



14aSL-10

# LHC-ATLAS実験における第三世代粒子 (ボトムクォーク)への崩壊を用いた 超対称性粒子の探索

山中隆志, 金谷奈央子<sup>A</sup>, 片岡洋介<sup>A</sup>, 山本真平<sup>A</sup>,  
浅井祥仁<sup>A</sup>, 駒宮幸男, 小林富雄<sup>A</sup>  
東京大学大学院, 東京大学 ICEPP <sup>A</sup>

# 目次

1. 物理的背景
2. Data/Monte Carlo Sample
3. Event Selection
4. まとめと展望

# 超対称性粒子の第三世代粒子への崩壊

- MSSMなどの標準的な超対称性理論において、第三世代粒子の超対称性パートナーは他の粒子に比べて軽くなりやすい

例) mSUGRAにおけるmass spectrum

- 一般的に右巻き粒子は左巻き粒子よりも軽い(SU(2)のゲージノの効果を持たない)
- 第三世代粒子の超対称性パートナーは湯川結合の効果大⇒右巻きと左巻きの混合が起こる  
→ 第三世代のスカラーフェルミオンが他と比べて軽くなる

スカラーボトムの質量行列

$$m^2(\tilde{b}) = \begin{pmatrix} m_0^2 + 6.28m_{1/2}^2 + m_b^2 - 0.42D & -m_b(A_b + \mu \tan \beta) \\ -m_b(A_b + \mu \tan \beta) & m_0^2 + 5.82m_{1/2}^2 + m_b^2 - 0.08D \end{pmatrix}$$

- その結果、第三世代粒子の超対称性パートナーを通しての崩壊がenhanceされる

- scalar quarkがgluinoのより軽ければdirect productionやgluinoからの2-body decay

$$\tilde{g} \rightarrow \tilde{b}_1 b$$

- scalar quarkがgluinoより重くても3-body decayにより第三世代粒子のenhanceが可能

$$\tilde{g} \rightarrow \tilde{\chi}_i^0 b \bar{b}$$

- 超対称性粒子(SUSY)的な粒子が発見された場合、第三世代粒子のexcessがあるかが重要な証拠
- 本解析では第三世代粒子の中でもボトムクォークを使う
  - 最終的に、主要なBGをtop quarkだけにすることができるため、BGの理解がしやすく、比較的cleanな環境での解析が可能



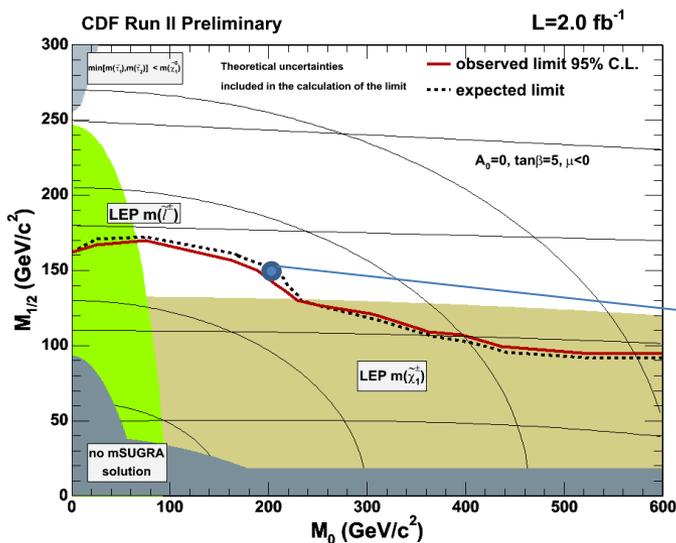
# 目次

1. 物理的背景
- 2. Data/Monte Carlo Sample**
3. Event Selection & Result
4. まとめと展望

# 使用したData, Susy Sample

- ATLASで2010年3月31日から8月30日の間に取得された $3.46\text{pb}^{-1}$ のDataの内、関係する全てのDetectorがReadyになっていた $2.94\text{pb}^{-1}$ を使用
- Monte Carlo Sample
  - SUSYのBenchmark pointとして、SU4と呼ばれるSampleを使用
    - cross section :  $60\text{pb}$  (NLO)

| $\tilde{g}$ | $\tilde{u}_R$ | $\tilde{b}_1$ | $\tilde{t}_1$ | $\tilde{e}_R$ | $\tilde{\tau}_1$ | $\tilde{\chi}_1^0$ | $\tilde{\chi}_1^\pm$ |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|--------------------|----------------------|
| 410GeV      | 411GeV        | 361GeV        | 200GeV        | 213GeV        | 200GeV           | -61GeV             | -113GeV              |



| $\tilde{g} \rightarrow$ | BR    |
|-------------------------|-------|
| $\tilde{b}_1 b$         | 0.430 |
| $\tilde{t}_1 t$         | 0.526 |

Tevatronでのlimitを辛うじて超えるぐらいのlow mass susy model

←CDFでのmSUGRA limit

# 使用したSM BG Sample

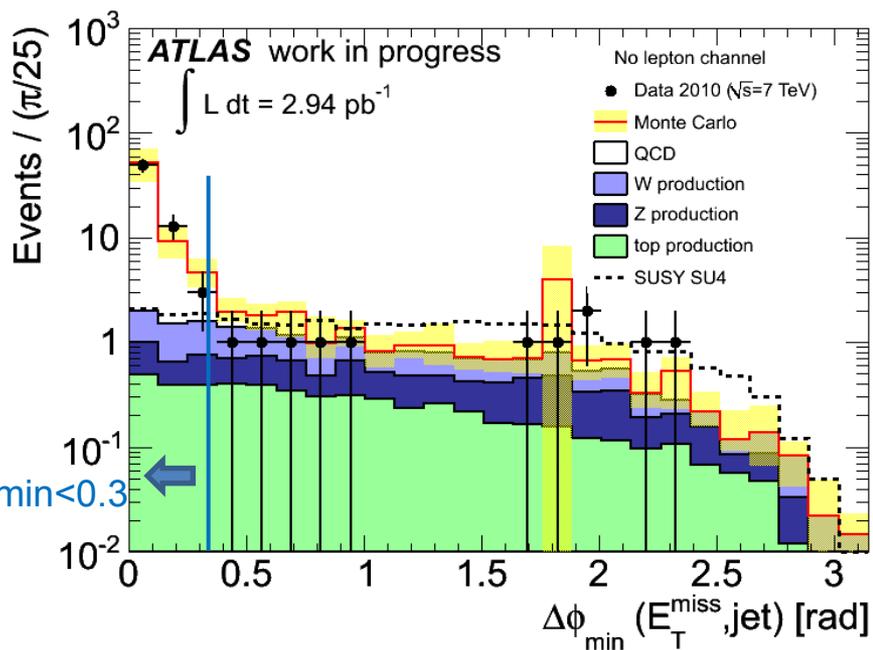
- Standard Model Background

| Sample                               | Total cross section | Generator |
|--------------------------------------|---------------------|-----------|
| QCD dijets                           | 1.06e7 nb           | PYTHIA    |
| W + jets / W+bb                      | 31.5 nb / 9.47 pb   | ALPGEN    |
| Z + jets / Z( $\rightarrow$ ll) + bb | 8.77 nb / 37.6 pb   | ALPGEN    |
| ttbar / single top                   | 161 pb / 37 pb      | MC@NLO    |
| diboson                              | 7.10 pb             | ALPGEN    |

- QCDのMC sampleはrenormalization/factorization scaleの不定性が大きく、Dataを使ってのevent数のnormalizeが必要
- W, ZはNNLOの計算で精度よくcross sectionが求まっている
- Monte Carloが良く合っているにもかかわらず、ルミノシティやtrigger efficiencyの不定性が残るため、Dataを使ってNormalizeすることで、それらをキャンセルすることができる

# QCD Normalization in No Lepton Channel

- minimum  $\Delta\Phi$  (leading 3jetsとMissing ETの間の角( $\Delta\Phi$ )の最小値)  $< 0.3$ の領域でNormalize
- QCD eventで作られるMissing ETの起源
  - 検出器の分解能・不完全な領域によるfake
  - heavy flavor (bb/cc)のsemi-leptonic decay
- Missing ETはjetの方向(または反対方向)を向くことが期待される
- Susy signalのneutralinoやW, Z, topでのneutrinoによるreal missingの場合にはjetの方向とは無相関



- Missing ET Cutをpassしたeventに対して、をプロットすると左図のように $\Delta\Phi_{\min}$ の小さい領域にQCD BGが集中する
- ここでは $\Delta\Phi_{\min} < 0.3$ の領域で、W, Z, top quarkの寄与をMCの値を使って引いて、QCDのnormalizationを行った

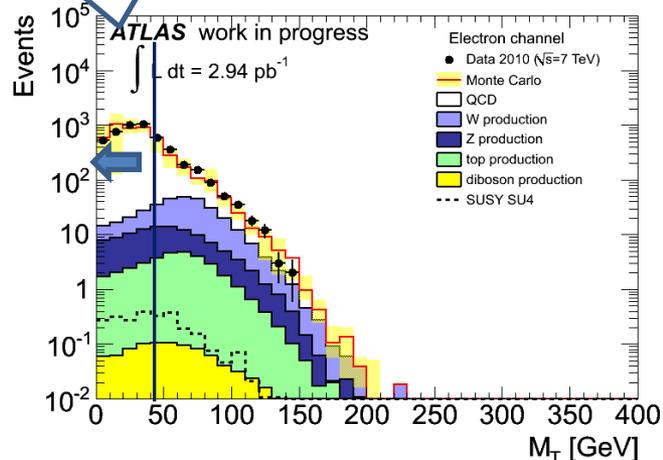
normalization factor =  $0.68 \pm 0.11$  (stat.)

# QCD, W Normalization in Lepton Channel

- まずはMissing ET<40GeV かつ MT<50GeVのControl regionでQCDをnormalizeする
  - lepton channelでは、QCD eventでのlepton efficiencyも入ってくるため、0-leptonとは別の normalization factorが必要
- Wについては、Missing ET>40GeVの後、更にWをenhanceするため、50GeV<MT<100GVのregionを使う

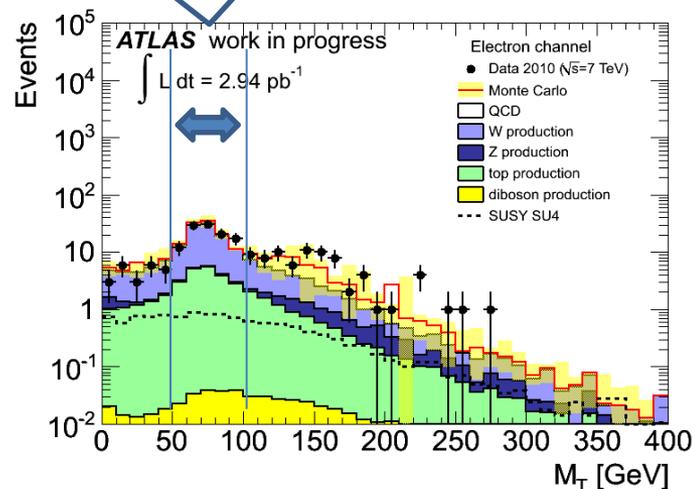
※ MT(transverse mass) : leptonとMissing ETから計算したtransverse方向の質量

QCDのnormalization region



MET<40GeV後のMT分布

Wのnormalization region



MET>40GeV後のMT分布

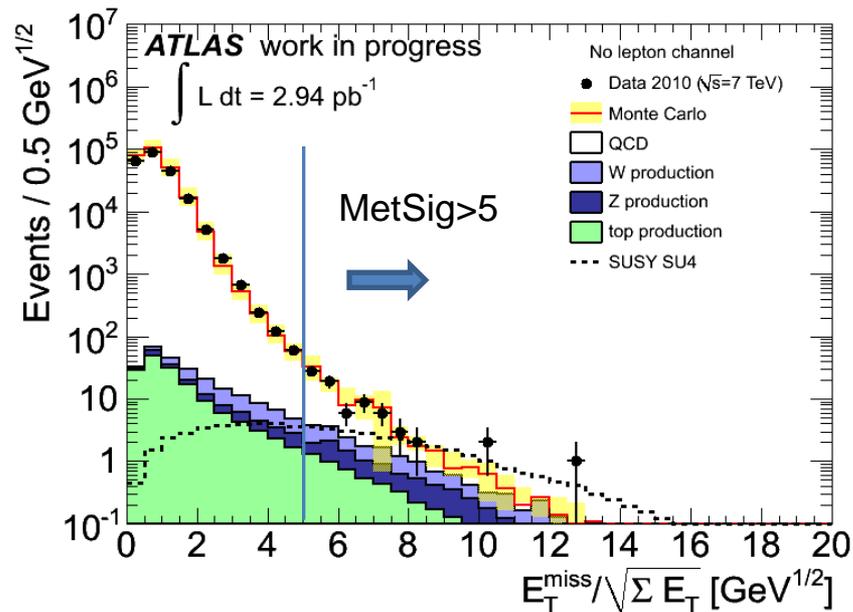
# 目次

1. 物理的背景
2. Data/Monte Carlo Sample
- 3. Event Selection & Result**
4. まとめと展望

# No Lepton Channel

## Multi-Jet, Missing ET Cut

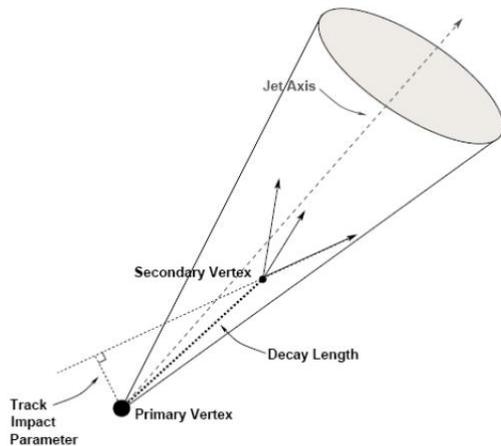
- 3 jets以上を要求して、SM BGを落とし、Susy Signalがenhanceされる領域を使う( $p_T > 80, 50, 50$  GeV)
- Missing EtのSignificance ( $= \text{missET} / \sqrt{\text{EtSum}}$ )でカットする



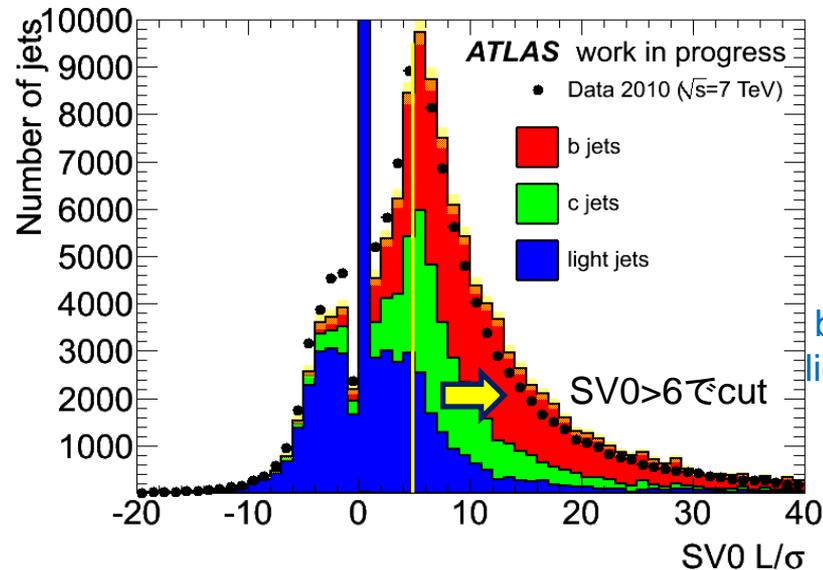
- 3 jets cut後のMET significance 分布
- QCDのnormalization あり

# B-Tagging

- 最後にb-taggingによりb-jetが1本以上あることを要求する
  - b quarkが中間子をつかって比較的長寿命( $\sim 1\text{ps}$ )なことを利用してtagする
- SV0 : Secondary Vertex Finder
  - Jetにassociateしたtrackからvertexを再構築
  - primary vertexとの符号付き距離(L)を距離の測定誤差( $\sigma$ )で割った $L/\sigma = \text{significance}$ を用いる



secondary vertex reconstruction模式図



b-jet efficiency=50%,  
light jet rejection=200

low  $p_T$ のjet trigger後のSV0の分布  
真のsecondary vertexの場合、符号付き距離は正に出る

# Systematic Error

- Jet Energy Scale (JES) Uncertainty
  - jetのenergy scaleはdetectorでの生の測定値にdead materialやカロリメーターにenergyを落とさずに逃げた粒子などの補正をかけて得られる
  - このenergy scaleに関する不定性が6-10%ほどあり、大きなsystematic errorとなっている
- Luminosity Uncertainty
  - 積分ルミノシティの不定性が11%
- Trigger Efficiency
  - DataとMonte CarloでのTrigger efficiencyの違い
  - 現在のところ、他のSystematic errorと比べるとnegligible
- **B-tagging Uncertainty**
  - SV0によるb-jet selectionの不定性
  - まだ正しく見積もられた不定性はないが、conservativeには下記の値が見積もられている
    - 15% for the b-tagging efficiency
    - 30% for the c-tagging efficiency
    - 100% for the light tagging efficiency

## 0-lepton channelでの誤差評価

|       | Center | Stat. | +JES | -JES  | trig. eff. | Lumi. | b-tag up | b-tag down |
|-------|--------|-------|------|-------|------------|-------|----------|------------|
| Data  | 7      | 2.6   |      |       |            |       |          |            |
| SM BG | 8.85   | 3.13  | 0.15 | 0.47  | 0.05       | 0.41  | 0.00     | -2.19      |
| SU4   | 12.25  | 0.21  | 1.49 | -1.45 | 0.17       | 1.35  | 0.00     | -3.46      |

# CutFlow

- 最終的に残ったDataが7 eventsに対して、SM BGの8.9 events, SU4が12.3 events期待される
  - SU4があるとしたときの、 $\chi^2 = \{7 - (8.9 + 12.3)\}^2 / (7 + 5.6^2) = 5.24 \rightarrow 99.4\%$  confidence levelで棄却

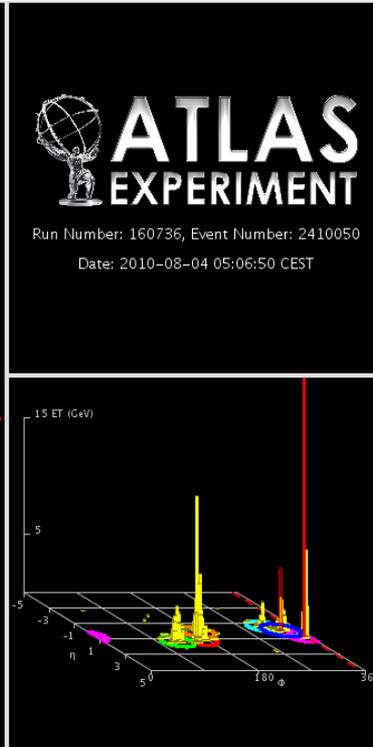
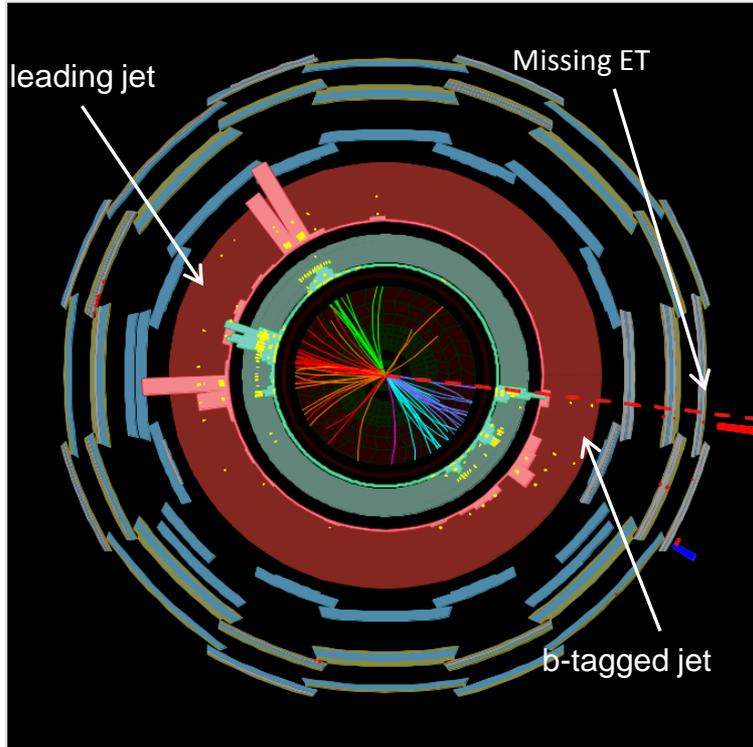
2.94 pb<sup>-1</sup>

| cut                | Data         | SM BG                             | SU4                                |
|--------------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| jet pT>80,50,50GeV | 217345 ± 466 | 252029 ± 1229(stat.)              | 58.5                               |
| MetSig>5           | 76 ± 9       | 84 ± 6.6(stat.)                   | 29                                 |
| minΔφ>0.3          | 13 ± 3.6     | 21 ± 3.2(stat.)                   | 24                                 |
| b-tagged jet>=1    | 7 ± 2.6      | 8.9 ± 3.1(stat.) + 2.0/-4.0(sys.) | 12.3 ± 0.2(stat.) + 0.4/-2.3(sys.) |

## SM BGの内訳

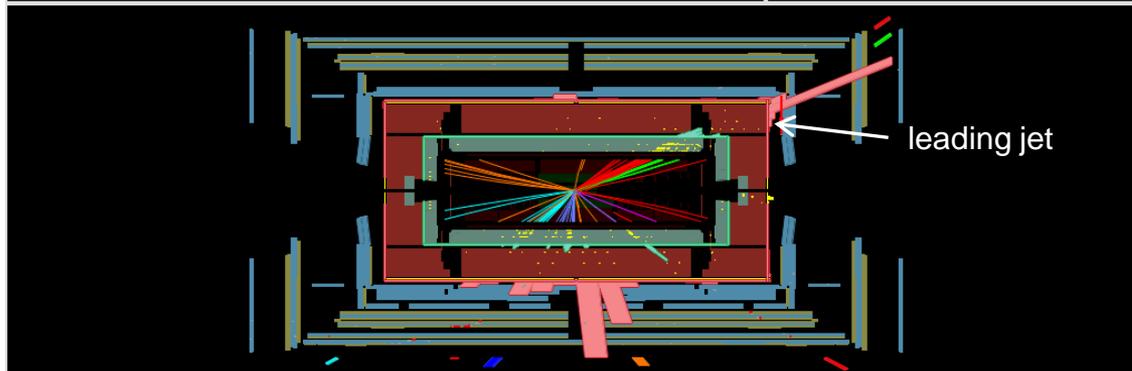
| cut                | QCD    | W+jets | Z+jets | TTbar+single top |
|--------------------|--------|--------|--------|------------------|
| jet pT>80,50,50GeV | 251774 | 66     | 234    | 154              |
| MetSig>5           | 66.0   | 8.2    | 5.1    | 5.0              |
| minΔφ>0.3          | 7.0    | 6.1    | 4.2    | 4.0              |
| b-tagged jet>=1    | 5.1    | 0.64   | 0.29   | 2.8              |

# Event Display



- 最後のcutまで残ったeventの一つ

|  |  |
|--|--|
| Run no.  | 160736   |
| Event no.  | 2410050  |
| Lumi Block   | 216  |
| MET (Et[GeV], Phi[rad], SumEt[GeV])                  | MET_Topo (109.0, -0.0888, 452.0)   |
| Jet (Pt[GeV], Eta, Phi[rad], E[GeV], SV0, Dphi[rad]) | 1st (131.4, 1.086, 2.909, 217.5, 0, 2.998),<br>2nd (105.5, 1.316, 2.153, 211.3, 0, 2.241),<br><b>3rd (56.4, -0.126, -0.538, 57.4, 15.1, 0.450),</b><br>4th (50.6, 0.096, -3.071, 51.1, 0, 0.6, --),<br>5th (49.1, 0.699, -0.157, 61.8, 0, --),<br>6th (43.2, -0.648, -0.882, 53.1, 3.73, --) |
| minDphi [rad]  | 0.450  |
| ST   | 0.255  |
| Meff [GeV]   | 453  |
| MetSig [ $\sqrt{\text{GeV}}$ ]                       | 5.13   |



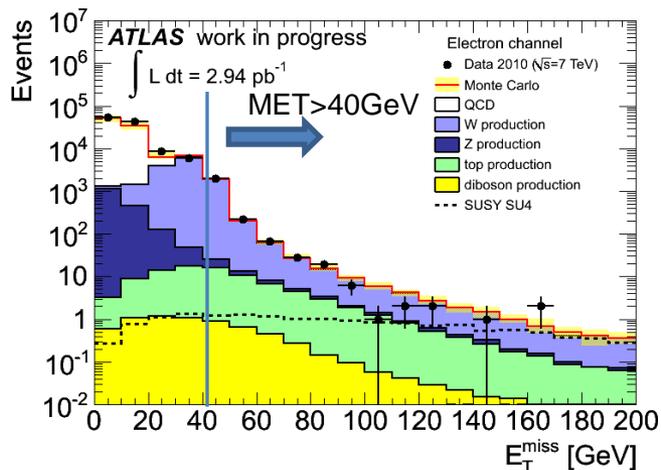
- Msing ETはgapに入ったjetの反対方向
  - jetのmis-measurement
- Missing ETは比較的高いb-tagging weightを持った6th leading jetと同じ方向でもある
  - b-jetでのreal missing
- QCD  $b\bar{b}$  dijets + jets /  $t\bar{t}$  semi-leptonic decay

# Electron Channel

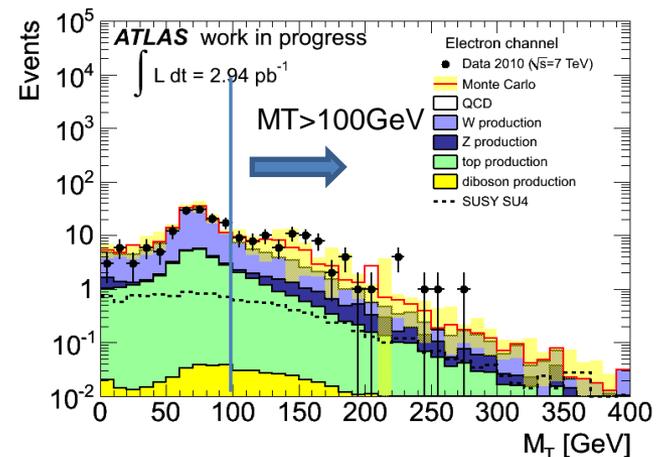
2.94 pb<sup>-1</sup>

| cut              | Data      | SM BG                              | SU4                               |
|------------------|-----------|------------------------------------|-----------------------------------|
| jet pT>30,30GeV  | 5027 ± 71 | 4845                               | 14.8                              |
| Missing ET>40GeV | 210 ± 15  | 197                                | 12.3                              |
| MT>100GeV        | 77 ± 9    | 58                                 | 4.8                               |
| b-tagged jet>=1  | 9 ± 3     | 11.3 ± 1.0(stat.) + 3.0/-6.2(sys.) | 2.8 ± 0.1(stat.) + 0.3/-0.8(sys.) |

- QCD, WのNormalizationはp.7の方法で行った
- Missing ET>40GeVの後に、W, Zを落とすため、MT>100GeVでカットした後、b-jetを1本以上要求する



2jets cut後のMissing ET分布



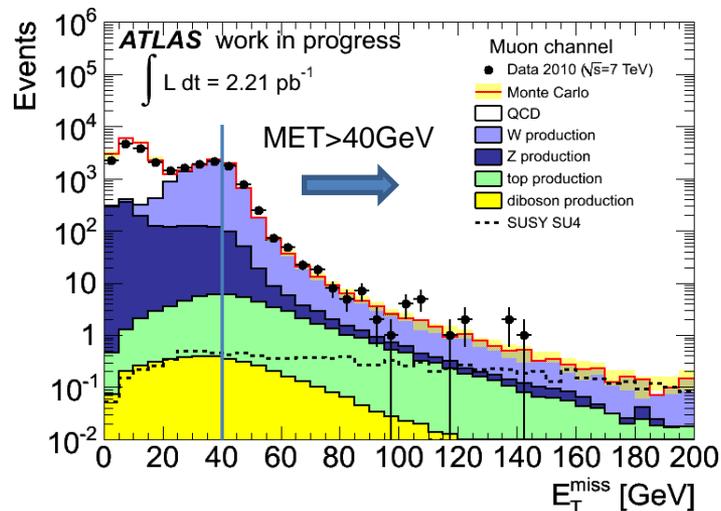
Missing ET cut後のMT分布

# Muon Channel

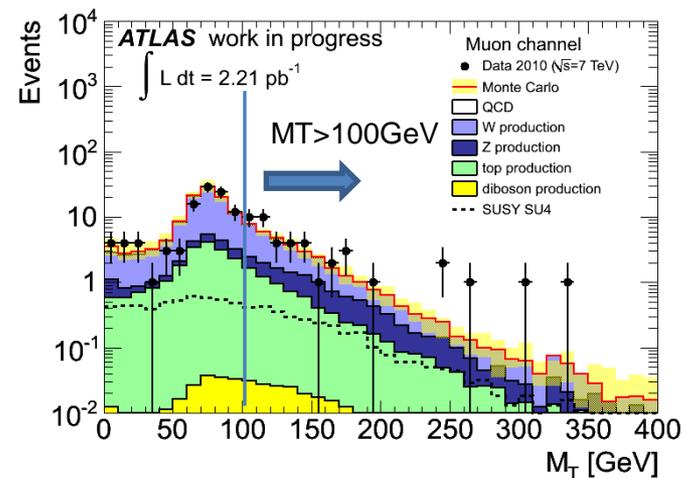
2.21 pb<sup>-1</sup>

| cut              | Data     | SM BG                             | SU4                                |
|------------------|----------|-----------------------------------|------------------------------------|
| jet pT>30,30GeV  | 894 ± 30 | 874                               | 9.1                                |
| Missing ET>40GeV | 144 ± 12 | 131                               | 7.5                                |
| MT>100GeV        | 44 ± 6.6 | 32                                | 3.0                                |
| 1 bjet (SV0>6)   | 4 ± 2    | 5.9 ± 0.1(stat.) + 0.8/-2.7(sys.) | 1.8 ± 0.07(stat.) + 0.2/-0.5(sys.) |

- Electron channelと同様のcutをかける



2jets cut後のMissing ET分布



Missing ET cut後のMT分布

# まとめと展望

- 第三世代粒子を含む超体性粒子の探索は標準的な超対称粒子探索と並んで、発見が期待できるトポロジー
  - 第三世代粒子のenhanceがあることが超対称性理論の検証にもなる
- LHC-ATLASで取得された $3\text{pb}^{-1}$ のDataを用いて解析を行い、最初のSusy Bench Mark Point(SU4)がexcludeできた
- 今年中に到達できそうな積分ルミノシティ $\sim 50\text{pb}^{-1}$ 
  - 今回の解析ではData量が少ないため、Monte Carlo Simulationの分布は信頼して、cross sectionだけをNormalizeする方法を取った
  - $50\text{pb}^{-1}$ のデータがあれば、データのみを用いたBackground Estimationが可能
  - Tevatronのリミットを大きく超えるSusy modelが検出できる

# Backup

# SUSY Benchmark Point

- これまでの実験のLimitを辛うじて超える程度のLow mass Susy modelのbench mark pointとして以下のmSUGRA parameterが最初のtarget (SU4と呼ばれている)

| $m_0$  | $m_{1/2}$ | $A_0$   | $\tan\beta$ | $\text{sign}(\mu)$ |
|--------|-----------|---------|-------------|--------------------|
| 200GeV | 160GeV    | -400GeV | 10          | +                  |

- Mass spectrum

– Lightest Susy Particle (LSP): neutralino 61GeV

| $\tilde{g}$ | $\tilde{u}_R$ | $\tilde{b}_1$ | $\tilde{t}_1$ | $\tilde{e}_R$ | $\tilde{\tau}_1$ | $\tilde{\chi}_1^0$ | $\tilde{\chi}_1^\pm$ |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|--------------------|----------------------|
| 410GeV      | 411GeV        | 361GeV        | 200GeV        | 213GeV        | 200GeV           | -61GeV             | -113GeV              |

- Susy particle production

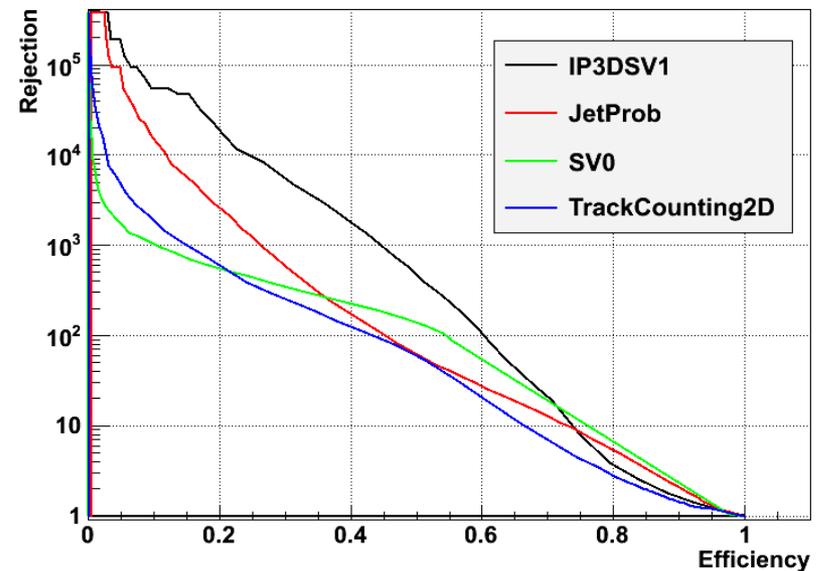
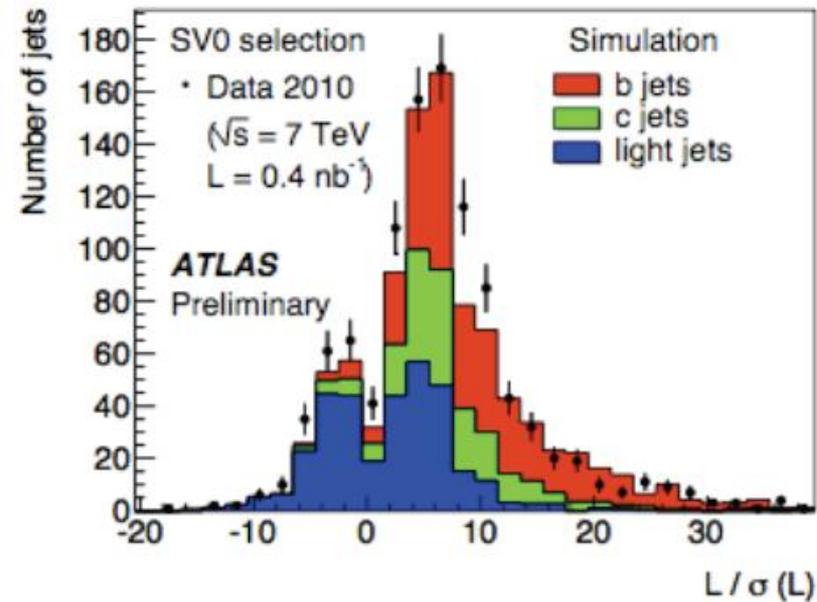
|                        | $\tilde{\text{light}}$ | $\tilde{t}, \tilde{b}$ | $\tilde{g}$ | $\tilde{\chi}$ |
|------------------------|------------------------|------------------------|-------------|----------------|
| $\tilde{\text{light}}$ | 0.064                  |                        |             |                |
| $\tilde{t}, \tilde{b}$ | 0.013                  | 0.091                  |             |                |
| $\tilde{g}$            | 0.144                  | 0.021                  | 0.04        |                |
| $\tilde{\chi}$         | 0.108                  | 0.131                  | 0.059       | 0.331          |

- Branching ratio to b-quark

– top quarkへのdecayを含めるとgluinoはほとんど終状態にb quarkを持つ

| $\tilde{g} \rightarrow$ | BR    |
|-------------------------|-------|
| $\tilde{b}_1 b$         | 0.430 |
| $\tilde{t}_1 t$         | 0.526 |

# B-Tagging



b-taggingのefficiency-rejection曲線  
(Monte Carlo Simulation)

# Estimated Error for Final Number of Events

- 0-lepton channel

|       | Center | Stat. | +JES | -JES  | trig. eff. | Lumi. | b-tag up | b-tag down |
|-------|--------|-------|------|-------|------------|-------|----------|------------|
| Data  | 7      | 2.6   |      |       |            |       |          |            |
| SM BG | 8.85   | 3.13  | 0.15 | 0.47  | 0.05       | 0.41  | 0.00     | -2.19      |
| SU4   | 12.25  | 0.21  | 1.49 | -1.45 | 0.17       | 1.35  | 0.00     | -3.46      |

- Electron channel

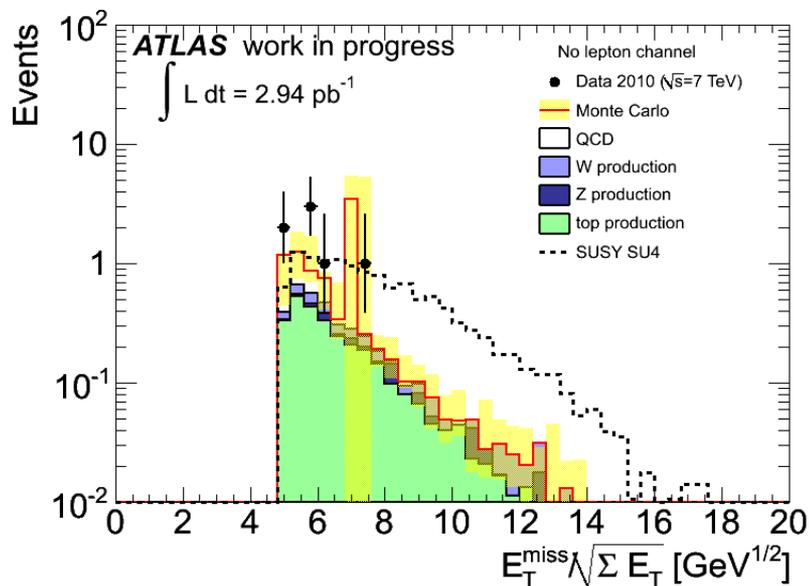
|       | Center | Stat. | +JES  | -JES  | trig. eff. | Lumi. | b-tag up | b-tag down |
|-------|--------|-------|-------|-------|------------|-------|----------|------------|
| Data  | 9      | 3     |       |       |            |       |          |            |
| SM BG | 11.32  | 2.01  | -2.99 | 3.50  |            | 0.67  | 0.00     | -5.10      |
| SU4   | 2.84   | 0.10  | 0.08  | -0.09 |            | 0.31  | 0.00     | -0.75      |

- Muon channel

|       | Center | Stat. | +JES  | -JES  | trig. eff. | Lumi. | b-tag up | b-tag down |
|-------|--------|-------|-------|-------|------------|-------|----------|------------|
| Data  | 4      | 2     |       |       |            |       |          |            |
| SM BG | 5.89   | 0.10  | -0.66 | 0.79  |            | 0.52  | 0.00     | -2.55      |
| SU4   | 1.80   | 0.066 | 0.04  | -0.07 |            | 0.20  | 0.00     | -0.43      |

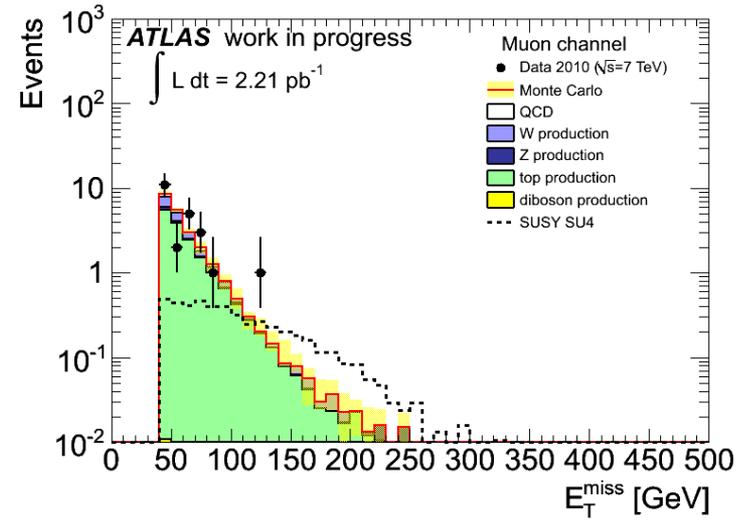
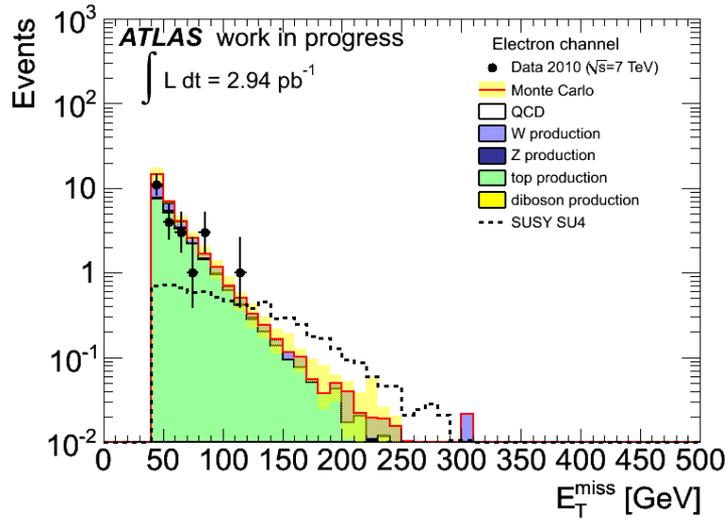
# No Lepton Channelで残ったEvents

| Missing ET [GeV] | leading jet pT[GeV] | $N_{\text{jets}} (pT>30\text{GeV})$ | highest b-tagged jet pT[GeV] | $N_{\text{b-tagged jets}} (pT>30\text{GeV})$ |
|------------------|---------------------|-------------------------------------|------------------------------|--|
| 135.7            | 148.1               | 4                                   | 61.0                         | 1  |
| 88.5             | 111.2               | 4                                   | 54.1                         | 1  |
| 134.0            | 190.3               | 3                                   | 111.2                        | 1  |
| 118.5            | 113.2               | 4                                   | 68.6                         | 1  |
| 132.7            | 93.2                | 4                                   | 93.2                         | 1  |
| 118.4            | 193.2               | 4                                   | 193.2                        | 2  |
| 109.0            | 131.4               | 6                                   | 56.4                         | 1  |



- 最後のcutまで残ったeventのMET Significance分布
  - SM BGの分布とconsistent
- 予測される主なSM BGは、
  - QCD bbar di-jets + jets  $\sim 5$ events
  - semi-leptonic decay of ttbar  $\sim 3$ events

# Missing ET 分布 in Lepton Channel



- Electron/Muon Channelで最終カット後のMissing ET分布
  - 低いMissing ET側にのみeventsが残っており、SM BGにconsistent

# Large MT Event in Muon Channel

- Muon channelでMTが大きい(>200GeV)eventを見てみると、  
typicallyにはdi-muons + missing ET
  - 現在使っているMissing ETはEM scaleのcalorimeter base
  - muon termはofflineで足す
  - $Z/\gamma^* \rightarrow \mu\mu$ なら無いはずのmissing ETが残る

