



MSSM with **Vector-like Quarks** can explain 126GeV Higgs.

[Sho IWAMOTO](#) (岩本 祥)

The University of Tokyo, JAPAN

6th Aug. 2012 YONUPA summer school @ Fuji-Yoshida

Based on

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

[1112.5653] [1108.3071] [1202.2751]

MSSM に Vector-like Quarks を追加すると良いことがある。

- M1～M2向け(ゲンミツでない部分も)

- スライドは web に載せます <http://www.misho-web.com>

- もっと詳しく聞きたい
→過去の研究会トーク



Based on

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

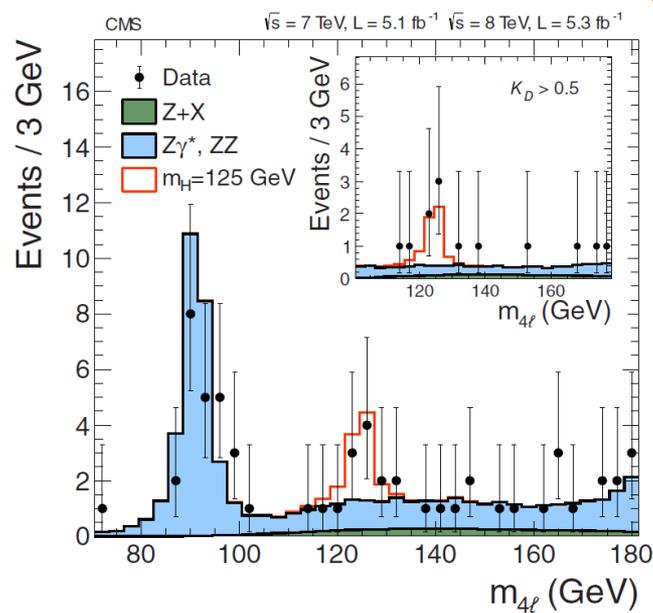
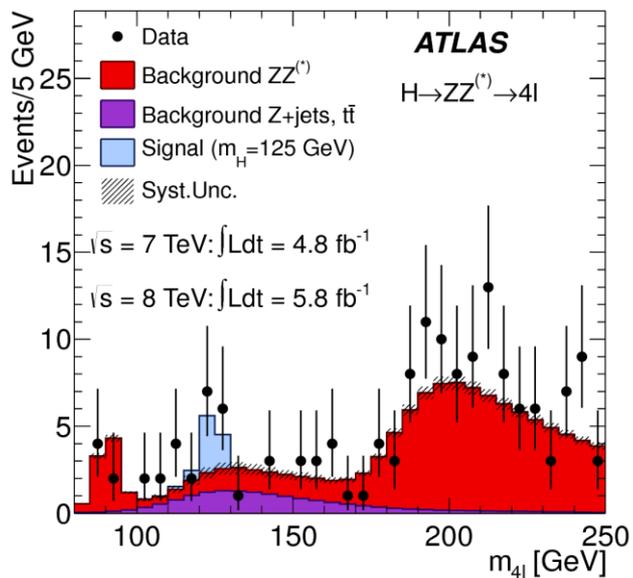
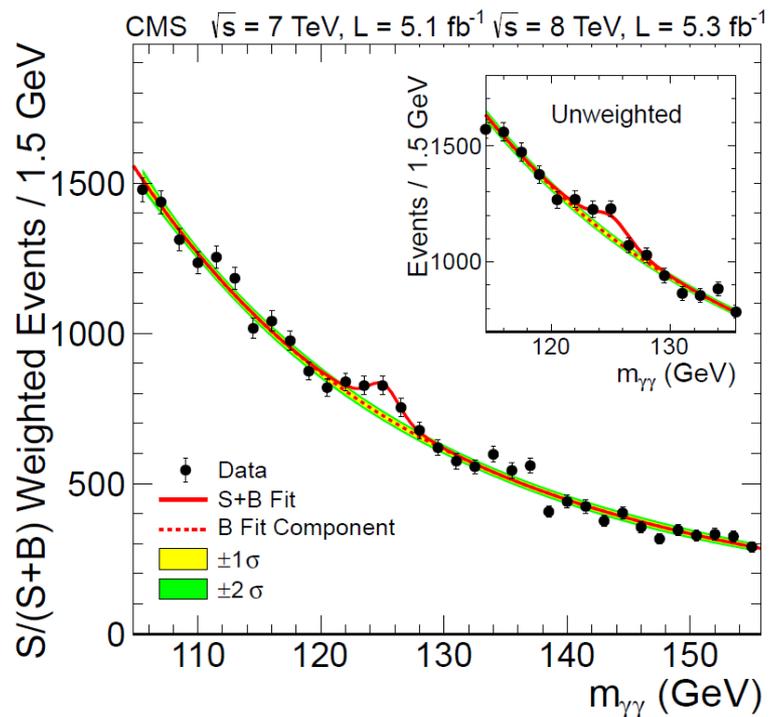
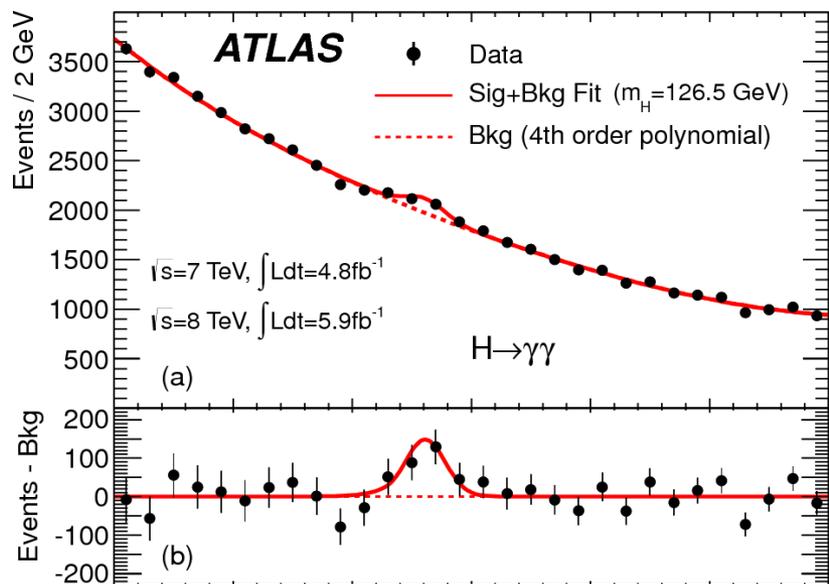
[1112.5653] [1108.3071] [1202.2751]

祝

あの粒子が

ついに

Observed



『あの粒子』

名状しがたい

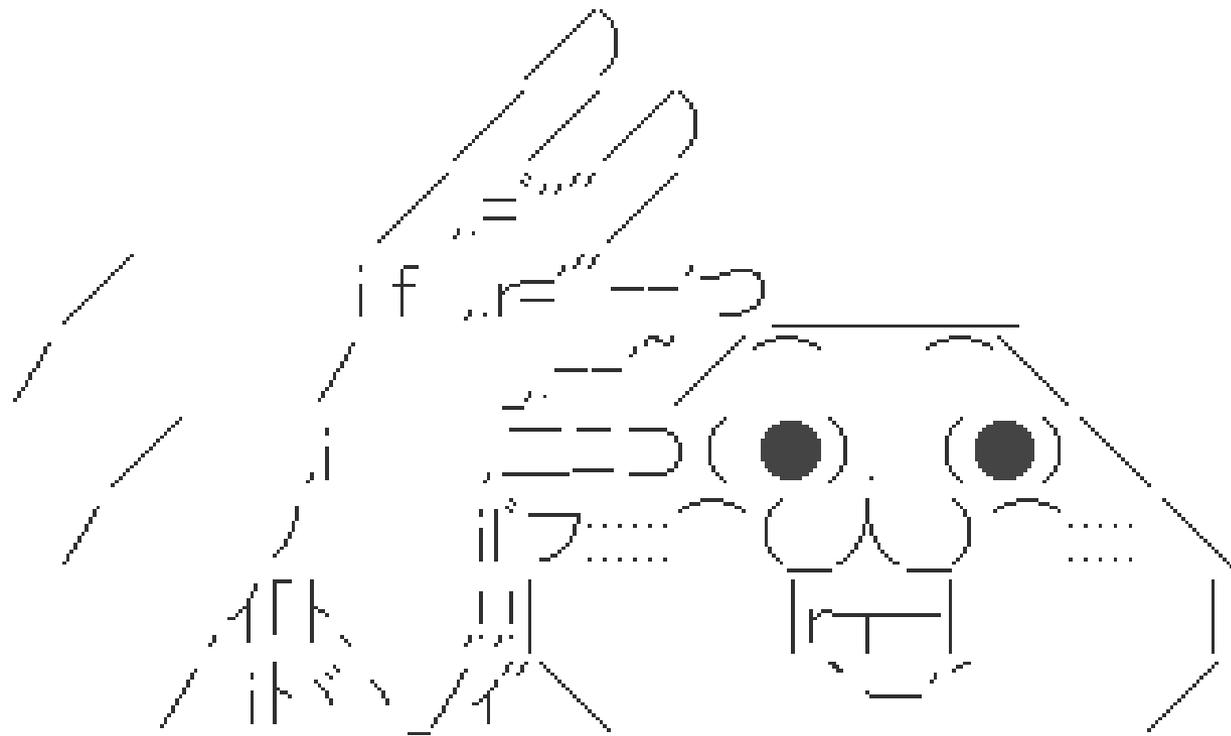
Brout-Englert-

Higgs- Guralnik- Hagen- Kibble

粒子

のようなもの

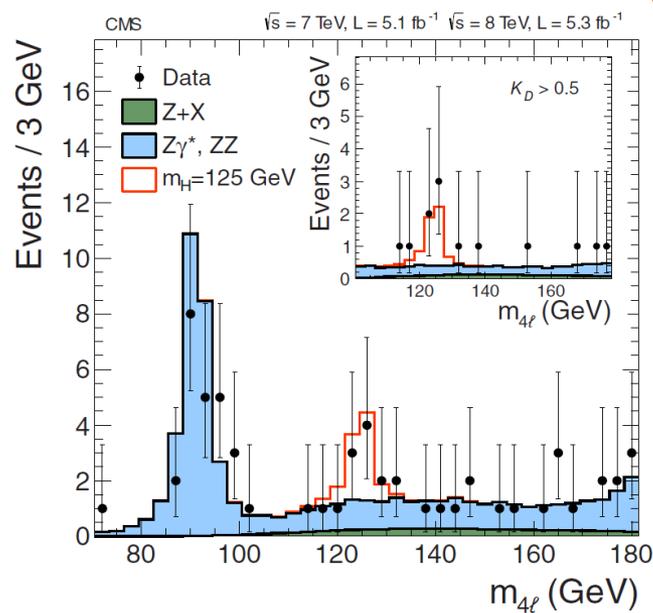
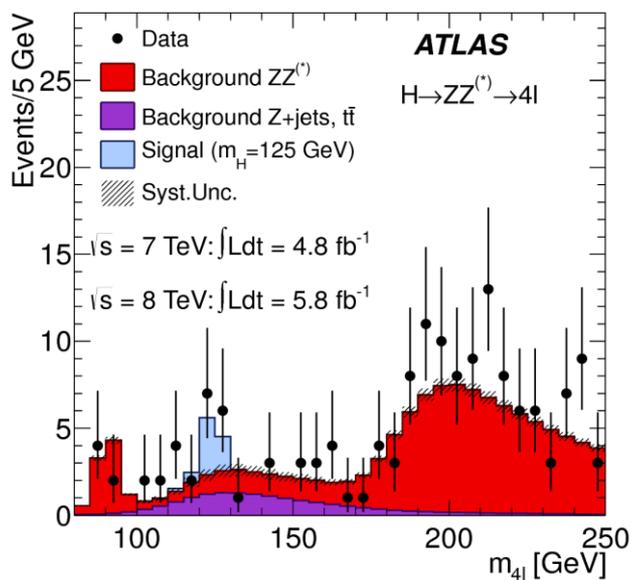
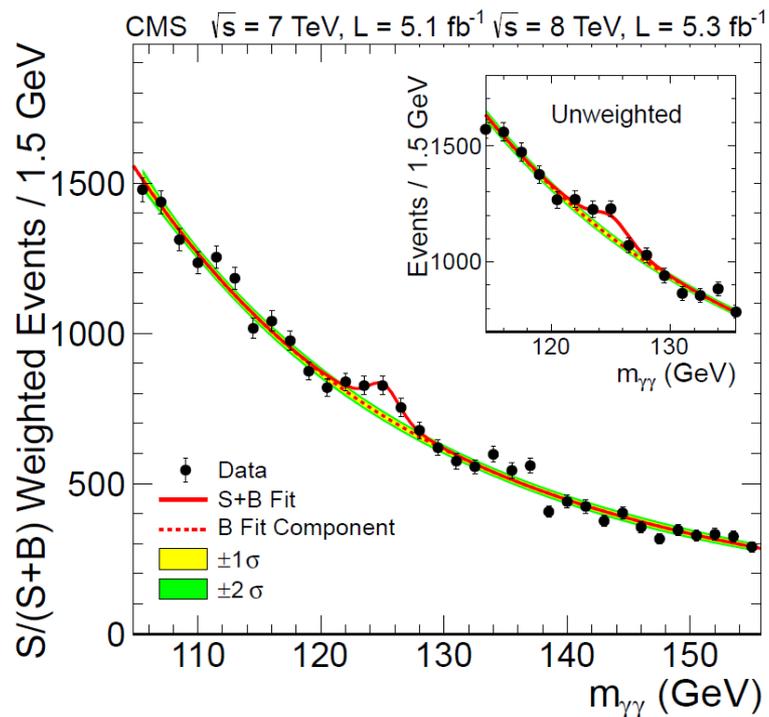
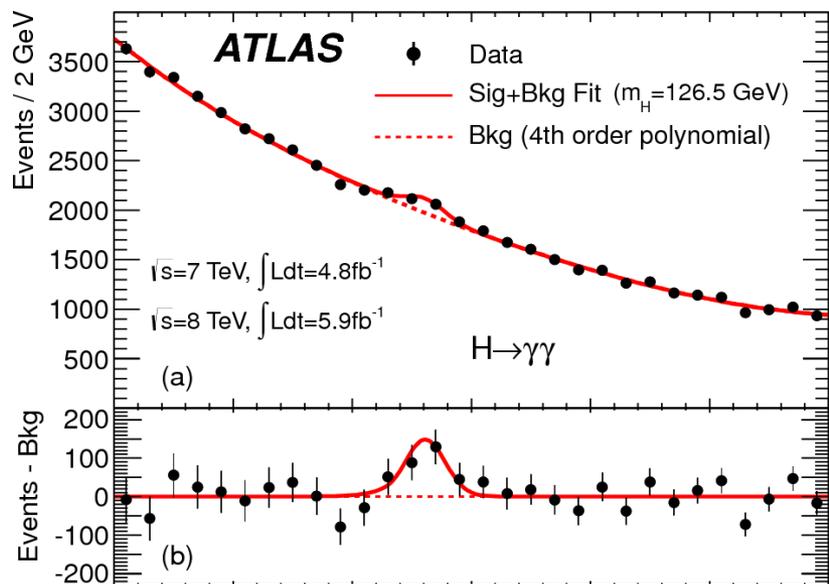
こまけえこたあいいんだよ！！！！

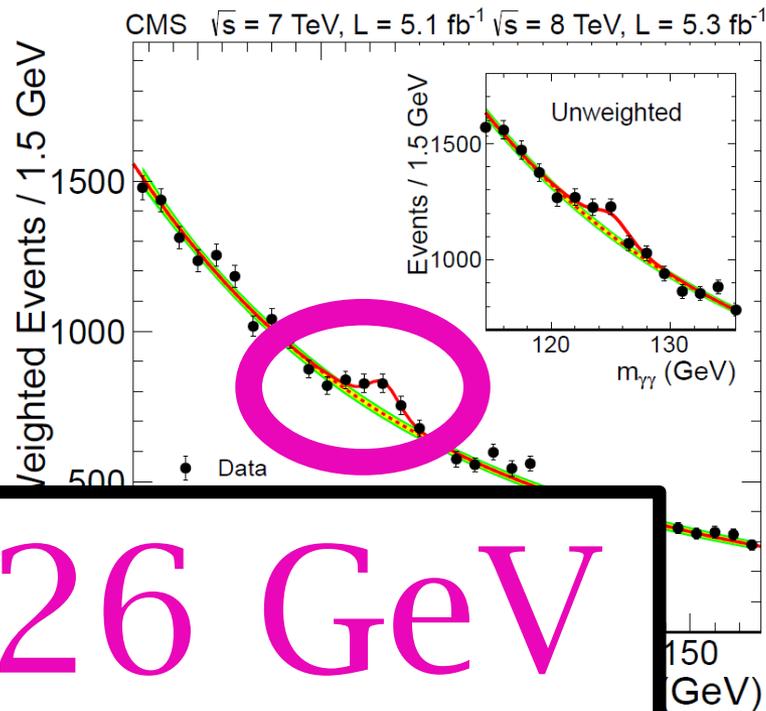
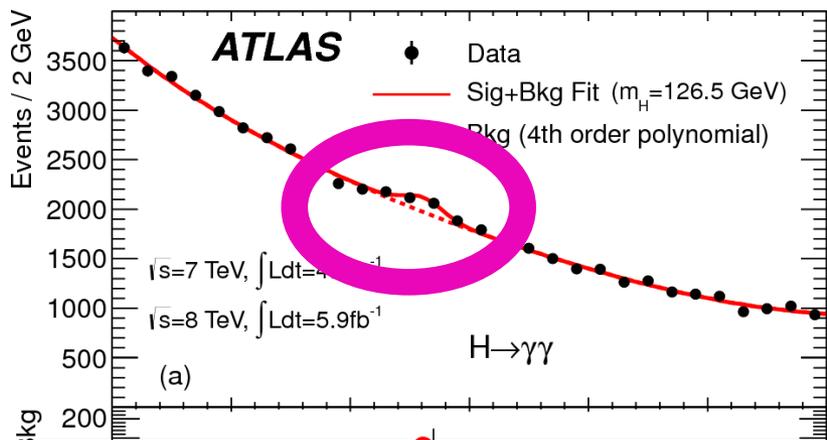


祝

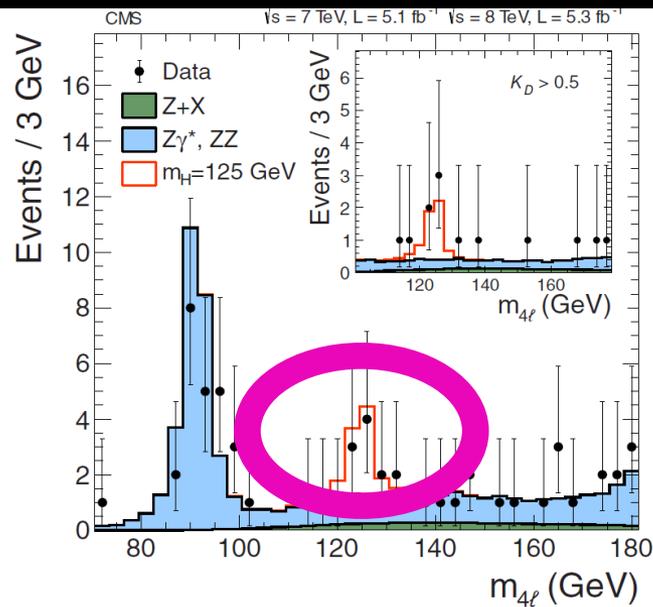
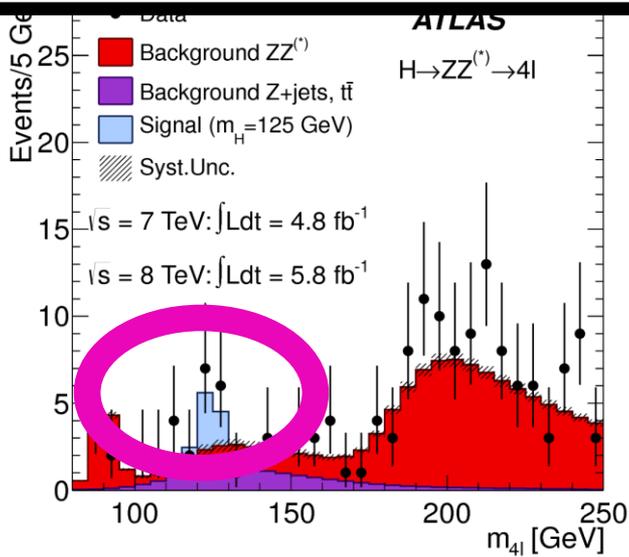
Higgs粒子

発見！！





Higgs = 126 GeV



祝

標準模型

完成！

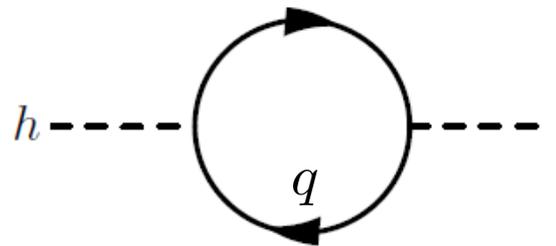
.....素粒子物理，完結？

NO!

◎ スカラー粒子 → 二次発散 → “fine-tuning” の問題

標準模型: $\mathcal{L} \ni \lambda h \bar{q} q$

$$\Lambda \sim M_{\text{planck}} \simeq 10^{18} \text{ GeV?}$$



$$\Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim -\frac{|\lambda|^2}{8\pi^2} \Lambda^2$$

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

$$(126 \text{ GeV})^2 \sim m_{\text{bare}}^2 + (10^{18} \text{ GeV})^2$$

偶然, キャンセルした?

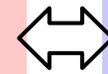
.....or 背後に**対称性**がある?

[Cf. Poster by 羽柴さん]

[Cf. 昨日の talk by 川村さん]

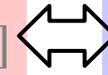
Boson—fermion

h



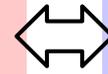
\tilde{h} [Higgsino]

\tilde{q} [squark]



q

$\tilde{\mu}$ [smu]



μ

超対称粒子！

対称性

超対称性

超対称

標準模型: $\mathcal{L} \ni \lambda h \bar{q} q - \lambda^2 |h|^2 |\tilde{q}|^2$

A Feynman diagram showing a loop of quarks (q) with external Higgs lines (h). The loop is a solid circle with arrows indicating the direction of the quark flow. Two dashed lines labeled h enter and exit the loop.

$$\Rightarrow \Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim -\frac{|\lambda|^2}{8\pi^2} \Lambda^2$$

A Feynman diagram showing a loop of squarks (\tilde{q}) with external Higgs lines (h). The loop is a dashed circle with arrows indicating the direction of the squark flow. Two dashed lines labeled h enter and exit the loop.

$$\Rightarrow \Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim +\frac{|\lambda|^2}{16\pi^2} \Lambda^2 \times 2$$

h **2次発散がキャンセル**

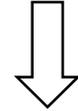
→ チューニングがマイルドになる

※ 小さなチューニングは残る

→ 昨日の talk by 川村さん

標準模型

◎ Higgs 粒子の発見 「スカラー粒子」 126 GeV



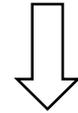
◎ Fine-tuning 問題 ← 二次発散

超対称標準模型 [MSSM]

◎ Fine-tuning 問題を解決

標準模型

◎ Higgs 粒子の発見 「スカラー粒子」 126 GeV



◎ Fine-tuning 問題 ← 二次発散

超対称標準模型 [MSSM]

- ◎ Fine-tuning 問題を解決
- ◎ ゲージ相互作用を大統一に導く
- ◎ $(g - 2)_\mu$ のズレを説明
- ◎ 暗黒物質を説明

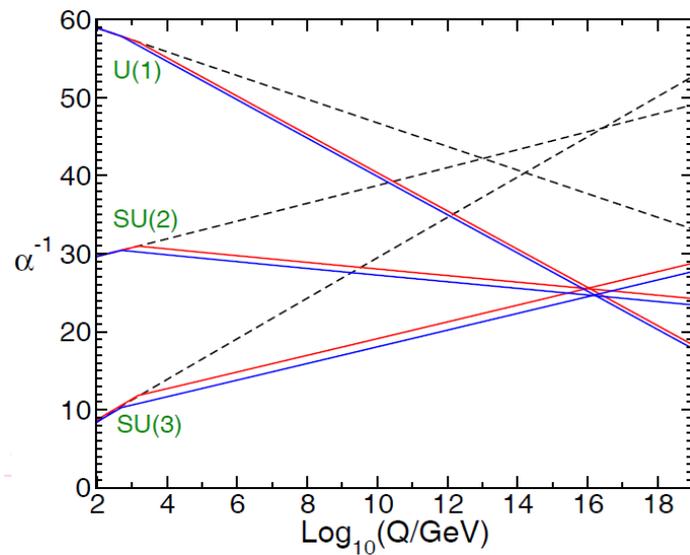
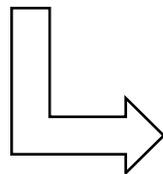
なぜ SUSY を考えるのか

MSSM (超対称標準模型)

- ◎ Fine-tuning 問題を解決
- ◎ ゲージ相互作用を大統一に導く
- ◎ $(g - 2)_\mu$ のズレを説明
- ◎ 暗黒物質を説明
- ◎ 120 GeV ぐらいの Higgs 粒子を予言する。

MSSM (超対称標準模型)

- ◎ Fine-tuning 問題を解決
- ◎ ゲージ相互作用を大統一に導く
- ◎ $(g - 2)_\mu$ のズレを説明
- ◎ 暗黒物質を説明
- ◎ 120 GeV ぐらいの Higgs 粒子を



“R-parity” “最も軽い超対称粒子 (LSP)”

MSSM (超対称標準模型)

- ◎ Fine-tuning 問題を解決
- ◎ ゲージ相互作用を大統一に導く
- ◎ $(g - 2)_\mu$ のズレを説明
- ◎ 暗黒物質を説明
- ◎ 120 GeV ぐらいの Higgs 粒子を予言する。

μ 粒子の異常磁気モーメント $(g - 2)_\mu$

$$\vec{\mu} = -\frac{g_{\mu}|e|\hbar}{2m_{\mu}} \vec{S}$$

\vec{S} : Spin 角運動量

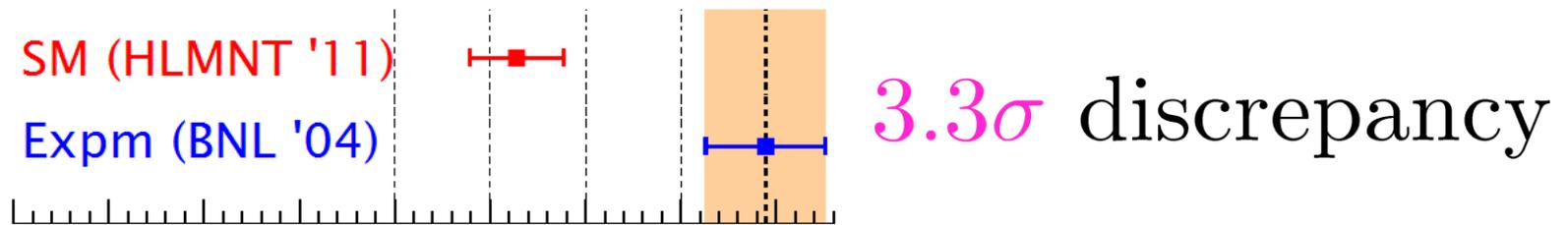
$\vec{\mu}$: Spin magnetic moment

Quantum Mechanics : $g_{\mu} = 2$

QED (1-loop) : $g_{\mu} = 2.0023$ (Peskin Sec.6.3 etc.)

SM expected value : $g_{\mu} - 2 = 0.00233183656 \pm 0.000000000098$

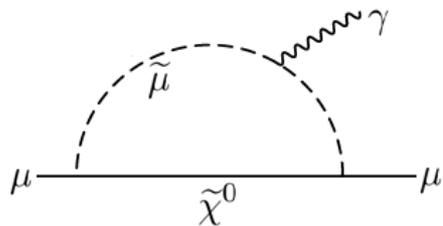
Experimental result : $g_{\mu} - 2 = 0.00233184178 \pm 0.000000000126$



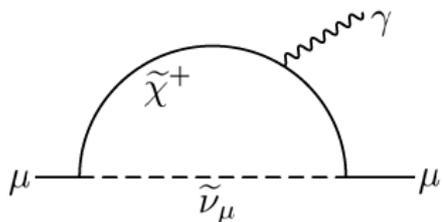
Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner [1105.3149]

◎ SUSY はこのズレを説明できる！

$m_{s.p.}$: loopを回る SUSY 粒子の質量



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



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

SM expected value
Experimental result

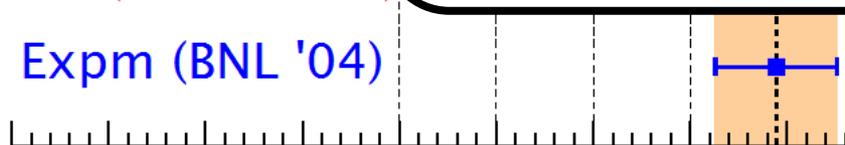
ただし SUSY 粒子の質量が

$$m_{s.p.} \sim O(100 \text{ GeV})$$

でなければならない。

SM (HLMNT '11)

Expm (BNL '04)



3.3σ discrepancy

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

MSSM (超対称標準模型)

- ◎ Fine-tuning 問題を解決
- ◎ ゲージ相互作用を大統一に導く
- ◎ $(g - 2)_\mu$ のズレを説明
- ◎ 暗黒物質を説明
- ◎ 120 GeV ぐらいの Higgs 粒子を予言する。

Higgs 粒子の質量 in MSSM

◎ Higgs mass :

➤ 標準模型

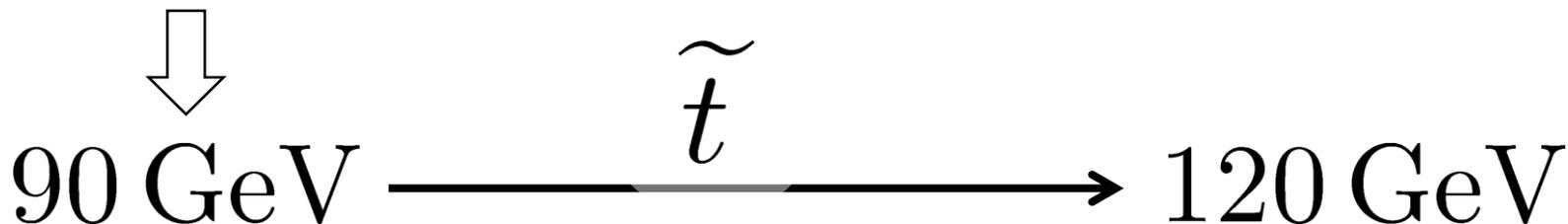
→ Lagrangian の中の parameter $V = \frac{\lambda}{2}|H|^4 - \frac{m_h^2}{2}|H|^2$

➤ 超対称標準模型

→ scalar-top の質量 $m_{\tilde{t}}$ や, top A-term A_t などから決まる

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

tree level
1-loop level



◎ Higgs mass :

➤ 標準模型

→ Lagrangian の中の parameter $V = \frac{\lambda}{2}|H|^4 - \frac{m_h^2}{2}|H|^2$

➤ 超対称標準模型

→ scalar-top の

SUSY 粒子の質量が

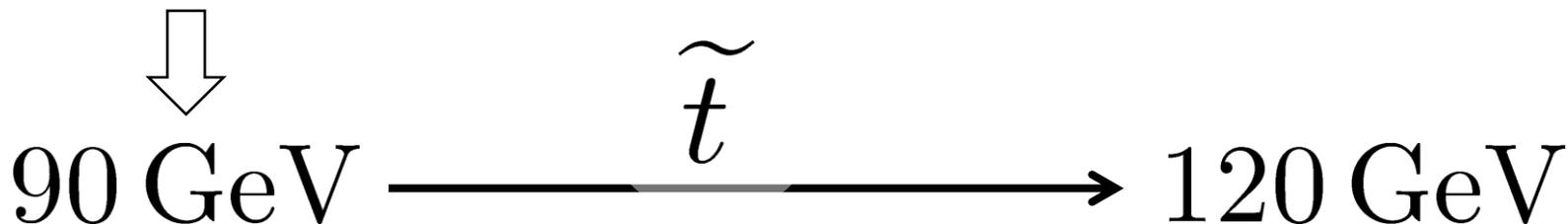
$$m_{s.p.} \sim O(1 - 10 \text{ TeV})$$

でなければならない。

$$m_h^2 \approx m_Z^2 + \frac{3g_W^2 m_t^2}{8\pi^2 m_{\tilde{W}}^2}$$

tree level

1-loop level

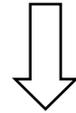


MSSM (超対称標準模型)

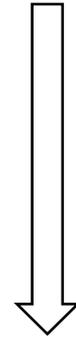
- ◎ Fine-tuning 問題を解決
- ◎ ゲージ相互作用を大統一に導く
- ◎ $(g - 2)_\mu$ のズレを説明
- ◎ 暗黒物質を説明
- ◎ 120 GeV ぐらいの Higgs 粒子を予言する。

標準模型

◎ Higgs 粒子の発見 「スカラー粒子」 126GeV



◎ Fine-tuning 問題 ← 二次発散



超対称標準模型 [MSSM]

SUSY 粒子は重いはず。

◎ Fine-tuning 問題を解決

◎ ゲージ相互作用を大統一に導く

◎ $(g - 2)_\mu$ を説明 (※ただし SUSY 粒子が軽い時に限る)

◎ 暗黒物質を説明



- ◎ 126 GeV Higgs 発見 \Rightarrow SUSY 粒子は**重い**? $m_{\tilde{t}} \sim O(1 - 10 \text{ TeV})$
- ◎ $(g - 2)_\mu$ を説明したい \Rightarrow **軽い** SUSY 粒子を望む。 $O(100 \text{ GeV})$

SUSY 粒子が軽い場合

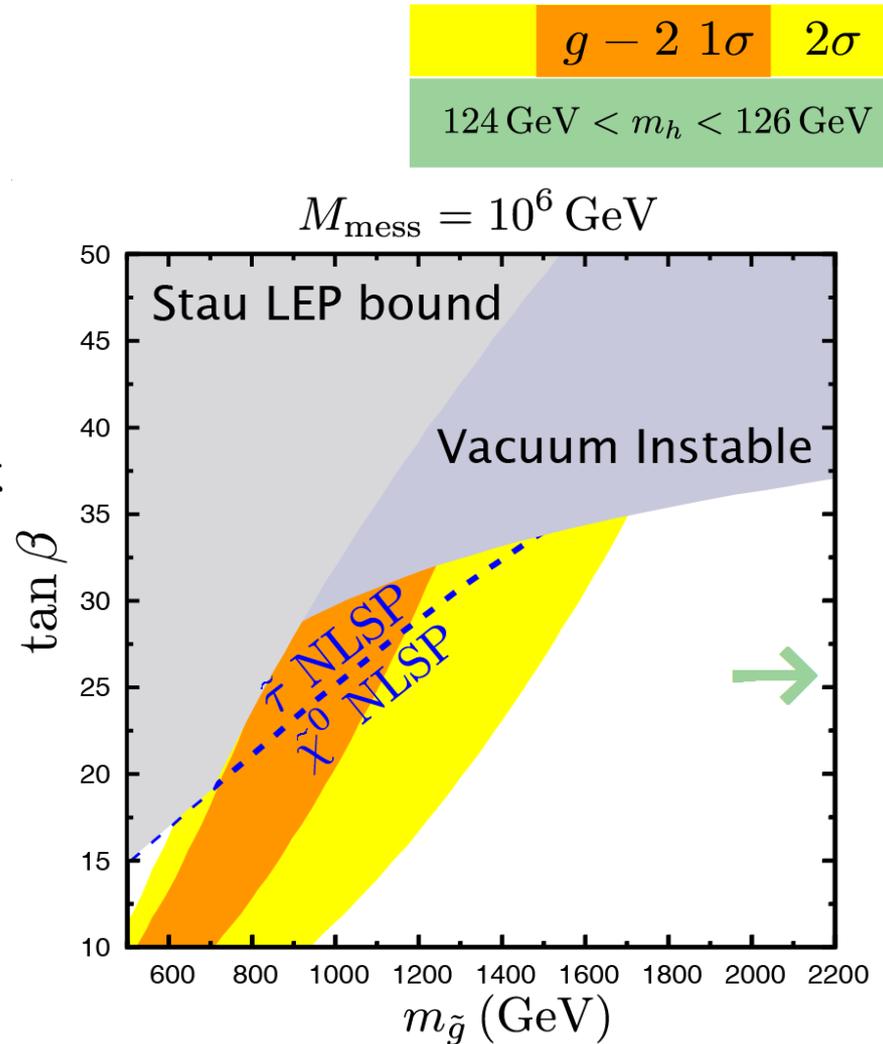
- ◎ $(g - 2)_\mu$ を説明できる! 😊
- ◎ Higgs を持ち上げきれない。😡

- ◎ 126 GeV Higgs 発見 \Rightarrow SUSY 粒子は**重い**? $m_{\tilde{t}} \sim O(1 - 10 \text{ TeV})$
- ◎ $(g - 2)_\mu$ を説明したい \Rightarrow **軽い** SUSY 粒子を望む。 $O(100 \text{ GeV})$

SUSY 粒子が軽い場合

- ◎ $(g - 2)_\mu$ を説明できる! 😊
- ◎ Higgs を持ち上げきれない。😞

実際, もっとも **simple** な “GMSB 模型” では
(Gauge-Mediated SUSY Breaking)



- ◎ 126 GeV Higgs 発見 \Rightarrow SUSY 粒子は**重い**? $m_{\tilde{t}} \sim O(1 - 10 \text{ TeV})$
- ◎ $(g - 2)_\mu$ を説明したい \Rightarrow **軽い** SUSY 粒子を望む。 $O(100 \text{ GeV})$

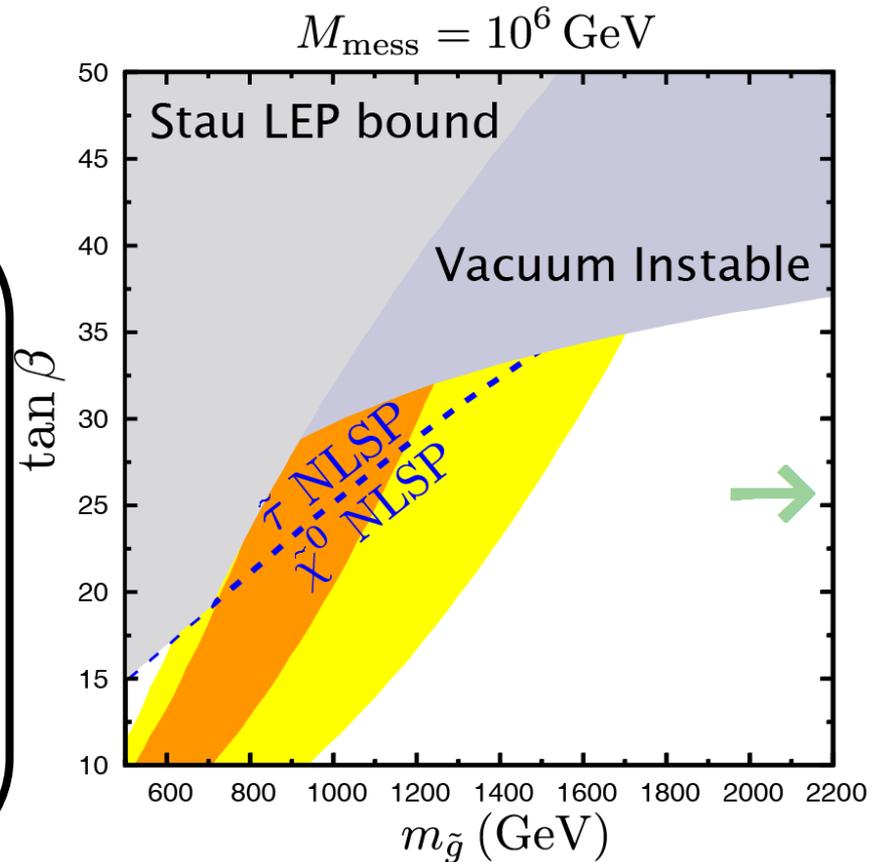
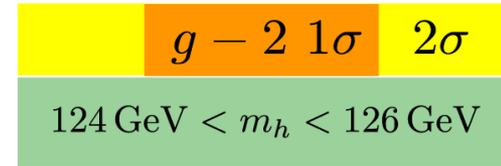
SUSY 粒子が軽い場合

- ◎ $(g - 2)_\mu$ を説明できる! 😊
- ◎ Higgs を持ち上げきれない。😞

◎ 本当は $(g - 2)_\mu$ はズレてない、
と信じる (理論式の誤差評価を疑う)。

◎ MSSM の SUSY parameter を
調節して、両方を実現する。

◎ MSSM に粒子を追加して、
両方を実現する。



MSSM に Vector-like 粒子を追加し
g-2 と 126GeV を同時に説明する

- ◎ 126 GeV Higgs 発見 \Rightarrow SUSY 粒子は**重い**? $m_{\tilde{t}} \sim O(1 - 10 \text{ TeV})$
- ◎ $(g - 2)_\mu$ を説明したい \Rightarrow **軽い** SUSY 粒子を望む。 $O(100 \text{ GeV})$

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

SUSY 粒子が軽い場合

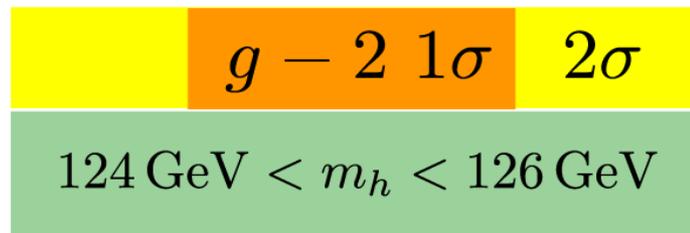
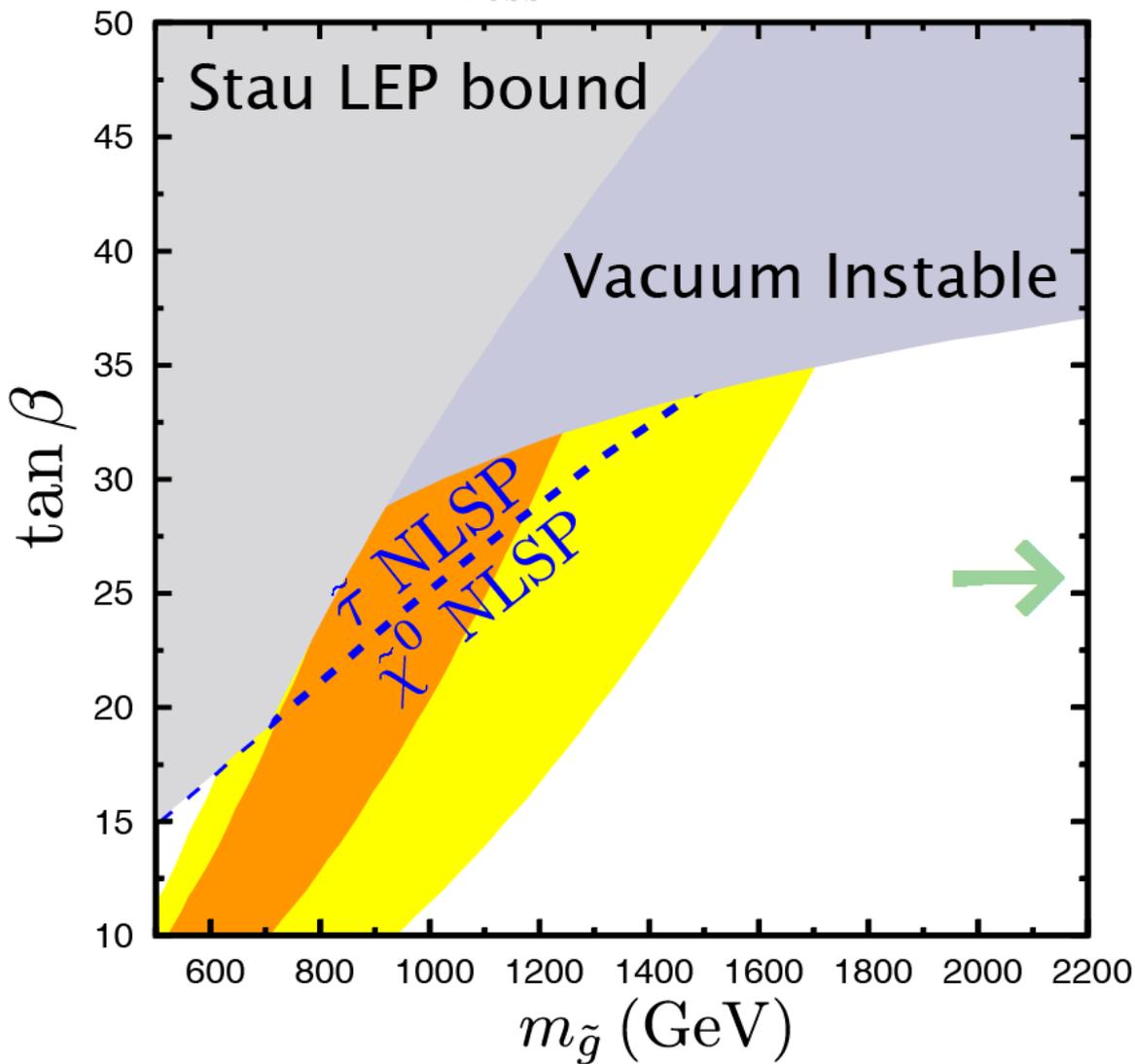
- ◎ $(g - 2)_\mu$ を説明できる! 😊
- ◎ $t-\tilde{t}$ pair だけでは Higgs を持ち上げきれない。

\Rightarrow **もう1つ追加!**
 $(t'-\tilde{t}' \text{ pair})$

- ◎ 本当は $(g - 2)_\mu$ はズレてない、
と信じる (理論式の誤差評価を疑う)。
- ◎ MSSM の SUSY parameter を
調節して、両方を実現する。
- ◎ MSSM に粒子を追加して、
両方を実現する。 

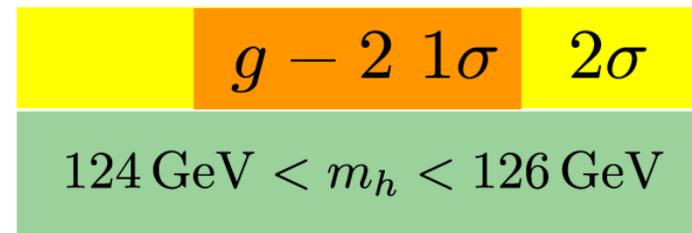
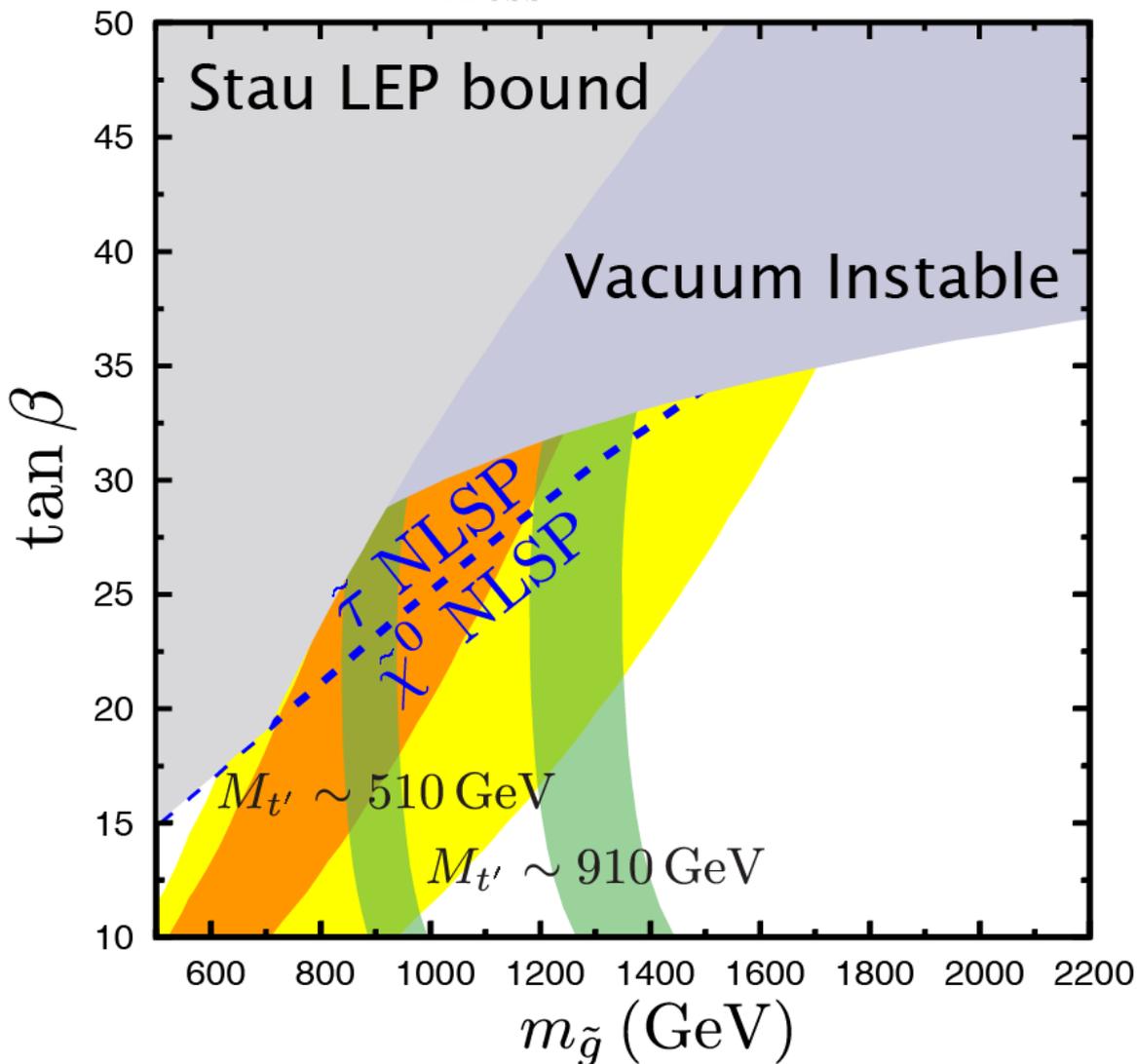
GMSB without vector-like matters (t' and \bar{t}')

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



GMSB with vector-like matters (t' and \bar{t}')

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



MSSM

かなり専門的な説明

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 (s)quark (**10**)を！

$$\text{MSSM} + (\mathbf{10} \quad),$$

$$\text{i.e. } \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{10} = (Q', U', E') \end{array} \right.$$

$m_h \uparrow$

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

かなり専門的な説明

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 (s)quark ($\mathbf{10}$)を！

⇒ Gauge anomaly...



$$\text{MSSM} + (\mathbf{10} + \overline{\mathbf{10}}),$$

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

 $m_h \uparrow$

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

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 (s)quark ($\mathbf{10}$) を !

⇒ Gauge anomaly... 

⇒ t' と \bar{t}' を入れよう

$$(\mathbf{10} + \overline{\mathbf{10}})$$

“vector-like”

$$\text{MSSM} + (\mathbf{10} + \overline{\mathbf{10}}),$$

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

$m_h \uparrow$

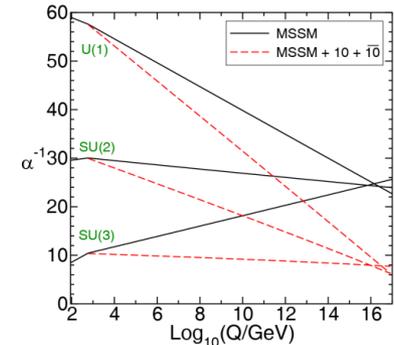
$$W_{\text{add}} = Y' Q' H_u U' + M_V Q' \bar{Q}' + M_V U' \bar{U}' + M_V E' \bar{E}'$$

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

Mixing between SM- & vector-like quark

かなり専門的な説明

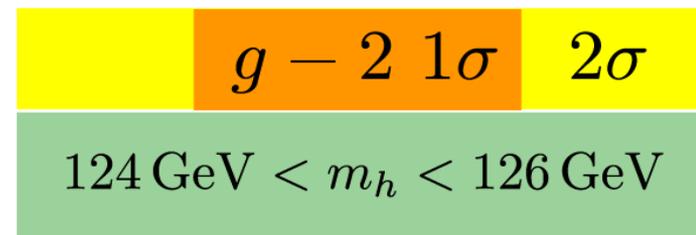
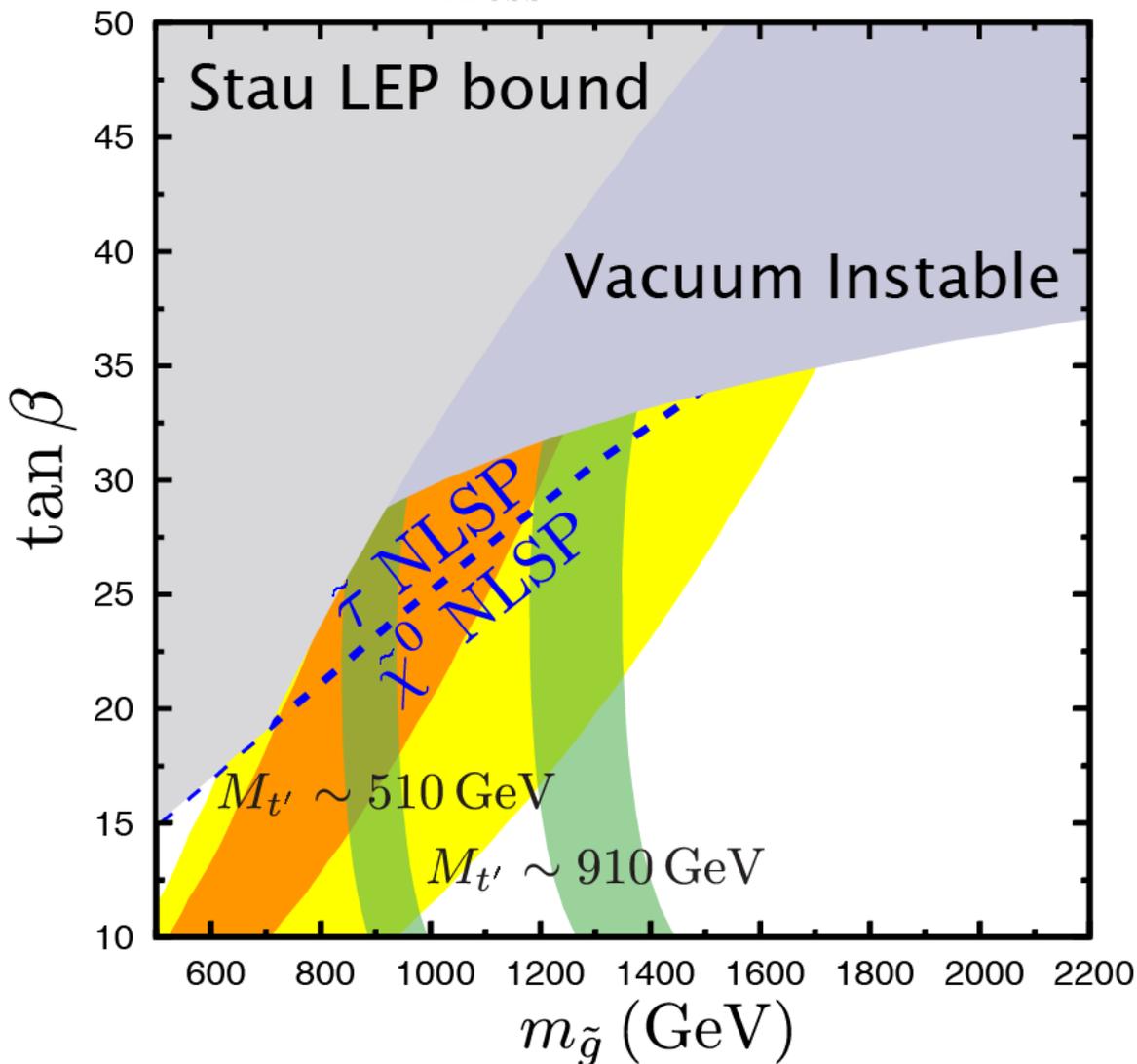
- No gauge anomaly.
- Gauge couplings unification.



Martin [0910.2732]

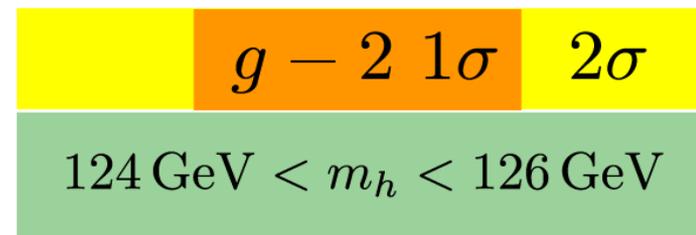
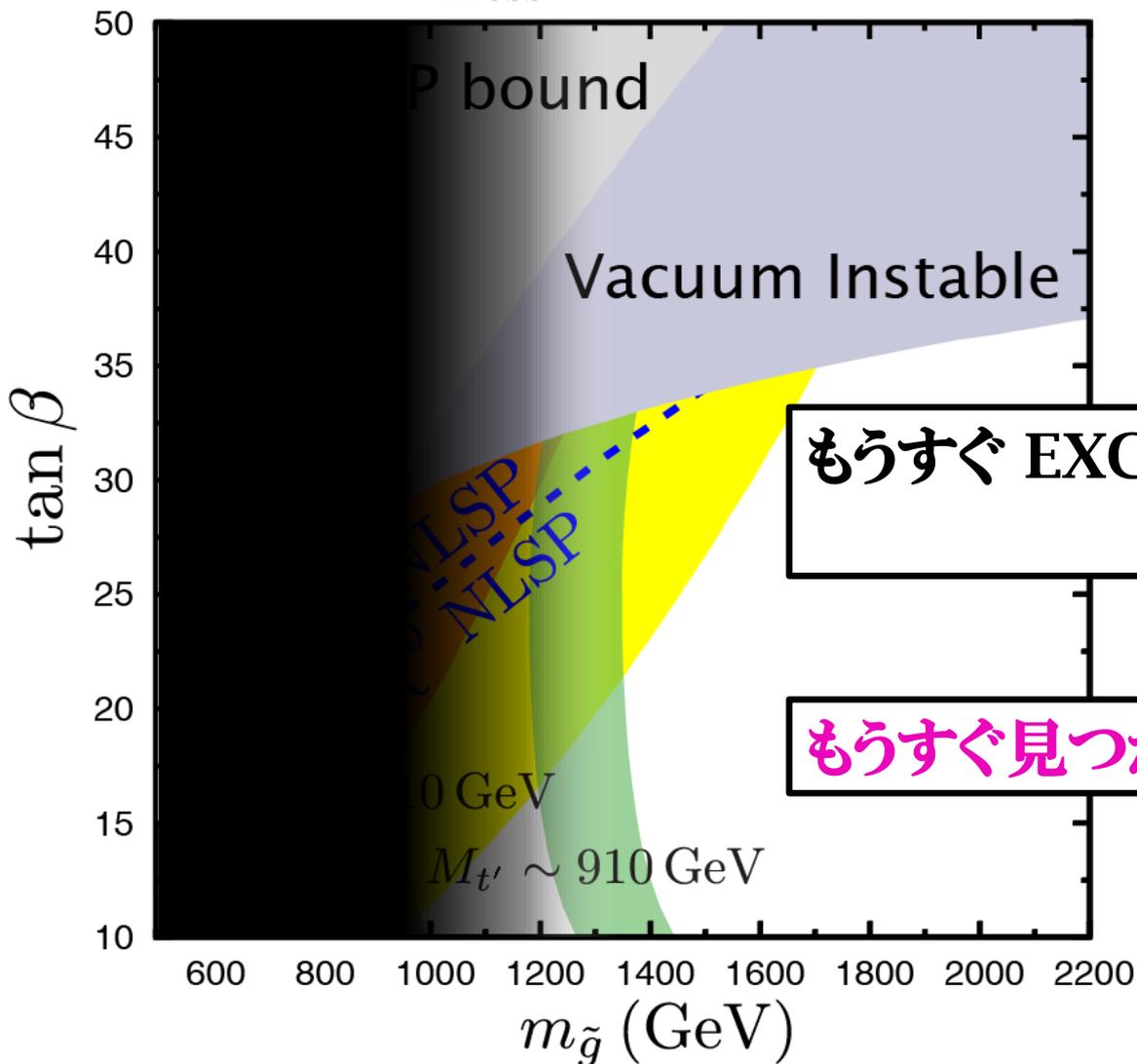
GMSB with vector-like matters (t' and \bar{t}')

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



GMSB without vector-like matters (t' and \bar{t}')

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



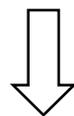
もうすぐ EXCLUDE されるかも.....
(^・ω・^)

裏を返せば

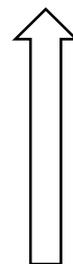
もうすぐ見つかるかも! ? (^・ω・^)

標準模型

◎ Higgs 粒子の発見 「スカラー粒子」 126GeV



◎ Fine-tuning 問題 ← 二次発散



Vector-like quark

$t' + \bar{t}'$ ($10 + \bar{10}$) を追加



Higgs が持ち上がらない
($m_h \lesssim 120 \text{ GeV}$)



MSSM

◎ Fine-tuning 問題を解決

◎ ゲージ相互作用を大統一に導く

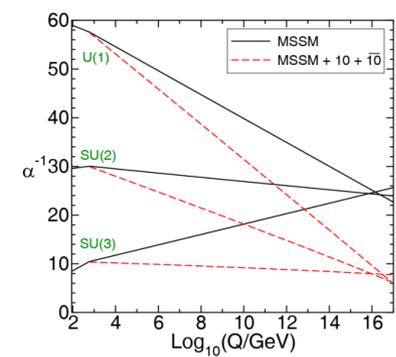
◎ $(g - 2)_\mu$ を説明 (※ただし SUSY 粒子が軽い時に限る)

◎ 暗黒物質を説明

模型の詳細

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

- No gauge anomaly.
- Gauge couplings unification.



Martin [0910.2732]

$$W_{\text{add}} = \overset{m_h \uparrow}{Y' Q' H_u U'} + \overset{m_h \downarrow}{Y'' \bar{Q}' H_d \bar{U}'} \rightarrow \text{we assume } Y'' \ll 1.$$

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

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

Mixing between SM- & vector-like quark

- 大きすぎ → flavor 問題
- ゼロ → 安定な colored 粒子

⇒ 小さい、と仮定。

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

- $N_{\text{mess}} = 1$ to keep perturbative up to M_{GUT} .
- $\text{sgn } \mu = +$ to explain $g - 2$.
- **$Y' = 1.05$: infrared fixed point** ⇒ nice for 125 GeV
 (also A_t and A' go to IR fixed point.)

Vector-like quark DIRECT search

◎ New “vector-like” quark

Mass

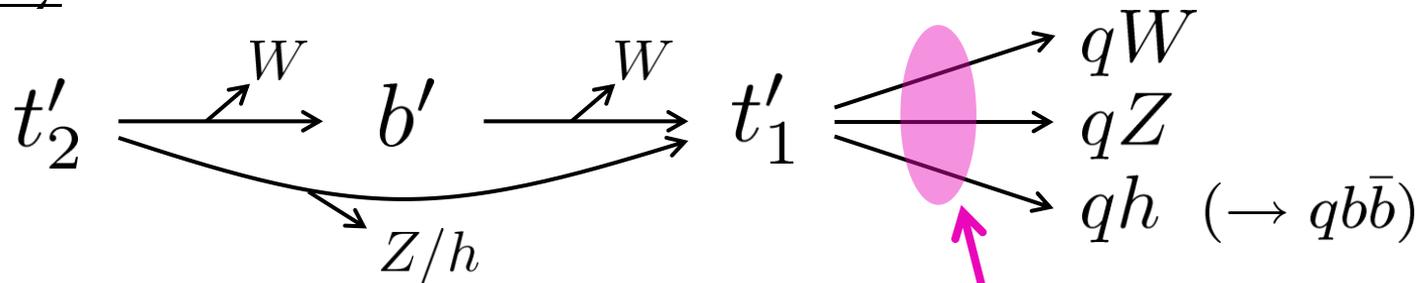
$$m_{t'} \sim M_V \pm (174 \text{ GeV}/2),$$

$$m_{b'} = M_V$$

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.

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

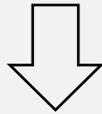
Interesting channel after Higgs discovery.

Harigaya, Matsumoto, Nojiri, Tobioka [1204.2317]

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

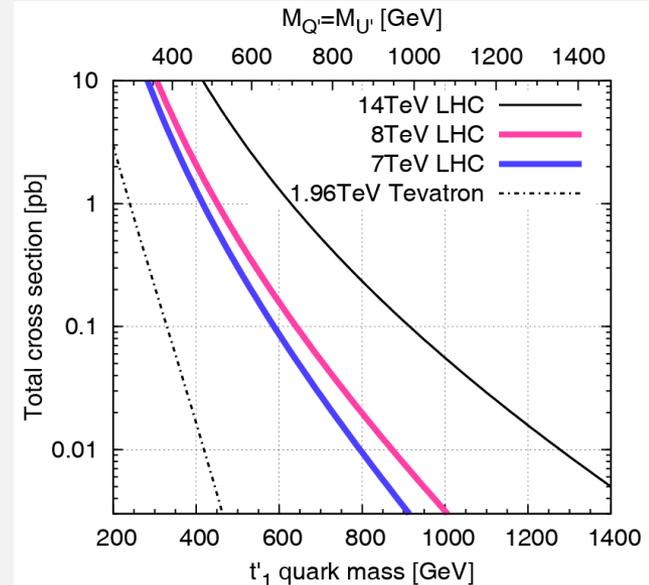
Current bound

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



More severe bounds,
or....?

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



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

Interesting channel after Higgs discovery.

Harigaya, Matsumoto, Nojiri, Tobioka [1204.2317]