GMSB)
- $g_X(M_{\text{mess}}) = 0.5$

↑  
**GUT な値より大きめ**

(参考)

$$\Delta m_h^2 \sim \frac{4x^2 g_X^2}{g^2 + g'^2} m_Z^2 \cos^2 2\beta \cdot \left( \frac{m_S^2}{m_S^2 + m_{Z'}/2} \right)$$

# 1. 125GeV Higgs !

## 2. TeV-SUSY 教

- a. 指導原理は naturalness と  $g-2$ 。
- b. 125GeV Higgs により危機に瀕している。

## 3. MSSMの拡張で, TeV-SUSY 教 $g-2$ 至上主義を救済

- a. Vector-like matter (  $10 + \overline{10}$  )
- b. Extra U(1) gauge

Based on

M. Endo, K. Hamaguchi, SI, N. Yokozaki

[1112.5653] [1108.3071] [1202.2751]

M. Endo, K. Hamaguchi, K. Nakayama, SI, N. Yokozaki

[1112.6412]

# Summary

---

## ◎ TeV-SUSY 教

- Naturalness 原理主義
- $(g - 2)_\mu$  至上主義 ←

## ◎ $(g - 2)_\mu$ と 125 GeV を同時に実現したい！

### Parameter の調整を許す

- $M_1 \neq M_2 \neq M_3$  @GUT
- $m_0^{1,2\text{-gen.}} < m_0^{3\text{rd}}$  @GUT

### Field の追加を許す

- extra  $10 + \bar{10}$   
(vector-like quark)
- extra U(1)

➡ できました。(mSUGRA/mGMSB)

LHC がどんどん軽い方を削ってる。

➤ TeV-SUSY 教の終焉も近い？

➤ 2012 年の結果が待ち遠しい。

◎  $(g - 2)_\mu$  と 125 GeV を同時に実現したい！

Parameter の調整を許す

- $M_1 \neq M_2 \neq M_3$  @GUT
- $m_0^{1,2\text{-gen.}} < m_0^{3\text{rd}}$  @GUT

Field の追加を許す

- extra  $10 + \bar{10}$   
(vector-like quark)
- extra U(1)

➡ できました。(mSUGRA/mGMSB)

1. 125GeV Higgs !
2. TeV-SUSY 教
  - a. 指導原理は naturalness と  $g-2$ 。
  - b. 125GeV Higgs により危機に瀕している。
3. MSSMの拡張で, TeV-SUSY 教  $g-2$  至上主義を救済
  - a. Vector-like matter ( $10 + \overline{10}$ )
  - b. Extra U(1) gauge
4. まとめ : LHC は偉大。TeV-SUSY 教の最終戦争も近い。

Based on

M. Endo, K. Hamaguchi, SI, N. Yokozaki

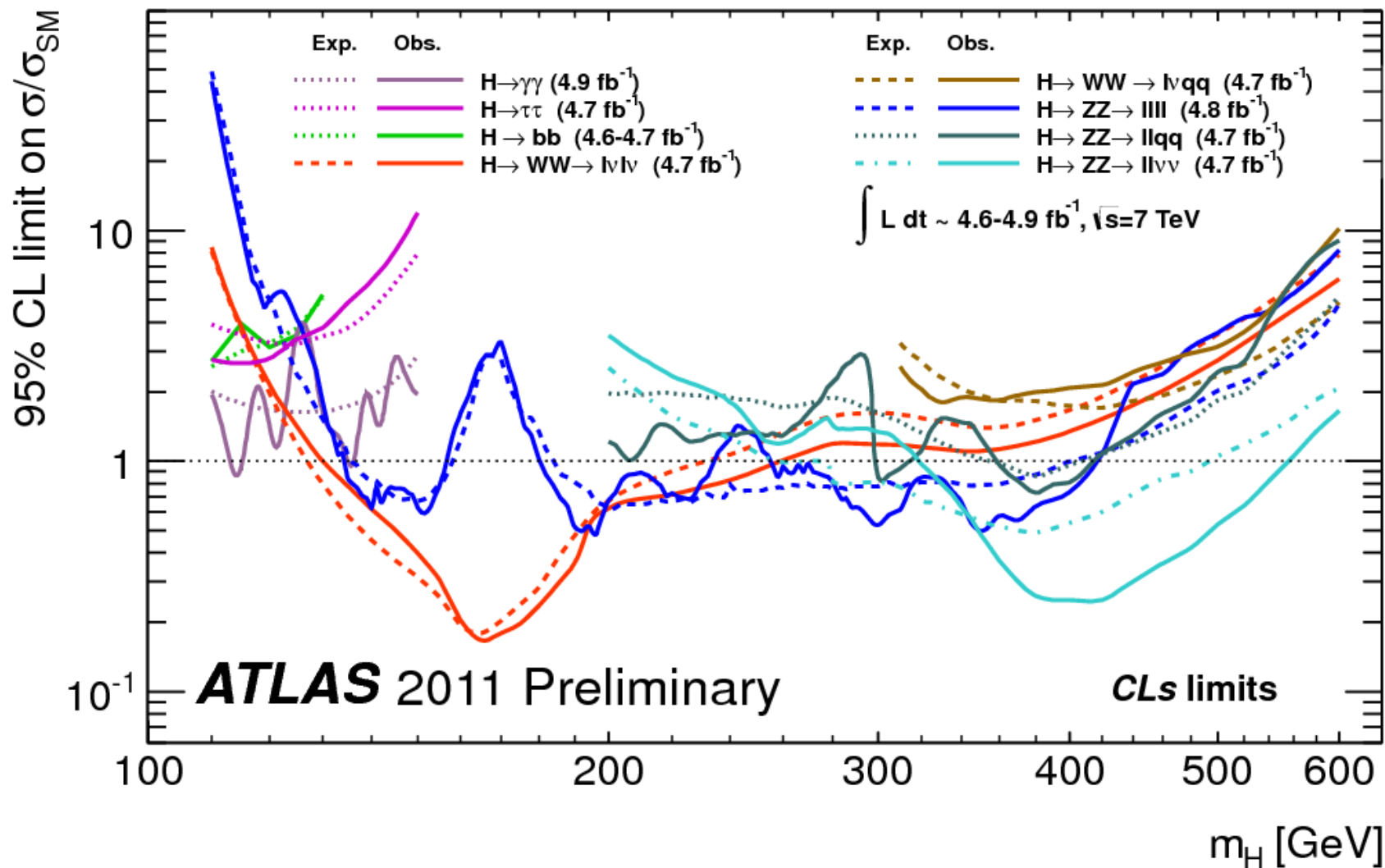
[1112.5653] [1108.3071] [1202.2751]

M. Endo, K. Hamaguchi, K. Nakayama, SI, N. Yokozaki

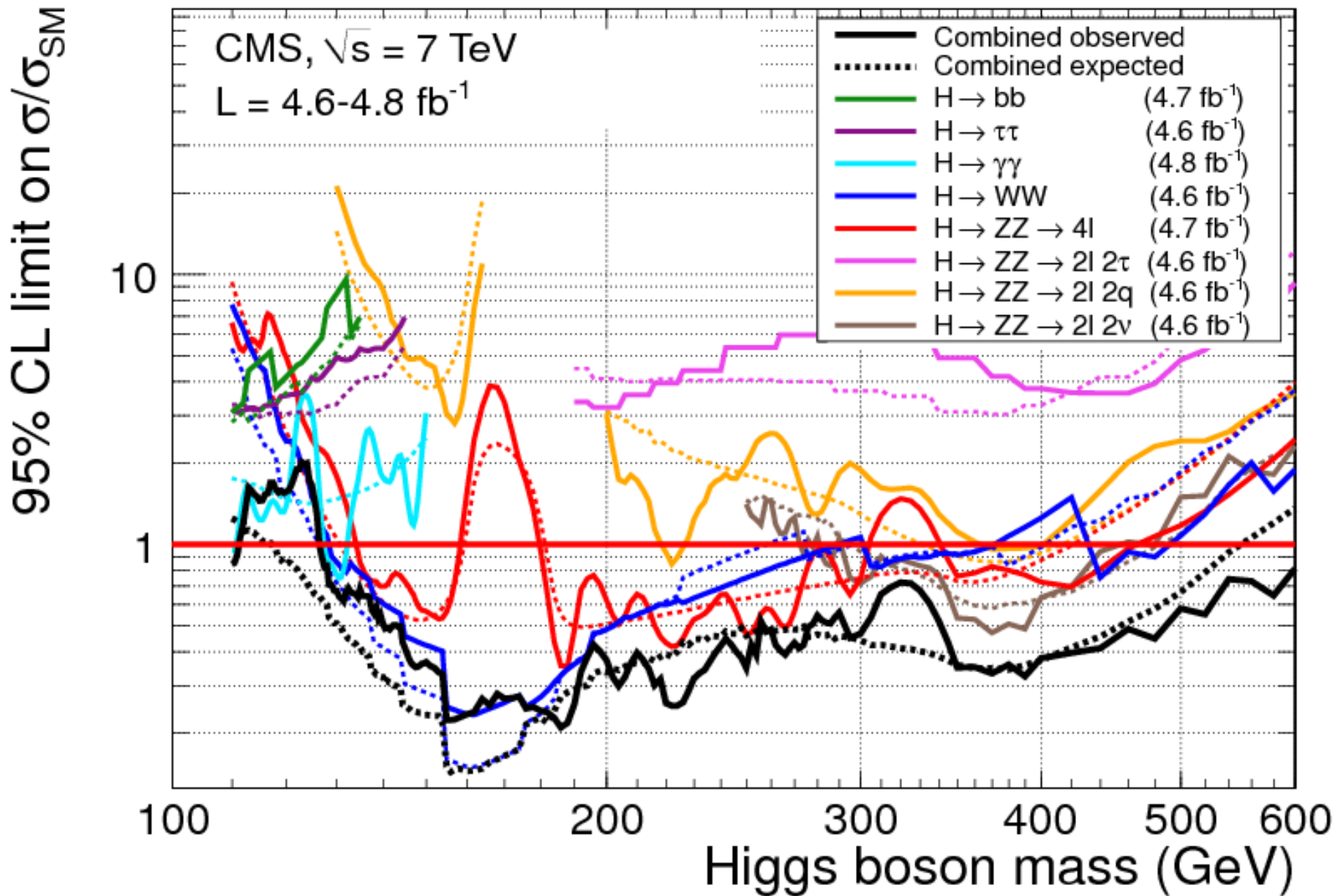
[1112.6412]

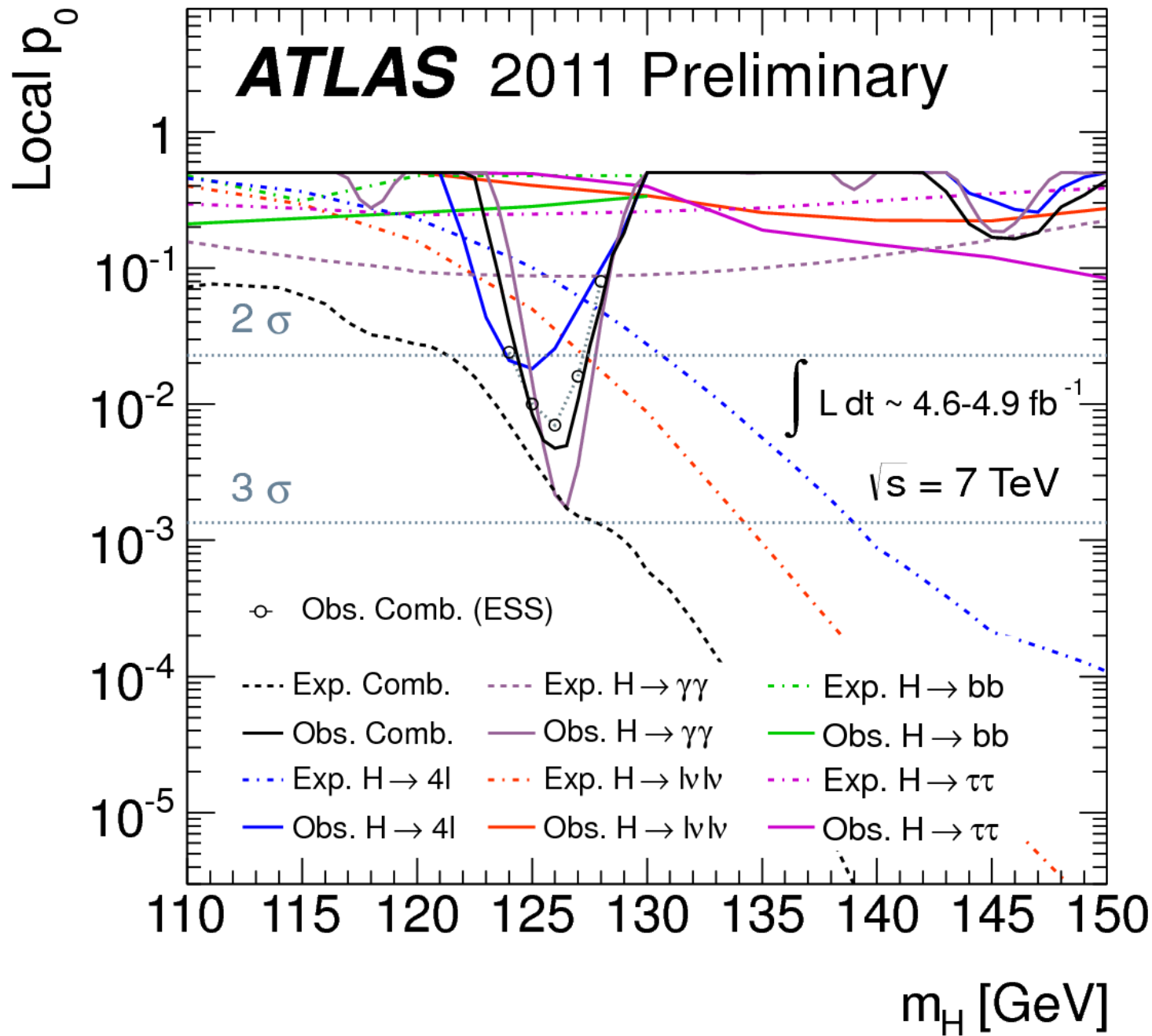
# Higgs Result for Each Channel

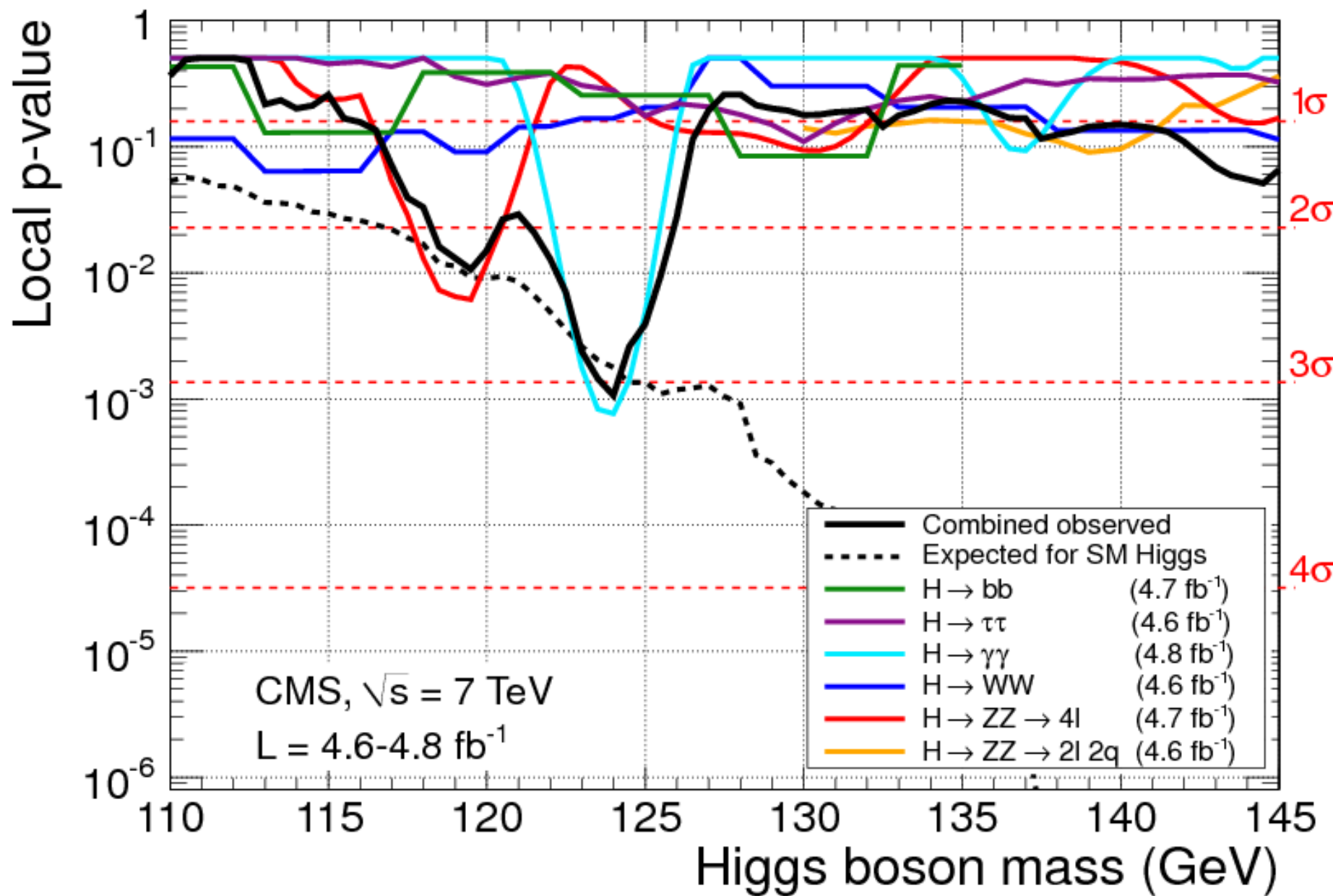
---



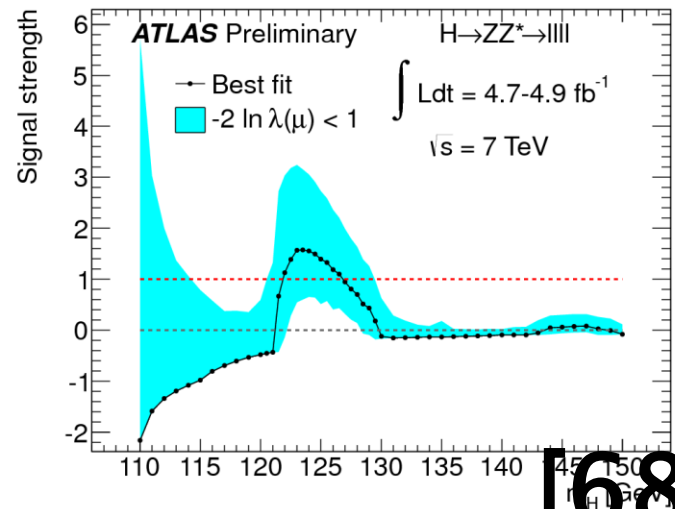
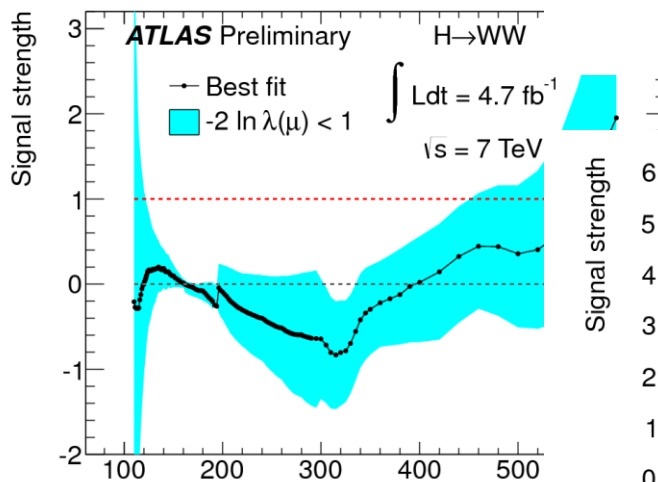
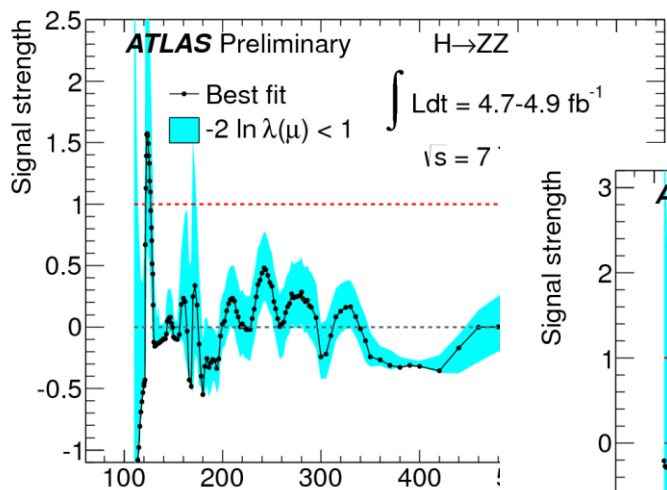
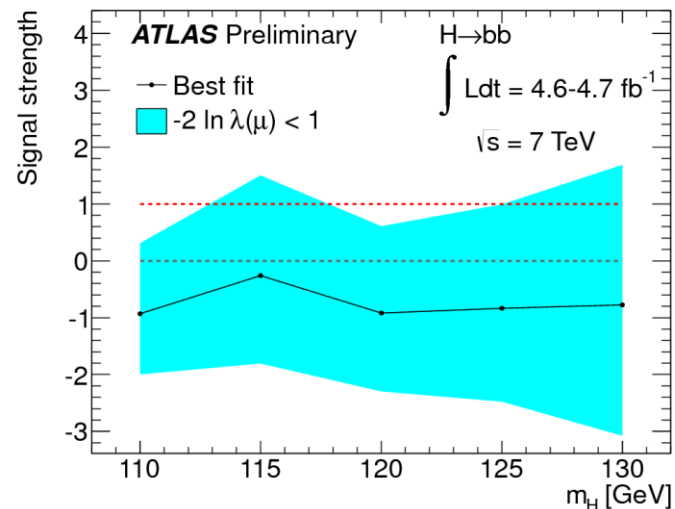
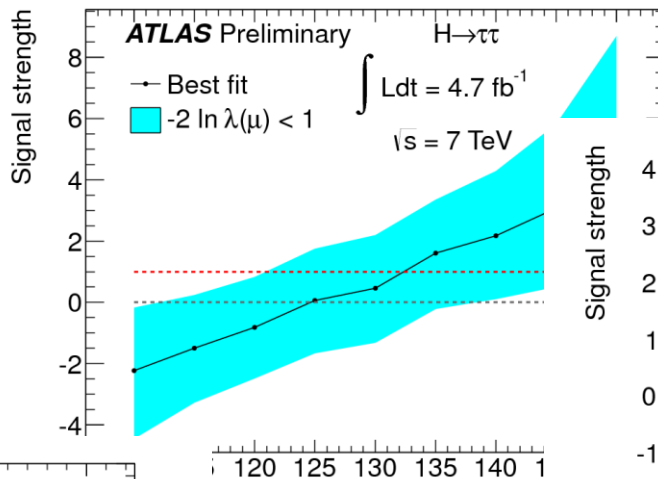
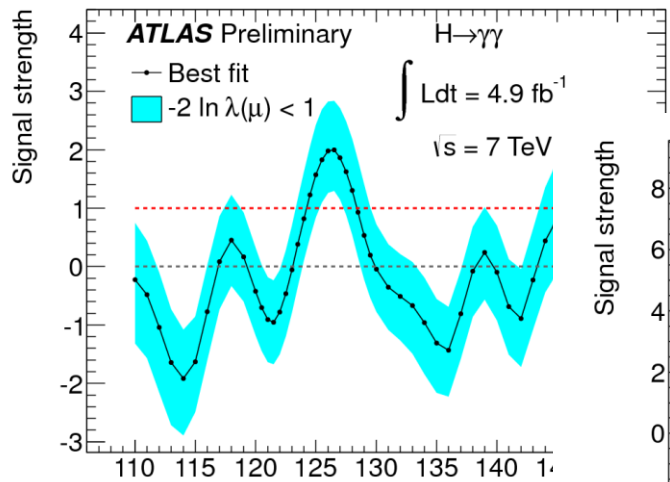


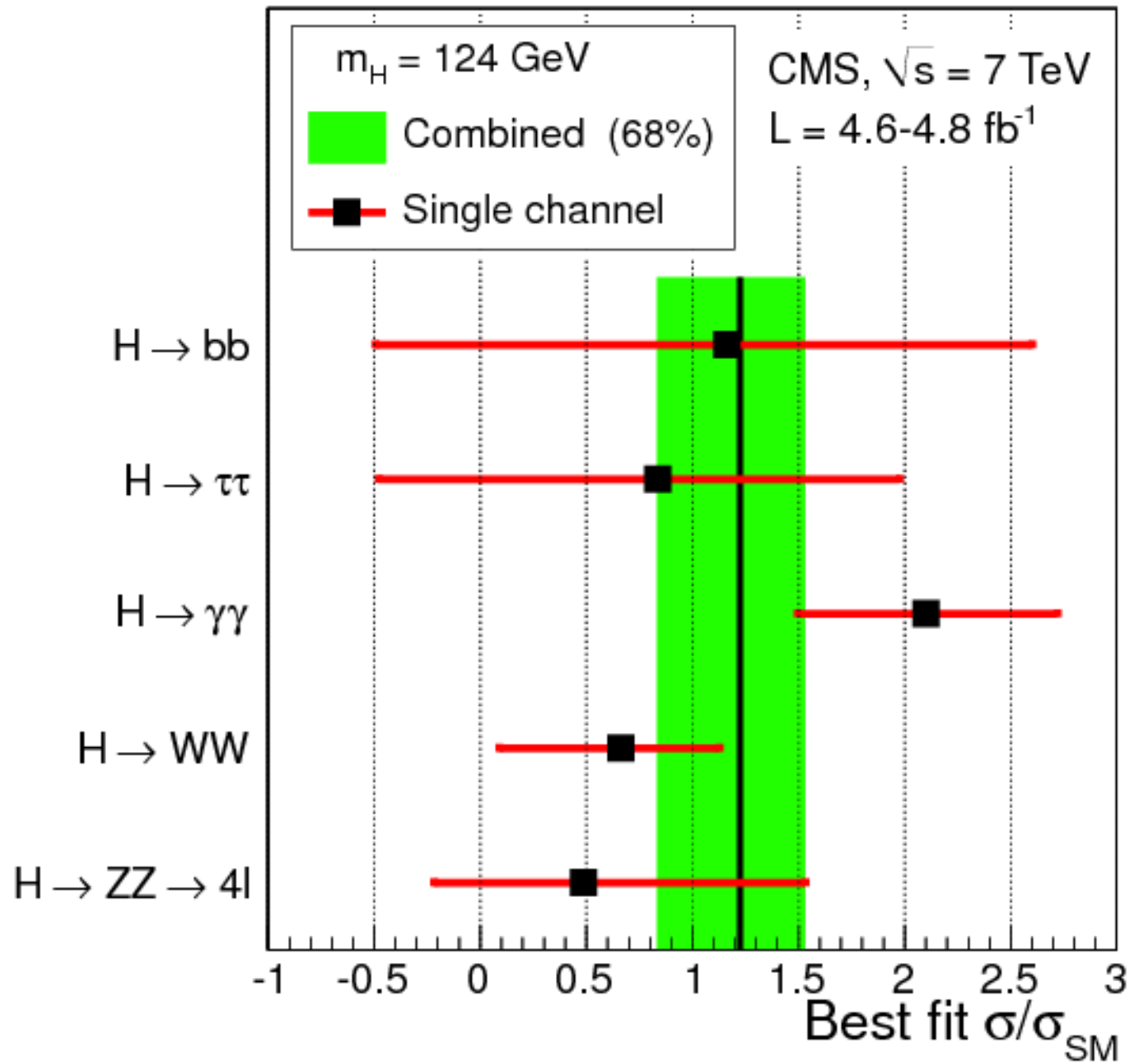






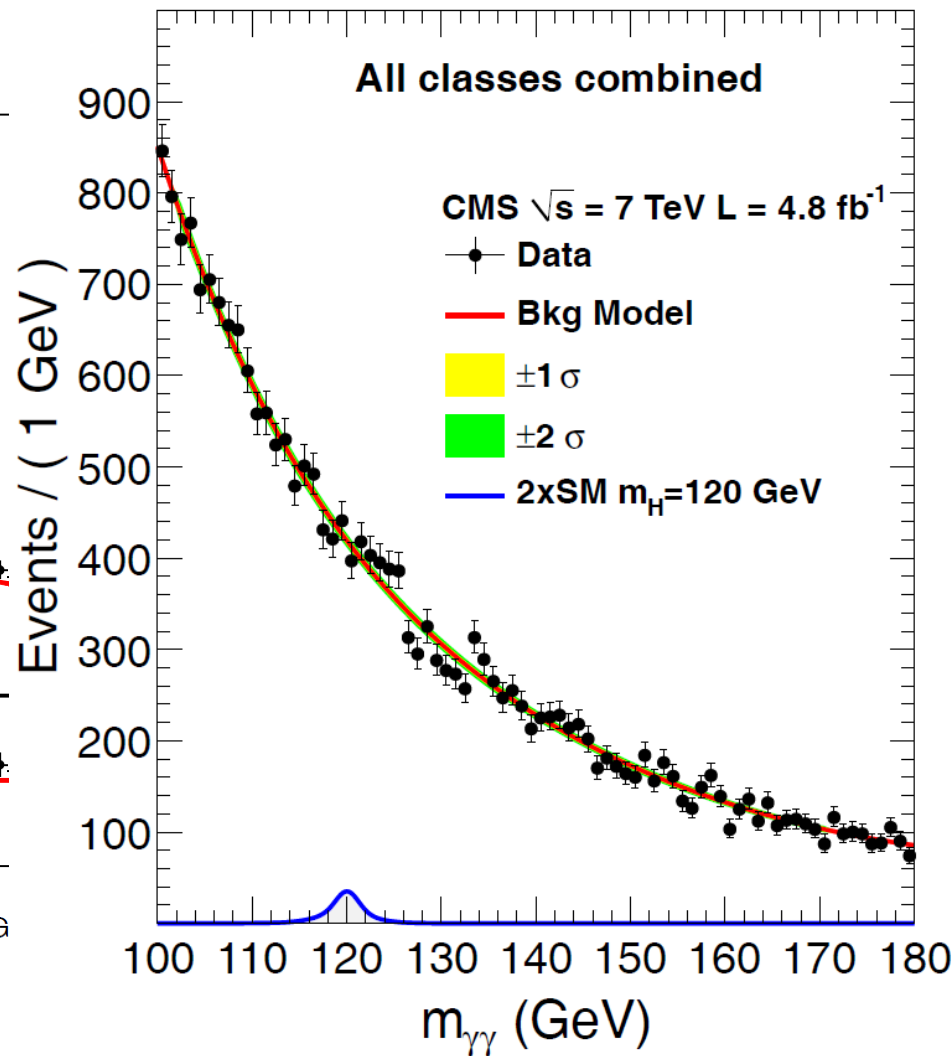
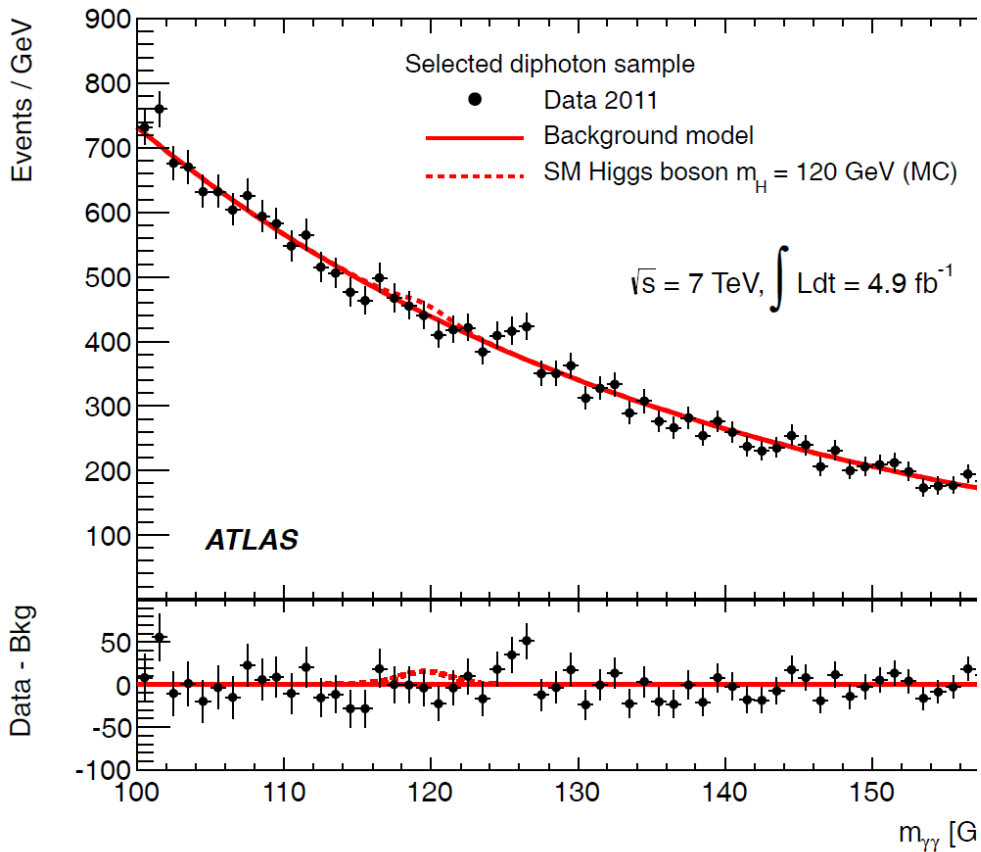
[67]

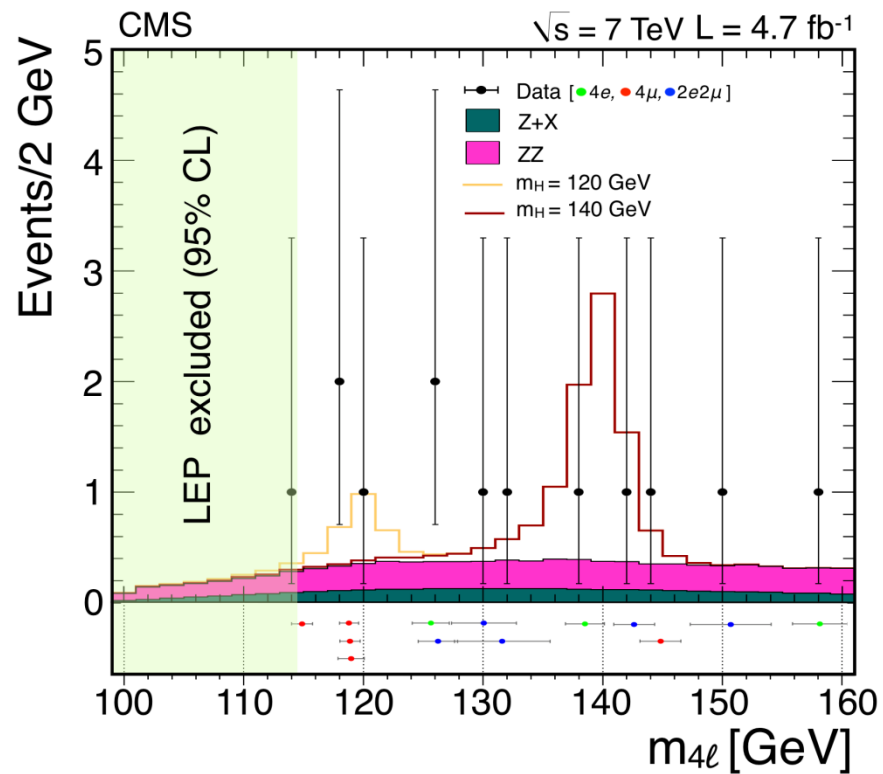
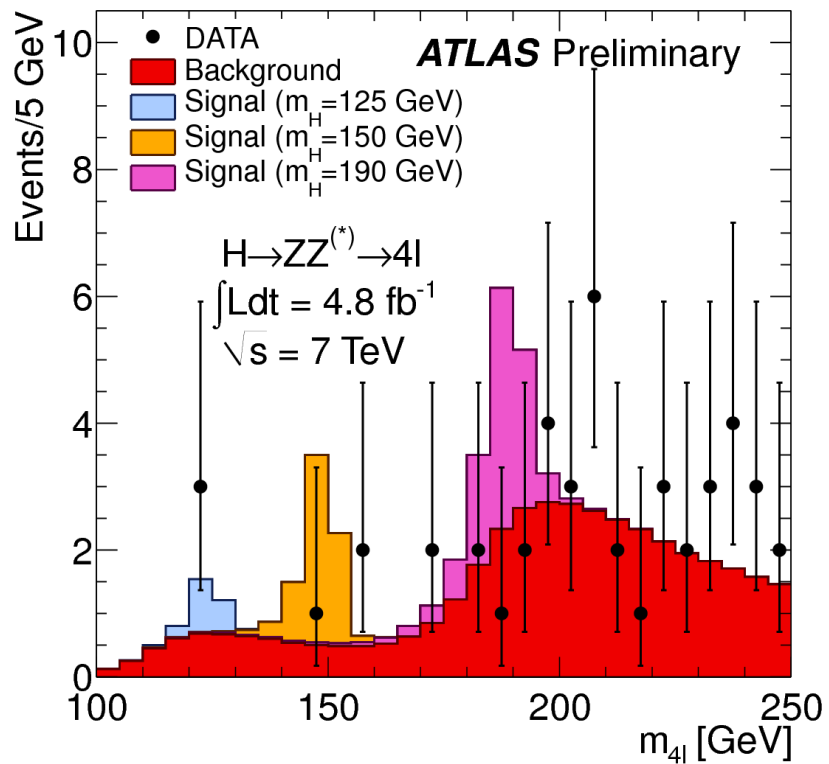




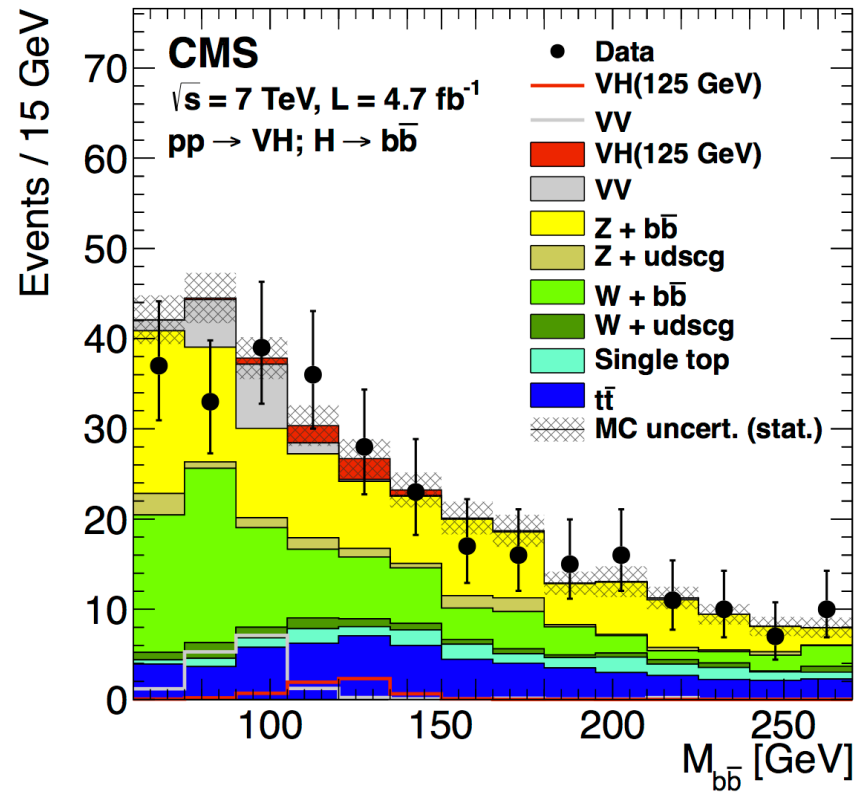
Higgs Search : Respective chs.

---









# Vector-like quark DIRECT search

---

# ◎ New “vector-like” quark

Mass

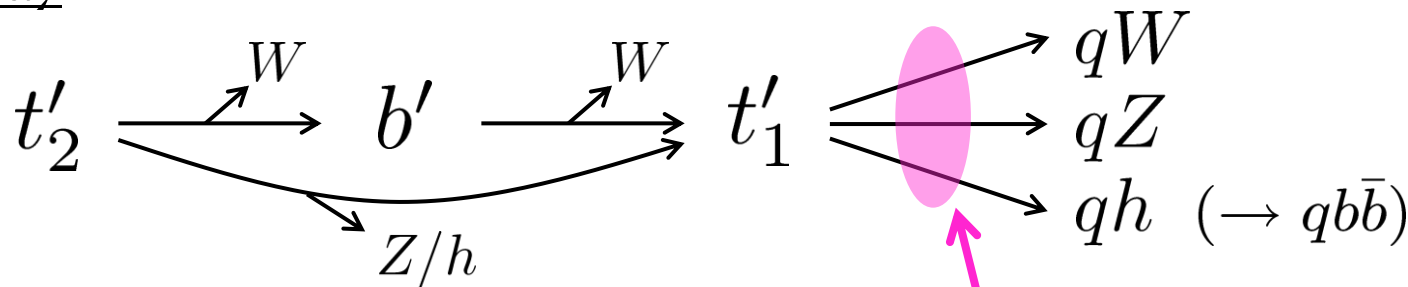
$$m_{t'} \sim M_V \pm (174 \text{ GeV}/2),$$

$$m_{b'} = M_V$$

## Production

$$pp \rightarrow t'_1 \bar{t}'_1 \text{ etc. (pair production)}$$

## Decay



$$\text{MSSM} + (\mathbf{10} + \overline{\mathbf{10}}), \text{ i.e. } \begin{cases} \mathbf{10} = (Q', U', E') \\ \overline{\mathbf{10}} = (\bar{Q}', \bar{U}', \bar{E}') \end{cases}$$

$$(t'_1, b', t'_2)$$

$$W_{\text{add}} = Y' Q' H_u U' + Y'' \bar{Q}' H_d \bar{U}'$$

$$+ M_V Q' \bar{Q}' + M_V U' \bar{U}' + M_V E' \bar{E}'$$

$$W_{\text{mix}} = \epsilon_i Q_i H_u U' + \epsilon'_i Q' H_u \bar{U}_i + \epsilon''_i Q' H_d \bar{D}_i$$

depending on mixing  
btw. vec-like/SM quark.

◎ New “vector-like” quark  $(t'_1, b', t'_2)$

Current bound

$$pp \rightarrow t'_1 \bar{t}'_1; \quad t'_1 \begin{cases} \rightarrow qW \\ \rightarrow qZ \\ \rightarrow qh \quad (\rightarrow qbb) \end{cases}$$

if it decays exclusively as

$$t'_1 \rightarrow bW \quad :: m_{t'_1} > 557 \text{ GeV} \quad \text{CMS } 5.0\text{fb}^{-1} \text{ [1203.5410]}$$

$$t'_1 \rightarrow q_d W \quad :: m_{t'_1} > 340 \text{ GeV} \quad \text{CDF } 5.6\text{fb}^{-1} \text{ [1107.3875]}$$

$$t'_1 \rightarrow tZ \quad :: m_{t'_1} > 475 \text{ GeV} \quad \text{CMS } 1.14\text{fb}^{-1} \text{ [1109.4985]}$$

$$t'_1 \rightarrow q_u Z \quad :: \text{No bound yet}$$

$$t'_1 \rightarrow th \quad :: \text{No bound yet}$$

$$t'_1 \rightarrow q_u h \quad :: \text{No bound yet}$$

} No general bound on  $t'_1$  yet because of these possibility.

$$\geq 4 \text{ } b\text{-quarks} \quad (h \rightarrow b\bar{b})$$

Interesting channel after Higgs discovery.

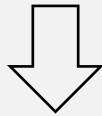
Harigaya, Matsumoto, Nojiri, Tobioka [1204.2317]

- ◎ New “vector-like” quark  $(t'_1, b', t'_2)$

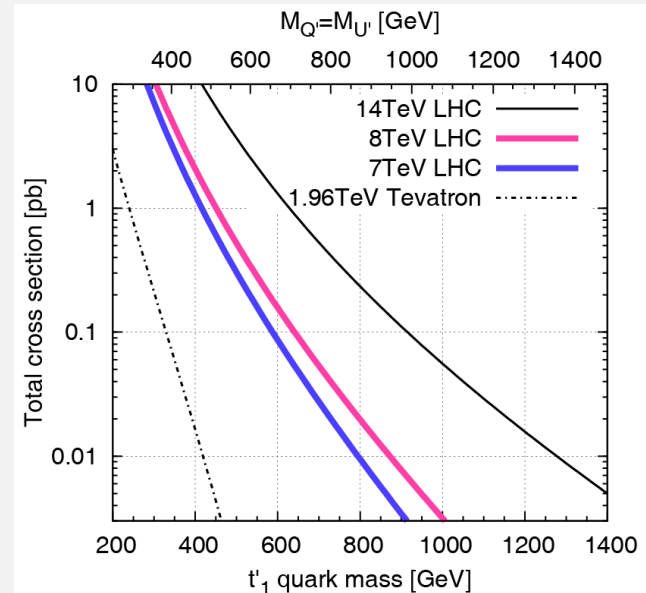
Current bound

$$pp \rightarrow t'_1 \bar{t}'_1; \quad t'_1 \begin{cases} \rightarrow qW \\ \rightarrow qZ \\ \rightarrow b\bar{b} \end{cases}$$

At LHC **8**TeV,  
production **doubles!**



More severe bounds,  
or....?



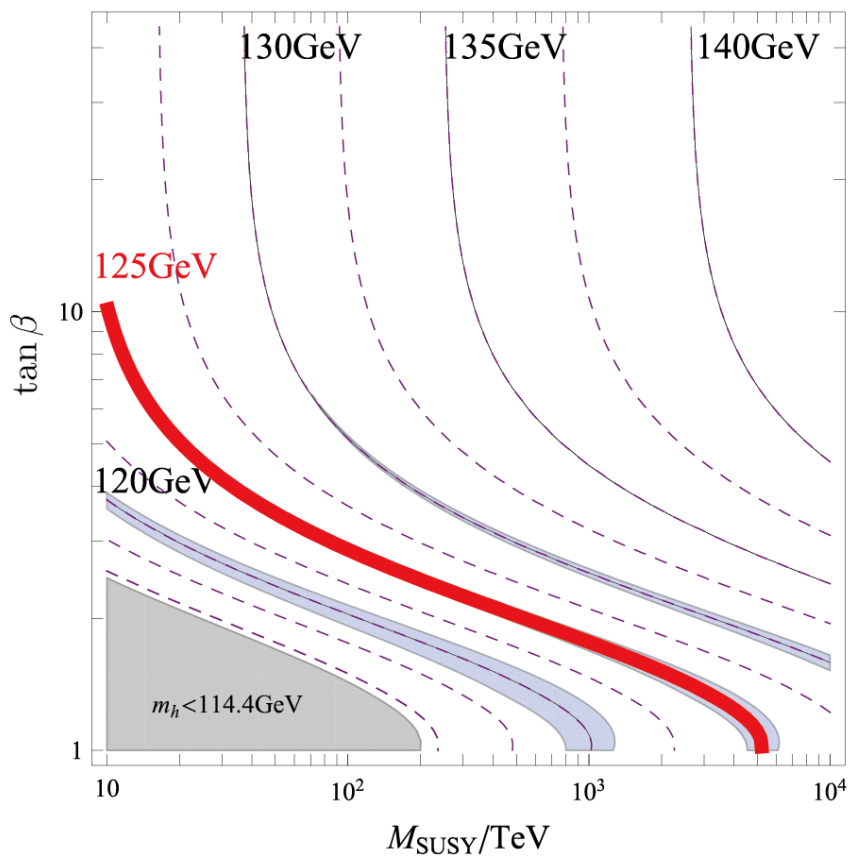
$\geq 4$   $b$ -quarks  $(h \rightarrow b\bar{b})$

Interesting channel after Higgs discovery.

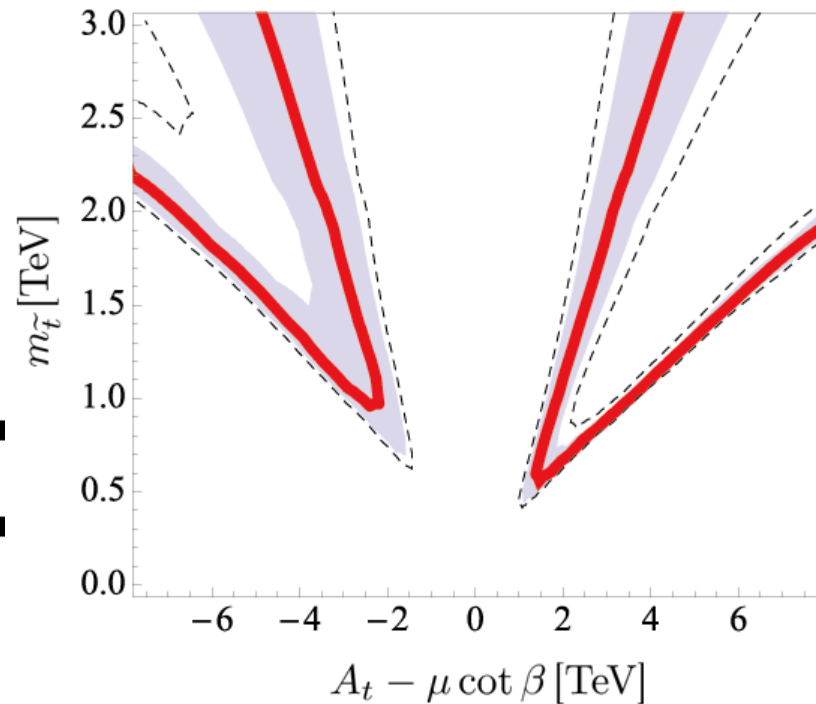
Harigaya, Matsumoto, Nojiri, Tobioka [1204.2317]

# Higgs mass in mSUGRA

---



Ibe, Yanagida [1112.2462]



Draper, Meade, Reece, Shih [1112.3068]