

「SUSYは軽い」

3章で整理したパラメーターの制限や好ましい領域について整理する。結論としては、LHCで発見可能である軽い SUSY を支持する制限が多い。

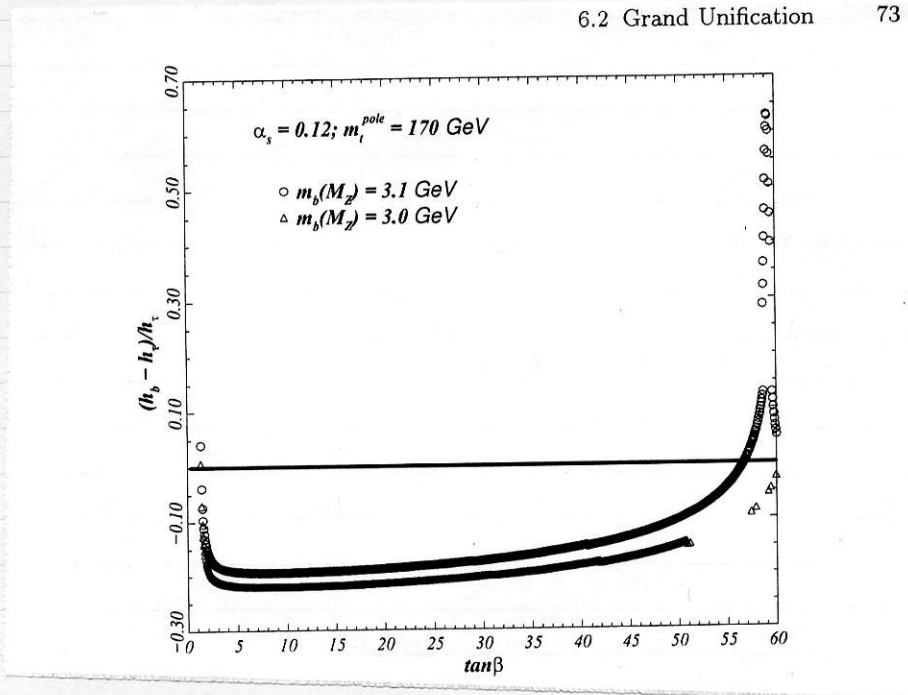
[1] $\tan \beta \geq 2-4$

3-18 B $\tan \beta$ が小さい領域では $m_R < 110 \text{ GeV}$

LEPで exclude している。

[2] 大きな $\tan \beta$ の方がよい。

① $\tan \beta = 40 \sim 55$ で $y_b = y_\tau$ @ GUT が起る。



← m_b の精度

(m_b も難しい)
 QCD の running
 mass の変異)

↓
 $m_b \sim 3 \text{ GeV}$
 ($B \sim 5 \text{ GeV}$)

@ GUT $y_b \sim y_\tau$ になる for $\tan \beta = 40 \sim 55$ ← SUSY 的

$y_t = y_b = y_\tau$ @ GUT になる $\tan \beta \geq 50$ ← SO(10) 的

② $m_R \sim 120-130 \text{ GeV}$ $\tan \beta \geq 30$ (3-18)
 exclude 114 GeV まで

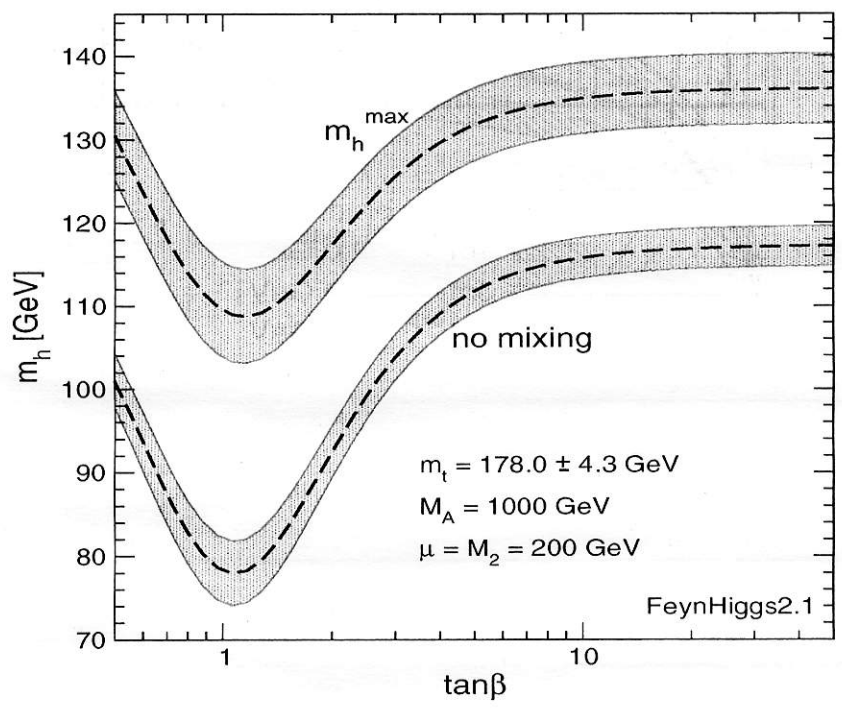


Figure 3.16: m_h is shown as a function of $\tan\beta$ in the m_h^{\max} and the no-mixing scenario. m_t has been varied in the interval $m_t = 178.0 \pm 4.3$ GeV.

$$\Delta m_A^2 = \frac{3G_\mu M_A^4}{\sqrt{2}\pi^2 \sin^2\beta} \ln \left(\left(1 + \frac{m_{\tilde{t}_L}^2}{m_t^2}\right) \left(1 + \frac{m_{\tilde{t}_R}^2}{m_t^2}\right) \right)$$

$$m_A^2 = M_A^2 |\cos 2\beta| \quad (\text{tree level})$$

$\tan\beta=1, \quad \cos 2\beta=0 \quad \text{tree } \tau \cdot M_A=0$

"mixing" 17.5 GeV 20 GeV. \tilde{t} は \tilde{t}_L, \tilde{t}_R には $\theta < \tilde{t}_1, \tilde{t}_2$ と混合して

113. 2 の効果は m_A^{\max} と no-mixing とは異なる。

$$\propto (A^t)^2 \frac{m_t^4}{M_A^2} \left(1 - \frac{1}{12} \frac{A^2}{M_A^2}\right)$$

$$A^t \sim \sqrt{6} m_t \quad \tau \cdot \max | = 113$$

[3] "Naturalness"

SUSY導入の1つの motivation 階層問題(1-2)

→ soft susy breaking term

SUSYの破れ TeV 程度だと

$$(\text{TeV})^2 - (\text{TeV})^2 = (246 \text{ GeV})^2 \text{ で } 10\% \text{ 程度の}$$

調整で済む。これを「Naturalness」と言う

この程度の調整までが「自然」かは「知らずでいいか」10%程度

[4] GUTが起きる条件

図 3-1 の α の running 図 SUSY粒子の mass スケール

を変えると折れまがる場所がかわる。(折れた後の傾きは変わらない)

→ 弱い依存性ではあるか これも $O(\text{TeV})$ であることが

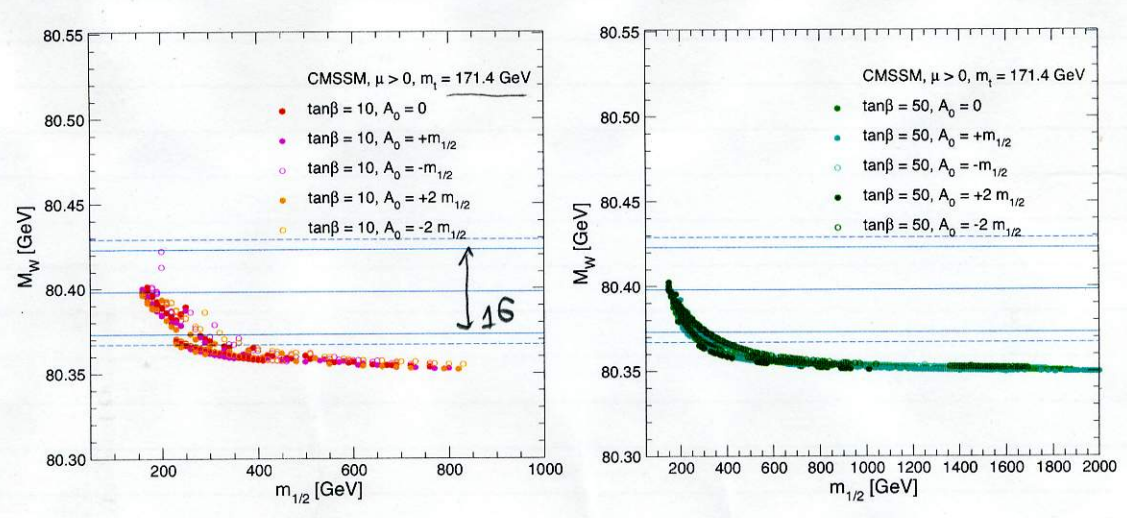
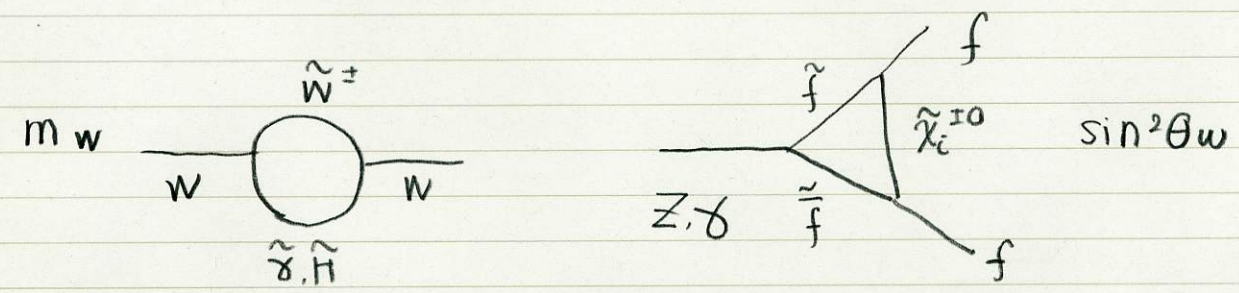
良い。



理論的に $O(\text{TeV})$ が望ましい。

電弱 (EW) の精密測定

SUSYの効果が W, Z, の mass や coupling に loop で入る (LEP2-8)



① $M_W = 80.398 \pm 0.025 \text{ GeV}$ (25 MeV) 以下
SM 80.35より重いので

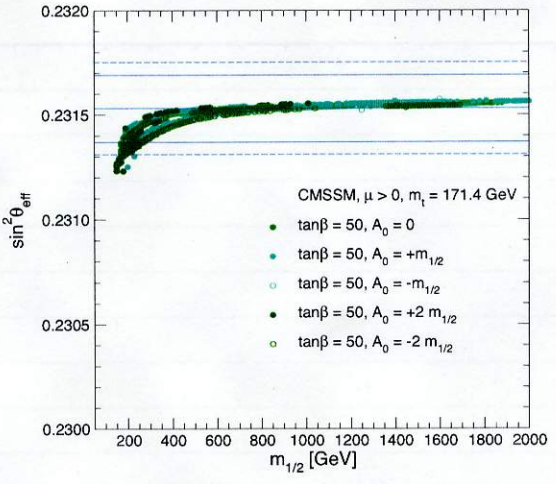
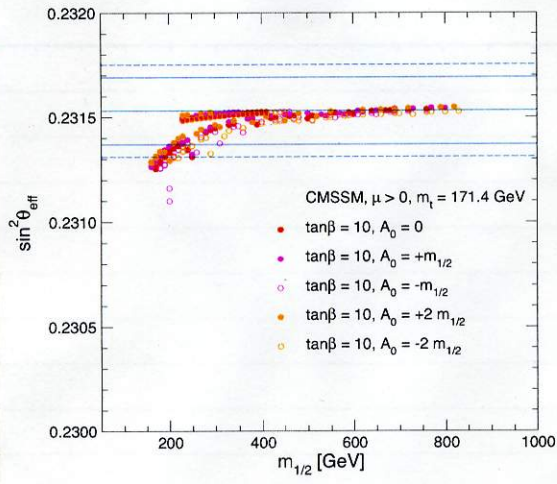
$m_{1/2} < 300 \text{ GeV}$ の SUSY が 15%

① $\tan \beta$. A_0 にあまりよらない。

② top 175 \rightarrow 171.4 になったので t の効果小

結果 SUSY の effect が 大々 なる

以下の絵は m_0 について scan して DM を 作る点だけ
プロット

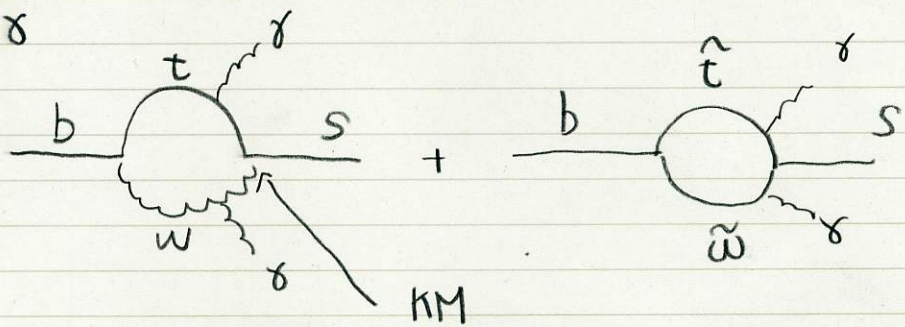


② $\sin^2 \theta_w = \frac{1}{4} (1 - \text{Re} \frac{v_{\text{eff}}}{a_{\text{eff}}})$

$\sin^2 \theta_w = 0.23153 \pm 0.00016$ (700ppm)

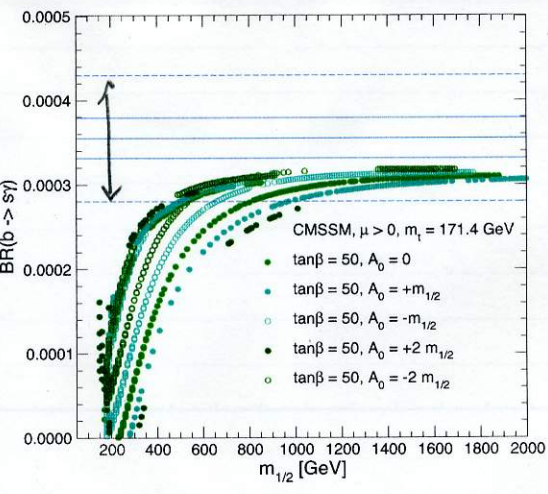
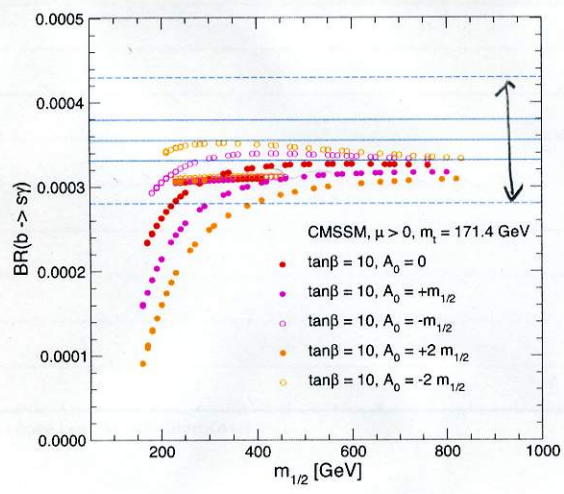
$m_{1/2} < 200$ GeV の軽い SUSY は 7 了力悪い。

③ $b \rightarrow s \gamma$



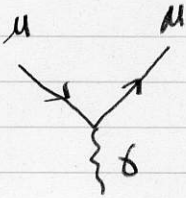
実験 $Br = (3.55 \pm 0.24 \pm 0.03) \times 10^{-4}$
 SM $= (3.15 \pm 0.23) \times 10^{-4}$

$\mu > 0$ かつ
 A の大きさは
 A' x



$\tan \beta$ が
 大きいほど
 悪くなる

④ $\mu \cdot g-2$ (異常磁気モーメント)



μ の電流として考える

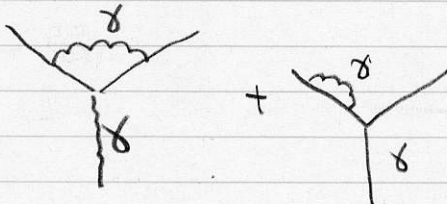
$$-e \bar{u}_f \delta_\mu u_i = -\frac{e}{2m} \bar{u}_f ((p_+ + f_i)_\mu - i \delta_{\mu\nu} \delta^\nu) u_i$$

\uparrow 電荷
 $\delta_{\mu\nu} \delta^\nu$
 \Downarrow 磁気モーメント

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m} \vec{\sigma} = -g \frac{e}{2m} \vec{S}$$

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{\sigma} \text{ (spinの向き)}$$

g is spin factor $g=2$ at tree-level

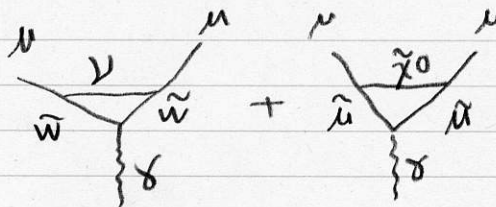


など補正が入り $g=2$ からずれる

$$a = \frac{g-2}{2} \text{ 定義される}$$

$$a_\mu^{SM} = \sum \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) \dots \sim 10^{-3} \text{ の補正 (QED)}$$

SUSYがある

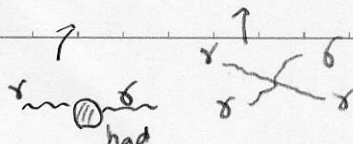


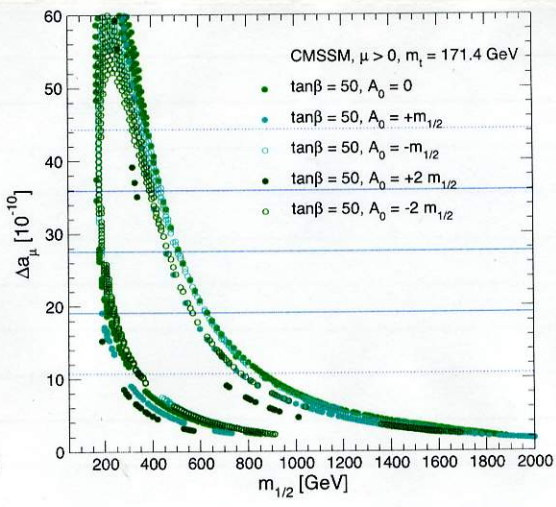
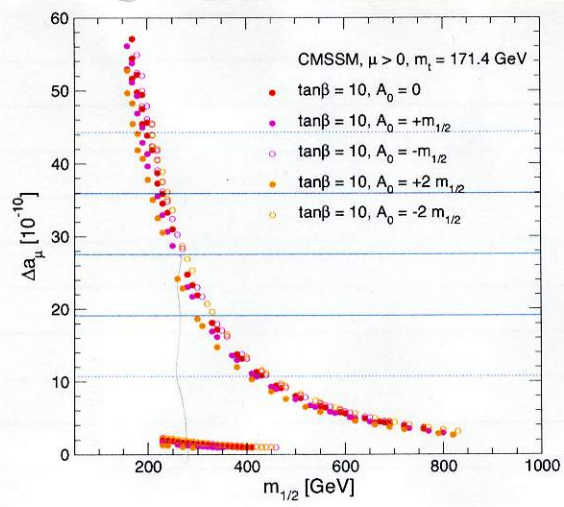
など加わる

$$\frac{a_\mu^{SUSY}}{a_\mu^{SM}} \sim \left(\frac{100 g_{\mu\nu}}{\tilde{m}} \right)^2 \tan \beta \cdot \cos(\phi_{M_2} + \phi_\mu)$$

$$a_\mu^{SM} = (11659180.5 \pm 4.4 \pm 3.5 \pm 0.2) \times 10^{-10}$$

had LBL QED-EW



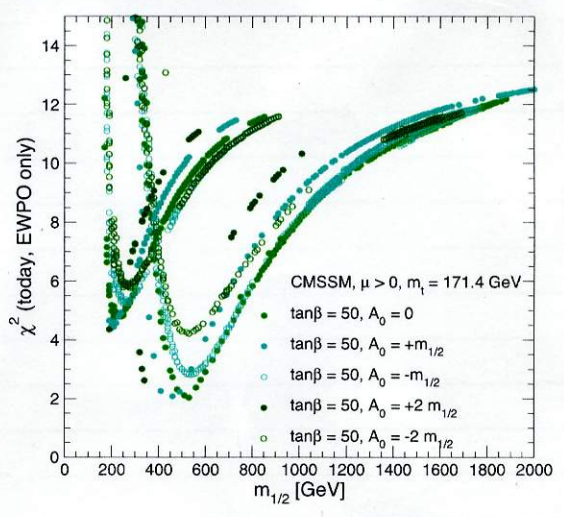
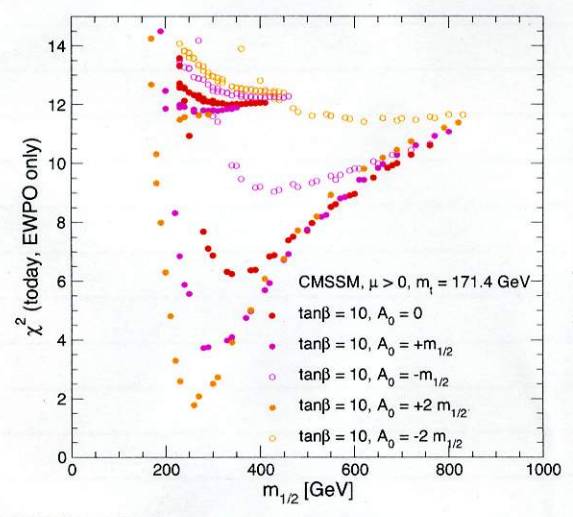


$a_\mu^{ex} = (11659208 \pm 6.3) \times 10^{-10}$ ← 可なり実験

$\Delta^{ar} = (27.5 \pm 8.4) \times 10^{-10}$ (35 level)

≒ 10% 程度に合うと $m_{1/2} \sim 300 \text{ GeV}$ $\tan \beta = 10$

$m_{1/2} \sim 200 \text{ or } 600 \text{ GeV}$ $\tan \beta = 50$



$M_W, \sin^2 \theta_w, \mu$ (9-2) 程度に合うと, $(m_A, \tan \beta)$

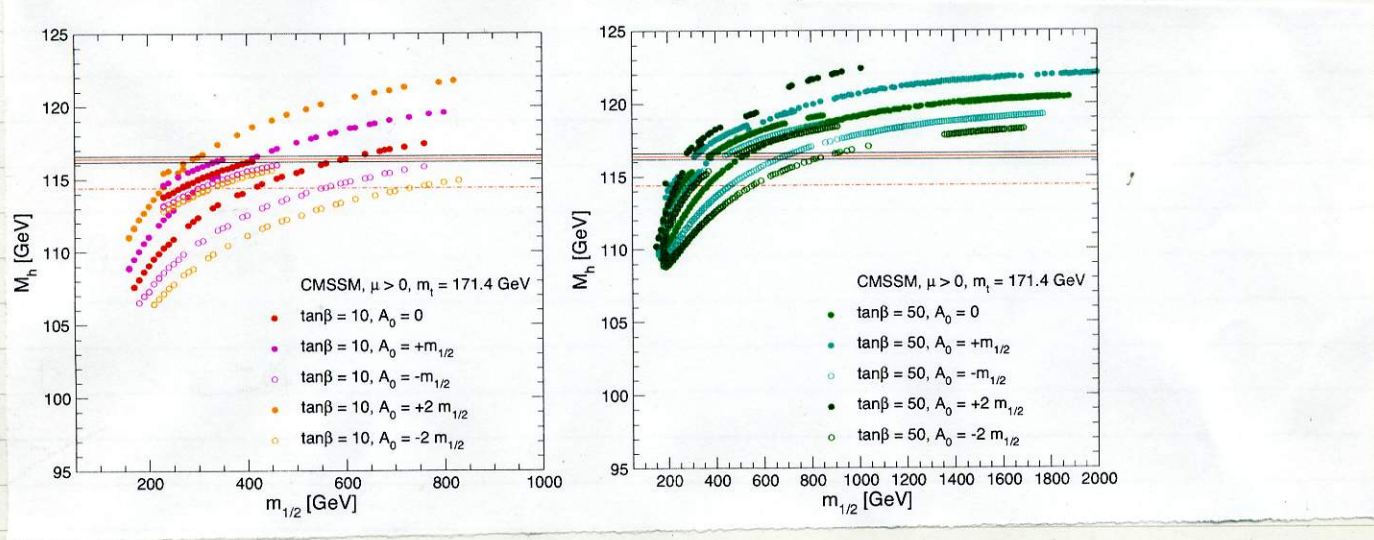
$\tan \beta = 10$ の時 大きい A が m_A が重なる(良い)。 $m_{1/2} < 400 \text{ GeV}$

$\tan\beta = 50$ の時 m_A の limit は及ぶ()
 $\rightarrow A = 55$ ()

$m_{1/2} < 800 \text{ GeV}$

又は $m_{1/2} < 400 \text{ GeV}$

共に軽い所がよい



Higgs の loop の寄与は不安定性が大きい

tan beta の小さい所 m_A 軽く $\rightarrow A$: mixing が入り
 て重くなる

$\tan\beta = 50$ m_A 小さい方がいい

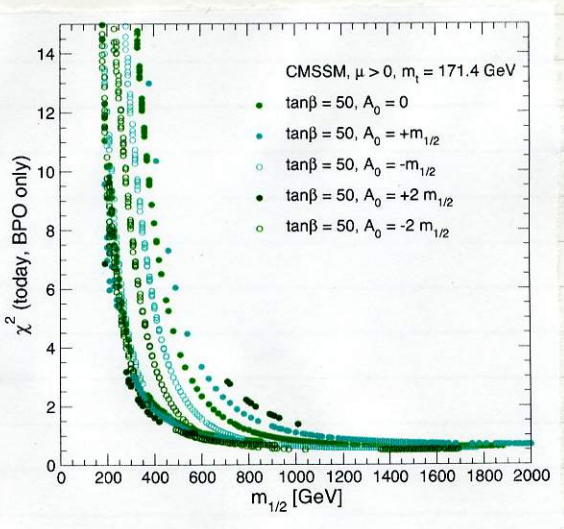
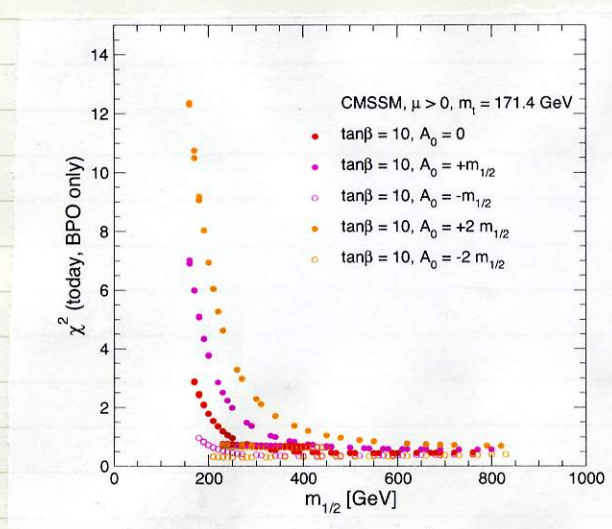
フルーバ-

- $b \rightarrow s \gamma$
- $B \rightarrow \mu \mu$
- $B \rightarrow \tau \nu$
- B_s 振動

(limit $Br < 10^{-7}$)

($Br_{exp} / Br_{SM} = 0.93 \pm 0.41$)

SMの予言の力が良い → 重い SUSY の方がいい。



- フルーバ-
- CP

SUSY がある方が (重い) 方がいい。

KMFJ では

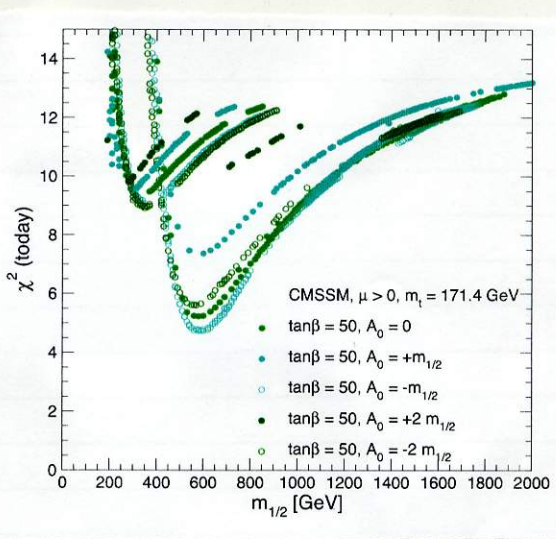
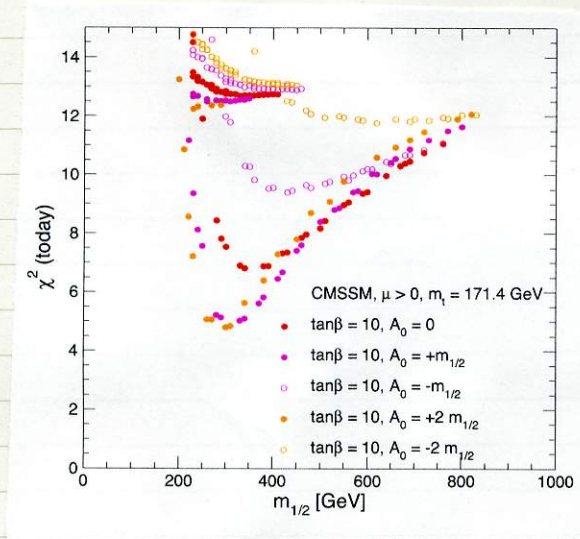
(CP が不足している → 新しい CP

が必要でも)

一般的に 1 TeV 以上

では CP が 足りる)

χ^2 が 2 程度悪くなる



→ それぞれの 粒子の mass

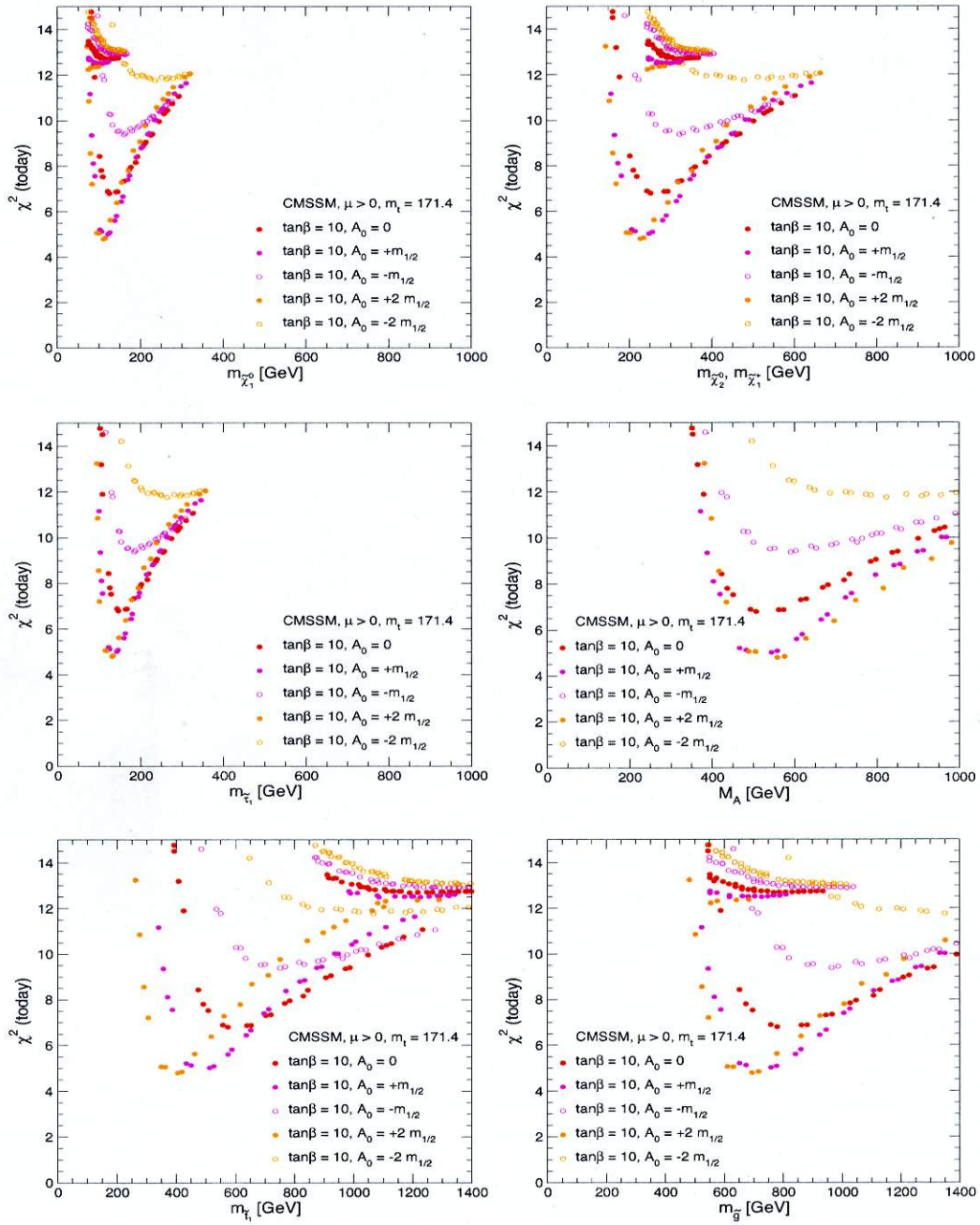


Figure 13: Various SUSY masses are presented with their respective χ^2 value in the CMSSM for $\tan\beta = 10$. The panels show (a) $m_{\tilde{\chi}_1^0}$, (b) $m_{\tilde{\chi}_2^0}$ and $m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$ (which are very similar), (c) $m_{\tilde{\tau}_1}$, (d) M_A , (e) $m_{\tilde{t}_1}$ and (f) $m_{\tilde{g}}$.

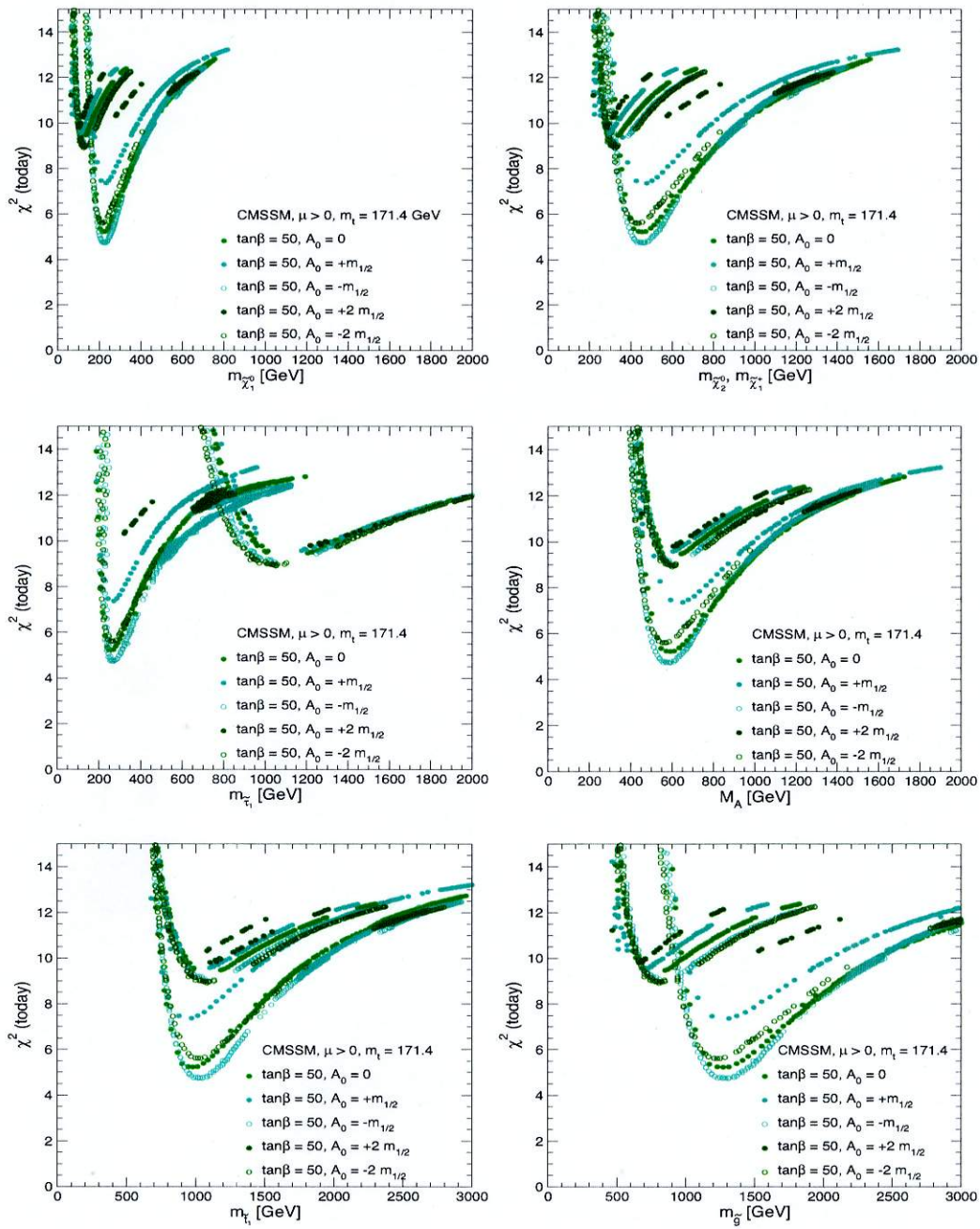


Figure 14: Various SUSY masses are presented with their respective χ^2 value in the CMSSM for $\tan\beta = 50$. The panels show (a) $m_{\tilde{\chi}_1^0}$, (b) $m_{\tilde{\chi}_2^0}$ and $m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$ (which are very similar), (c) $m_{\tilde{\tau}_1}$, (d) M_A , (e) $m_{\tilde{t}_1}$ and (f) $m_{\tilde{g}}$.

DMからの制限

Cold DM $\Omega_{CDM} h^2 = 0.113^{+0.016}_{-0.013}$

25,6%がDM (70% Dark Energy)

かなり厳しい量である。(矢を抜くと破くに超えてしまう)

宇宙の初期にこのくらい出来て、このくらい対消滅するから今の量を計算して $\Omega_{CDM} h^2$ と比較する

$n_{eq} \sim (MT)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m}{T}}$ $\frac{m}{T} \sim 30$ freeze out

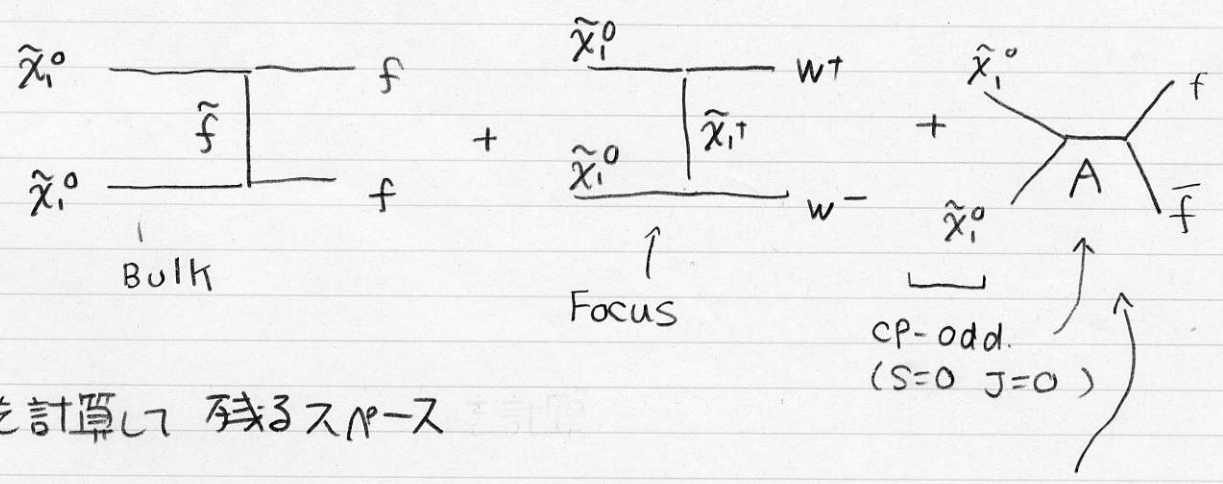
$\Omega_\alpha = m \cdot n \sim \frac{10^{-10} \alpha eV^{-2}}{\langle \sigma v \rangle}$

$\langle \sigma_{AV} \rangle \sim \frac{\alpha^2}{M_{weak}^2} \sim 10^{-9} \text{ GeV}^{-2}$

$M_{weak} \sim 200-300 \text{ GeV}$

$\Omega_\alpha \sim 0.1$ になる

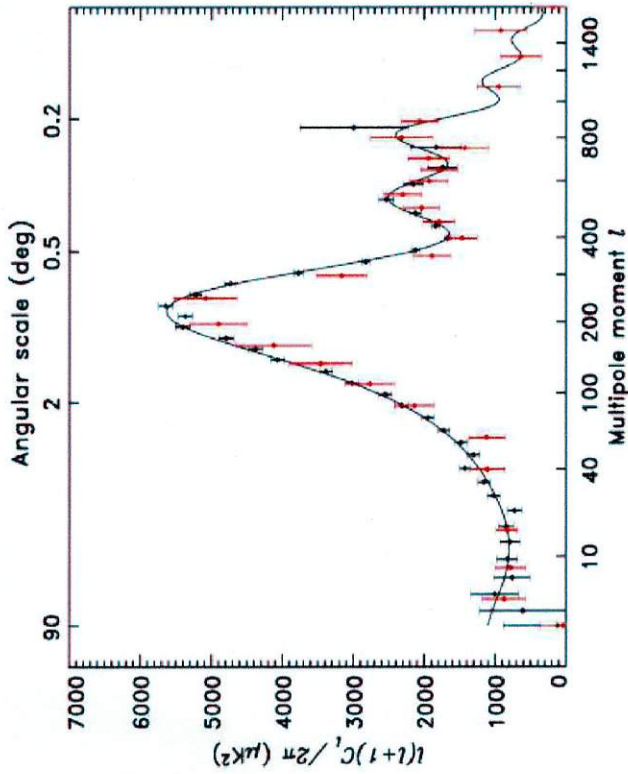
$\langle \sigma_{AV} \rangle$ を正しく計算



を計算して残るスペース

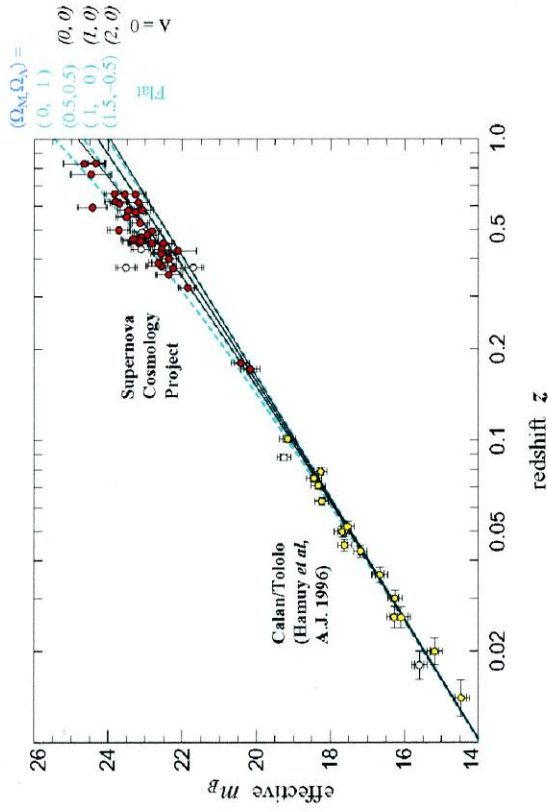
0. 最近のダークマターを巡る情勢 (一言)

WMAP/SNIa など多くの測定結果が、Cold & 非バリオンのダークマターの存在(25%)を予言している。

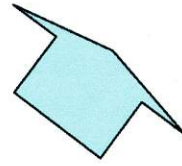


WMAPなどのCMBのゆらぎの精密測定
 Ω_b が小さい。(BBN、Ly α も)
 Hotは、まずい (小さな構造が消える)

$$\Omega_\nu h^2 < 0.0076$$



遠方のSNIaの測定
 宇宙が加速している。 $\Omega_\Lambda = 0.7$



$$\Omega_{CDM} h^2 = 0.113^{+0.016}_{-0.018}$$

宇宙の25% がCold DM
 5% がバリオン
 70% が未知のdark energy



COSM-01
 参照

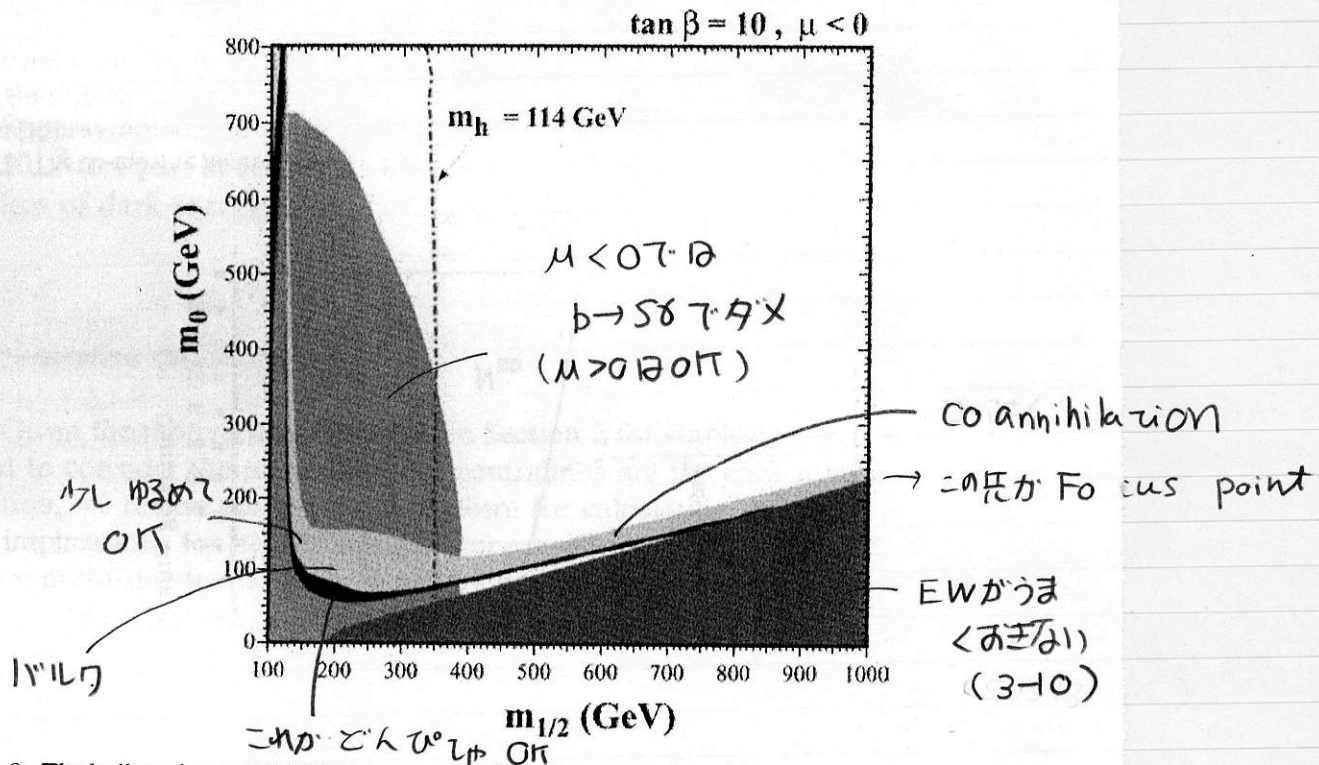


Fig. 9. The bulk and co-annihilation regions of minimal supergravity with $A_0 = 0$, $\tan \beta = 10$ and $\mu < 0$. In the light blue region, the thermal relic density satisfies the pre-WMAP constraint $0.1 < \Omega_{DM} h^2 < 0.3$. In the dark blue region, the neutralino density is in the post-WMAP range $0.094 < \Omega_{DM} h^2 < 0.129$. The bulk region is the dark blue region with $(m_0, M_{1/2}) \sim (100 \text{ GeV}, 200 \text{ GeV})$. The stau LSP region is given in dark red, and the co-annihilation region is the dark blue region along the stau LSP border. Current bounds on $b \rightarrow s\gamma$ exclude the green shaded region, and the Higgs mass is too low to the left of the $m_h = 114 \text{ GeV}$ contour. From [20].

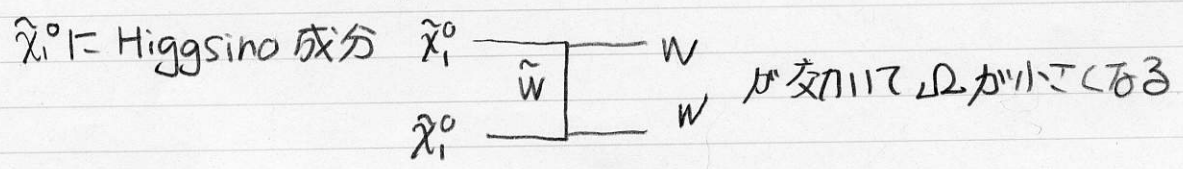
宇宙以外で以外で良い所と一致している ($\mu > 0$)

$\mu < 0$ $b \rightarrow s\gamma$
 $\mu \lesssim 0$ Higgsはきつい ($A\tau$ 調整可)

co-annihilation STU

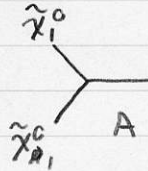
$\tilde{\chi}^0 \tilde{\tau}^\pm \rightarrow \tau \gamma$ に decay する 効果で Ω が小さくなる
 $\tilde{\tau}^\pm \sim \tilde{\chi}^0$ の mass が近い

Focus point $m_0 \rightarrow \infty$ (1 TeV) とすると μ が小さくなる (3-10)



• $\tan\beta$ が大きい時

$m_{\tilde{\chi}_1^0} = \frac{1}{2} m_A$ の場合

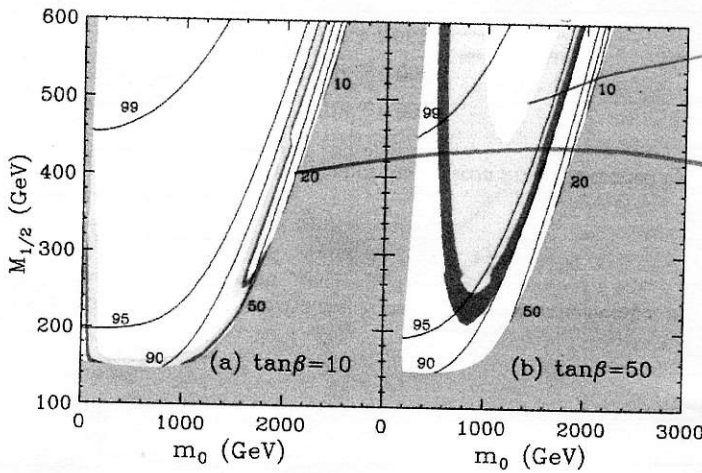


が pole でぶかてきく

↓
BW (LEP-1-13)

18

J.L. Feng / Annals of Physics 315 (2005) 2-51

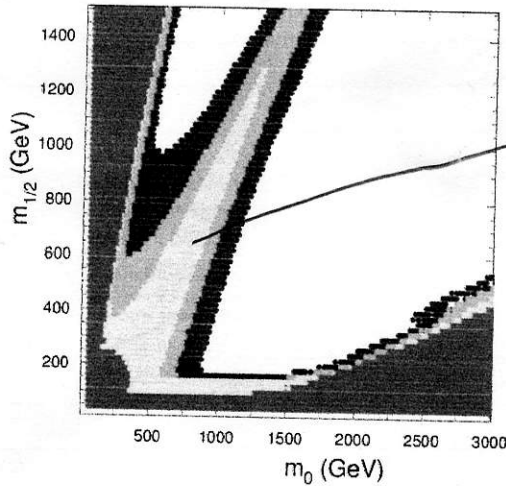


$\tan\beta = 50$
の時 $\mu < m_{1/2}$
1.5C 2.42

$\tan\beta$ が 100 の時は

$\mu < m_{1/2}$ は小なり
及

Fig. 10. Focus point region of minimal supergravity for $A_0=0$, $\mu > 0$, and $\tan\beta$ as indicated. The excluded regions and contours are as in Fig. 6. In the light yellow region, the thermal relic density satisfies the pre-WMAP constraint $0.1 < \Omega_{DM} h^2 < 0.3$. In the medium red region, the neutralino density is in the post-WMAP range $0.094 < \Omega_{DM} h^2 < 0.129$. The focus point region is the cosmologically favored region with $m_0 \geq 1$ TeV. Updated from [12]. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this paper.)



$m_{\tilde{\chi}_1^0} = \frac{1}{2} m_A$
1-103
P/F

Fig. 11. The A funnel region of minimal supergravity with $A_0=0$, $\tan\beta=45$, and $\mu < 0$. The red region is excluded. The other shaded regions have $\Omega_{DM} h^2 < 0.1$ (yellow), $0.1 < \Omega_{DM} h^2 < 0.3$ (green), and $0.3 < \Omega_{DM} h^2 < 1$ (blue). From [25]. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this paper.)