超対称模型の現状

後藤 亨 (KEK)

Introduction

Supersymmetry (SUSY): boson $\Leftrightarrow$ fermion symmetry.

黎明期:

- Miyazawa ('66): baryons & mesons $\in$ supermultiplet.
- Volkov & Akulov ('72): supertranslation (nonlinear realization).

Beyond the Standard Model としての SUSY:

- Wess & Zumino ('74): renormalizable quantum field theory (4-dim. $N = 1$)

以後、"realistic" model building へ。

Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM) の現象論が詳しく調べられている。

Introduction

SUSY模型を研究する動機:

- 豊富な新粒子、新現象を予言 $\Rightarrow$ 面白い。
- 統一理論の可能性
  - ▷ Local SUSY = supergravity: 重力を含む
    - ∗ SUSY algebra $\supset$ spacetime translation (Poincaré group)
      $\Rightarrow$ local SUSY transformation $\supset$ 一般座標変換
  - ▷ MSSM $\rightarrow$ GUTと相性がいい。
- (ゲージ)階層性問題の緩和
  - ▷ Electroweak scale ($\sim 100\,$GeV) $\Leftrightarrow$ Planck (GUT) scale ($\sim 10^{16-19}\,$GeV)
    - ∗ "軽い" スピン 0 粒子を対称性で保証
      - · スピン 1 $\rightarrow$ ゲージ対称性
      - · スピン 1/2 $\rightarrow$ カイラル対称性

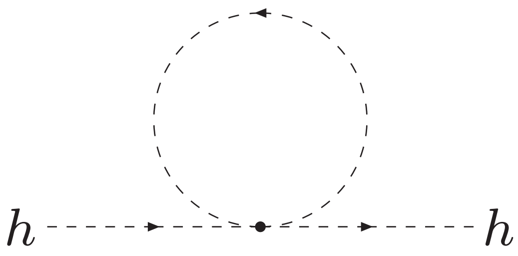
Introduction

Hierarchy problem in SM

- Higgs boson mass への量子補正 → 二次発散

$$m_h^2 = m_h^{(\text{tree})2} + \delta m_h^2 = O((100\text{GeV})^2)$$

$\delta m_h^2 \sim$

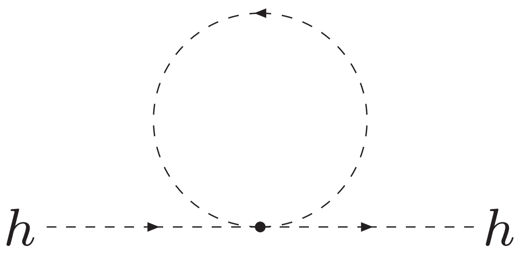


$\sim \Lambda^2 \qquad (\Lambda \sim M_{\text{Planck}})$

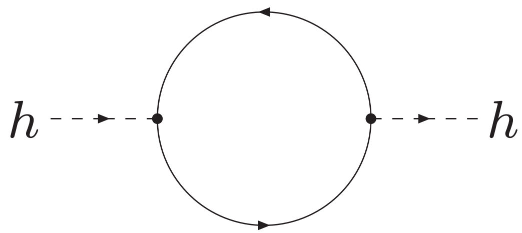
⟹ 不自然!

Supersymmetry stabilizes the hierarchy.

$\delta m_h^2 \sim$



$+$



$\sim \log \Lambda^2$

Introduction

このセミナーでは、minimal supergravity model (mSUGRA) を中心に、模型の構造と、最近の LHC の結果について紹介する。

以下の目次

- Minimal Supersymmetric Standard Model
- Minimal Supergravity scenario
- Constraints from LHC
- Constraints from flavor physics

Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM)

The Standard Model:

- $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ gauge theory.
- 3 families of quarks/leptons (chiral fermions).
- 1 Higgs doublet (complex scalars).
- 19 (+9) parameters.
  - ▷ α_s, α, G_F, m_Z, $m_{u,c,t}$, $m_{d,s,b}$, $m_{e,\mu,\tau}$, m_h, $V_{\text{CKM}}(\lambda, A, \bar{\rho}, \bar{\eta})$, θ_{QCD}.
  - ▷ m_{ν_1,ν_2,ν_3}, U_{MNS}.

MSSM: field contents

標準模型を超対称化する： superpartners の導入。

- $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ gauge fields: g_μ, W_μ, B_μ

$\Longrightarrow$ vector supermultiplets $(g_\mu,\ \tilde{g})$, $(W_\mu,\ \widetilde{W})$, $(B_\mu,\ \widetilde{B})$

  ▷ $\tilde{g}$, $\widetilde{W}$, $\widetilde{B}$: Majorana fermions (gauginos).

- Quarks, leptons: q_L, $(u_R)^c$, $(d_R)^c$, ℓ_L, $(e_R)^c$

$\Longrightarrow$ (left-handed) chiral supermultiplets

$Q\,(q_L,\ \tilde{q}_L)$, $U^c\,((u_R)^c,\ \tilde{u}^*_R)$, $D^c\,((d_R)^c,\ \tilde{d}^*_R)$, $L\,(\ell_L,\ \tilde{\ell}_L)$, $E^c\,((e_R)^c,\ \tilde{e}^*_R)$

  ▷ $\tilde{q}_L$, $\tilde{u}^*_R$, $\tilde{d}^*_R$, $\tilde{\ell}_L$, $\tilde{e}^*_R$: complax scalars (squarks, sleptons).

  ▷ 全部3世代。

- Higgs doublet H

$\Longrightarrow$ (left-handed) chiral supermultiplets $H_1\,(h_1,\ \tilde{h}_1)$, $H_2\,(h_2,\ \tilde{h}_2)$

  ▷ $\tilde{h}_1$, $\tilde{h}_2$: chiral fermions (higgsinos)

MSSM: field contents

Chiral supermultiplets ($SU(3)$, $SU(2)$, $U(1)$):

$$Q_i(\mathbf{3},\, \mathbf{2},\, \tfrac{1}{6}), \quad U_i^c(\overline{\mathbf{3}},\, \mathbf{1},\, -\tfrac{2}{3}), \quad D_i^c(\overline{\mathbf{3}},\, \mathbf{1},\, \tfrac{1}{3}), \quad L_i(\mathbf{1},\, \mathbf{2},\, -\tfrac{1}{2}),$$
$$E_i^c(\mathbf{1},\, \mathbf{1},\, 1), \quad H_1(\mathbf{1},\, \mathbf{2},\, -\tfrac{1}{2}), \quad H_2(\mathbf{1},\, \mathbf{2},\, \tfrac{1}{2}).$$

$i = 1,\, 2,\, 3.$

Higgs doublets は２つ必要。

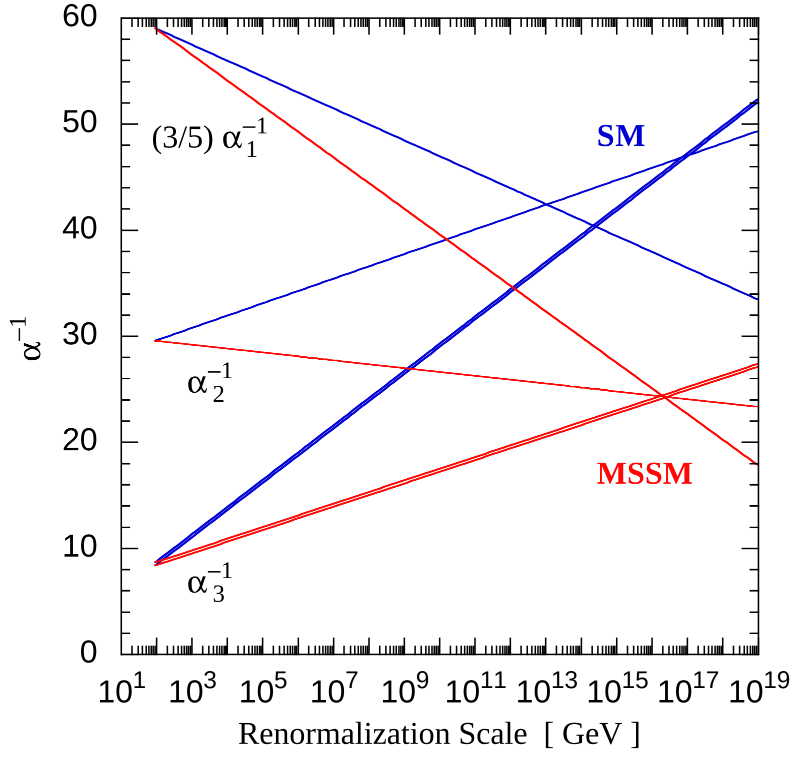
- 湯川相互作用の超対称化（後述）
- Gauge anomaly cancellation
  - ▷ $\widetilde{h}_1$ は ℓ_L と同じ量子数。これだけを追加すると gauge anomaly が生じる。$\widetilde{h}_2$ で相殺。

MSSM: field contents

大統一理論 (GUT) と相性が良い。

- GUT は
  - ▷ $Q_e = -Q_p$
  - ▷ $g_3 > g_2 > g_1$

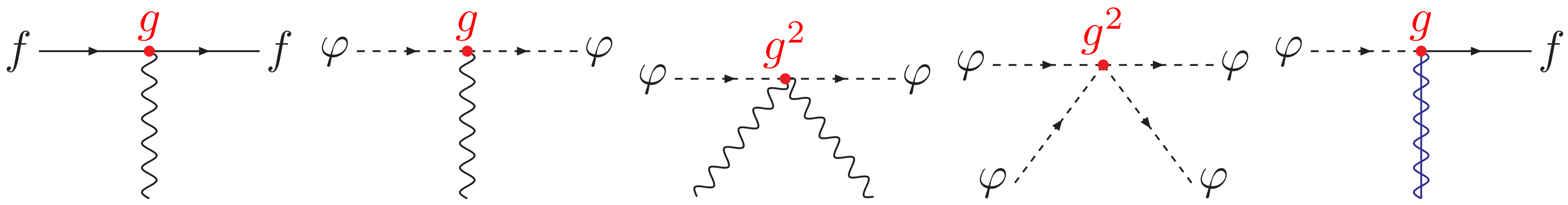
  をゲージ対称性と関連づける点で魅力的。



MSSM: interactions

相互作用の超対称化

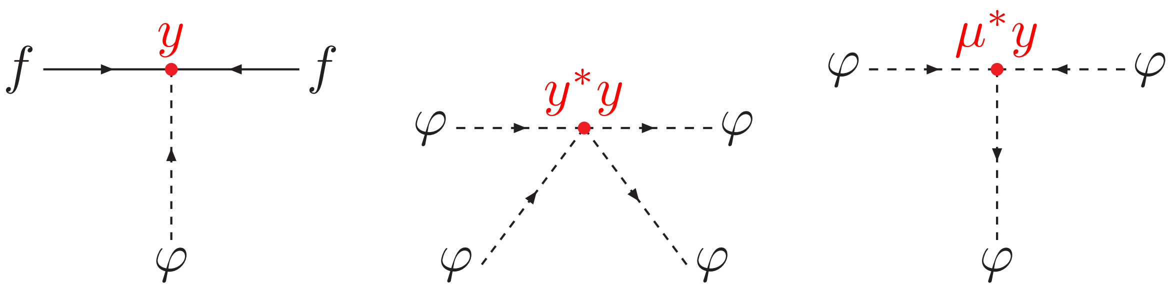
SUSY gauge interactions



Superpotential (Yukawa couplings & "μ"): holomorphic

$$W_{\text{MSSM}} = \epsilon_{ab} \left[(Y_E)_{ij} H_1^a L_i^b E_j^c + (Y_D)_{ij} H_1^a Q_i^b D_j^c + (Y_U)_{ij} H_2^b Q_i^a U_j^c - \mu H_1^a H_2^b \right],$$

- SUSY: scalar にも chirality. $\Rightarrow$ $h_1^\dagger$ で h_2 の代用不可。



MSSM: R-parity

Gauge invariance だけだと

$$W_{\mathrm{RPV}} = \epsilon_{ab}\left[\frac{1}{2}\lambda_{ijk}L_i^a L_j^b E_k^c + \lambda'_{ijk}L_i^a Q_j^b D_k^c - \kappa_i L_i^a H_2^b\right] + \frac{1}{2}\lambda''_{ijk}U_i^c D_j^c D_k^c,$$

も可能。これらはバリオン数、レプトン数を破る $\Rightarrow$ 短寿命で陽子崩壊。

R-parity

- Even: SM particles
- Odd: SUSY particles ($\tilde{g}$, $\widetilde{W}$, $\tilde{B}$, $\tilde{q}_{L,R}$, $\tilde{\ell}_{L,R}$, $\tilde{h}_i$)

で禁止 (L_i と H_1 に異なる量子数を割当)。

$\Longrightarrow$ Lightest R-odd particle (Lightest SUSY Particle, LSP) は安定。

MSSM: SUSY breaking

超対称性は破れている。これを soft SUSY breaking terms として取り入れる。

- Gaugino masses

$$\mathcal{L}_G = \frac{1}{2}\left[M_1\widetilde{B}\widetilde{B} + M_2\widetilde{W}^A\widetilde{W}^A + M_3\widetilde{g}^X\widetilde{g}^X\right] + \text{H.c.}.$$

- Scalar masses

$$\begin{aligned} V_2 &= \widetilde{q}^*_{iLa}(m^2_{\widetilde{Q}})_{ij}\widetilde{q}^a_{jL} + \widetilde{\ell}^*_{iLa}(m^2_{\widetilde{L}})_{ij}\widetilde{\ell}^a_{jL} \\ &\quad + \widetilde{u}_{iR}(m^2_{\widetilde{u}})_{ij}\widetilde{u}^*_{jR} + \widetilde{d}_{iR}(m^2_{\widetilde{d}})_{ij}\widetilde{d}^*_{jR} + \widetilde{e}_{iR}(m^2_{\widetilde{e}})_{ij}\widetilde{e}^*_{jR} \\ &\quad + m^2_{H_1}h^*_{1a}h^a_1 + m^2_{H_2}h^*_{2a}h^a_2 - \left[m^2_3\epsilon_{ab}h^a_1h^b_2 + \text{H.c.}\right], \end{aligned}$$

- Trilinear scalar couplings (holomorphic)

$$V_3 = \epsilon_{ab}\left[(T_E)_{ij}h^a_1\widetilde{\ell}^b_{iL}\widetilde{e}^*_{jR} + (T_D)_{ij}h^a_1\widetilde{q}^b_{iL}\widetilde{d}^*_{jR} + (T_U)_{ij}h^b_2\widetilde{q}^a_{iL}\widetilde{u}^*_{jR}\right],$$

Soft = 2次発散を生じない (Girardello & Grisaru, '82)。

MSSM: SUSY breaking

SUSY breaking mechanism を特定しない場合、

- 105 new parameters. "MSSM-124"
  - ▷ Standard Model はパラメータ 19 個。
  - ▷ 大半 (97 個) が squark/slepton mass matrices (SUSY breaking)
    $\Rightarrow$ flavor/CPV sector.

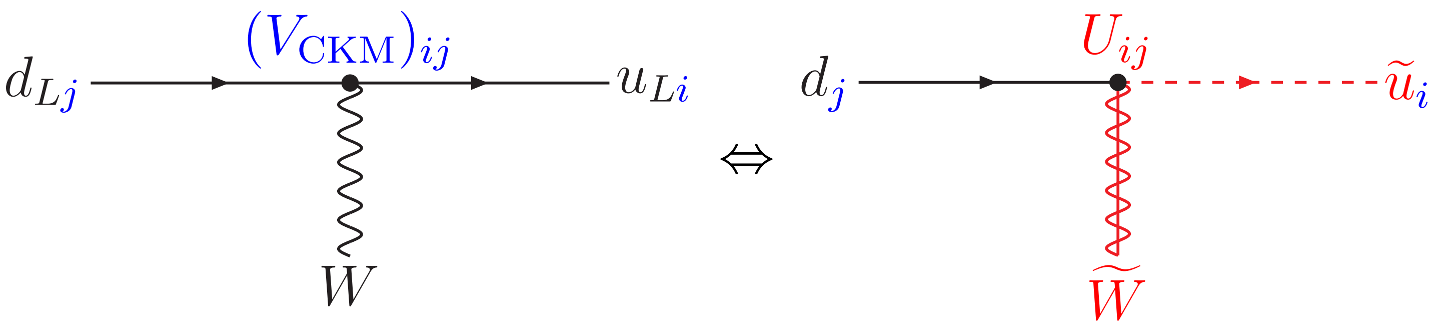
$\Longrightarrow$ 最初から大問題。

MSSM ＋ "SUSY breaking parameters の構造の種" で模型を定義する。

Flavor mixing in the MSSM

- quark の質量行列 $\Leftarrow$ Electroweak gauge symmetry breaking ($\langle h \rangle$),
- squark の質量行列 $\Leftarrow$ EW symmetry breaking $\oplus$ SUSY breaking.

quark と squark の質量行列は一般には同時対角化できない。

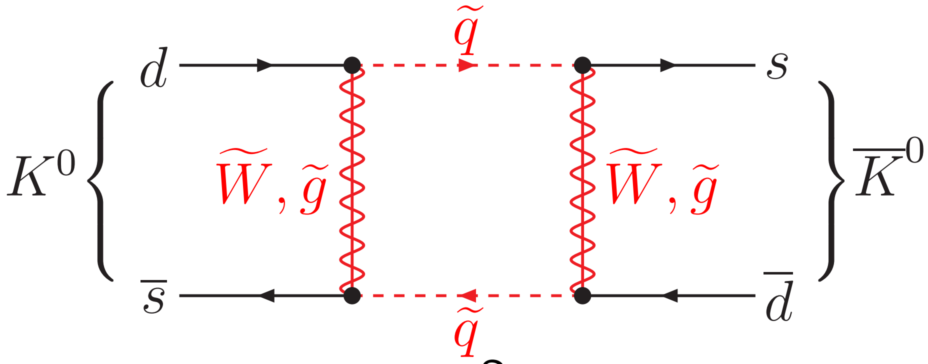


- squark の相互作用に CKM 行列とは一般に異なる混合行列が現れる。
- SUSY breaking に特別な構造 (universality, etc.) があれば、混合行列が一致する場合もある。

SUSY Flavor “Problem”

SUSY breaking のフレイバー構造は既に制限されている。(Ellis & Nanopoulos, ’82)

- 最も強い制限: $K^0 - \overline{K}^0$ 混合 (特に ε_K)
  - ▷ squark mixing $\sim$ quark mixing (CKM) を仮定



$$\frac{1}{m(\text{SUSY})^2}\left(\frac{\Delta m(\tilde{q})^2}{m(\tilde{q})^2}\right)^2 < O(10^{-10})\ \text{GeV}^{-2}.$$

  - ▷ $m(\text{SUSY}) \sim 100\,\text{GeV}$ なら $\frac{\Delta m(\tilde{q})^2}{m(\tilde{q})^2} < O(10^{-3})$。
  - ▷ $\frac{\Delta m(\tilde{q})^2}{m(\tilde{q})^2} \sim 1$ なら $m(\text{SUSY}) > O(100\,\text{TeV})$。
- Lepton sector では $\mu \to e\gamma$ が強い制限を与える。

SUSY breaking scenarios: minimal supergravity

Spontaneous breaking of global SUSY の問題点

- Vacuum energy $> 0 \Rightarrow$ huge cosmological constant?
  - ▷ $H = Q^\dagger Q$ (Q: supercharge) $\Longrightarrow$ $Q|0\rangle \neq 0 \Leftrightarrow \langle 0|H|0\rangle > 0$.
- Massless Nambu-Goldstone fermion (goldstino).
- Supertrace relation (tree level): $\sum m^2(\text{boson}) - \sum m^2(\text{fermion}) = 0$.

$\Longrightarrow$ Local SUSY = supergravity (SUGRA) で解決。

- Supertrace relation は loop で解決する方法も (gauge mediation 等)。

Minimal supergravity

Matter coupled supergravity (Cremmer, Julia, Scherk *et al.*, '79)
$\oplus$ gauge (Cremmer, Ferrara, Girardello & van Proeyen, '83)

Lagrangian は

- Kähler potential $K(\varphi, \varphi^*)$,
- superpotential $W(\varphi)$,
- gauge kinetic function $f_{ab}(\varphi)$,

で記述される。

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\mathrm{kin}} &= K^i_j \partial^\mu \varphi^*_i \partial_\mu \varphi^j - \frac{1}{4} \mathrm{Re}\, f_{ab}(\varphi) F^{a\mu\nu} F^b_{\mu\nu} + \cdots, \\
V &= \mathrm{e}^G \left[G^i (G^{-1})^j_i G_j - 3 \right] + (\mathrm{gauge}), \qquad G = K + \log |W|^2, \\
G_i &= \frac{\partial G(\varphi, \varphi^*)}{\partial \varphi^i}, \qquad G^i_j = \frac{\partial^2 G(\varphi, \varphi^*)}{\partial \varphi^*_i \partial \varphi^j} = K^i_j,
\end{aligned}
$$

Minimal supergravity

- Spontaneous SUSY breaking with vanishing cosmological constant.
  - ▷ Supersymmetric cosmological term < 0 ("-3" in V).
  - $\Rightarrow$ cancels positive contributions due to SUSY breaking.
    - $*$ Fine-tuning だが、宇宙項問題を悪化させてはいない。
- Super-Higgs mechanism: goldstino eaten by gravitino.
  - ▷ Supergravity multiplet: graviton (spin 2) & gravitino (spin 3/2): gauge field of local supersymmetry.
    - $*$ SUSY unbroken $\rightarrow$ massless gravitino, helicity $\pm 3/2$ only.
    - $*$ SUSY broken $\rightarrow$ massive gravitino $m_{3/2}$, helicity $\pm 3/2$ & $\pm 1/2$. helicity $\pm 1/2$ components $\Leftarrow$ goldstino.
    - $*$ Massless goldstino disappear.
- $\sum m^2(\text{boson}) - \sum m^2(\text{fermion}) \propto m_{3/2}^2 > 0$.
  - ▷ Realistic mass spectrum $m(\text{squark}) > m(\text{quark})$ possible.

Minimal supergravity

(Barbieri, Ferrara & Savoy, '82)

Field contents: "visible" sector (MSSM, ϕ) and "hidden" sector (z)

- Simplest Käler potential: $K = \varphi_i^* \varphi^i \to K_i^j = \delta_i^j$.
- $W = W_{\text{hid}}(z) + W_{\text{vis}}(\phi)$.
- SUSY breaking occurs in the "hidden" sector.

$\Downarrow$ flat limit ($M_{\text{Planck}} \to \infty$ with $m_{3/2}$ fixed)

- Lagrangian for the "visible" sector: softly broken (global) SUSY with:
  - ▷ universal scalar mass $m_0 = m_{3/2}$.
    - ∗ degenerate squarks → flavor problem resolved.
  - ▷ universal trilinear coupling $T_{U,D,E} = A_0 Y_{U,D,E} \propto m_{3/2}$.
  - ▷ minimal gauge kinetic function ($f_{ab} = \delta_{ab}$) では gaugino mass は出ない (tree level)。
    - ∗ loop correction, or nonminimal f_{ab}.

Electroweak symmetry breaking (EWSB)

Higgs potential (neutral component)

$$V_{\text{Higgs}} = m_1^2 |h_1|^2 + m_2^2 |h_2|^2 - \left(m_3^2 h_1 h_2 + \text{H.c.}\right) + \frac{g_1^2 + g_2^2}{8} \left(|h_1|^2 - |h_2|^2\right)^2$$

$$m_i^2 = |\mu|^2 + m_{H_i}^2, \qquad i = 1, 2,$$

- Quartic coupling $\Leftarrow$ SUSY gauge interaction.
  - ▷ Flat direction $|h_1| = |h_2|$.
- EWSB conditions:

$$m_1^2 m_2^2 - \left|m_3^2\right|^2 < 0, \qquad m_1^2 + m_2^2 - 2\left|m_3^2\right| > 0.$$

$$\langle h_1 \rangle = v \cos\beta, \qquad \langle h_2 \rangle = v \sin\beta, \qquad m_W^2 = \frac{g_2^2}{2} v^2.$$

  - ▷ $m_{H_1}^2 = m_{H_2}^2 = m_0^2$ では実現しない。

Radiative electroweak symmetry breaking

量子補正 $\Rightarrow$ Lagrangian のパラメータは繰り込み群方程式に従う running parameters.

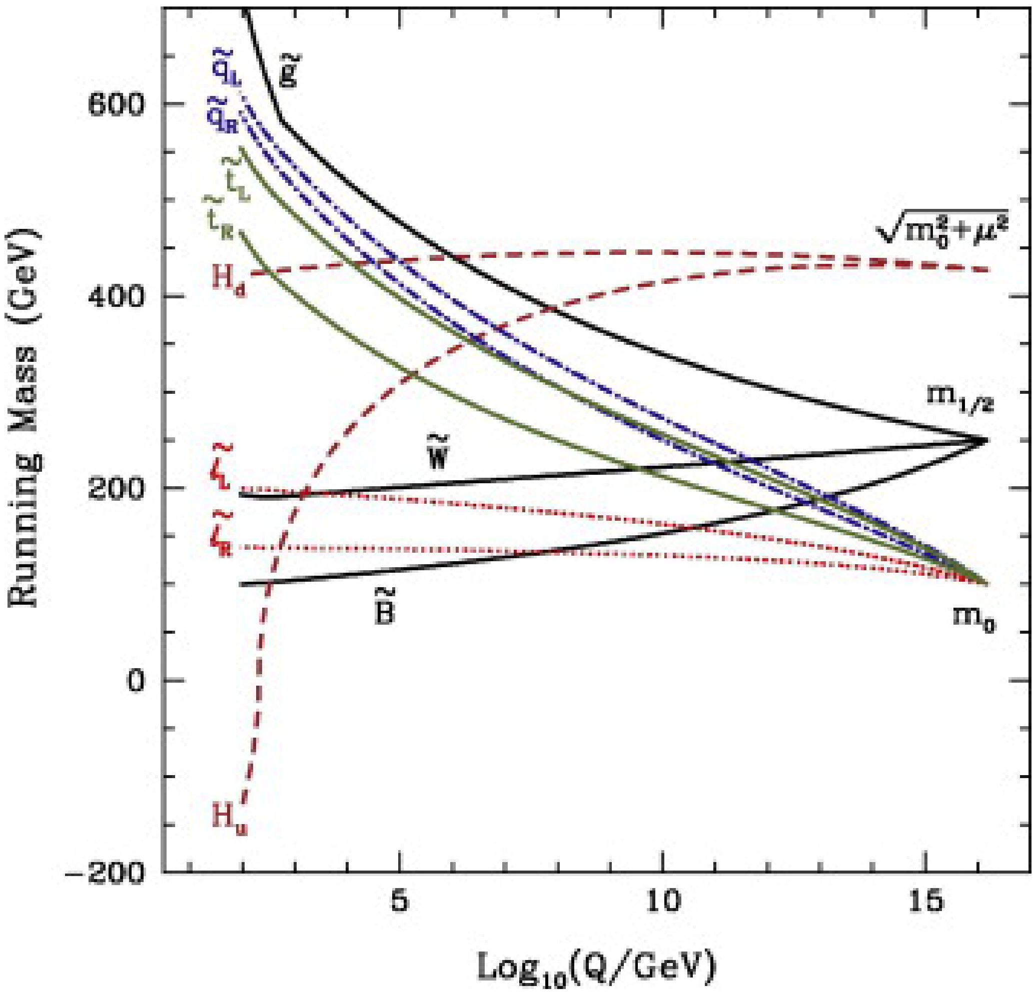
- "Universal" soft SUSY breaking ($\leftarrow$ SUGRA): Planckスケール (GUTスケール) 付近の値。
- 現象論に必要なのはEWスケール付近 ($\mathcal{O}(100)$ GeV – $\mathcal{O}(1)$ TeV) の値。

$\Longrightarrow$ Top Yukawa coupling の効果が重要（Alvarez-Gaumé, Polchinski & Wise, '83, Inoue, Kakuto & Takeshita, '84）。

RGEs (3rd gen.):

$$
\begin{aligned}
(4\pi)^2\mu\frac{d}{d\mu}m_Q^2 &= 2y_t^2\left(m_Q^2+m_U^2+m_{H_2}^2\right)-\frac{32}{3}g_3^2|M_3|^2+\cdots\,,\\
(4\pi)^2\mu\frac{d}{d\mu}m_U^2 &= 4y_t^2\left(m_Q^2+m_U^2+m_{H_2}^2\right)-\frac{32}{3}g_3^2|M_3|^2+\cdots\,,\\
(4\pi)^2\mu\frac{d}{d\mu}m_{H_2}^2 &= 6y_t^2\left(m_Q^2+m_U^2+m_{H_2}^2\right)+\cdots\,,
\end{aligned}
$$

RG running of sparticle masses



(K.A. Olive, '08)

- $O(100)$ GeV スケールで $m_2^2 < 0$ ⇒ EWSB.
  ⇒ considered as a realistic scenario.

mSUGRA scenario

- MSSM with R-parity.
- SUGRA-induced (gravity-mediated) SUSY breaking.
  - ▷ SUSY breaking parameters at GUT scale:
    - ∗ universal scalar mass m_0,
    - ∗ universal trilinear coupling A_0.

    $\Rightarrow$ flavor problem under control.
    - ∗ universal (unified) gaugino mass $m_{1/2}$,
  - ▷ EW scale input parameters: $\tan\beta = \langle h_2 \rangle / \langle h_1 \rangle$, sgn($\mu$).
- Radiative EWSB.

基本要素は80年代前半に出揃っていた。

その後の発展: 定量的精密化

- Loop correction to Higgs boson mass (1-loop: Okada, Yamaguchi & Yanagida, '91) $\rightarrow$ 2-loop.
- 2-loop RGE (Jack, Jones, Martin, Vaughn & Yamada, '94).

MSSM particles

- R-even
  - ▷ Quarks: u, c, t; d, s, b.
  - ▷ Leptons: e, μ, τ; ν_e, ν_μ, ν_τ.
  - ▷ Gauge bosons: g, $W^\pm$, Z, γ.
  - ▷ Higgs bosons: h^0, H^0, A^0, $H^\pm$ ($\Leftarrow$ 2-Higgs doublet model).
- R-odd
  - ▷ Squarks: $\tilde{u}_L$, $\tilde{u}_R$, $\tilde{c}_L$, $\tilde{c}_R$, $\tilde{t}_L$, $\tilde{t}_R$; $\tilde{d}_L$, $\tilde{d}_R$, $\tilde{d}_L$, $\tilde{d}_R$, $\tilde{b}_L$, $\tilde{b}_R$.
  - ▷ Sleptons: $\tilde{e}_L$, $\tilde{e}_R$, $\tilde{\mu}_L$, $\tilde{\mu}_R$, $\tilde{\tau}_L$, $\tilde{\tau}_R$; $\tilde{\nu}_{eL}$, $\tilde{\nu}_{\mu L}$, $\tilde{\nu}_{\tau L}$.

    $*$ 一般に世代、Left-Right の混合有り。
  - ▷ Gluino: $\tilde{g}$.
  - ▷ Chargino = mixture of charged gauginos & higgsinos: $\tilde{\chi}_1^\pm$, $\tilde{\chi}_2^\pm$ (Dirac).
  - ▷ Neutralino = mixture of neutral gauginos & higgsinos: $\tilde{\chi}_1^0$, $\tilde{\chi}_2^0$, $\tilde{\chi}_3^0$, $\tilde{\chi}_4^0$ (Majorana).

MSSM particles

LSP: stable, neutral. $\Longrightarrow$ Lightest neutralino or sneutrino.

mSUGRA では、$m(\tilde{\nu}) > m(\tilde{\tau})$ になりやすい (RG running $\oplus$ Left-Right mixing)。

$\Longrightarrow$ 大半の場合 neutralino LSP $\tilde{\chi}_1^0$.

Constraints from LHC

CERN Large Hadron Collider: proton-proton collider at $\sqrt{s} = 7\,\mathrm{TeV}$ (2010-2011), $\sqrt{s} = 8\,\mathrm{TeV}$ (2012).

Experiments:

- SUSY/Higgs search: ATLAS, CMS.
- B physics: LHCb.

SUSY search at ATLAS & CMS

Main target: colored SUSY particles = squark $\tilde{q}$, gluino $\tilde{g}$.

Production: $q\,g \to \tilde{q}\,\tilde{g}$, $g\,g \to \tilde{q}\,\tilde{q}^*$, $g\,g \to \tilde{g}\,\tilde{g}$.

- R-parity $\to$ sparticles are produced in pairs.

Decay: $\tilde{q} \to q\,\tilde{\chi}_1^0$, $\tilde{g} \to q\,\bar{q}\,\tilde{\chi}_1^0$.

- LSP (lightest neutralino $\tilde{\chi}_1^0$) は見えない。$\Longrightarrow$ missing momentum.
  - ▷ Missing transverse energy ($\not{E}_T$) を測る。
- high-energy quark $\to$ hadronic “jet”.

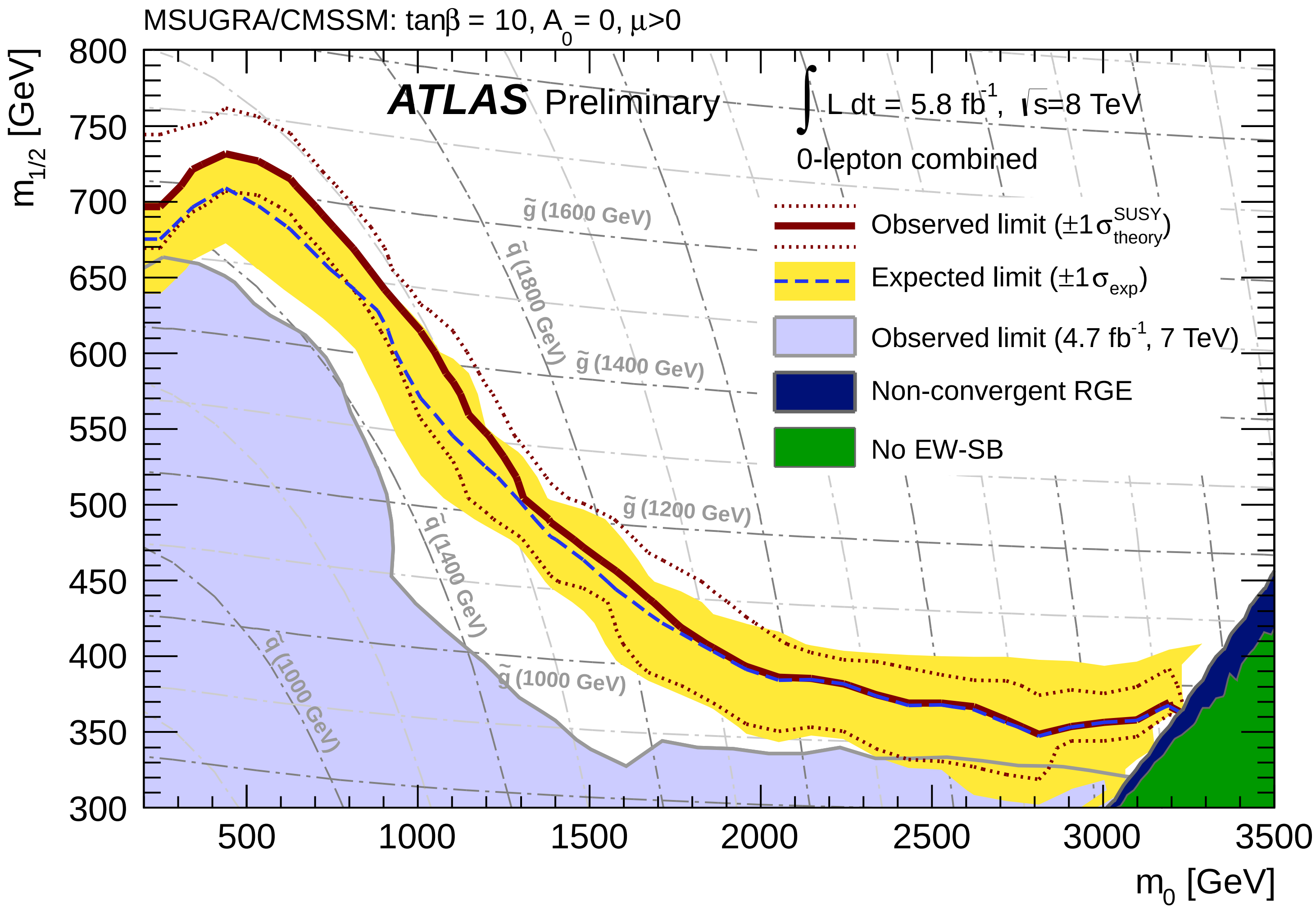
Typical signal: excess in jets + $\not{E}_T$ + 0 lepton (μ or e).

- $\not{E}_T \gtrsim 200\,\text{GeV}$ で測れる。

$\Longrightarrow$ No excess found.

SUSY search at ATLAS & CMS

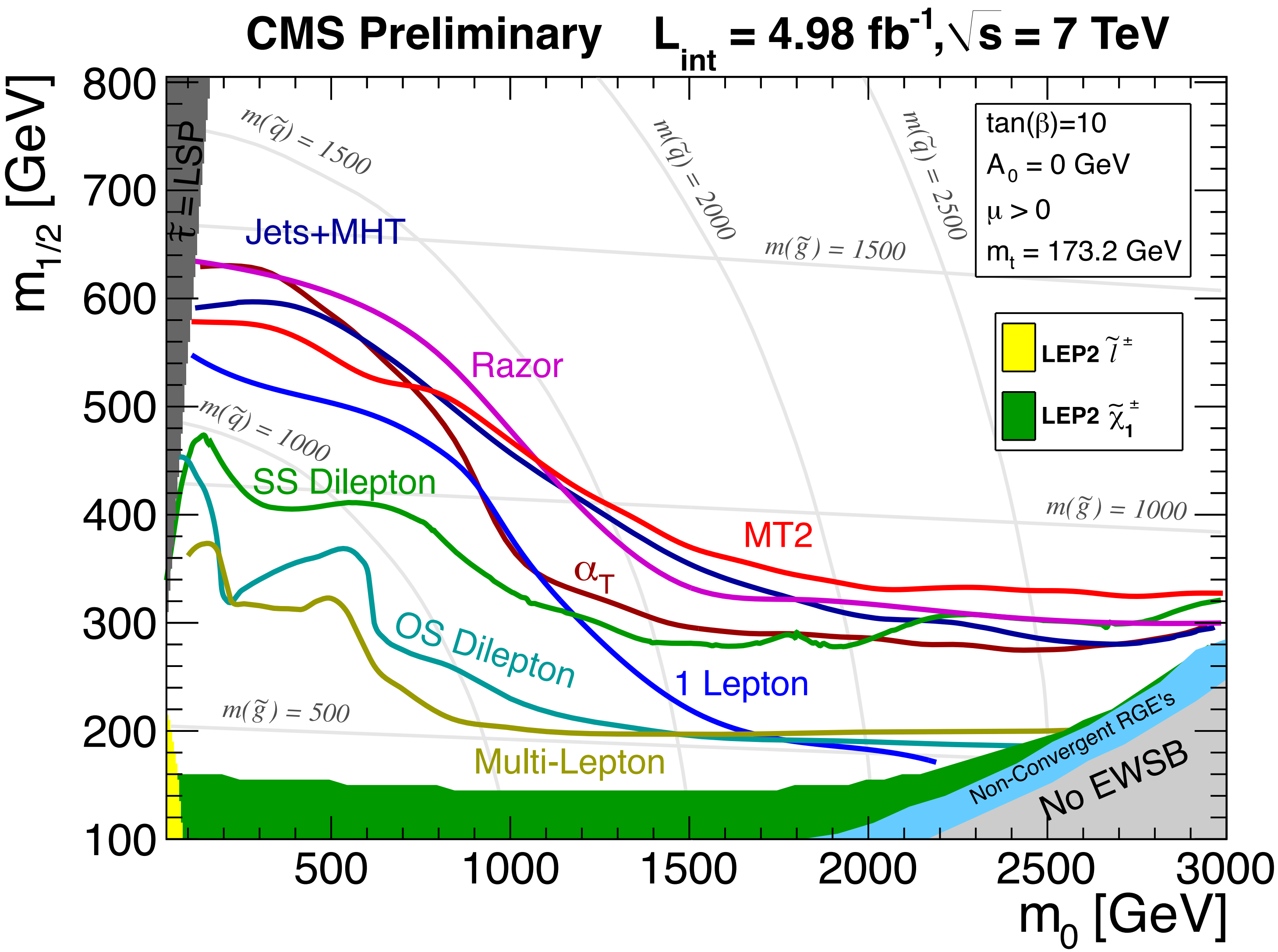
mSUGRA interpretation: $m(\tilde{g}) > 1\,\mathrm{TeV}$, $m(\tilde{q}) > 1.5\,\mathrm{TeV}$.



(ATLAS-CONF-2012-109)

SUSY search at ATLAS & CMS

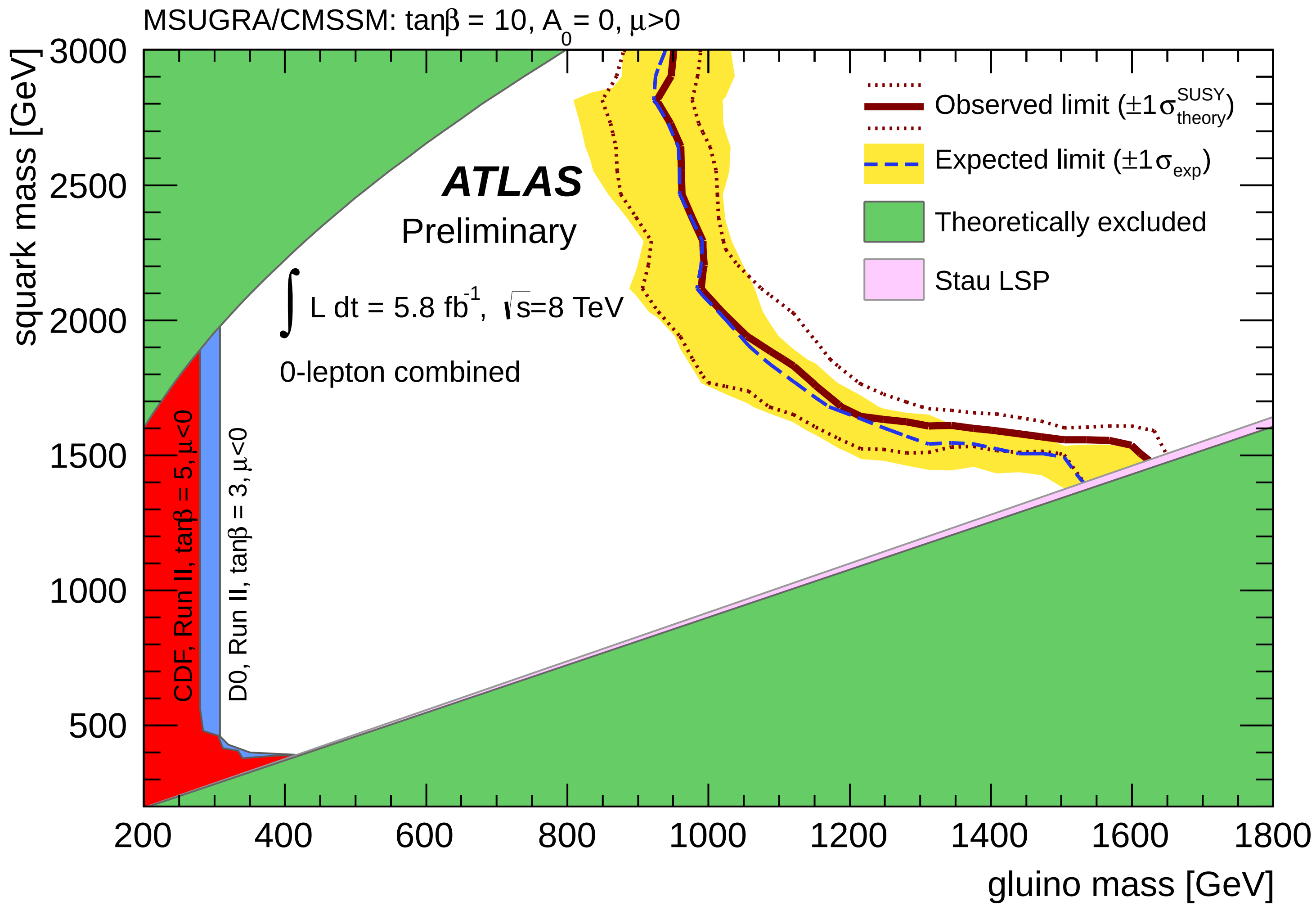
mSUGRA interpretation



(CMS, SUSY2012)

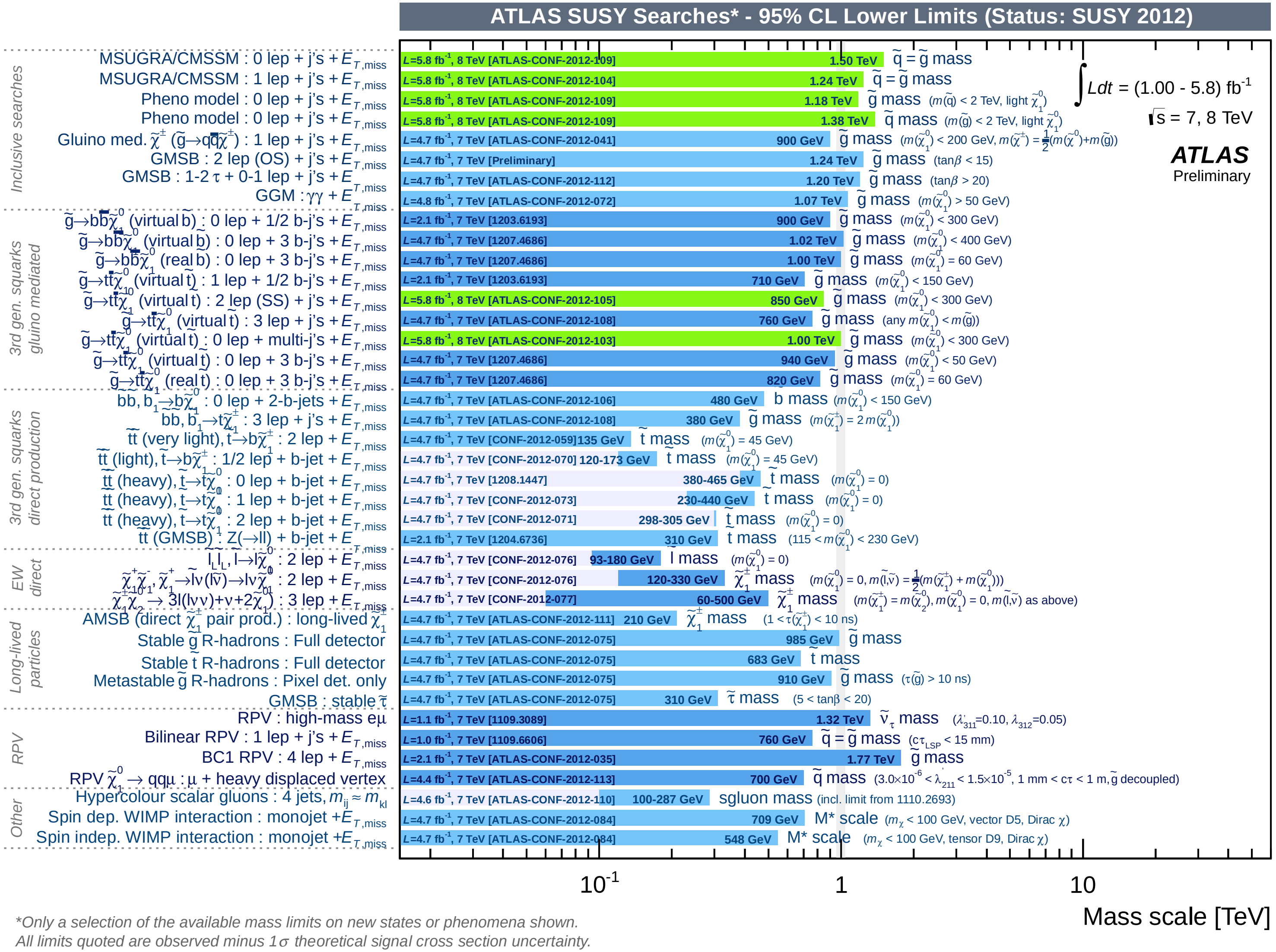
SUSY search at ATLAS & CMS

mSUGRA interpretation: $m(\tilde{g}) > 1\,\text{TeV}$, $m(\tilde{q}) > 1.5\,\text{TeV}$.



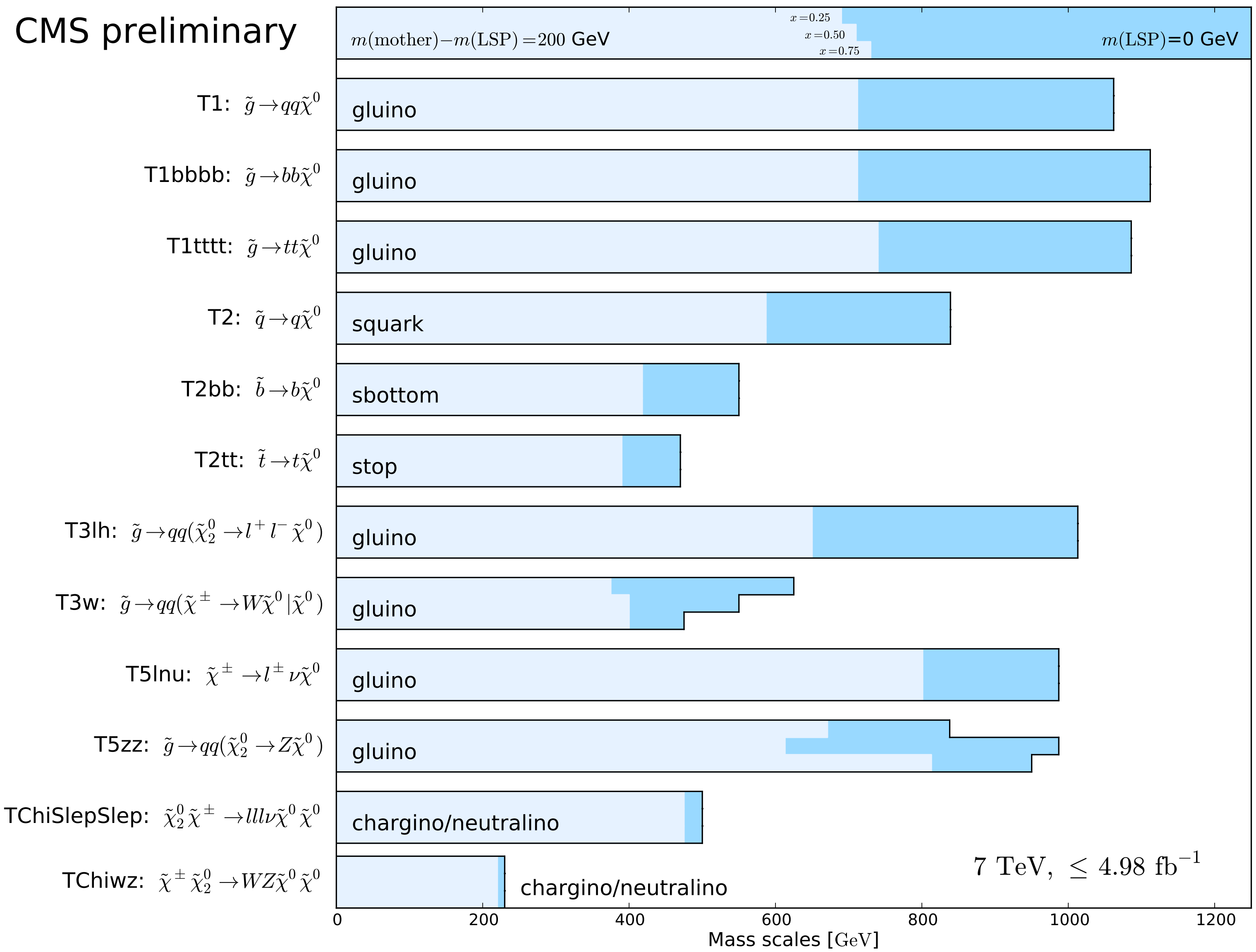
(ATLAS-CONF-2012-109)

SUSY search at ATLAS & CMS



(ATLAS, SUSY2012)

SUSY



(CMS, SUSY2012)

Higgs boson search at ATLAS & CMS

SM Higgs(-like) boson discovered: $m(h) \approx 125\,\mathrm{GeV}$.

SUSY模型へのインパクト?

- 基研研究会 標準模型を超えた素粒子理論へ向けて
  〜新しい実験結果をふまえて〜 (2012.3.19–23) で議論。[まとめPDF]

MSSM Higgs boson masses

$$V_{\text{Higgs}} = m_1^2 |h_1|^2 + m_2^2 |h_2|^2 - \left(m_3^2 h_1 h_2 + \text{H. c.} \right) + \frac{g_1^2 + g_2^2}{8} \left(|h_1|^2 - |h_2|^2 \right)^2$$

$$\frac{\partial V_{\text{Higgs}}}{\partial h_i} = 0 \quad \Rightarrow \quad \langle h_1 \rangle = v \cos\beta, \quad \langle h_2 \rangle = v \sin\beta.$$

Physical Higgs bosons: charged $H^{\pm}$, pseudoscalar A^0, scalar H^0, h^0.

Tree level mass relations:

$$m_{A^0}^2 = m_1^2 + m_2^2, \quad m_{H^\pm}^2 = m_{A^0}^2 + m_W^2,$$

$$m_{H^0,h^0}^2 = \frac{1}{2} \left\{ m_{A^0}^2 + m_Z^2 \pm \sqrt{\left(m_{A^0}^2 + m_Z^2 \right)^2 - 4 m_{A^0}^2 m_Z^2 \cos^2 2\beta} \right\}.$$

$$\boxed{m_{h^0}^2 < m_Z^2 \cos^2 2\beta.}$$

- $m_{A^0} \gtrsim 200\,\text{GeV}$ 程度なら、h^0 (軽い方) はほぼ SM Higgs とみなしてよい。

MSSM Higgs boson masses

Top Yukawa による loop correction が重要 (Okada, Yamaguchi & Yanagida, '91)。

1-loop approximate formula:

$$m_{h^0}^2 = m_Z^2 \cos^2 2\beta + \frac{3m_t^4}{4\pi^2 v^2}\left[\log\frac{M_S^2}{m_t^2} + \frac{X_t^2}{M_S^2}\left(1 - \frac{X_t^2}{12M_S^2}\right)\right],$$

$$M_S = \sqrt{m_{\tilde{t}_1} m_{\tilde{t}_2}}, \qquad X_t\text{: Left-right mixing of } \tilde{t}.$$

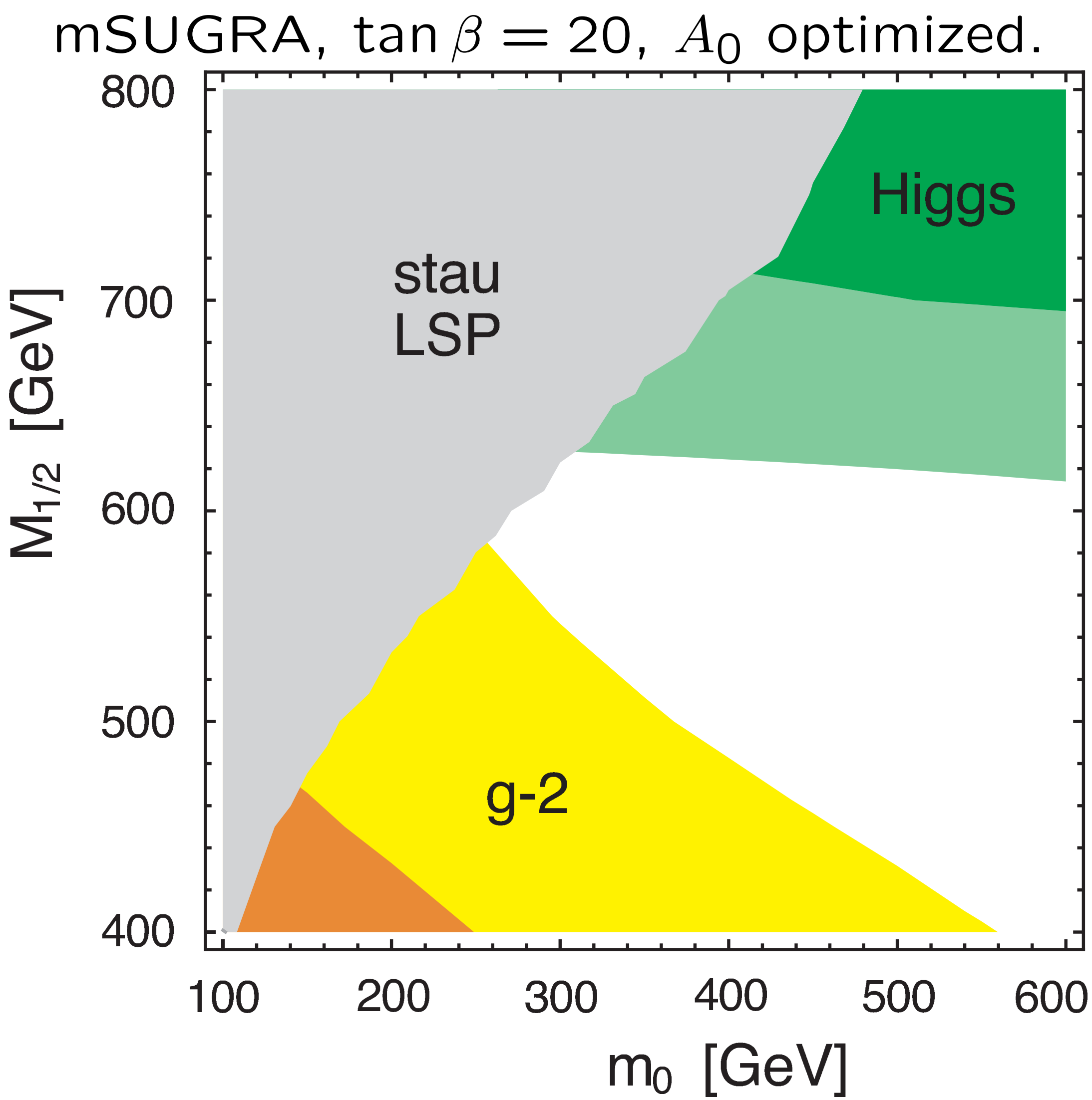
- 現在は 2-loop まで計算されている。

$m_{h^0} > m_Z$ になるには:

- Heavy stop,
- Large stop left-right mixing (max: $X_t/M_S = \sqrt{6}$),

$m_{h^0} \approx 125\,\text{GeV}$ $\Longrightarrow$ SUSY parameters に制限。

MSSM Higgs boson masses



(Endo, Hamaguchi, Iwamoto, Nakayama & Yokozaki, '12)

緑: $m_{h^0} = 125 \pm 1$ GeV.

Constraints from flavor physics

Flavor Changing Neutral Current (FCNC) processes が重要な制限。

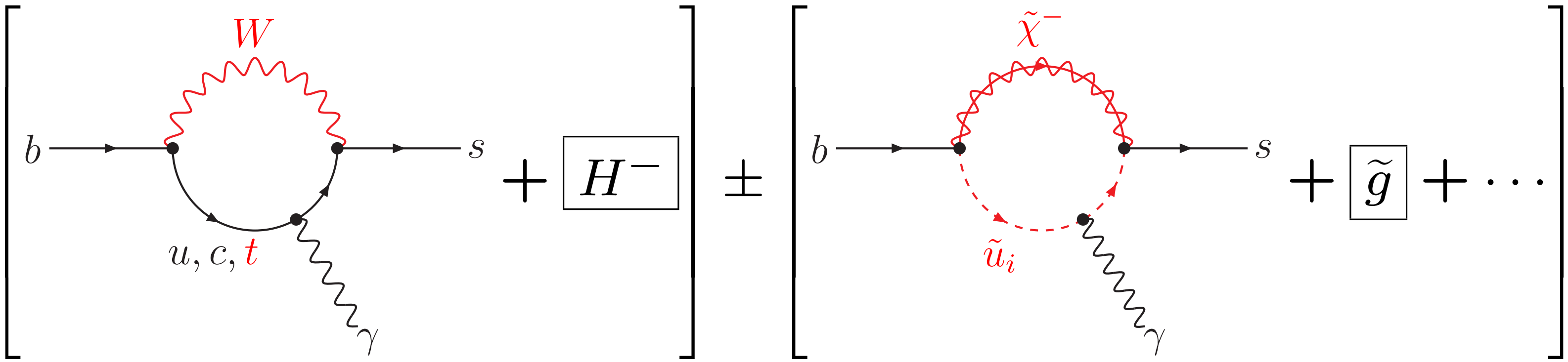
mSUGRA (degenerate squark mass $\oplus$ RG running) では、
Quark 質量行列の構造 $\Rightarrow$ squark 質量行列の構造

$$\frac{m_{u,c}}{m_W} \ll 1 \lesssim \frac{m_t}{m_W} \quad \Rightarrow \quad m(\tilde{u}) \approx m(\tilde{c}) > m(\tilde{t})$$

- $K^0 - \overline{K}^0$ 混合への寄与は抑えられる。
- Squark フレイバー混合は主に $\tilde{q}_L$、$\sim V_{\mathrm{CKM}}$。
- b の物理には効き得る。
  - ▷ $b \to s\,\gamma$
  - ▷ $B_s \to \mu^+\,\mu^-$

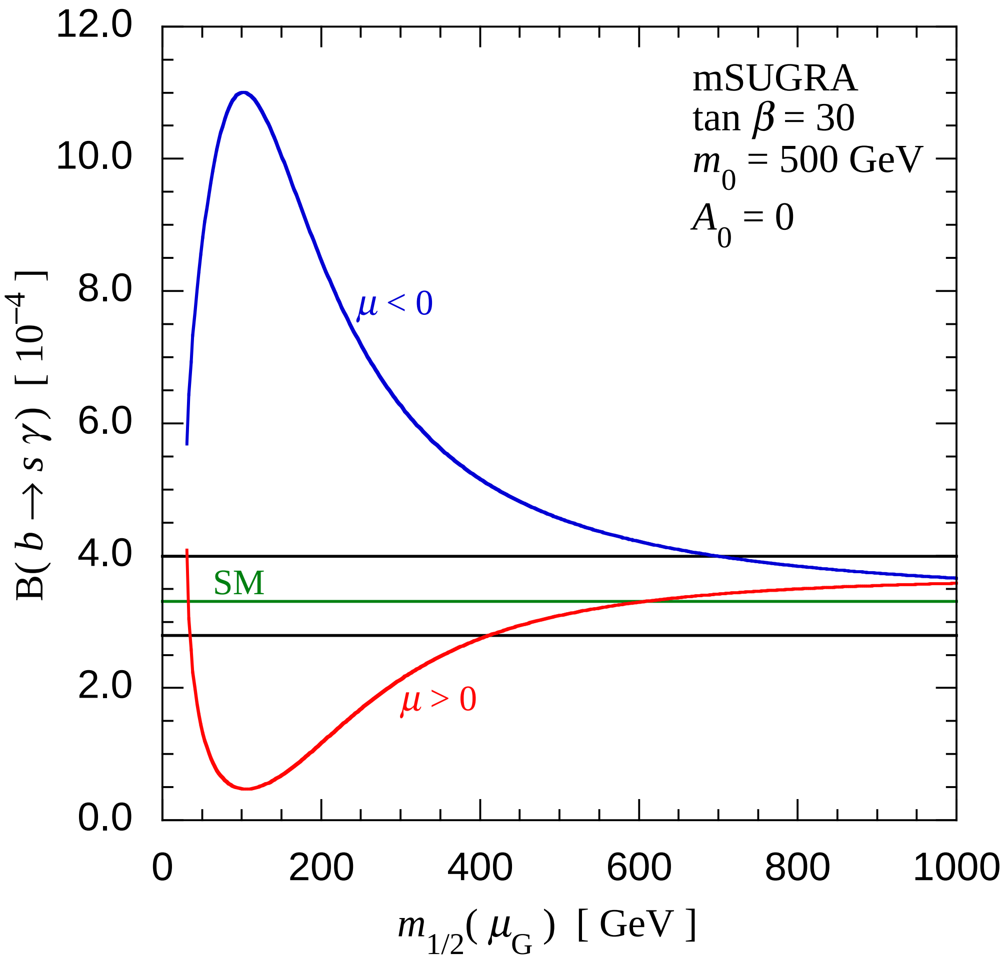
$b \to s\gamma$ in mSUGRA

- $\mathrm{B}(b \to s\gamma)_{\mathrm{exp}} = (3.55 \pm 0.24 \pm 0.09) \times 10^{-4}$ (Belle+Babar+CLEO, '10)
- $\mathrm{B}(b \to s\gamma)_{\mathrm{SM}} = (3.15 \pm 0.23) \times 10^{-4}$ (Misiak, '07, $O(\alpha_s^2)$ まで)



- SM(W) + H^- と squark-"ino" ループの寄与の相対符号は模型のパラメータによって決まる (Higgsino mass μ と gaugino mass $m_{1/2}$ の相対符号が主)。
- SUSY 粒子による寄与が標準模型 (W) 分と同等の大きさになり得る。
  - ▷ $b \to s\gamma$ はクォークのカイラリティが反転する ($b_R \to s_L$) 過程。
    - ∗ 標準模型では m_b がカイラリティ反転の最大要因。
    - ∗ squark-"ino" ループでは gaugino/higgsino の質量等でカイラリティ反転を生じる。

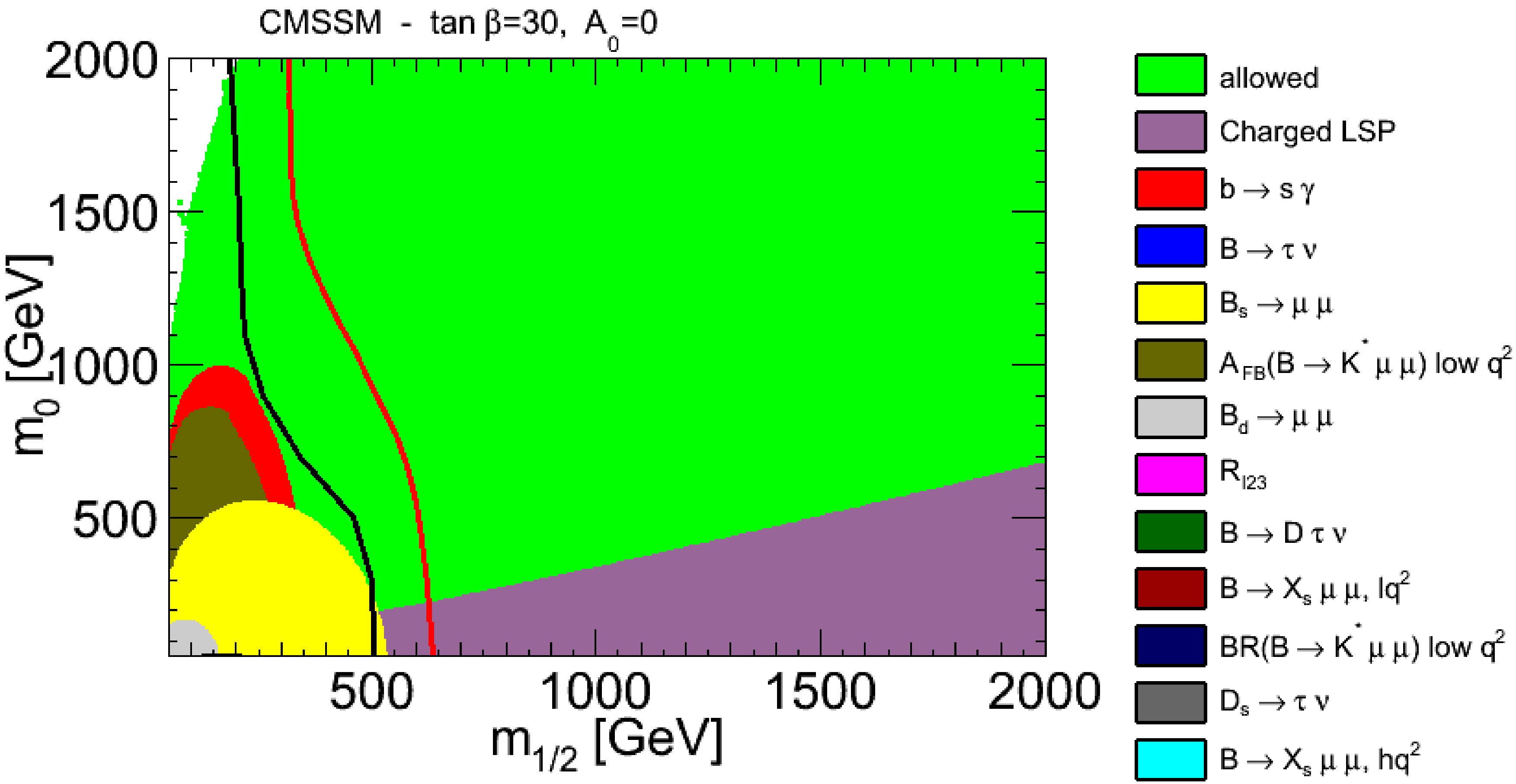
$b \to s\gamma$ in mSUGRA



SUSY braking パラメータに重要な制限を与えていた。

$b \to s\,\gamma$ in mSUGRA

(Mahmoudi, '12)

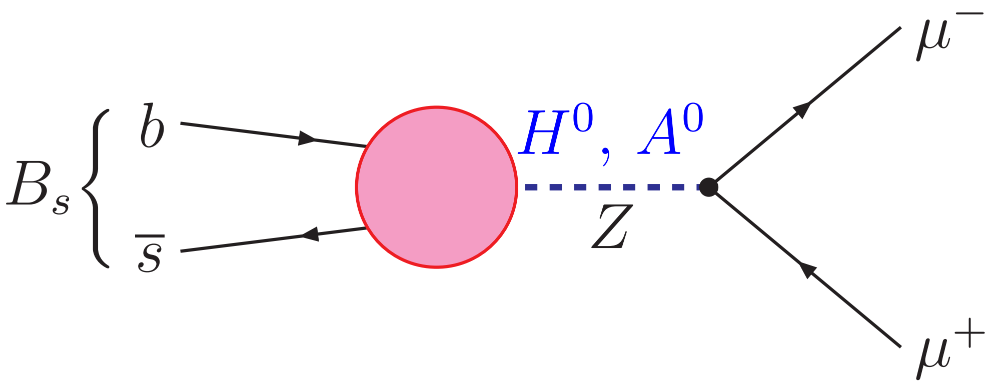


- 赤線: CMS exclusion limit with 4.4fb^{-1} data.

$B_s \to \mu^+ \mu^-$ in mSUGRA

- $\mathrm{B}(B_s \to \mu^+ \mu^-)_{\mathrm{exp}} < 4.5 \times 10^{-9}$ at 95% C.L. (LHCb, '12)
- $\mathrm{B}(B_s \to \mu^+ \mu^-)_{\mathrm{SM}} = (3.58 \pm 0.36) \times 10^{-9}$

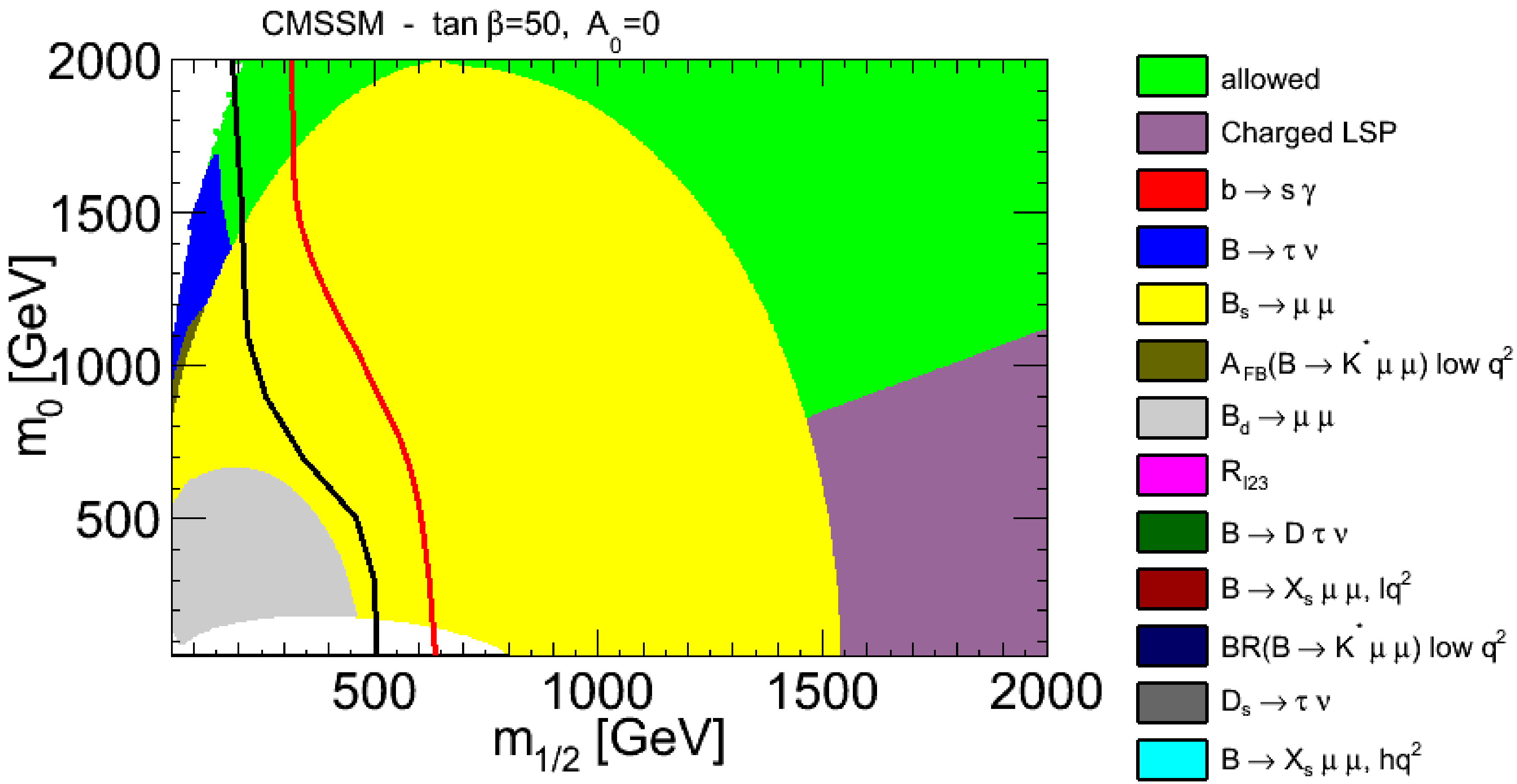
標準模型値に迫って来た。



- SUSY breaking による湯川相互作用への補正が重要な寄与。
  - ▷ $\mathrm{B}_{\mathrm{SUSY}} \gg \mathrm{B}_{\mathrm{SM}}$ になり得るとして注目された。
- $\mathrm{B}(B_s \to \mu^+ \mu^-)_{\mathrm{SUSY}} \propto \dfrac{\tan^6 \beta}{m_A^4} \Rightarrow \tan\beta \gtrsim 40$ で強い制限。

$B_s \to \mu^+\mu^-$ in mSUGRA

$\tan\beta = 50$ の場合 (Mahmoudi, '12)



- 黄色: LHCb limit for B($B_s \to \mu^+\mu^-$)

Conclusion

- SUSY は new physics の候補。
- LHC SUSY search でシグナルは見つかっていない。
  - ▷ spectrum に制限:
    $m(\tilde{g}) > 1$ TeV, $m(\tilde{q}) > 1.5$ TeV.
- 125 GeV Higgs は MSSM と整合。
- $B_s \to \mu^+ \mu^-$ で large $\tan\beta$ に直接探索より強い制限。