



ILCでのスレプトン

混合の可能性

清水康弘(東北大学)

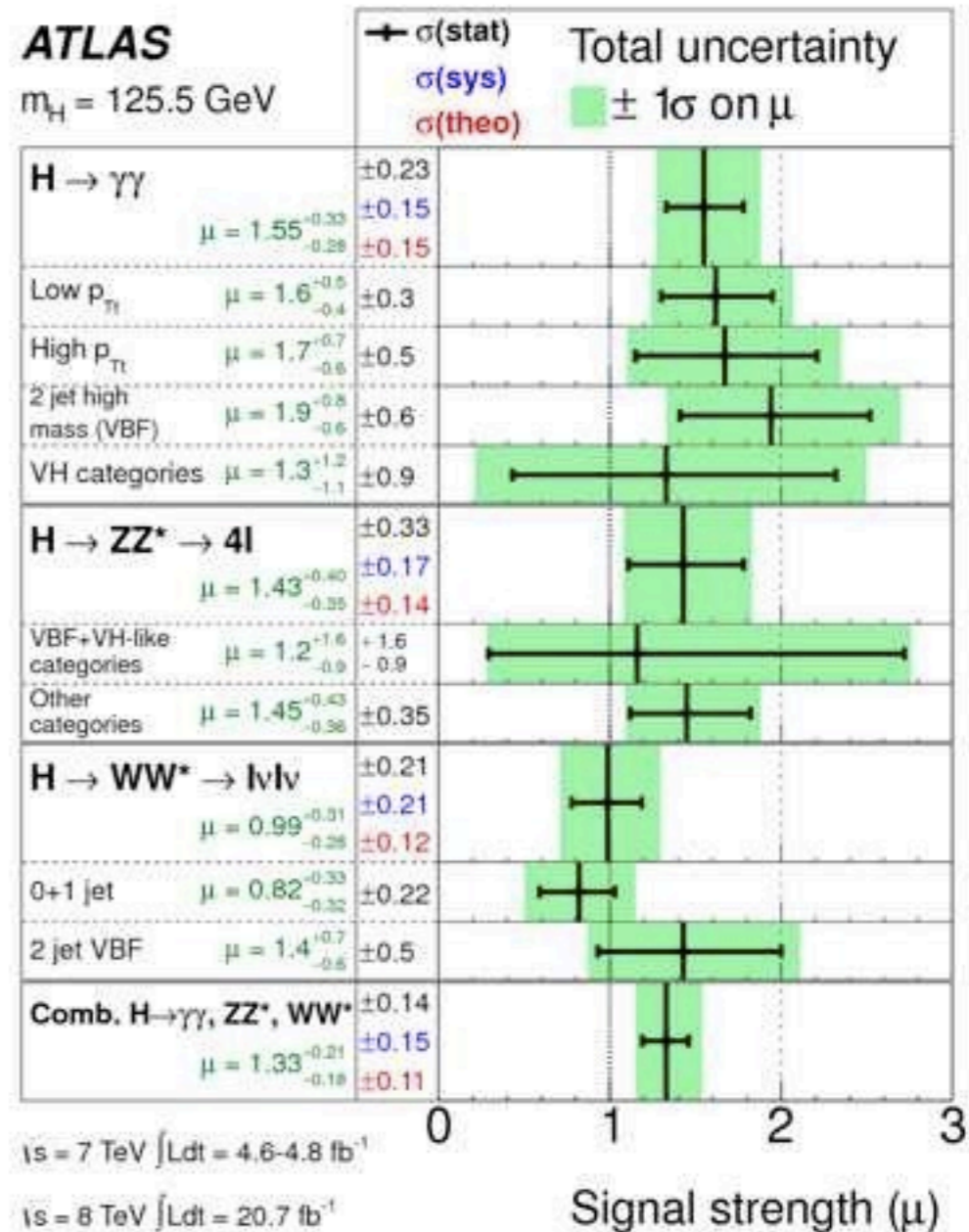
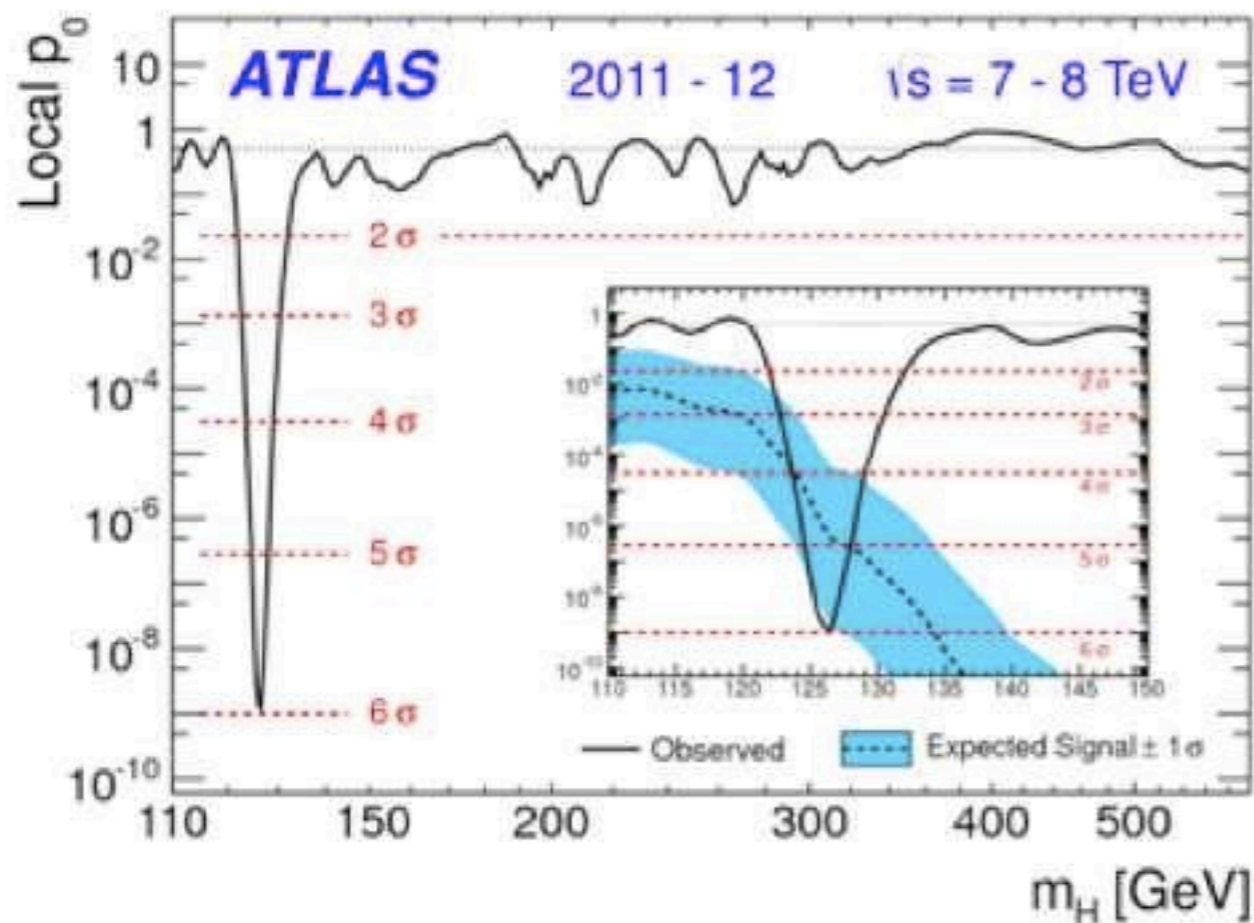
加速器物理合同ILC夏の合宿 2013

@富山 2013/7/20-23

LHCでのHiggsの発見

$$m_h = \begin{cases} 125.5 \pm 0.2 \text{ (stat)}^{+0.5}_{-0.6} \text{ (syst)} \text{ GeV} & \text{ATLAS,} \\ 125.7 \pm 0.3 \text{ (stat)} \pm 0.3 \text{ (syst)} \text{ GeV} & \text{CMS.} \end{cases}$$

性質もほぼ標準模型



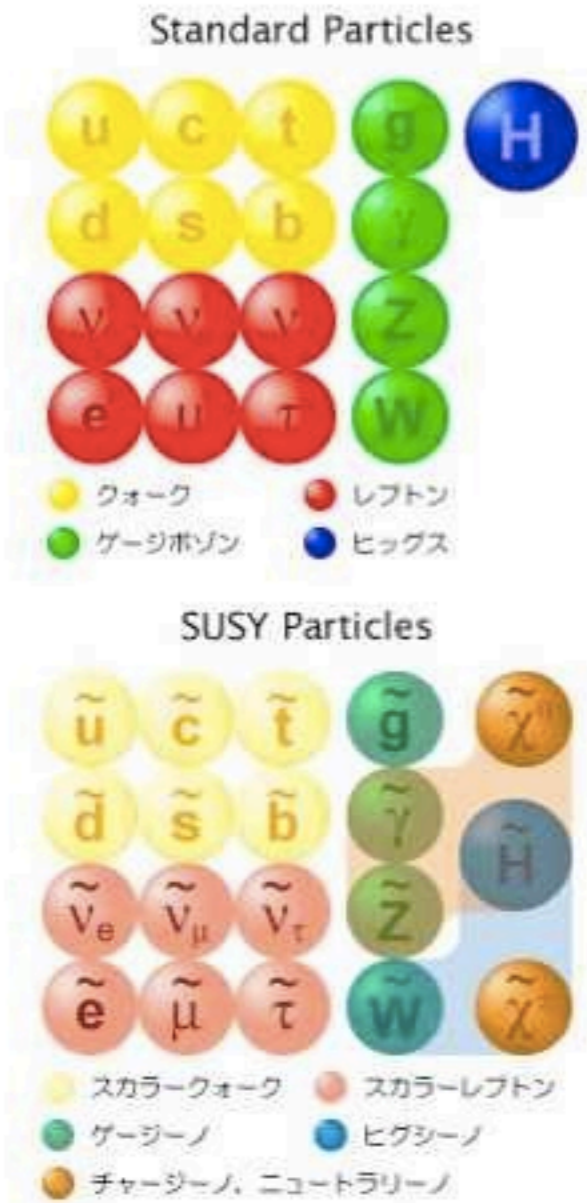
超対称模型

標準模型の粒子にスピンの異なる超対称粒子

超対称粒子の効果でヒッグスの質量の2時発散が
キャンセルしてlog発散になる

階層性問題の解決

R-パリティを仮定すると最も軽い超対称粒子は安定になり、**暗黒物質の有力な候補**



Higgs mass

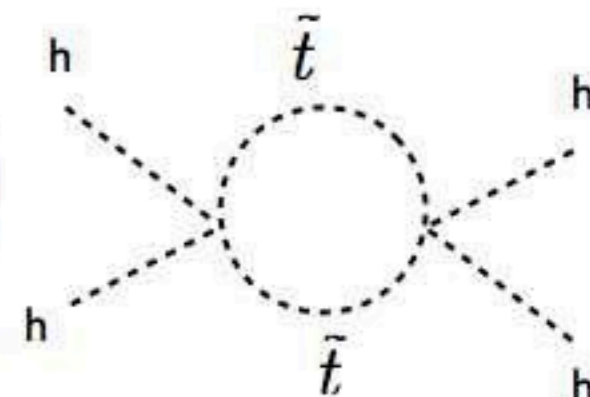
Y.Okada, M.Yamaguchi, T.Yanagida
G.Ridolfi, F.Zwirner
H.Haber, R.Hempfling,

MSSMではHiggsの4点相互作用がゲージ結合定数で決まっている

$$m_h^2 \simeq m_Z^2 \cos^2 2\beta + \frac{3}{4\pi^2} \frac{m_t^4}{v^2} \left(\log \frac{M_{SUSY}^2}{m_t^2} + \frac{2A_t^2}{M_{SUSY}^2} \left(1 - \frac{A_t^2}{12M_{SUSY}^2} \right) \right)$$

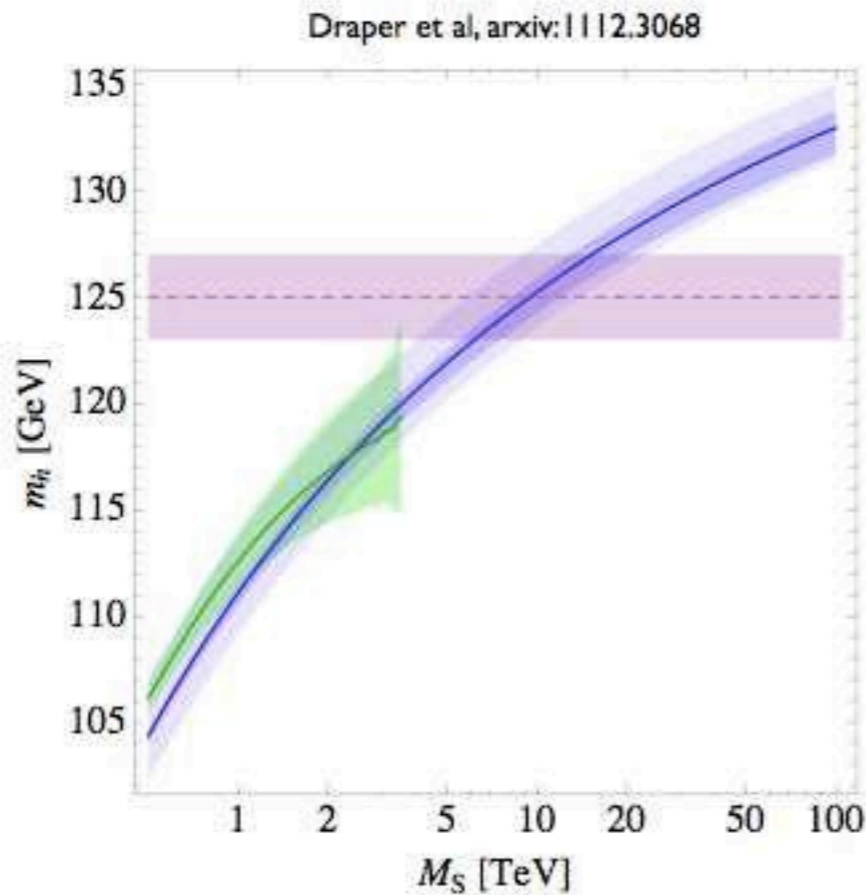
tree

stop loop

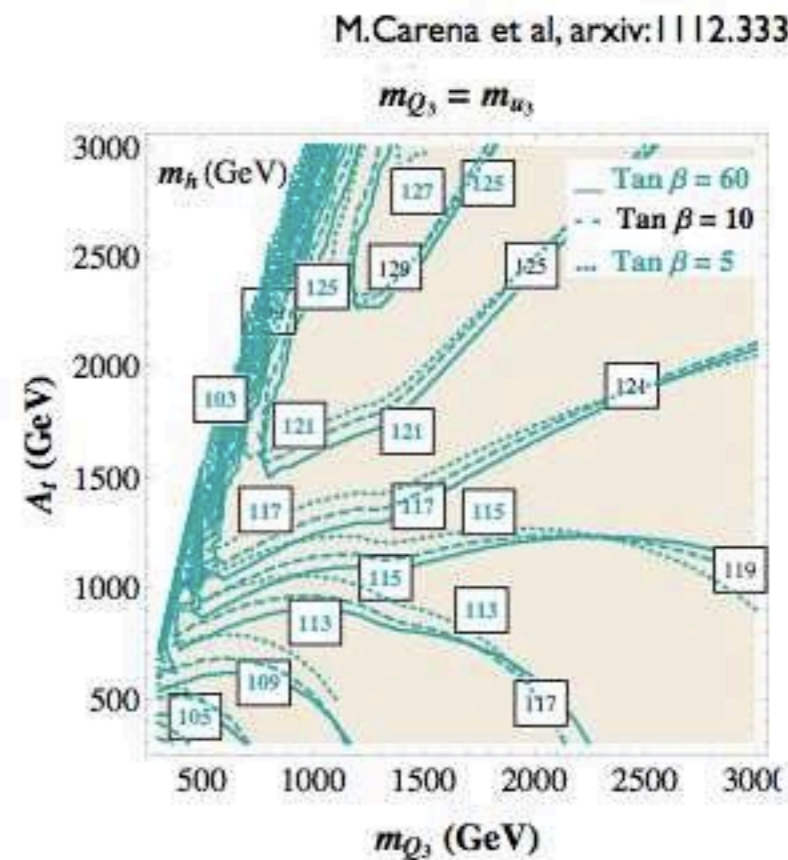


HiggsをZより重くするためにはstopの量子補正を非常に大きくする必要がある

126 GeVにするためにはstopがかなり重い



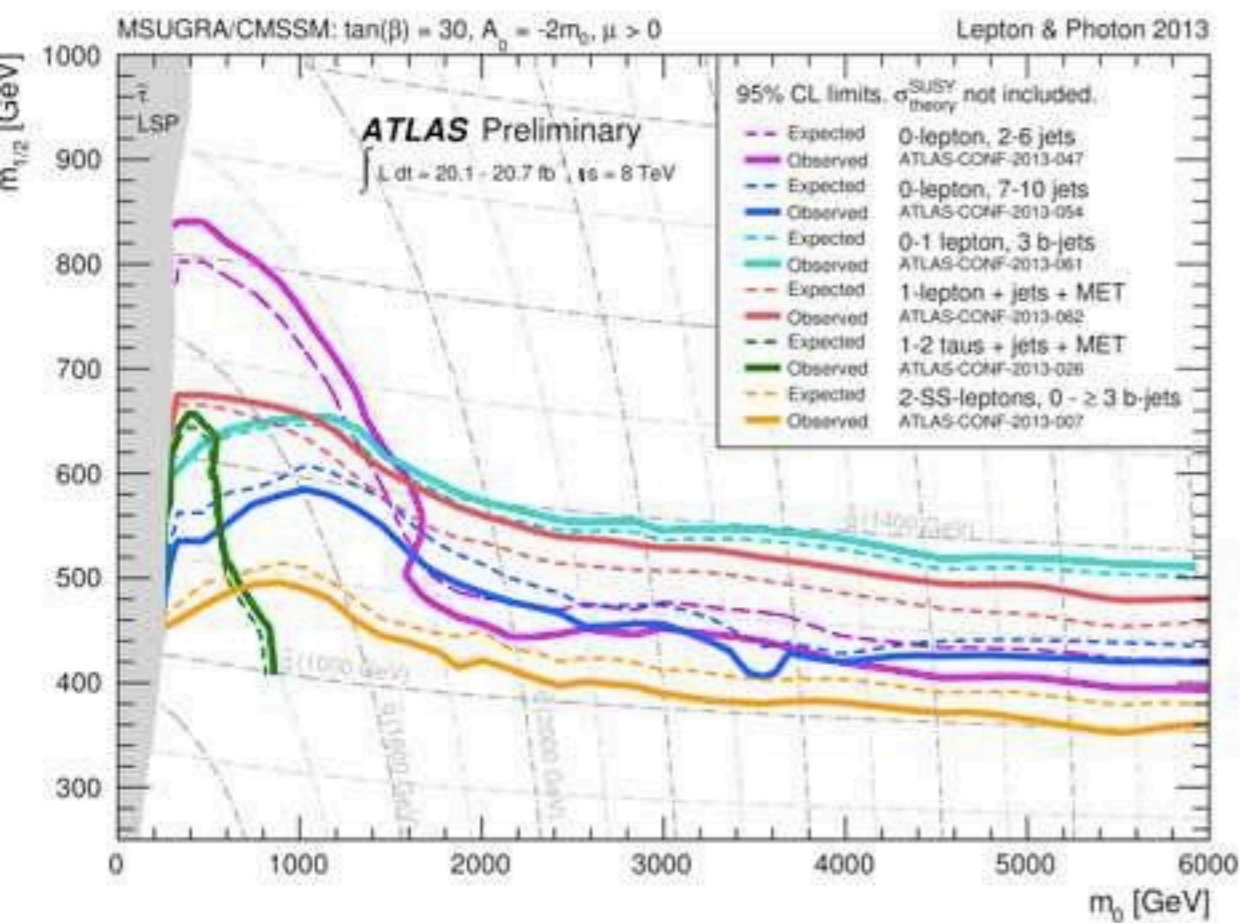
$A_t \simeq 0$



$m_{\tilde{t}} \simeq 1\text{TeV} (A_t \simeq 2\text{TeV})$

LHCでの超対称粒子探索の制限

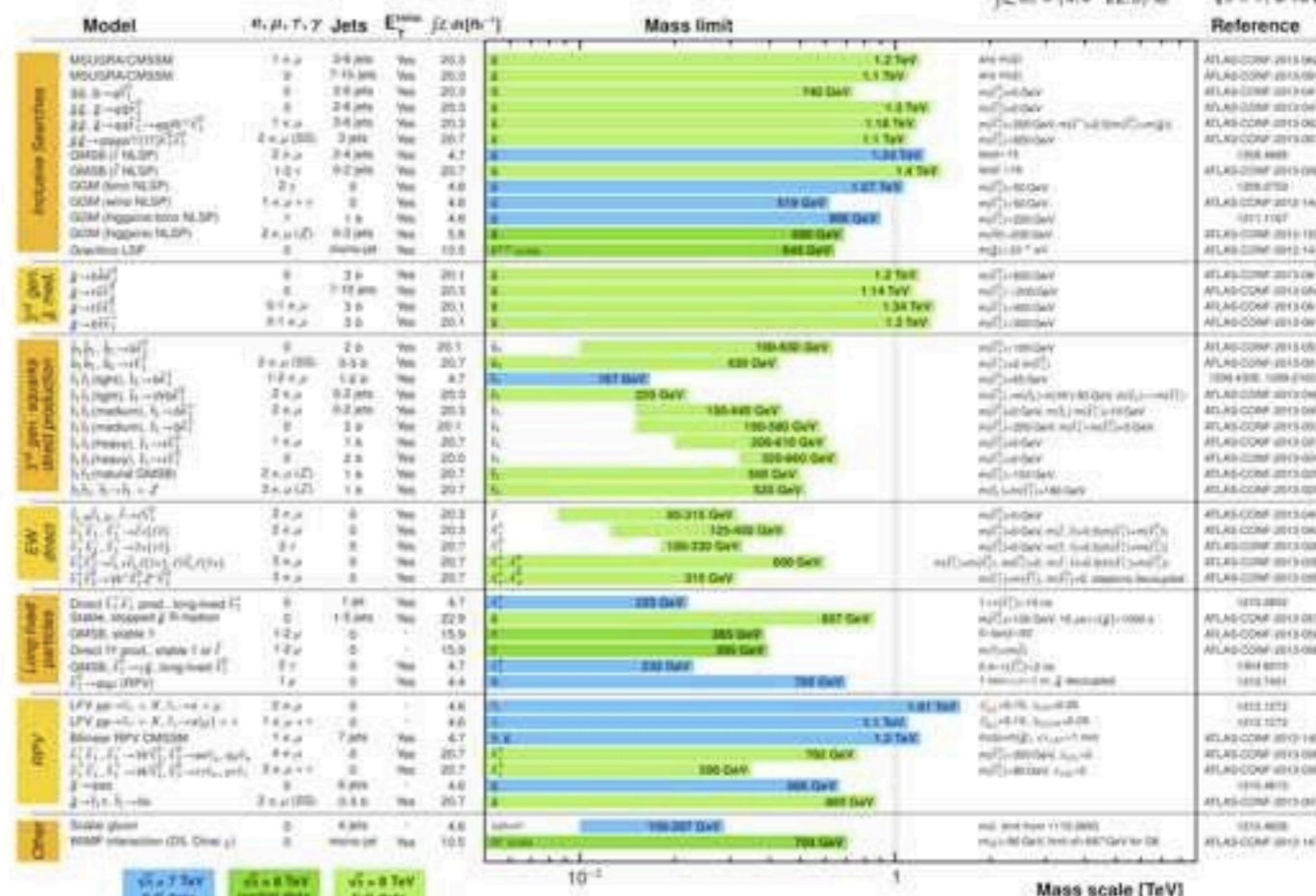
CMSSM



MSSM

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits
Status: LP 2013

ATLAS Preliminary
 $\int \mathcal{L} dt = (4.4 - 22.9) \text{ fb}^{-1}$ $\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$



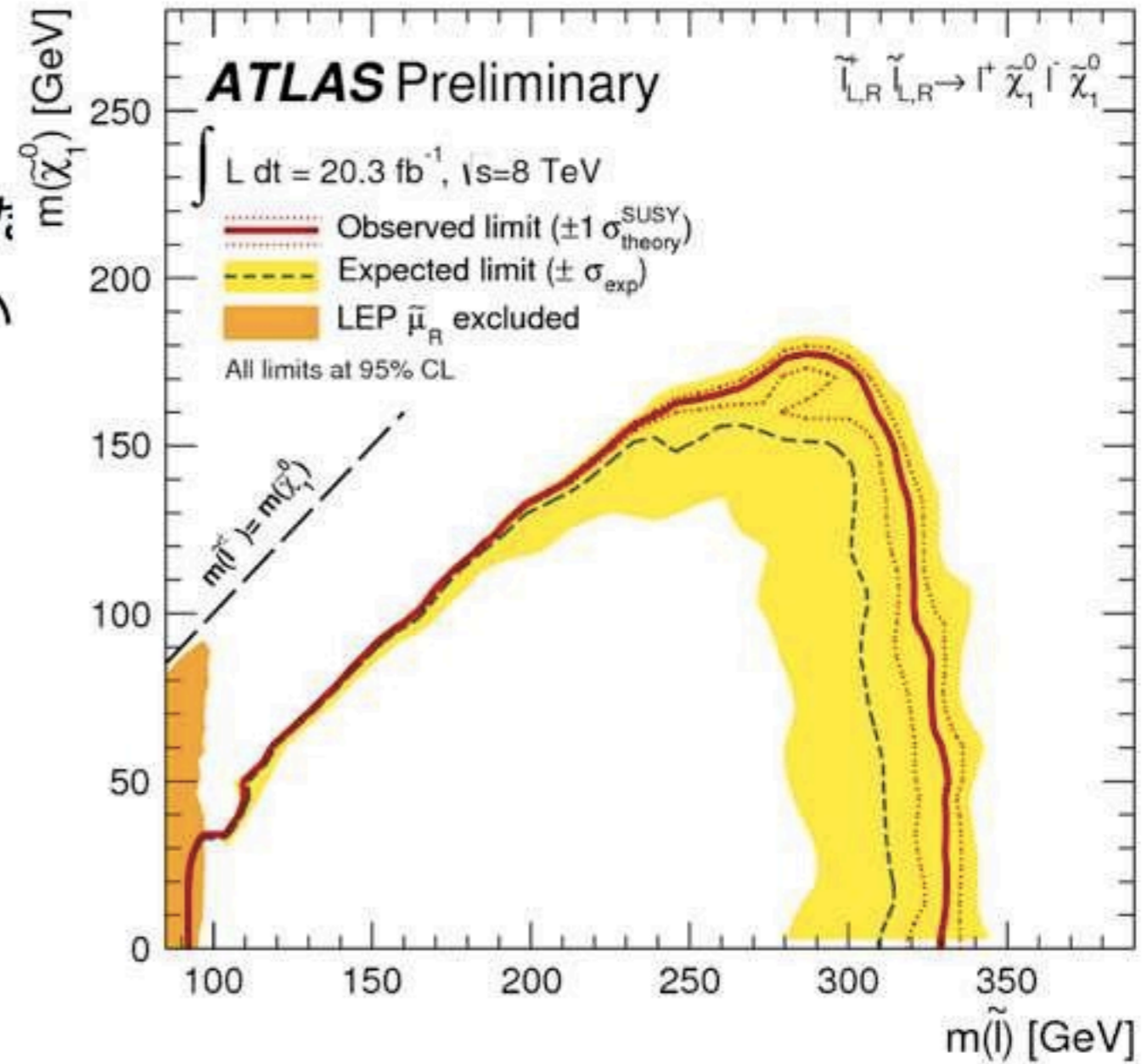
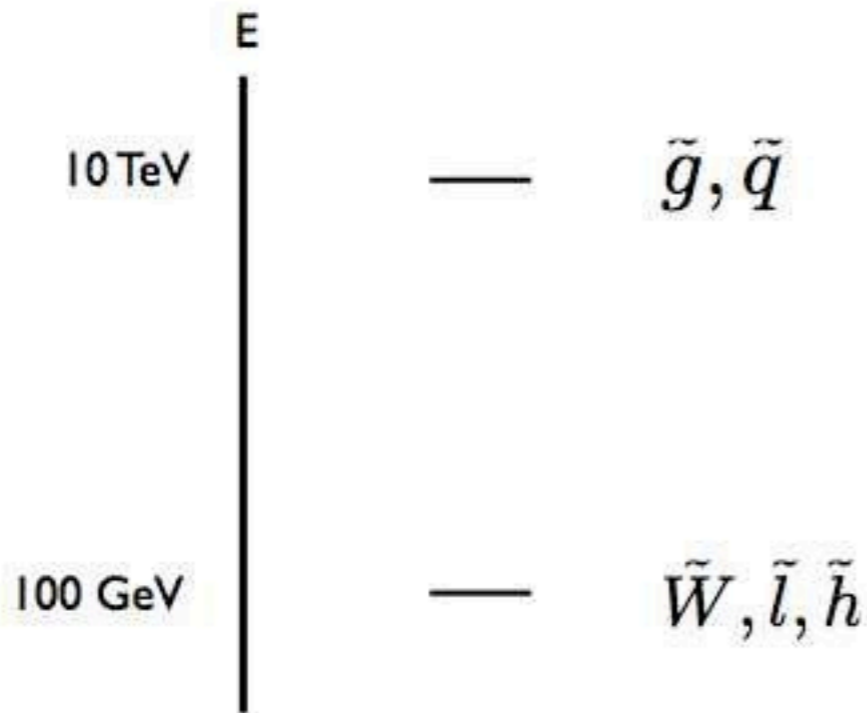
超対称粒子の兆候なし

$$m_{\tilde{g}} > 1.2 \text{ TeV}$$

LHCでのSleptonの直接生成に対する制限

100 GeV程度のsleptonはまだ許されている

125GeV Higgsを説明するためにカラーを持った
超対称粒子がO(10)TeV、カラーを持たない
超対称粒子をO(100)GeV程度



ミューオン磁気双極子能率

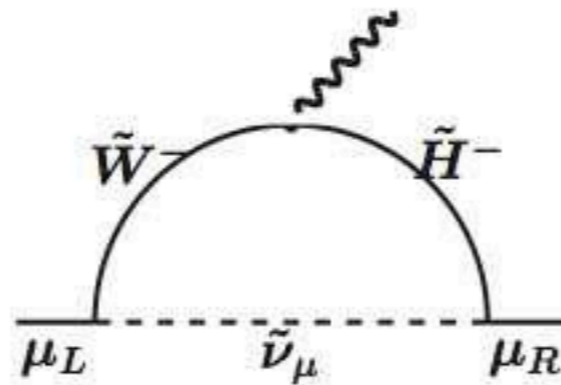
$$a_{\mu}^{\text{EXP}} - a_{\mu}^{\text{SM}} = (26.1 \pm 8.0) \cdot 10^{-10}$$



HLMNT11, arXiv:1105.3149

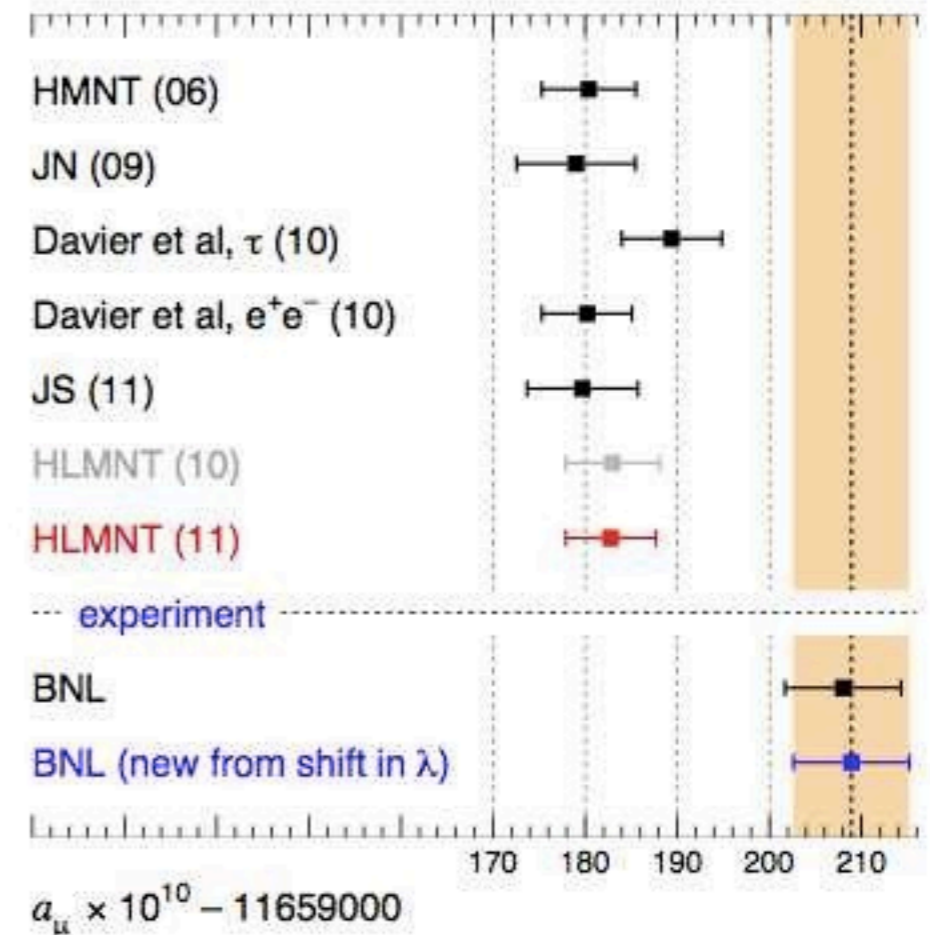
3σ以上のズレ

超対称粒子の効果



$$a_{\mu}^{\text{SUSY}} \simeq \frac{\alpha_2}{8\pi} \frac{\mu^2}{m_{\text{SUSY}}^2} \tan \beta$$

$$\simeq 1.4 \times 10^{-9} \frac{100 \text{ GeV}^2 \tan \beta}{m_{\text{SUSY}}^2 \cdot 10}$$



ズレを説明するためには比較的軽いsleptonが必要

ILCでsleptonを生成できる可能性

ニュートリノ振動

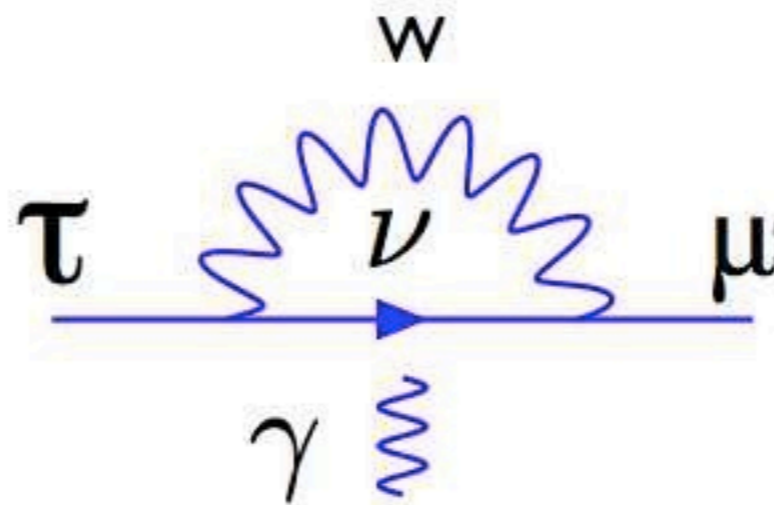
$$\Delta m_{sun}^2 = (7.50 \pm 0.185) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{atm}^2 = (2.47 + 0.069 - 0.067) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.30 \pm 0.013 \quad \sin^2 \theta_{23} = 0.41 + 0.037 - 0.025 \quad \sin^2 \theta_{13} = 0.023 \pm 0.0023$$

ニュートリノでlepton flavorは大きく破れている

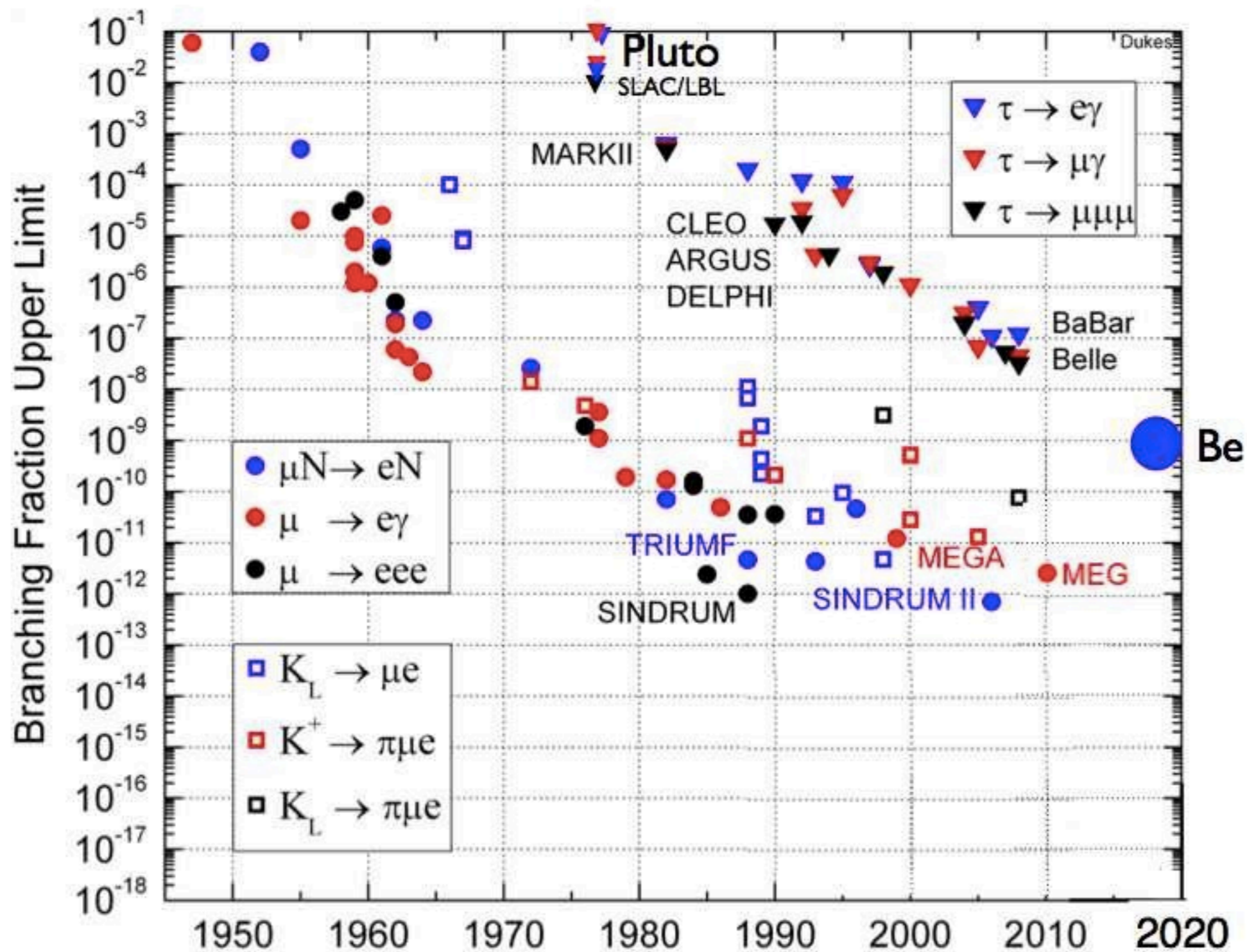
ニュートリノに質量があるとWループから $\tau \rightarrow \mu \gamma$ 過程が起こる



$$\frac{\text{BR}(\tau \rightarrow \mu \gamma)}{\text{BR}(\tau \rightarrow \mu \nu_{\tau} \bar{\nu}_{\mu})} = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_i V_{\tau i}^* V_{\mu i} \frac{m_{\nu_i}^2}{M_W^2} \right|^2 \simeq 10^{-54}$$

実験で観測するには小さすぎる

荷電レプトンでのLFV



Based on a slide presented by Craig Dukes at Tau 2010

超対称型における荷電レプトンでのLFV

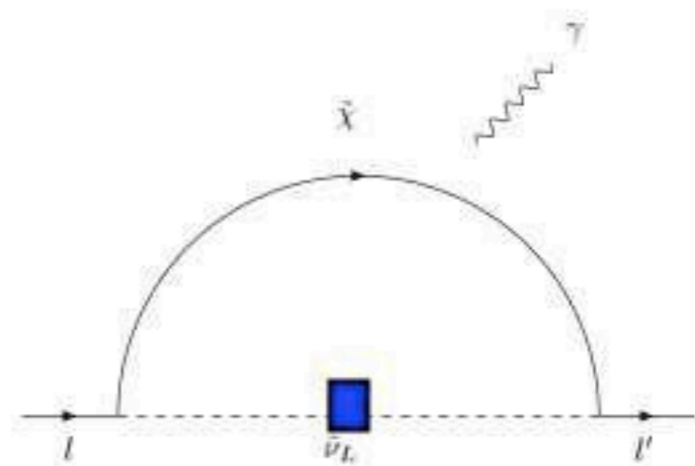
超対称性が破れているためにsleptonはLFVな質量項が存在する

$$-\mathcal{L}_{\text{soft}} = (m_L^2)_{ij} \tilde{\ell}_{Li}^\dagger \tilde{\ell}_{Lj} + (m_E^2)_{ij} \tilde{e}_{Ri}^* \tilde{e}_{Rj} + A_{ij}^E h_1 \tilde{\ell}_{Li} \tilde{e}_{Rj}^*$$

小さなニュートリノの質量とは関係のないLFVの効果

$$B(\tau \rightarrow \mu \gamma) \simeq 10^{-8} \left(\frac{500 \text{ GeV}}{m_{\text{SUSY}}} \right)^4 \left(\frac{\delta_{\tau\mu}^L}{0.1} \right)^2$$

$$B(\mu \rightarrow e \gamma) \simeq 10^{-11} \left(\frac{500 \text{ GeV}}{m_{\text{SUSY}}} \right)^4 \left(\frac{\delta_{\mu e}^L}{0.001} \right)^2$$



$$\delta^{L(R)}_{ij} = \frac{(m_{L(R)}^2)_{ij}}{m_{\text{SUSY}}^2}$$

δ_{ij} の大きさは超対称性の破れの伝達機構に依存する

$O(1)$ だとするとLFVが現在の制限よりおおきすぎる

超対称型のフレーバー問題

ILCでのスレプトン振動

ニュートリノ振動と同様にスレプトンが生成されると振動が起きる

$$|\tilde{\mu}\rangle = \cos\theta|1\rangle + \sin\theta|2\rangle$$

$$|\tilde{\tau}\rangle = -\sin\theta|1\rangle + \cos\theta|2\rangle$$

t=0で $|\tilde{\mu}\rangle$ の時間発展

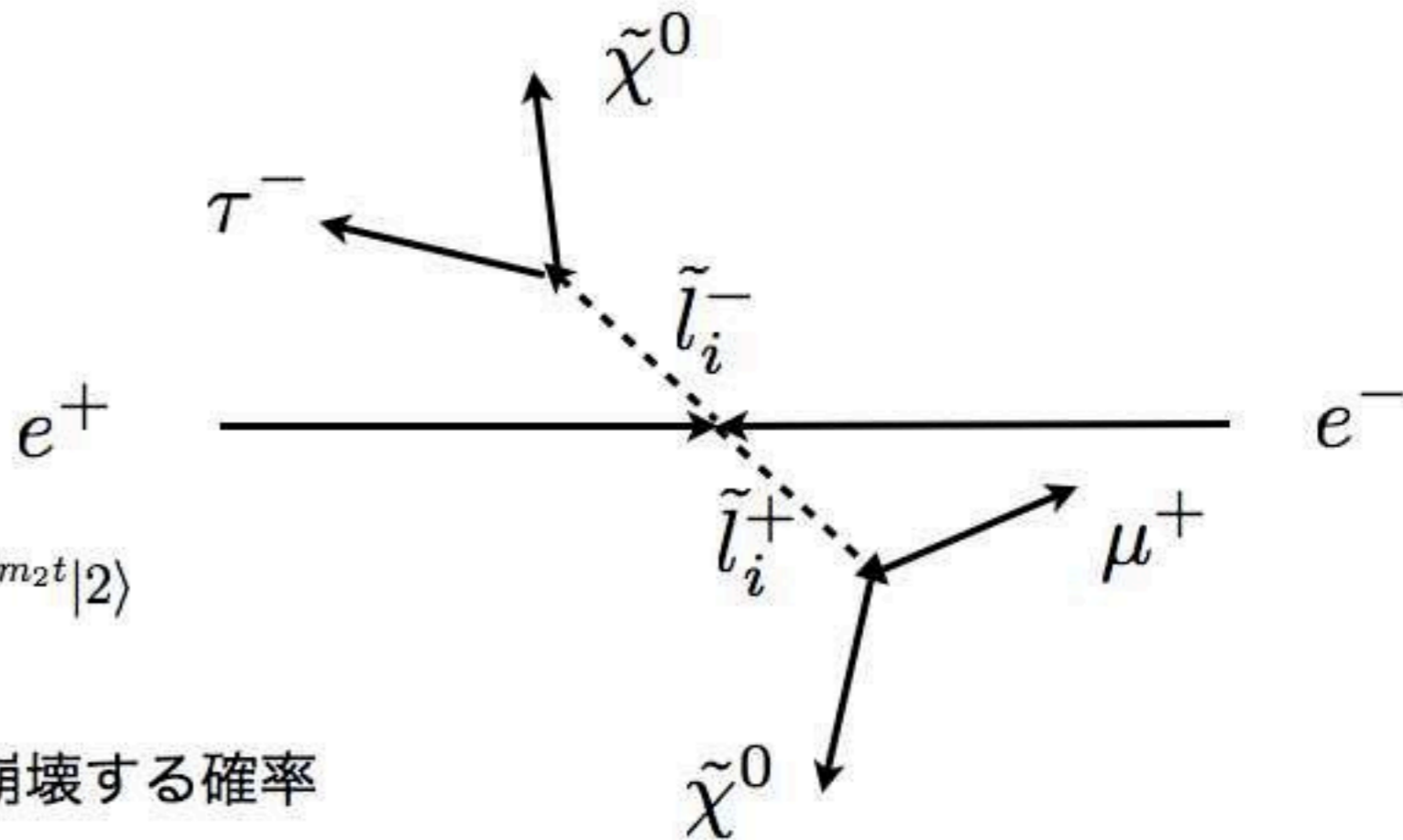
$$|\psi(t)\rangle = \cos\theta e^{-\frac{\Gamma}{2}t - im_1t}|1\rangle + \sin\theta e^{-\frac{\Gamma}{2}t - im_2t}|2\rangle$$

フレーバー振動で τ を含む終状態に崩壊する確率

$$P(\tilde{\mu} \rightarrow \tau + X) = \frac{\int_0^\infty dt |\langle \tilde{\tau} | \psi(t) \rangle|^2}{\int_0^\infty dt \langle \psi(t) | \psi(t) \rangle} \times Br(\tilde{\mu} \rightarrow \tau + X)$$

$$= 2 \sin^2\theta \cos^2\theta \frac{\Delta m^4}{4\bar{m}^2\Gamma^2 + \Delta m^4} Br(\tilde{\mu} \rightarrow \tau + X)$$

$$\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2, \bar{m} = (m_1 + m_2)/2$$



ILCでの左巻きのスレプトン混合

$$\sigma(\tau^+ \mu^- + 4jets + E) \simeq 2\chi_{\tilde{\nu}}(3 - 4\chi_{\tilde{\nu}}) \sin^2 2\theta_{\tilde{\nu}} \times 1.2\text{fb},$$

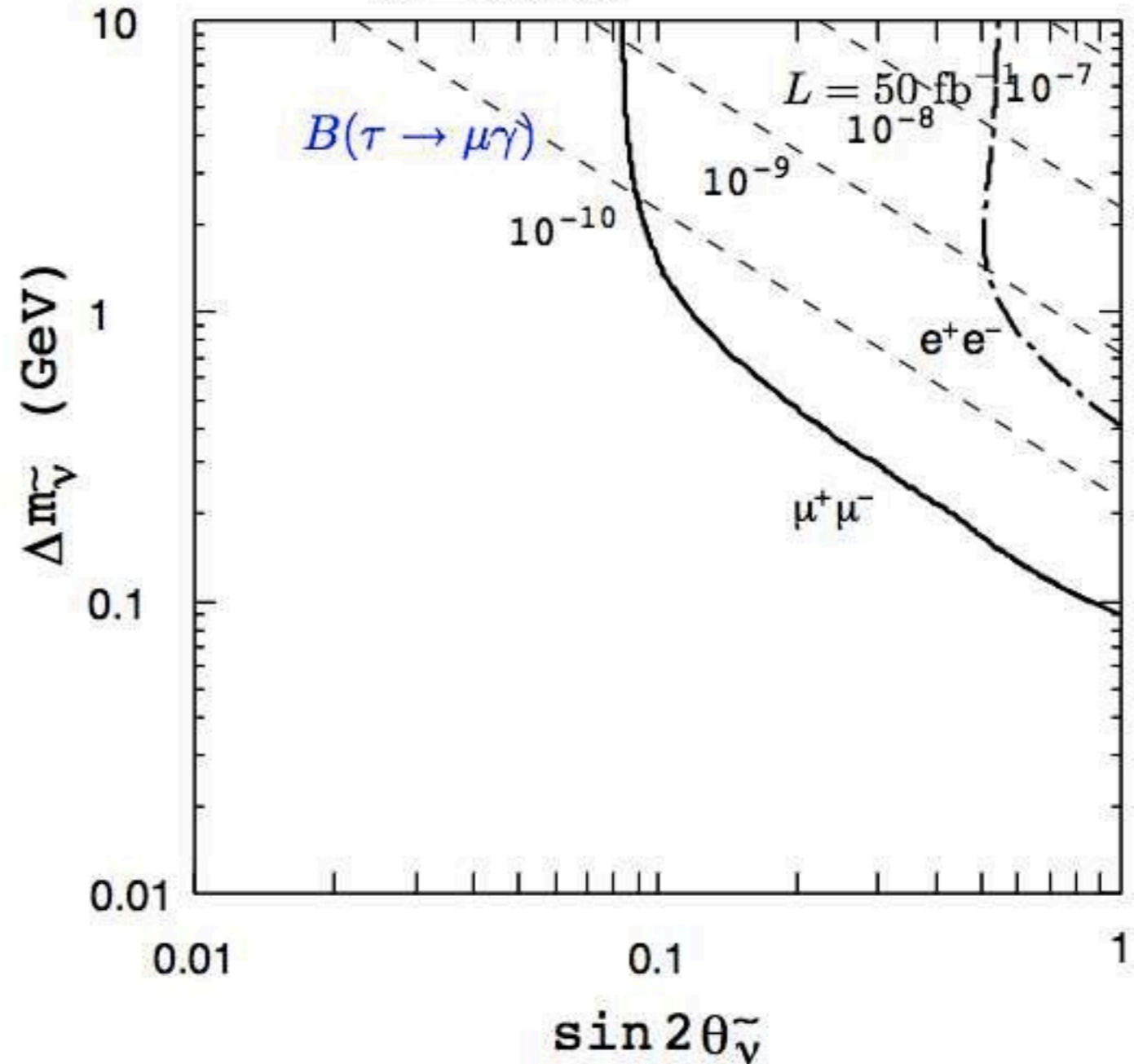
$$x_{\tilde{\nu}} = \frac{m_{\tilde{\nu}_3}^2 - m_{\tilde{\nu}_2}^2}{m_{\tilde{\nu}} \Gamma_{\tilde{\nu}}}$$

(GeV)	$\tan \beta = 3$
$m_{\tilde{\chi}_1^0}$	56
$m_{\tilde{\chi}_2^0}$	105
$m_{\tilde{\chi}_1^-}$	100
$m_{\tilde{\nu}_\mu}$	180
$m_{\tilde{\mu}_L}$	194
$m_{\tilde{\mu}_R}$	159
μ	244

$B(\tau \rightarrow \mu\gamma)$ で見えない領域を
カバーできる可能性がある

'98 J.Hisano, M.M.Nojiri, YS, M.Tanaka

$\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$



まとめ

- LHCの制限から軽いsleptonはまだ排除されていない
- ミューオン $g-2$ の標準模型からのズレを説明するためには軽いslepton
- ニュートリノ振動実験からsleptonにも大きなフレーバー混合が存在する可能性
- ILCでslepton oscillationを観測できる可能性