

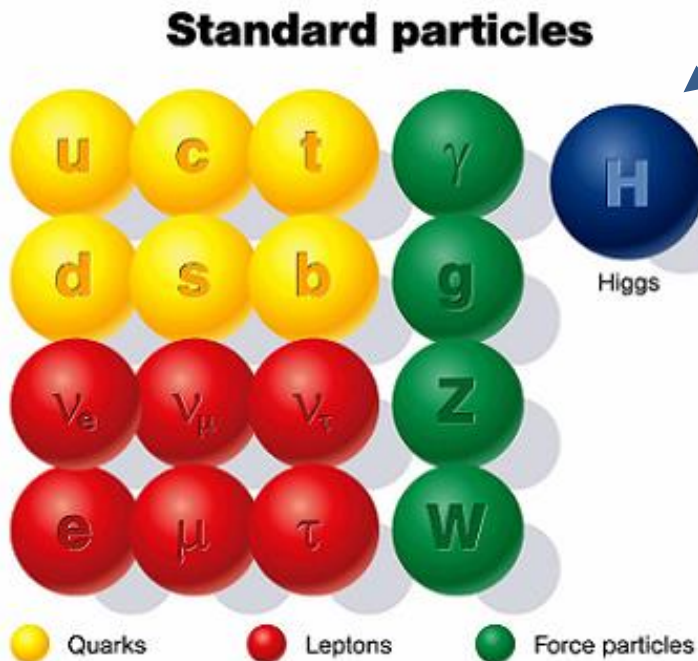
# LHC-ATLAS実験における ヒッグス粒子を崩壊過程に含む 超対称性粒子の探索

永井遼、陣内修、金谷奈央子<sup>A</sup>、浅井祥仁<sup>B</sup>

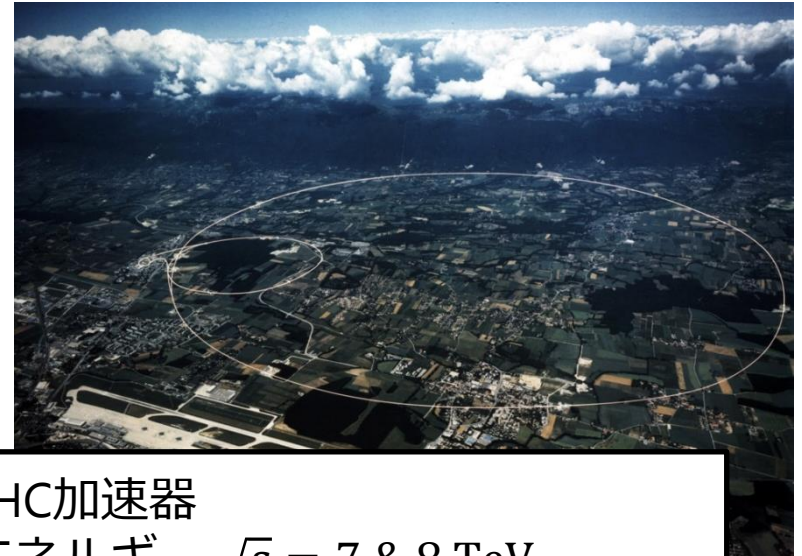
東工大理、東大素セ<sup>A</sup>、東大理<sup>B</sup>

# 標準模型とその問題点

## 標準模型粒子群



LHCでHiggsボソン発見



LHC加速器  
エネルギー  $\sqrt{s} = 7 \text{ \& } 8 \text{ TeV}$   
積分ルミノシティ  $5.25 + 21.7 \text{ fb}^{-1}$

## • 階層性の問題

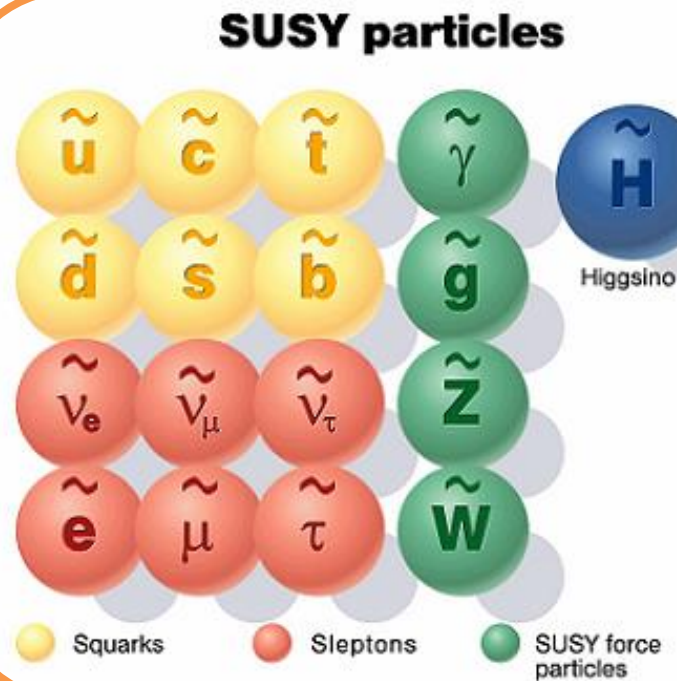
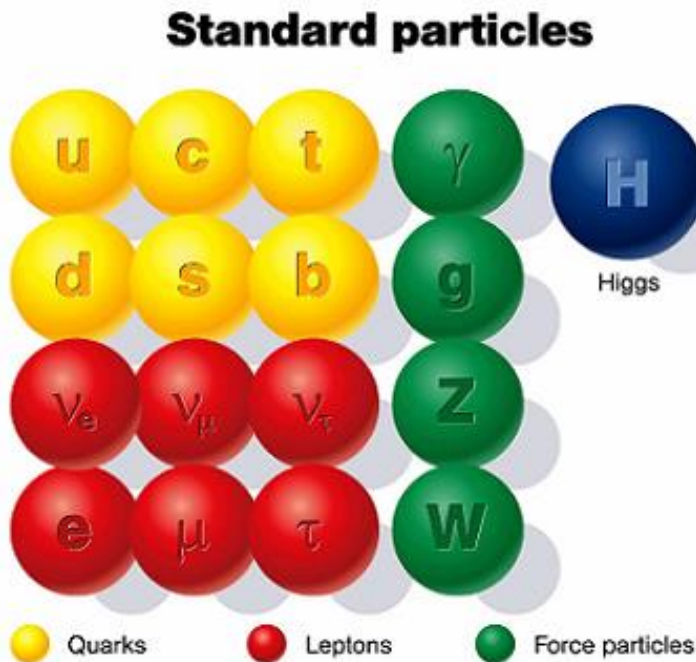
– Higgs質量の微調整問題

## • 暗黒物質の問題

**超対称性理論**

# 超対称性 (SUSY)

## ボソン $\leftrightarrow$ フェルミオンの対称性



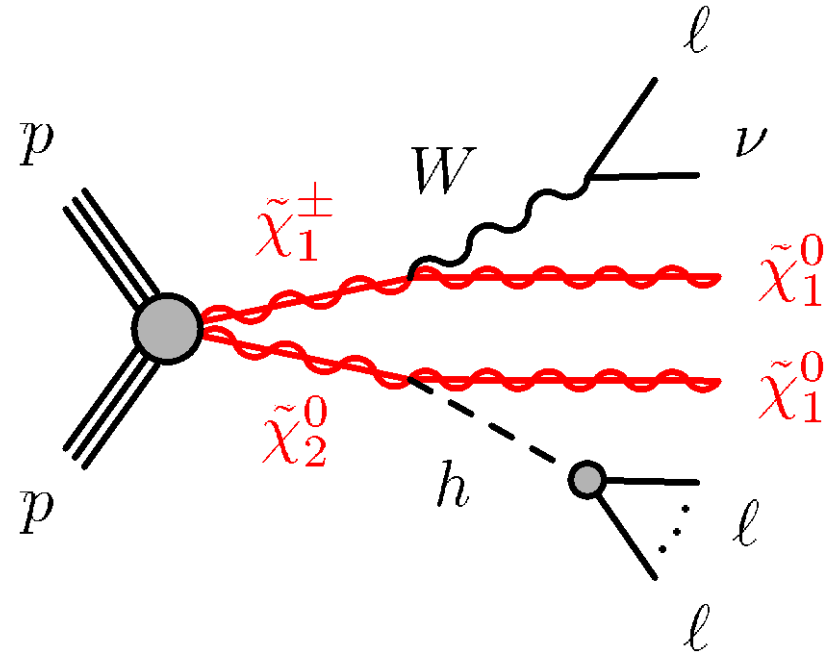
- 標準模型粒子との違いはスピンのみ—質量は同じ
  - これまで未観測 → **超対称性の破れ**  
(Rパリティ保存なら)最軽量超粒子は**安定**

# 解析のターゲット

- LHCの2012年運転時、重心系エネルギー $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ , データ量  $20.3 \text{ fb}^{-1}$  のデータを用いる

- ゲージ粒子の超対称パートナー (ゲージーノ) が陽子・陽子衝突で生成され、崩壊過程の中で  $Wh$  を終状態に持つ事象をターゲット

$$pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow Wh + \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0$$



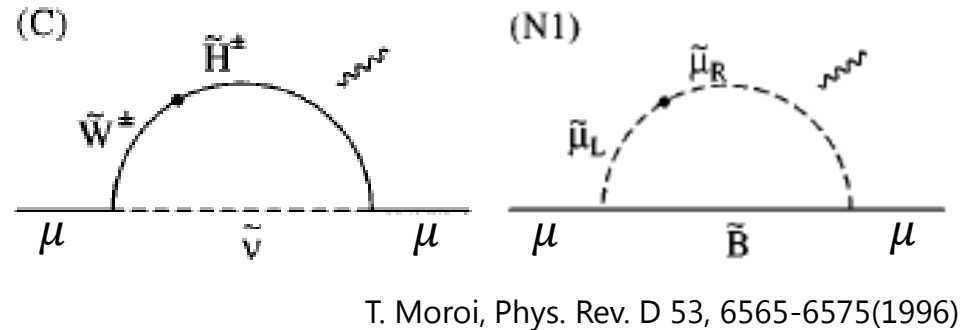
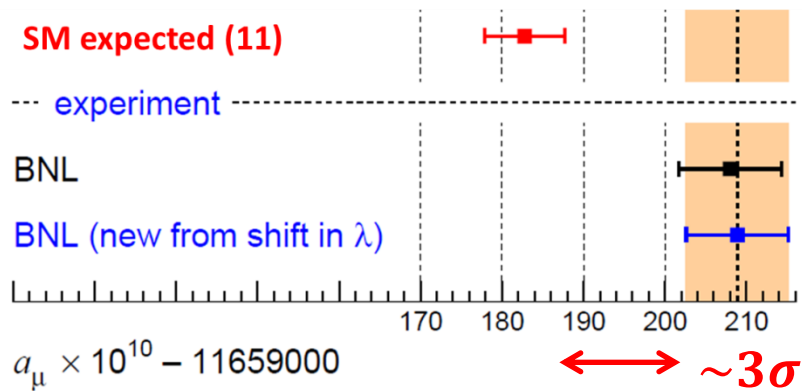
- ターゲットとする理由は主に2つ

(1) ミューオン  $g - 2$  のズレのSUSYによる説明

(2) Higgs質量 $\sim 125 \text{ GeV}$  を受けた、解析の変更の必要性

# なぜ $Wh$ なのか (1)

- ミューオン  $g - 2$  のズレ



Muon  $g-2$  Collaboration の最終結果と  
 現在最新の理論計算結果 K. Hagiwara, et al. arXiv:1105.3149

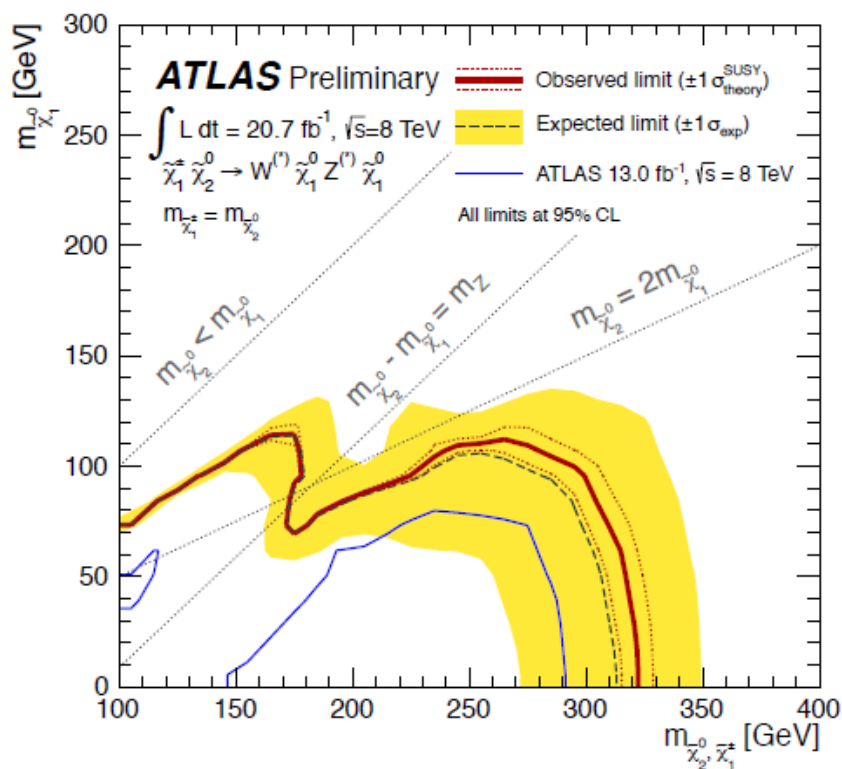
- スレプトン ( $\tilde{\ell}, \tilde{\nu}$ )、ゲージノ ( $\tilde{\chi}$ ) が軽いことが説明の条件  
 →  $O(100)$  GeV で良い説明... **LHCで検証可能**
- 特に、 $m_{\tilde{\ell}} > m_{\tilde{\chi}_2^0} > m_{\tilde{\chi}_1^0}$  のときは  $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow Z/h + \tilde{\chi}_1^0$  が有効

# なぜ $Wh$ なのか (2)

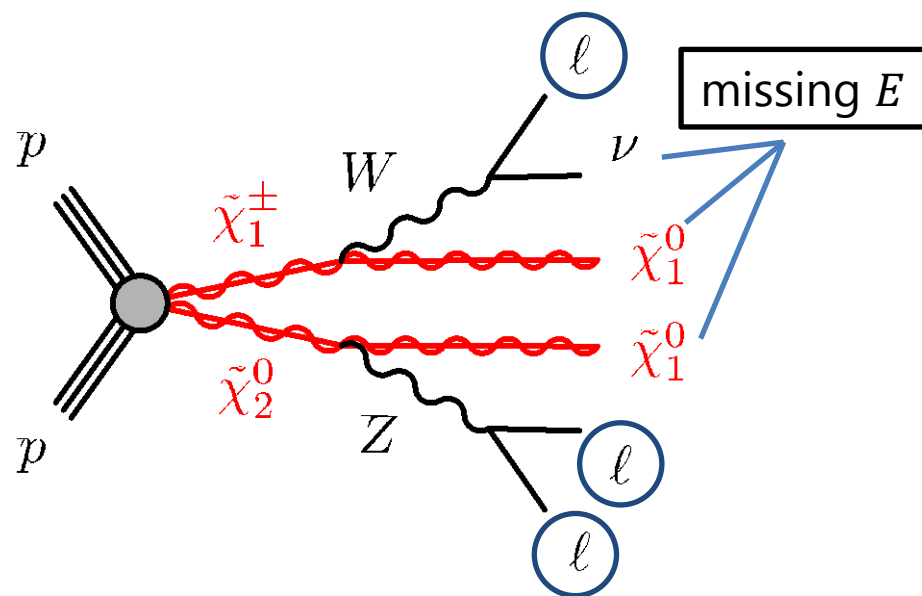
## SUSY探索 (Weak production)の現状

- $\tilde{q}, \tilde{g}$  は重い ( $\sim 1$  TeV)  $\rightarrow$  Weak production で  $\sim O(100)$  GeV を探索
- $\tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow WZ + \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0$  : BR 100%

$m_{\tilde{\chi}_2^0} \lesssim 300$  GeV まで95% C.L.で棄却

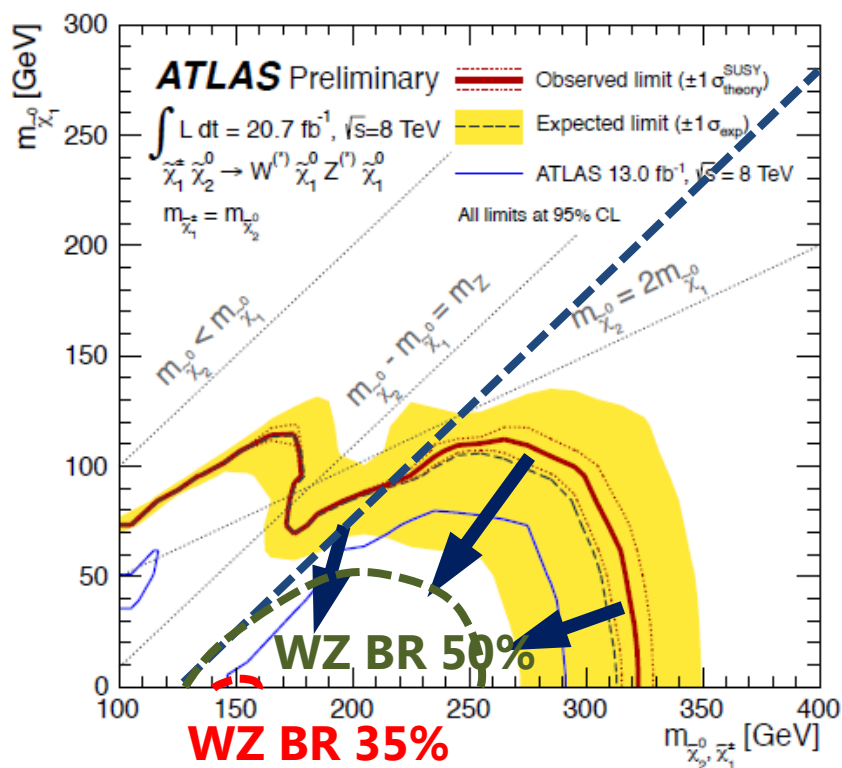


$\leftarrow$  3 lepton モード [ATLAS-CONF-2013-035](https://arxiv.org/abs/1303.6561)

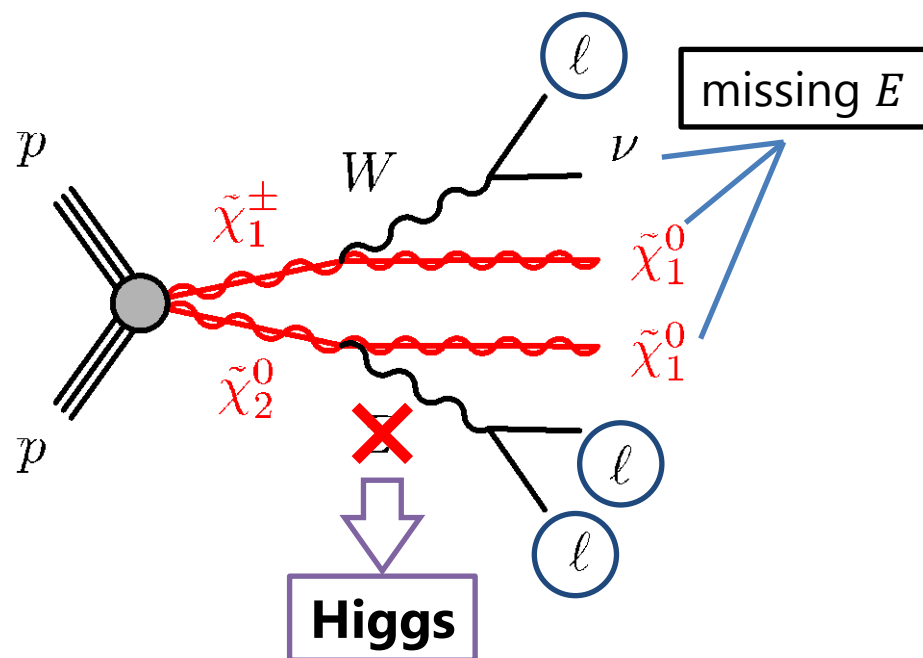


# なぜ $Wh$ なのか (2)

- 最軽量、2番目に軽量な中性超粒子(LSP, NLSP)が  $\tilde{W}^0$  or  $\tilde{B}^0$ -like  
 →  $\Delta m > m_h$  ( $\sim 125$  GeV) で **Higgsに崩壊可能**
- LSP, NLSPの成分によって  $\tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_2^0$  の質量に対する制限が弱くなる



$$m_{\tilde{\chi}_2^0} - m_{\tilde{\chi}_1^0} = 125 \text{ GeV}$$

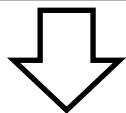




# $\tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow Wh + \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0$ モードの解析ストラテジー

ターゲットとする終状態

- $W(\ell\nu) + h(WW, \tau\tau) + E_T^{\text{miss}}$



レプトンモードを利用することで背景事象を抑えることができる

- **タウ → ハドロニック( $\tau_h$ )とレプトニック( $\tau_\ell$ )崩壊がある**

– これら2つを分けて考えると

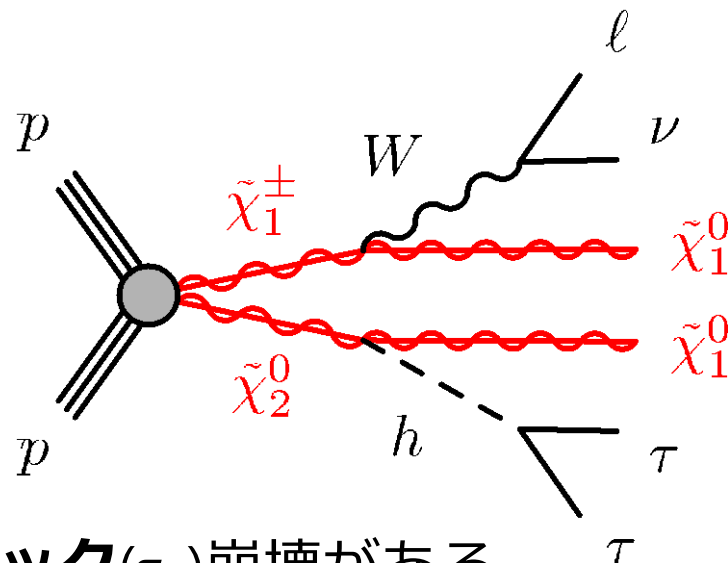
- $W(\ell\nu) + WW$  or  $\tau\tau \rightarrow 3(e, \mu) + \text{missing}$

- $W(\ell\nu) + WW$  or  $\tau\tau \rightarrow 2(e, \mu) + 1\tau_h + \text{missing}$

- $W(\ell\nu) + WW$  or  $\tau\tau \rightarrow 1(e, \mu) + 2\tau_h + \text{missing}$

レプトニックタウは  $e, \mu$  と基本的に**区別できない**

ハドロニックタウを最低1つ含む領域をターゲットとする

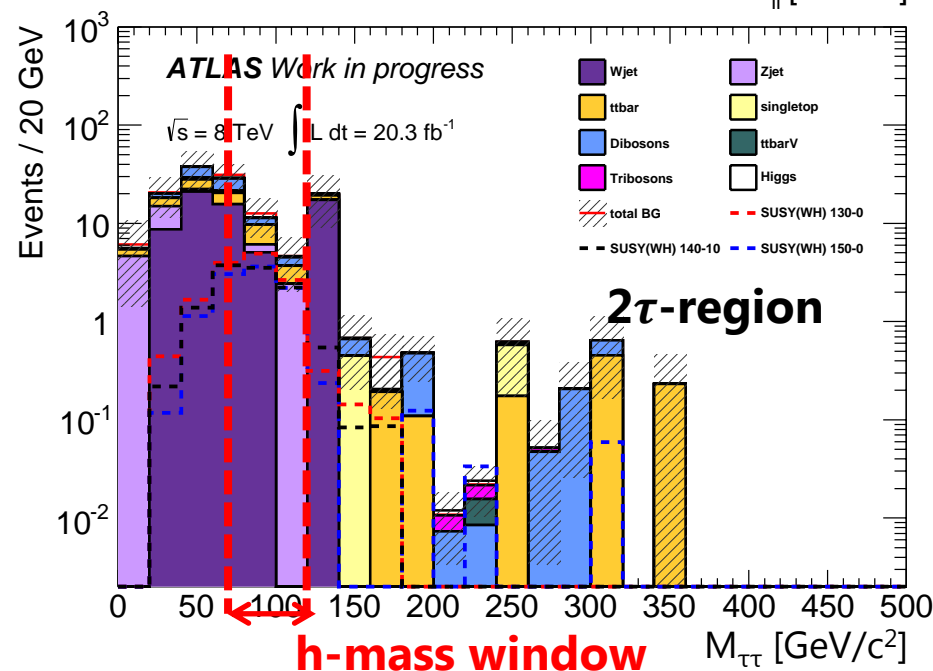
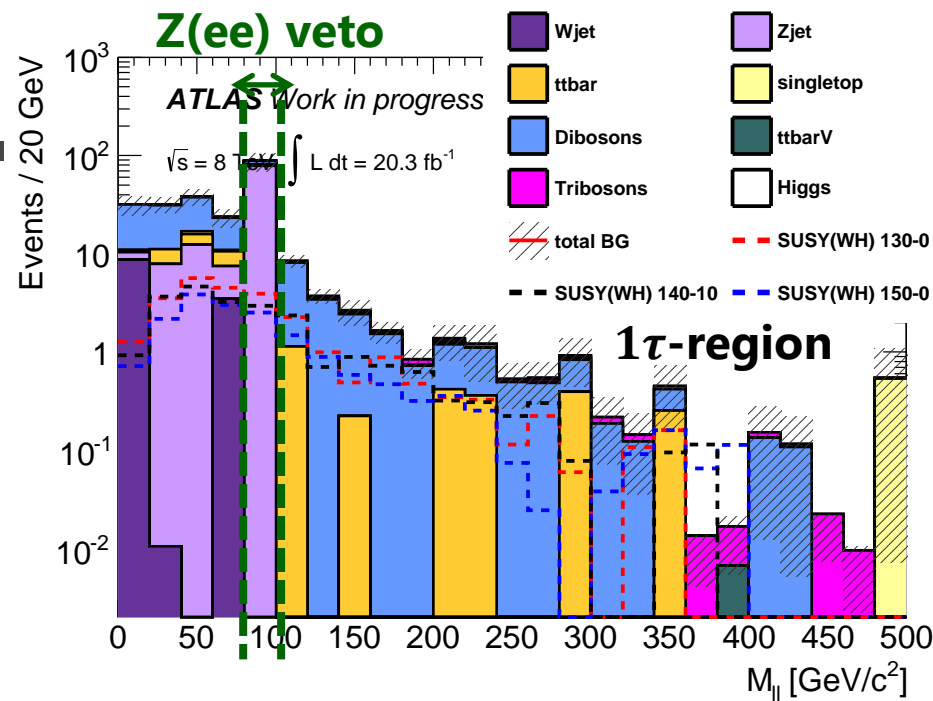




# 信号領域の設定

- $\tau_h$ の個数に応じて信号領域を設定

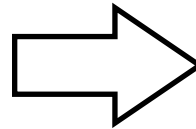
	1 $\tau$ -region	2 $\tau$ -region
Lep flav/sign	$\tau_h^\pm \ell^\mp \ell'^\mp$	$\tau_h^\pm \tau_h^\mp \ell$
Z boson	Veto (ee)	-
B-jet	Veto	Veto
$E_T^{\text{miss}}$	> 50 GeV	> 60 GeV
Lep pT	> 30 GeV	> 25 GeV
$\Sigma pT (2\ell/2\tau)$	> 70 GeV	> 110 GeV
$M_{\ell\tau}/M_{\tau\tau}$	< 120 GeV	70-120 GeV



# 主要な背景事象

## • 信号領域での背景事象分布

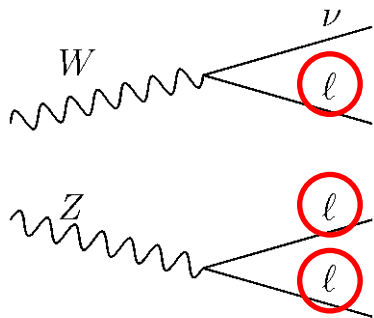
– 3 leptons ( $\geq 1\tau$ )



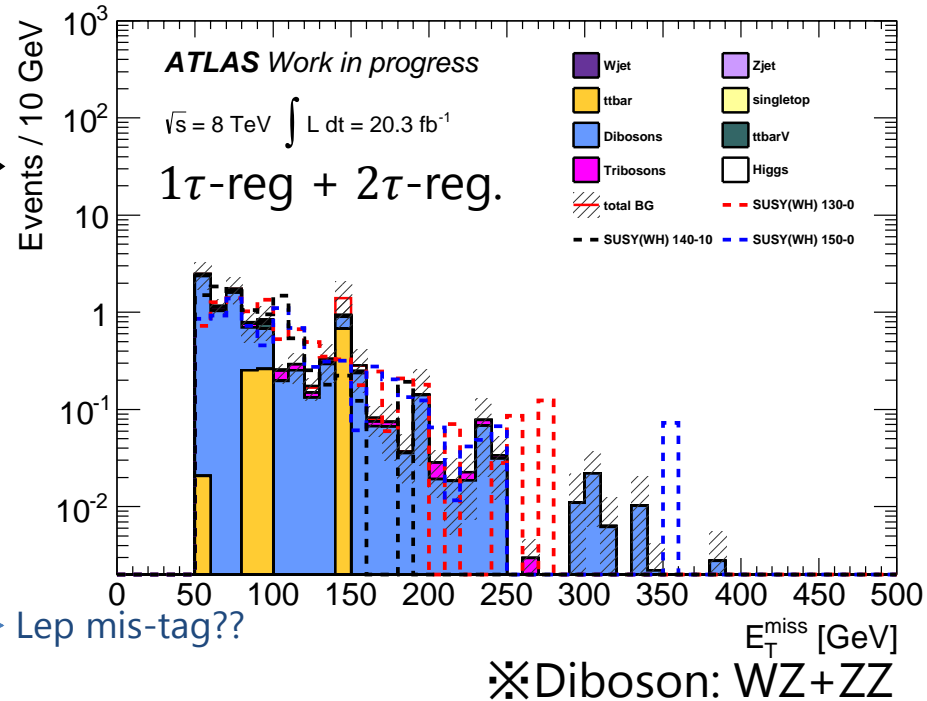
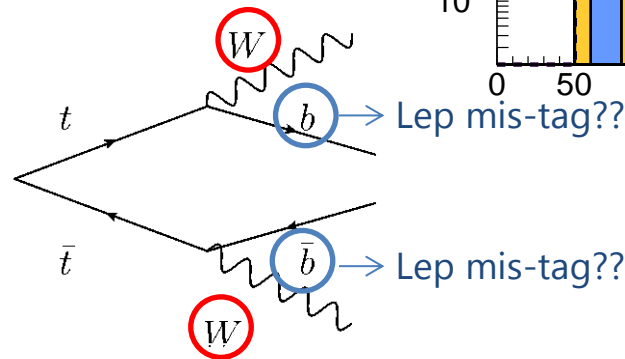
SUSY ref. point:

- SUSY(Wh) 130-0:  $m_{\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^\pm} = 130 \text{ GeV}, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 0 \text{ GeV}$
- SUSY(Wh) 140-10:  $m_{\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^\pm} = 140 \text{ GeV}, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 10 \text{ GeV}$
- SUSY(Wh) 150-0:  $m_{\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^\pm} = 150 \text{ GeV}, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 0 \text{ GeV}$

WZ :  $\sim 10 \text{ pb}$



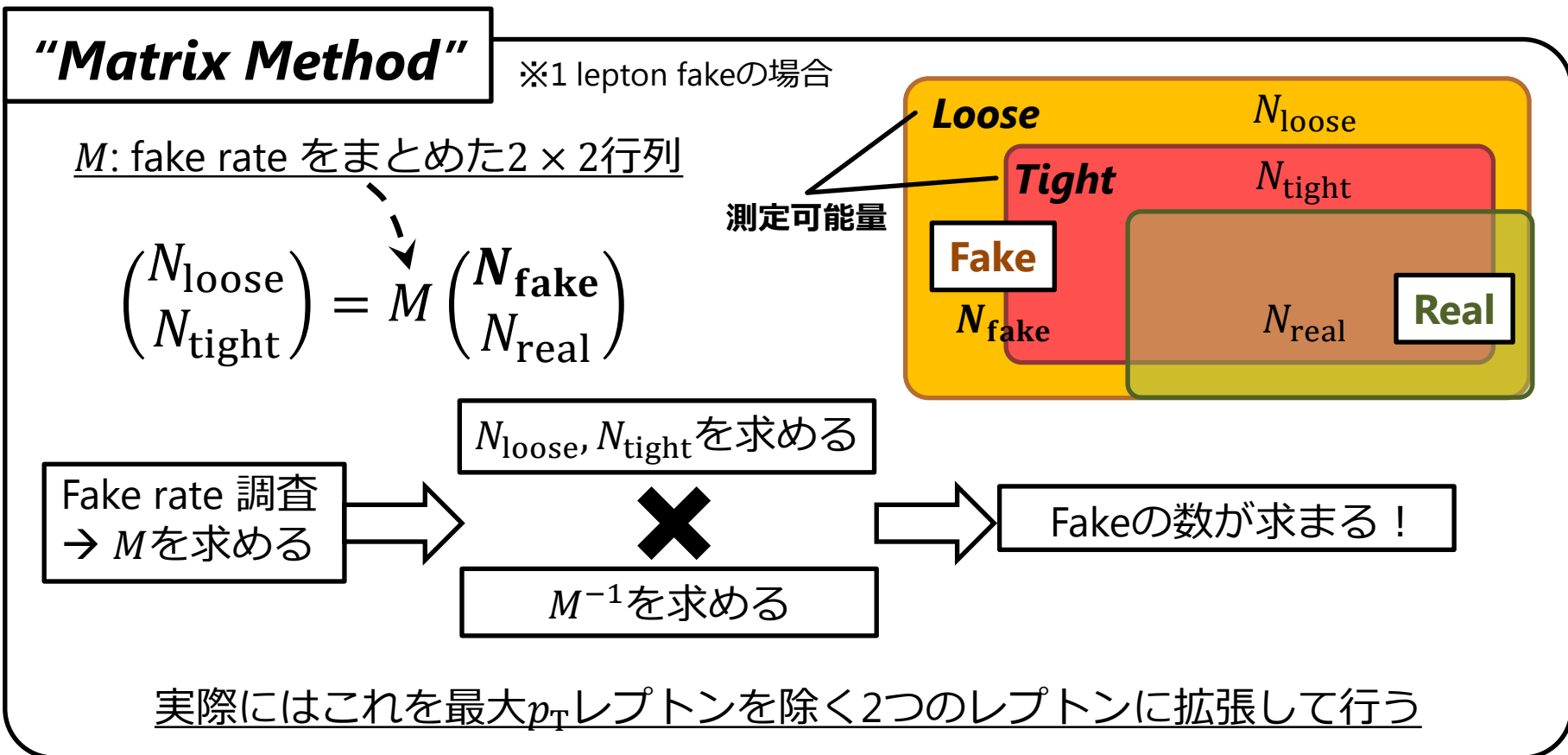
ttbar :  $\sim 200 \text{ pb}$



WZ ZZ	終状態のレプトン数が信号と同じかそれ以上 見分けがつかない(irreducible)	MCによる見積もり
ttbar V+jet	終状態のレプトン数が信号より少ない fakeにより信号と同じになり得る(reducible)	実データによるfakeの評価

# 背景事象の見積もり (1) —ジェット起源—

- ジェット起源の背景事象 → QCD効果が大きくMCでの見積もりは難しい
- Fakeは厳しいカット(isolationあり)を要求すれば原理的には排除可能  
→ 実際には一定割合 (Fake rate) で通過する：これを逆手にとって見積もる。



# 背景事象の見積もり (2)

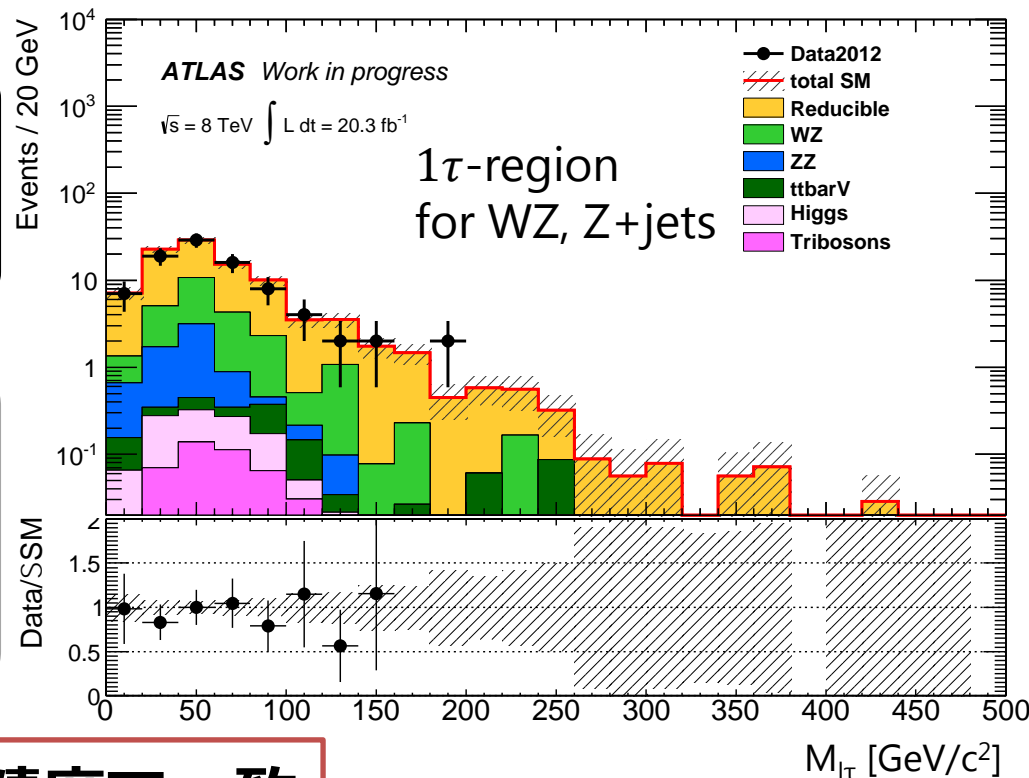
- Matrix Method による fake の見積もり と MC を用いた区別のつかない背景事象(irreducible background) を合わせて、  
信号領域と異なる**確認領域**で確認を行う

## 確認領域設定(1) for WZ, Z+jets

- $1\tau\ell^\pm\ell^\mp$  (1 $\tau$ -reg.), 2 $\tau$ 1 $\ell$  (2 $\tau$ -reg.)
- $30 \text{ GeV} \leq E_T^{\text{miss}} \leq 50 \text{ GeV}$

## 確認領域設定(2) for ttbar

- $1\tau\ell^\pm\ell^\mp$  (1 $\tau$ -reg.), 2 $\tau$ 1 $\ell$  (2 $\tau$ -reg.)
- $E_T^{\text{miss}} \geq 50 \text{ GeV}$
- $b\text{-tag} : b\text{-jet} \geq 1$



良い精度で一致

# 背景事象の見積もり (2)

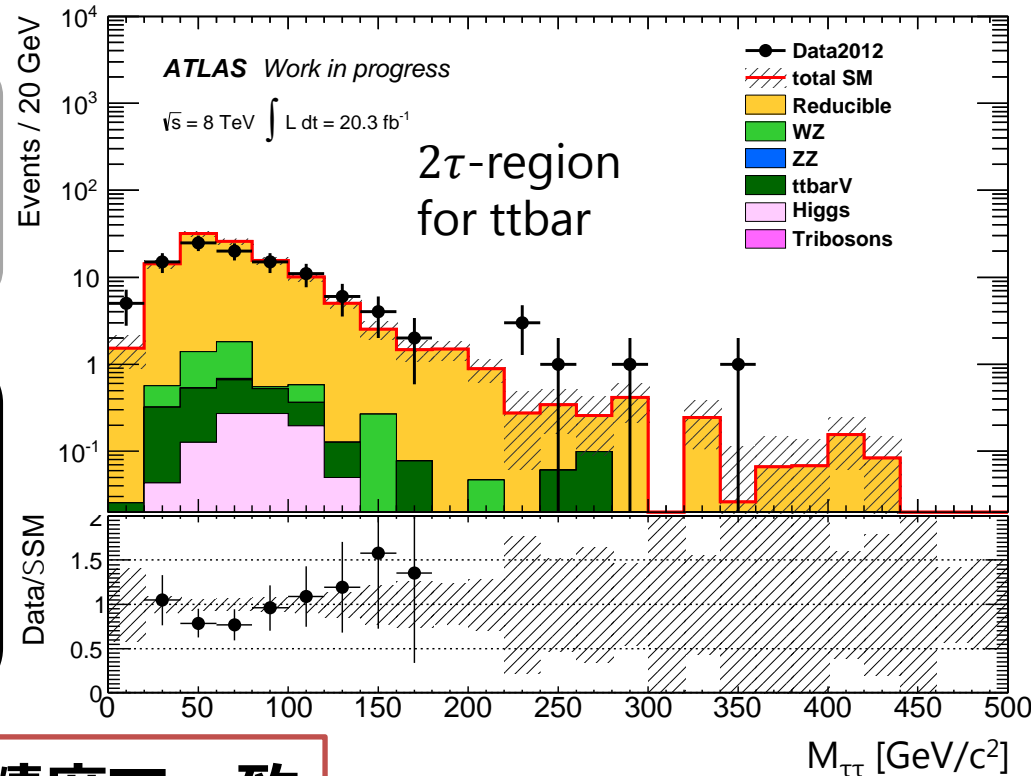
- Matrix Method による fake の見積もり と MC を用いた区別のつかない背景事象(irreducible background) を合わせて、  
信号領域と異なる**確認領域**で確認を行う

## 確認領域設定(1) for WZ, Z+jets

- $1\tau\ell^\pm\ell^\mp$  (1 $\tau$ -reg.), 2 $\tau$ 1 $\ell$  (2 $\tau$ -reg.)
- $30 \text{ GeV} \leq E_T^{\text{miss}} \leq 50 \text{ GeV}$

## 確認領域設定(2) for ttbar

- $1\tau\ell^\pm\ell^\mp$  (1 $\tau$ -reg.), 2 $\tau$ 1 $\ell$  (2 $\tau$ -reg.)
- $E_T^{\text{miss}} \geq 50 \text{ GeV}$
- $b$ -tag :  $b$ -jet  $\geq 1$



**良い精度で一致**

# 系統誤差の見積もり

- 系統誤差は種類毎、イベント毎に領域に合わせて見積もる
  - Irreducible : 理論断面積、MCの統計、検出器の検出効率の不定性等
  - Reducible : Fake rate、検出器の検出効率の不定性等

## 1 $\tau$ -region

- **Cross-section : 11.4%**
- **MC/data Stat. : 7.1%**
- **Tau Fake Rate : 5.4%**
- MC Generator : 4.5%
- Trigger : 3.4%

**Total ~20%**

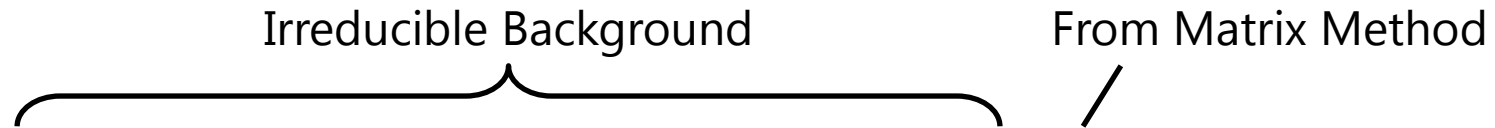
## 2 $\tau$ -region

- **MC/data Stat. : 8.1%**
- **Tau Fake Rate : 4.0%**
- **Cross-section : 1.0%**
- Jet Energy Scale : 0.8%
- MET scale : 0.6%

**Total ~10%**

# 信号領域における予想値

- 現段階で信号領域は開けていない
- 以上の見積もりを信号領域に拡張した場合



信号領域	WZ	ZZ	tt+V	VVV	VH/ttH	Fake	total	SUSY ref. 1	SUSY ref. 2
<b>1<math>\tau</math></b>	$4.7^{+0.7}_{-0.7}$	$0.33^{+0.05}_{-0.04}$	$0.12^{+0.12}_{-0.11}$	$0.5^{+0.5}_{-0.5}$	$0.28^{+0.12}_{-0.12}$	$2.8^{+0.7}_{-0.7}$	<b><math>8.8^{+1.4}_{-1.4}</math></b>	$5.5^{+0.8}_{-0.8}$	$2.5^{+0.4}_{-0.4}$
<b>2<math>\tau</math></b>	$1.10^{+0.38}_{-0.35}$	$0.0^{+0.0}_{-0.0}$	$0.010^{+0.008}_{-0.008}$	$0.031^{+0.033}_{-0.033}$	$0.08^{+0.04}_{-0.04}$	$13.9^{+1.2}_{-1.3}$	<b><math>15.1^{+1.3}_{-1.4}</math></b>	$4.5^{+0.6}_{-0.6}$	$3.3^{+0.5}_{-0.5}$

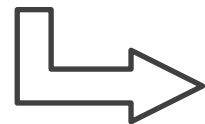
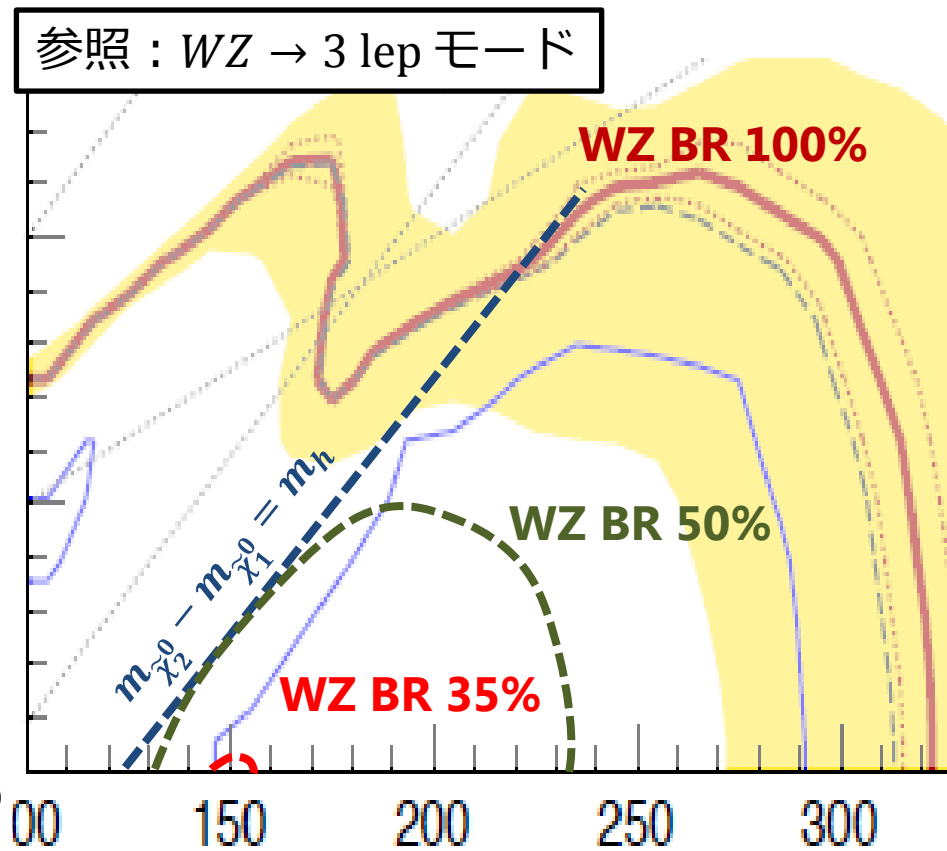
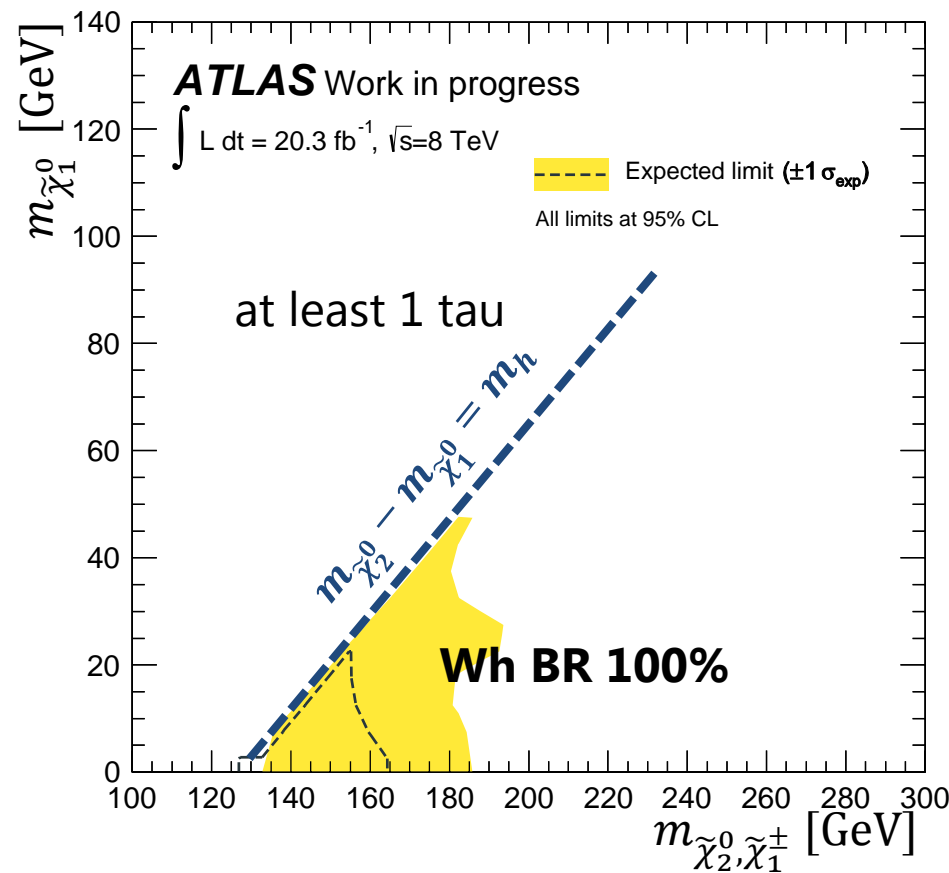
SUSY ref. 1 : SUSY(Wh)  $m_{\tilde{\chi}_2^0} = 140$  GeV ,  $m_{\tilde{\chi}_1^0} = 10$  GeV

SUSY ref. 2 : SUSY(Wh)  $m_{\tilde{\chi}_2^0} = 152.5$  GeV ,  $m_{\tilde{\chi}_1^0} = 22.5$  GeV



# 予想される制限領域

1 $\tau$ -reg. + 2 $\tau$ -reg. の予想制限領域



$\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_2^0$  質量 ~ 160 GeV までをカバー

# まとめ

- LHC-ATLAS実験の2012年の運転で収集された重心系エネルギー  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ ,  $20.3 \text{ fb}^{-1}$  のデータを用いて、崩壊過程にHiggsを含むゲージノ直接生成事象の探索を行っている。
- 背景事象を見積もり、確認領域において実データを再現していることを確認した。
- LSPとNLSPの質量に対する制限領域の予想値として  $m_{\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0} \lesssim 160 \text{ GeV}$  を得た。
- 信号領域での実データ分布はまだ確認していない。グループの承認が得られ次第確認する。

# Backup

# 背景事象の見積もり (1) —ジェット起源—

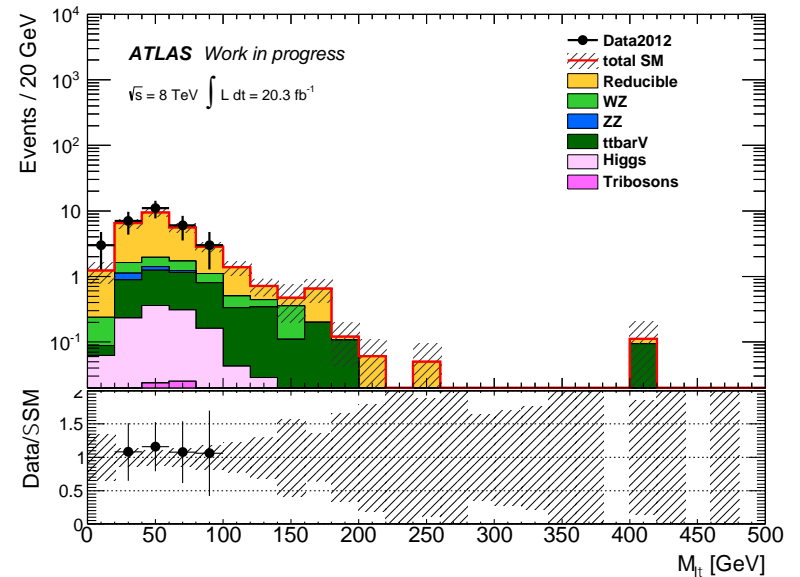
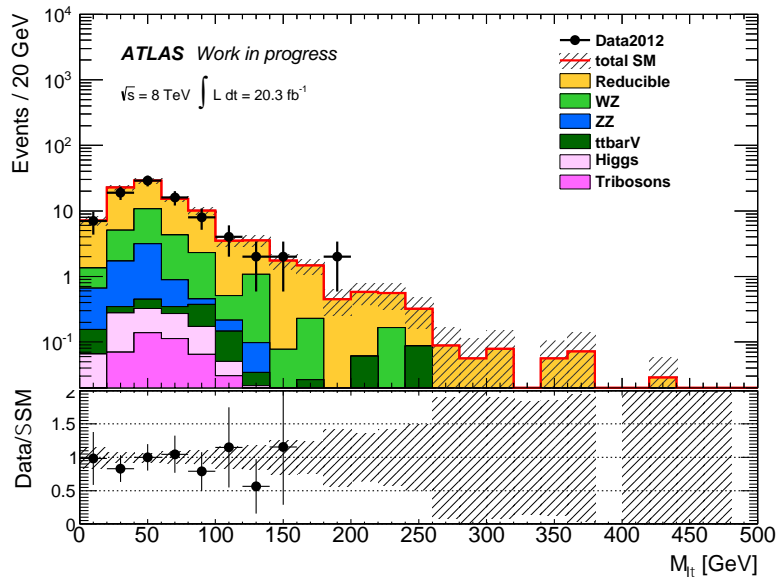
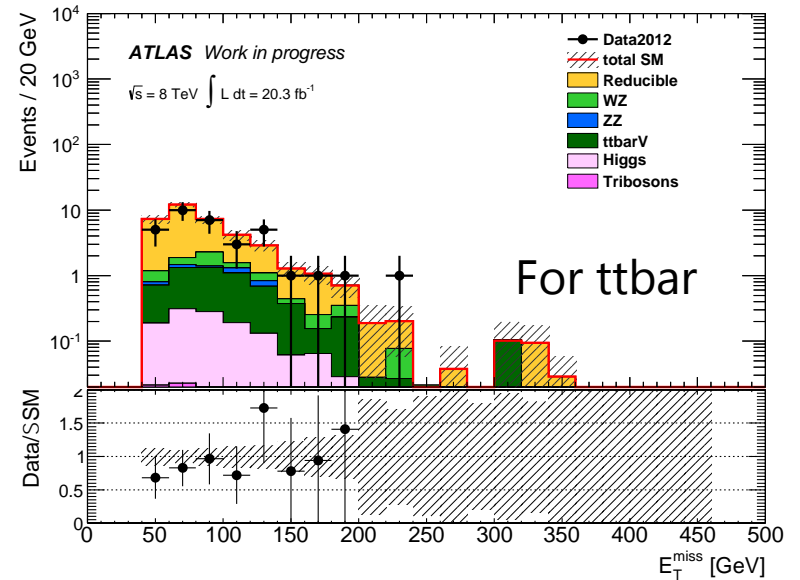
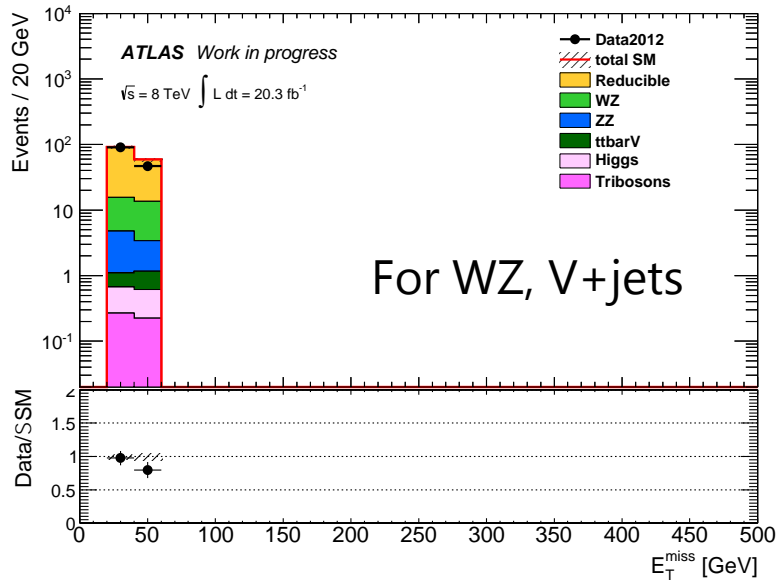
- Matrix Methodを、1番  $p_T$  が高いレプトン( $e, \mu$ )を除く、残り**2つのレプトン**( $e, \mu, \tau$ )に適用
- Real, fakeの組み合わせによって、行列  $M$  が  $4 \times 4$  行列になる。

行列  $M$

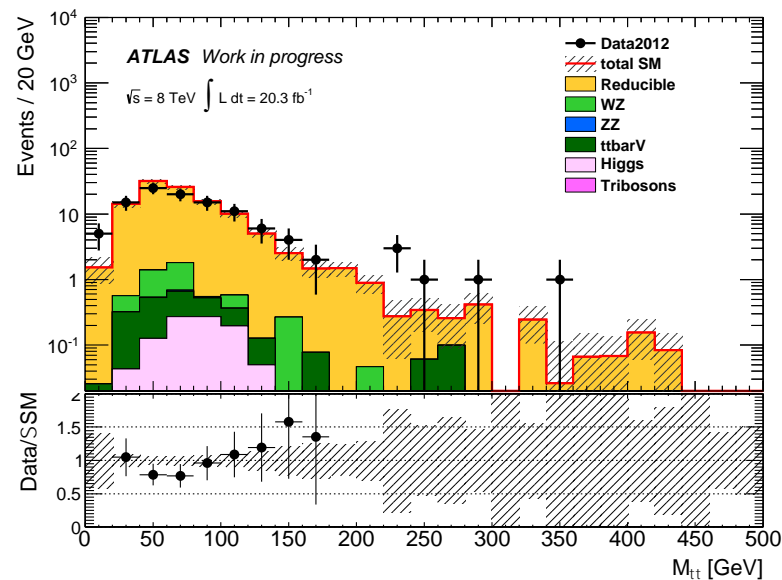
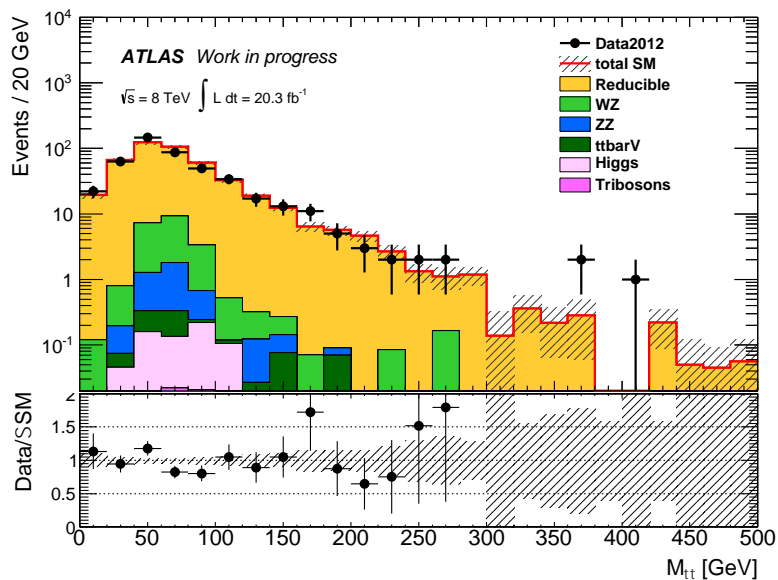
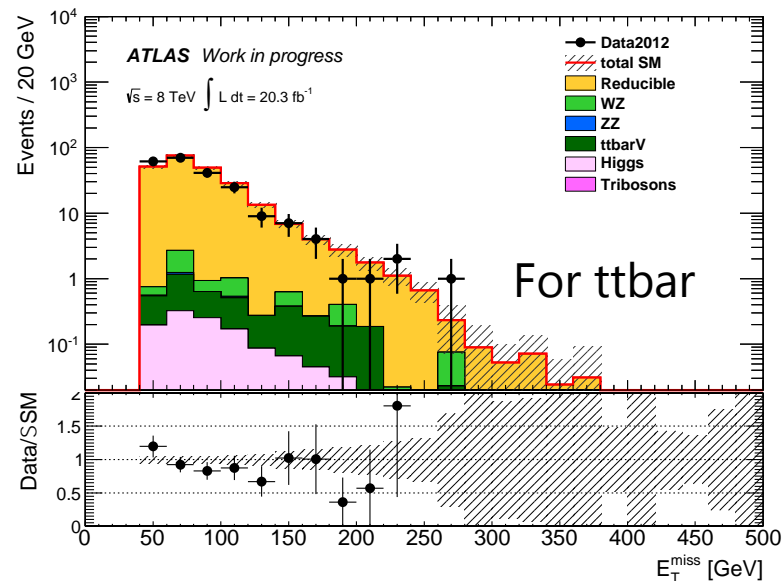
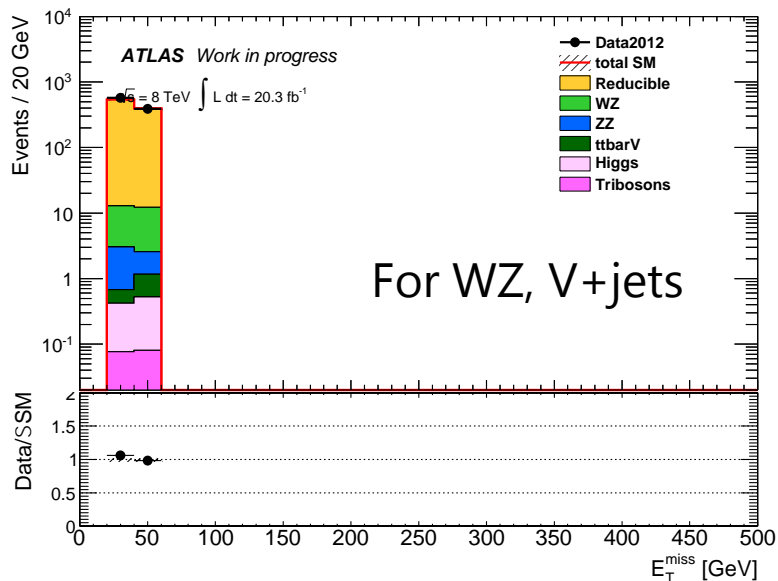
$$\begin{pmatrix} N_{TT} \\ N_{TL'} \\ N_{LT} \\ N_{LL'} \end{pmatrix} = \overbrace{\begin{pmatrix} \epsilon_1 \epsilon_2 & \epsilon_1 f_2 & f_1 \epsilon_2 & f_1 f_2 \\ \epsilon_1 (1 - \epsilon_2) & \epsilon_1 (1 - f_2) & f_1 (1 - \epsilon_2) & f_1 (1 - f_2) \\ (1 - \epsilon_1) \epsilon_2 & (1 - \epsilon_1) f_2 & (1 - f_1) \epsilon_2 & (1 - f_1) f_2 \\ (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) & (1 - \epsilon_1)(1 - f_2) & (1 - f_1)(1 - \epsilon_2) & (1 - f_1)(1 - f_2) \end{pmatrix}}^{\text{行列 } M} \cdot \left. \begin{pmatrix} N_{RR} \\ N_{RF} \\ N_{FR} \\ N_{FF} \end{pmatrix} \right\} N_{\text{fake}}$$

T: tight, L: loose, R: real, F: fake

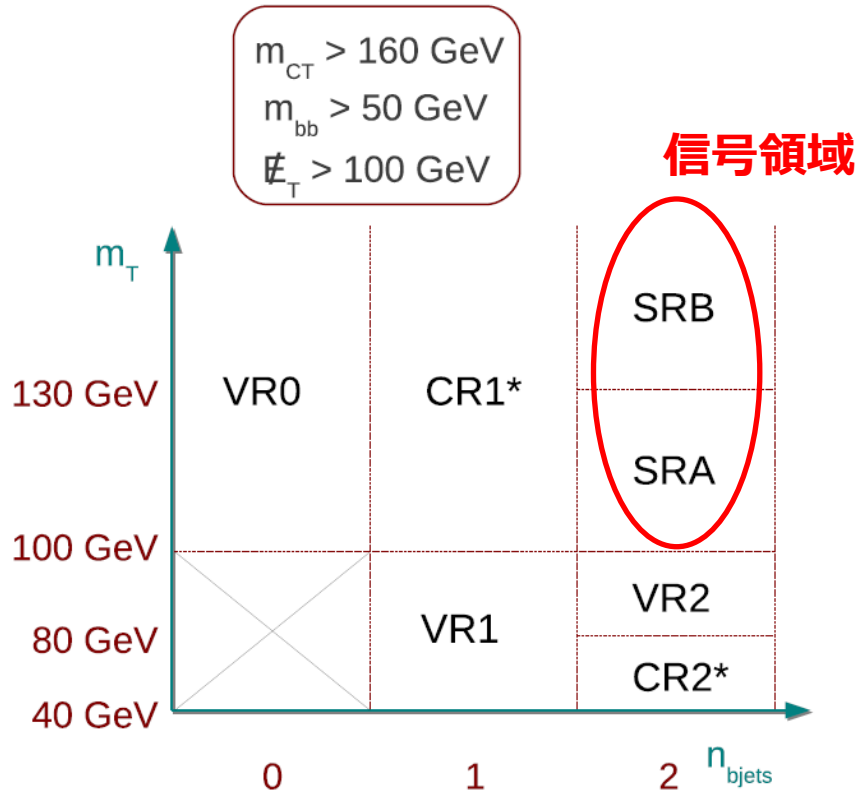
# 1 $\tau$ 確認領域



# 2 $\tau$ 確認領域



# $pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W(\ell\nu)h(b\bar{b}) + \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0$ 解析の現状



[ATLAS-CONF-2013-093](#) 2013年8月

