

日本物理学会2010秋季大会

九州工業大学

2010年9月11日

LHCでの新粒子探索

寺師 弘二

東京大学素粒子物理国際研究センター

アウトライン

LHC・ATLAS実験での、標準模型を越える物理（新粒子）の探索と将来の展望について

- ▶ Di-jet : w/ and w/o resonance
- ▶ Lepton + Missing E_T
- ▶ Di-lepton Resonance
- ▶ Multi-objects : Jets, Leptons, Missing E_T
- ▶ Jets + Missing E_T (+ Leptons)
- ▶ Boosted “Top” Signature

最新の結果は以下のリンクから入手できます。

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/AtlasResults>

Di-jet探索：Jetの測定

- ▶ Jetの再構成：Anti- k_T アルゴリズム ($R=0.6$)
 - ▶ Jet インプット：3次元カロリメータ Topological Clusters with noise suppression
 - ▶ Monte Carlo simulationを使ったHadronスケールへの補正
 - ▶ **Jet エネルギースケール (JES)の不定性**
 - 検出器由来の不定性
 - MCモデルの不定性
 - その他の不定性：pile-up、jet flavor依存性、non-isolated jets
- Test beam、in-situデータとの比較

JESの不定性：< 7% ($p_T^{\text{jet}} > 100 \text{ GeV}$, $|y^{\text{jet}}| < 2.8$)

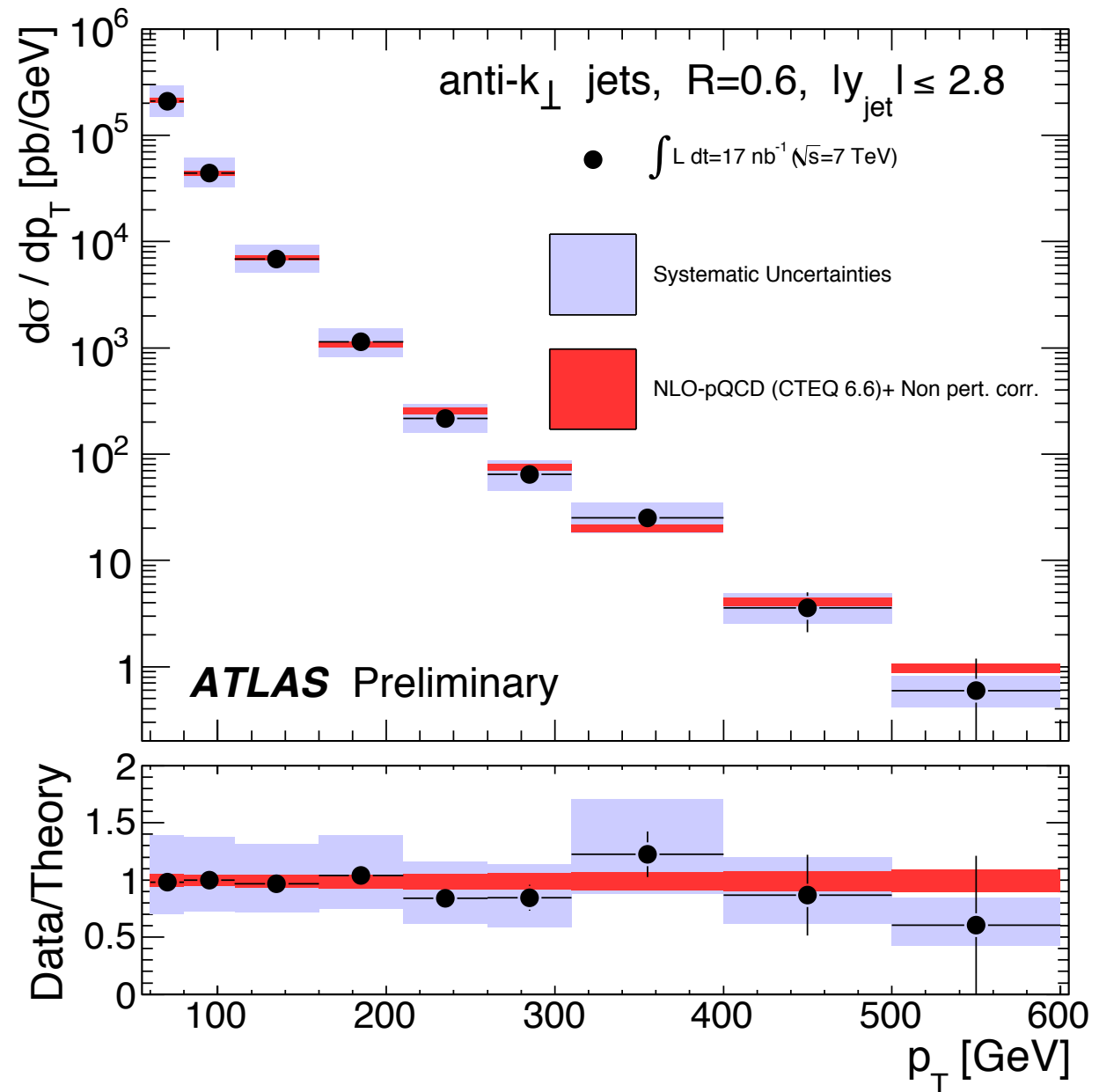
Di-jet : QCD測定の不定性

高い p_T 領域での実験・理論の不定性を正確に評価する必要がある。

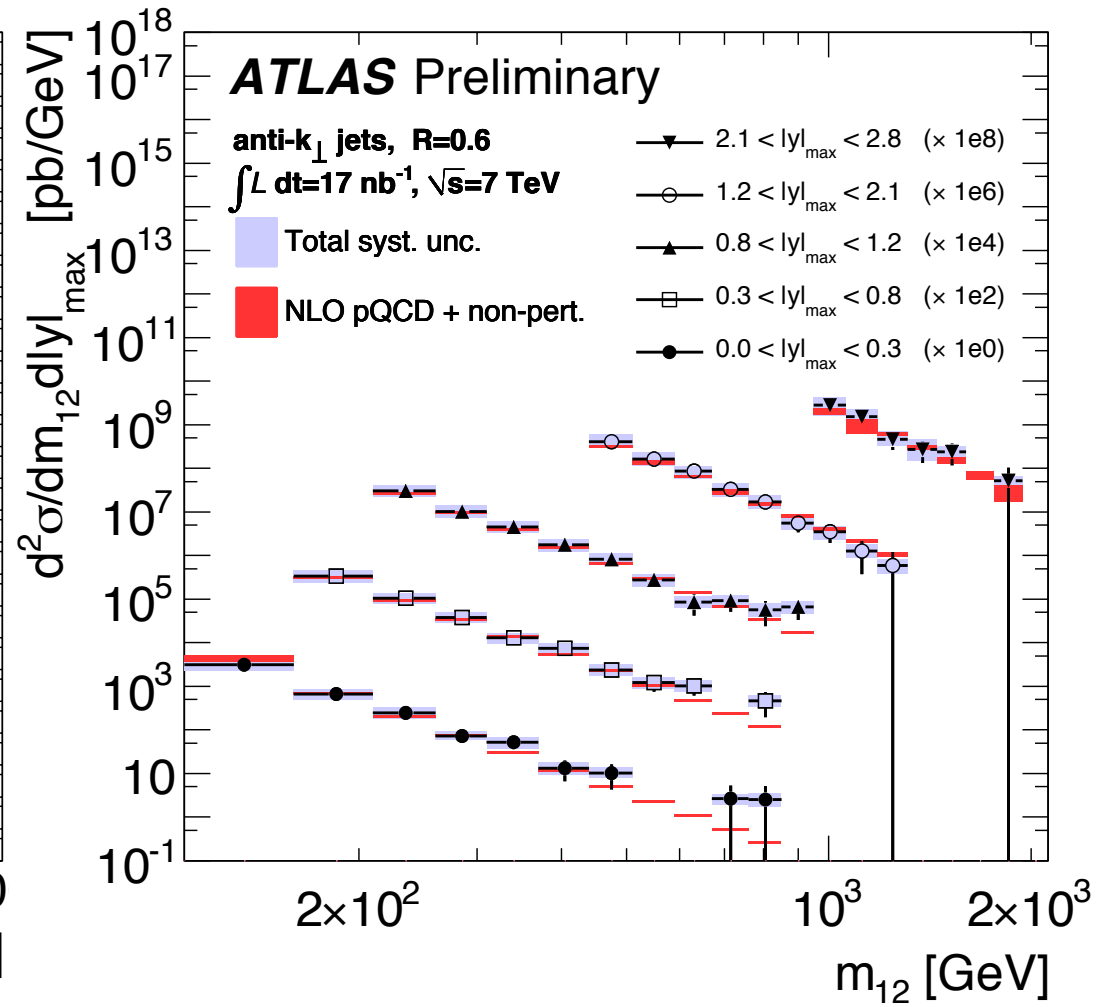
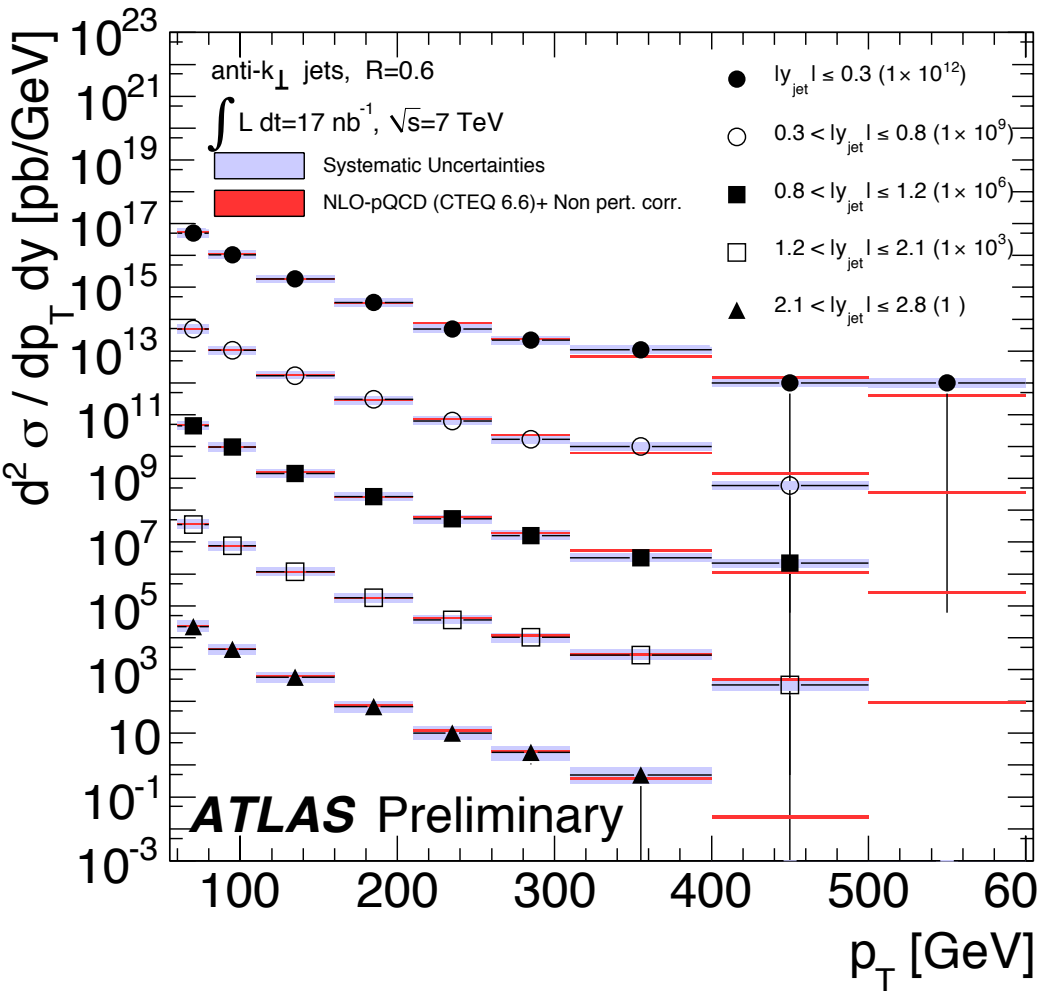
5-6%のJES不定性

→ $p_T^{\text{Jet}}=500$ GeVで
±50%程度の断面積
不定性につながる。

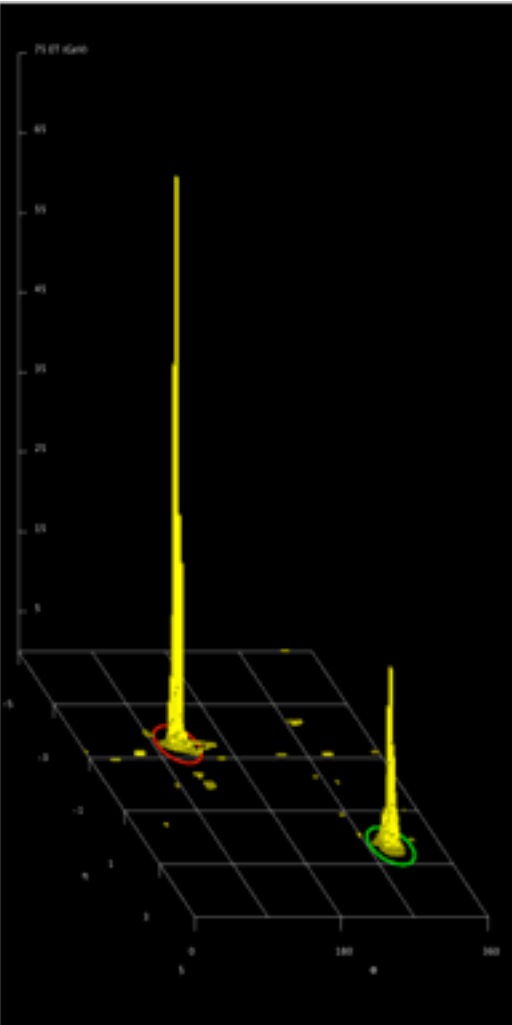
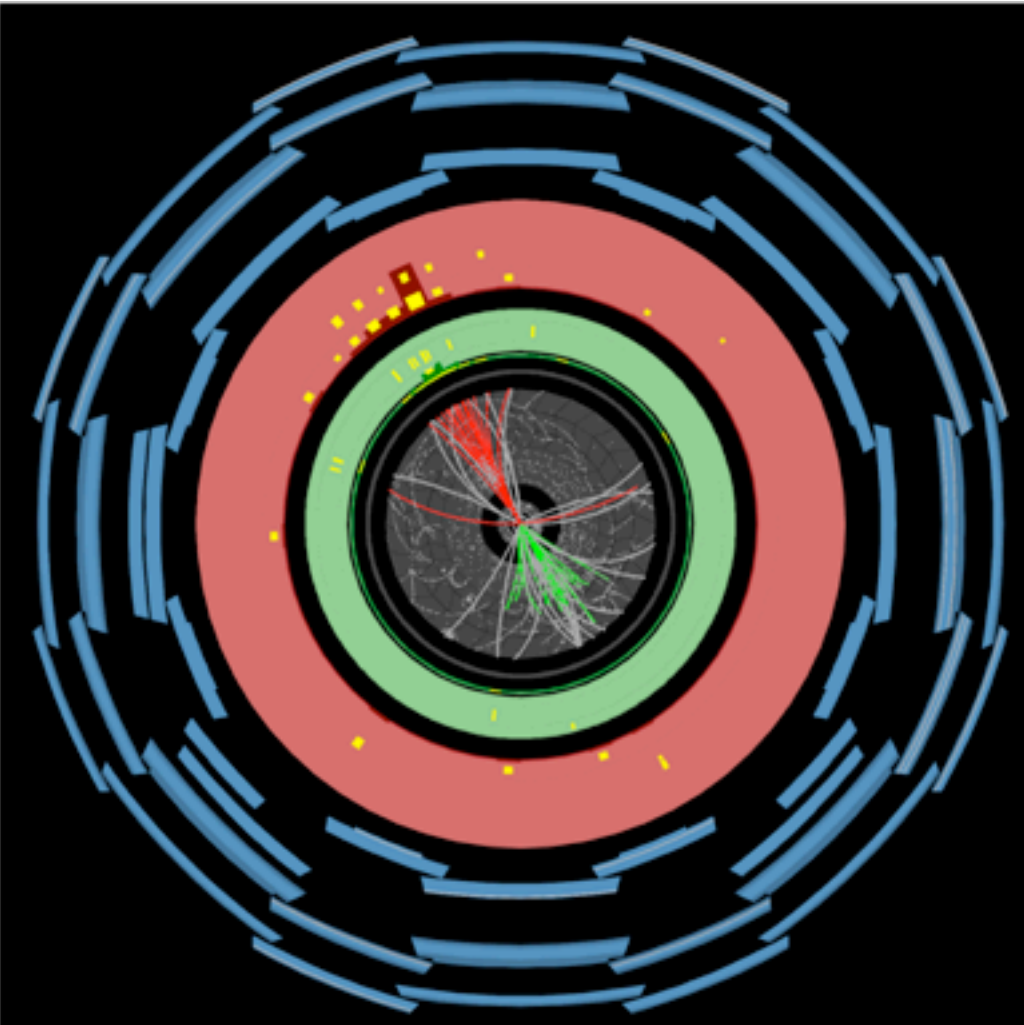
→ JES不定性からの影
響を抑えられる解析
方法が望ましい。



Inclusive Jet/Di-jet Cross Section



- ▶ ATLAS検出器・Jet Calibrationの理解。
- ▶ NLO pQCD+[Parton→Hadron補正]でデータを再現する。
- ▶ LO QCD (例えばPYTHIA) はデータへの規格化が必要。



Jet 1

$p_T = 420 \text{ GeV}$

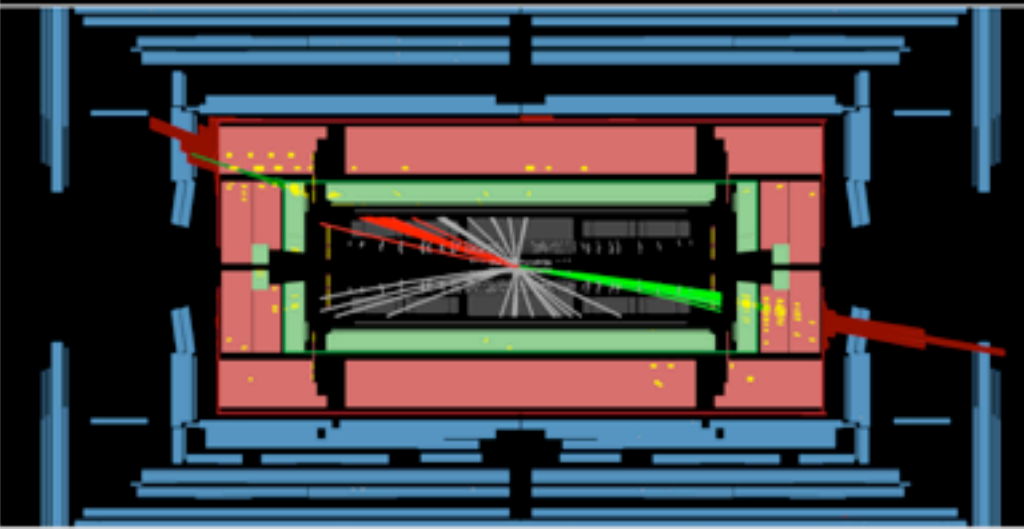
$\eta = -1.5$

Jet 2

$p_T = 320 \text{ GeV}$

$\eta = 2.3$

$M_{JJ} = 2.55 \text{ TeV}$



 **ATLAS**
EXPERIMENT

Run Number: 158548, Event Number: 5917927
Date: 2010-07-04 07:24:40 CEST

Dijet探索： Resonance

ベンチマーク：Excited Quark

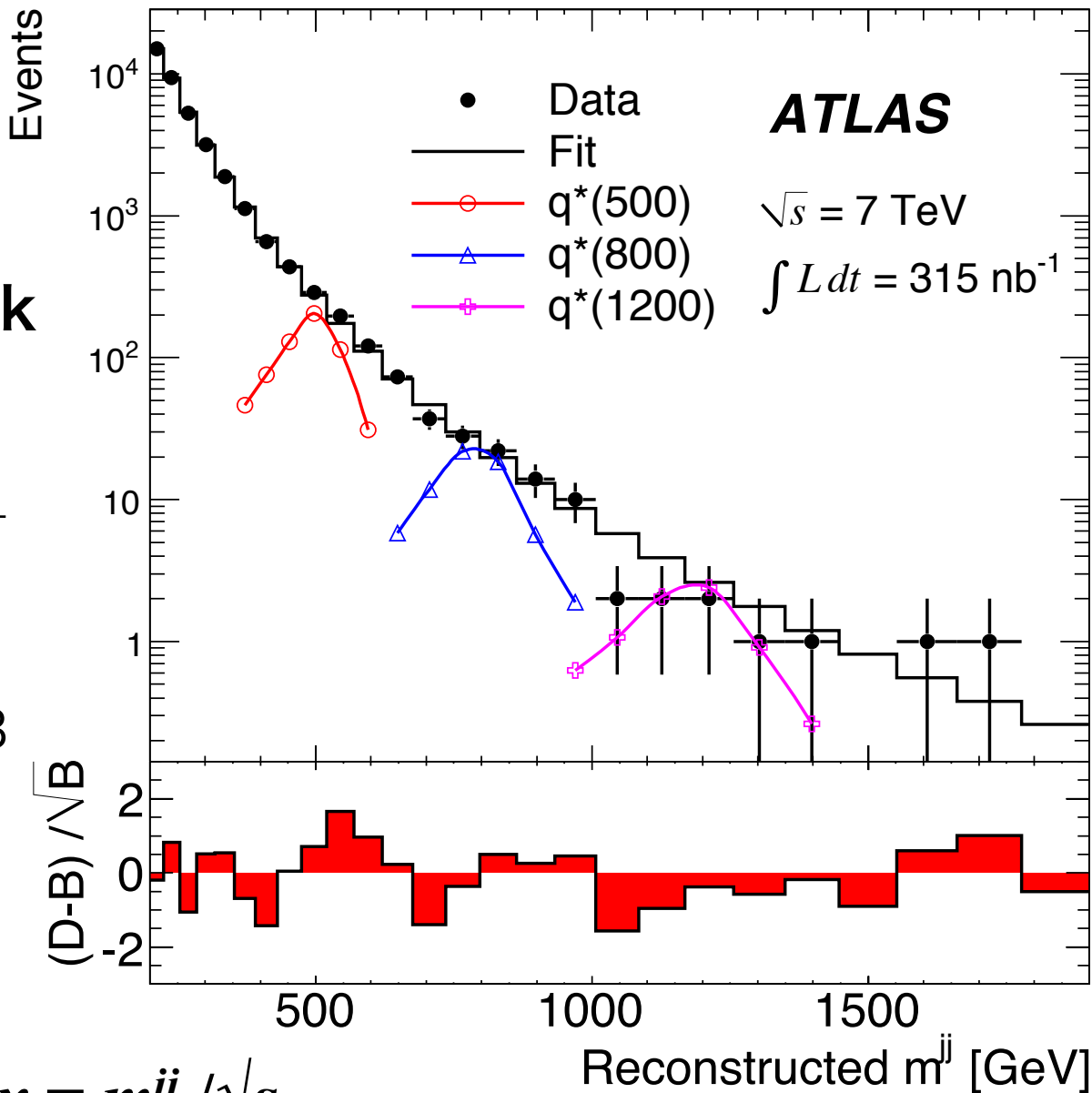
観測量

$$m^{jj} = \sqrt{(E_{j1} + E_{j2})^2 - (\vec{p}^{j1} + \vec{p}^{j2})^2}$$

- $p_{T}^{j1(2)} > 80(30)$ GeV
- $|\eta^{j1,2}| < 2.5, |\eta^{j1} - \eta^{j2}| < 1.3$
- $m^{jj} > 200$ GeV

$$\frac{dN}{dx} = p_0 \frac{(1-x)^{p1}}{x^{p2} + p3 \cdot \ln x}$$

$$x = m^{jj} / \sqrt{s}$$



m^{jj} 分布をsmooth関数フィット → フィットはデータを良く再現する。

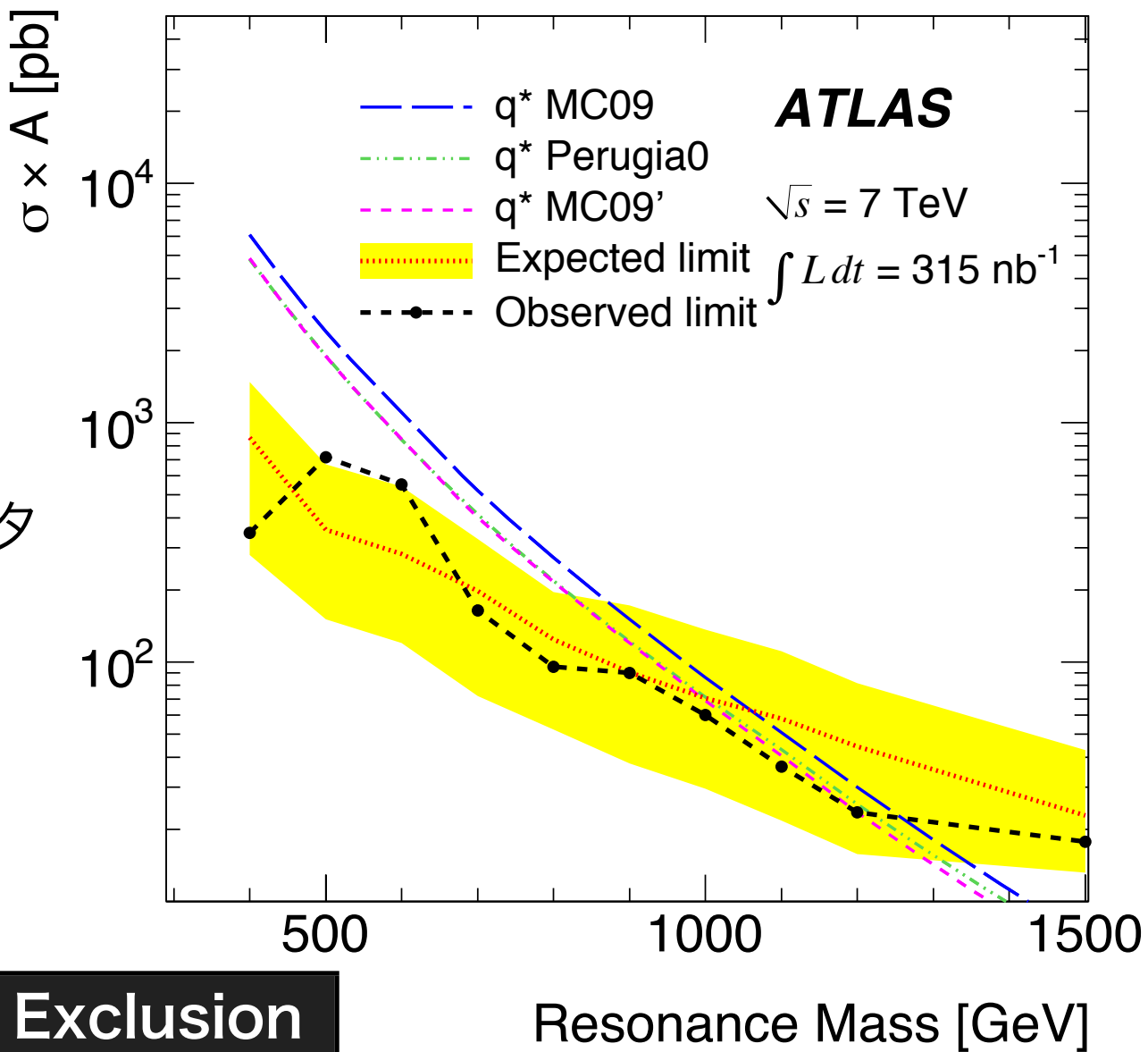
▶ [Ref. CDF Run II : PRD 79 (2009) 112002]

Dijet探索： Resonance

系統誤差

- ▶ JES (最も重要)
- ▶ Background fit パラメータ
- ▶ 積算ルミノシティ
- ▶ Jetエネルギー分解能

Excited Quarkの質量に
対する制限 (315 nb^{-1})



| PDF | 95% C.L. Exclusion |
|------------------------|------------------------------------|
| MRST2007 LO* (MC09) | $400 < m_{q^*} < 1260 \text{ GeV}$ |
| CTEQ6L (MC09') | $400 < m_{q^*} < 1190 \text{ GeV}$ |

**世界最高のLimitに到達した
最初のLHC探索結果**

[arXiv:1008.2461](https://arxiv.org/abs/1008.2461)

PRL accepted (30, Aug. 2010)

Dijet探索 : Non-Resonance

観測量

$$\chi = \exp(|y^{j1} - y^{j2}|)$$

$$\left(= \frac{1 + \cos \theta^*}{1 - \cos \theta^*} \right) \theta^* = \text{パートン散乱角 (c.m. frame)}$$

- $p_{T}^{j1(2)} > 60(30) \text{ GeV}$
 - $|\eta^{j1,2}| < 2.8$
 - $|y^{j1} - y^{j2}| < 3.4$
 - $|y^{j1} + y^{j2}| < 1.5$ (fixed x)
- in bins of m_{jj} (fixed $\sqrt{\hat{s}}$)

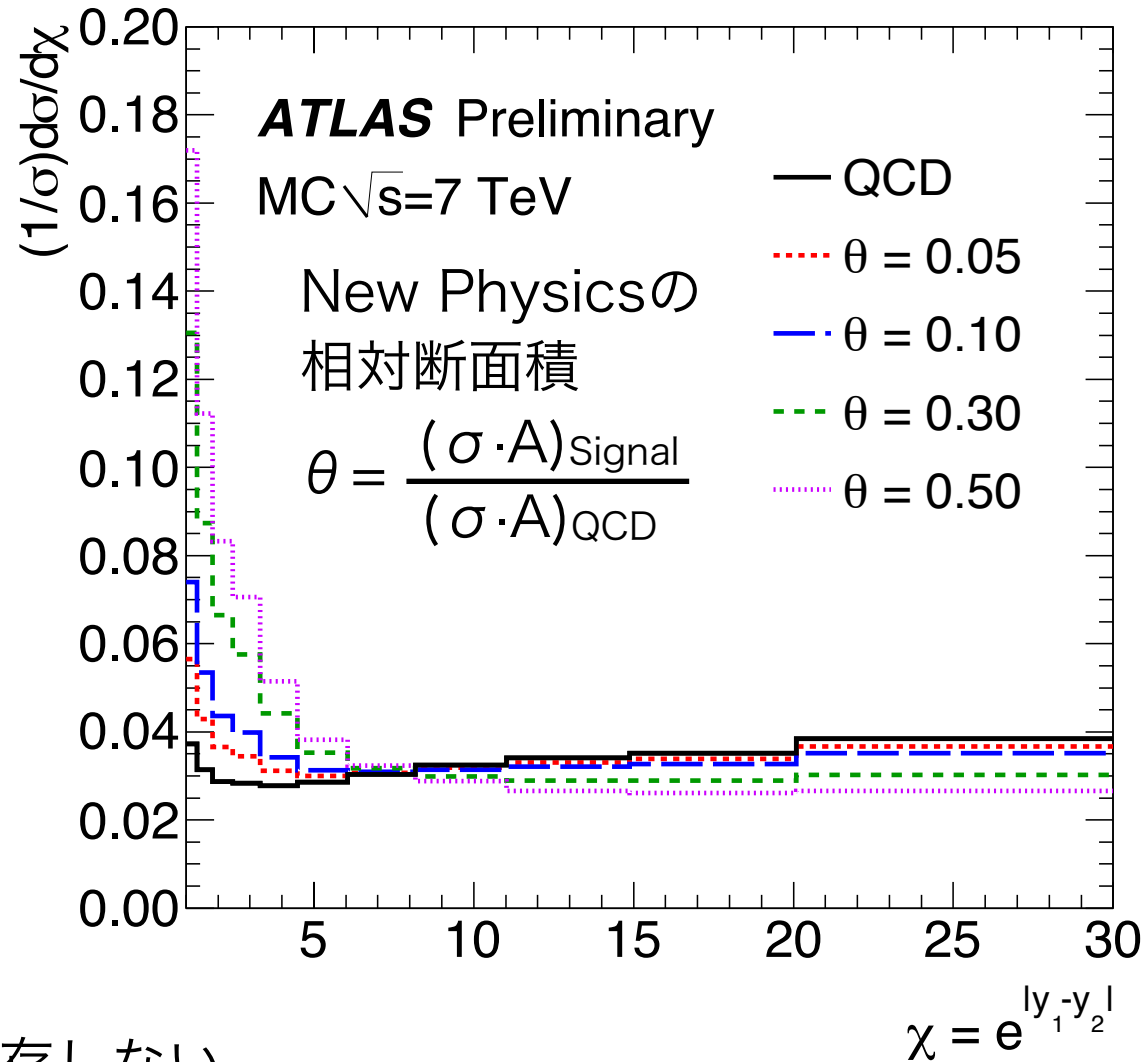
→ パートン散乱過程をprobe

断面積で規格化

→ ルミノシティ・理論不定性に依存しない。

小さい χ (大きい θ^*)領域でのFlatなQCD分布からのずれを検証。

ベンチマーク : Quark Compositeness



Dijet探索 : Non-Resonance

520 < m_{jj} < 680 GeV で
信号を探索

→ LO PYTHIA予想と無矛盾

系統誤差

- ▶ JES
- ▶ PDFの不定性 (< 2%)

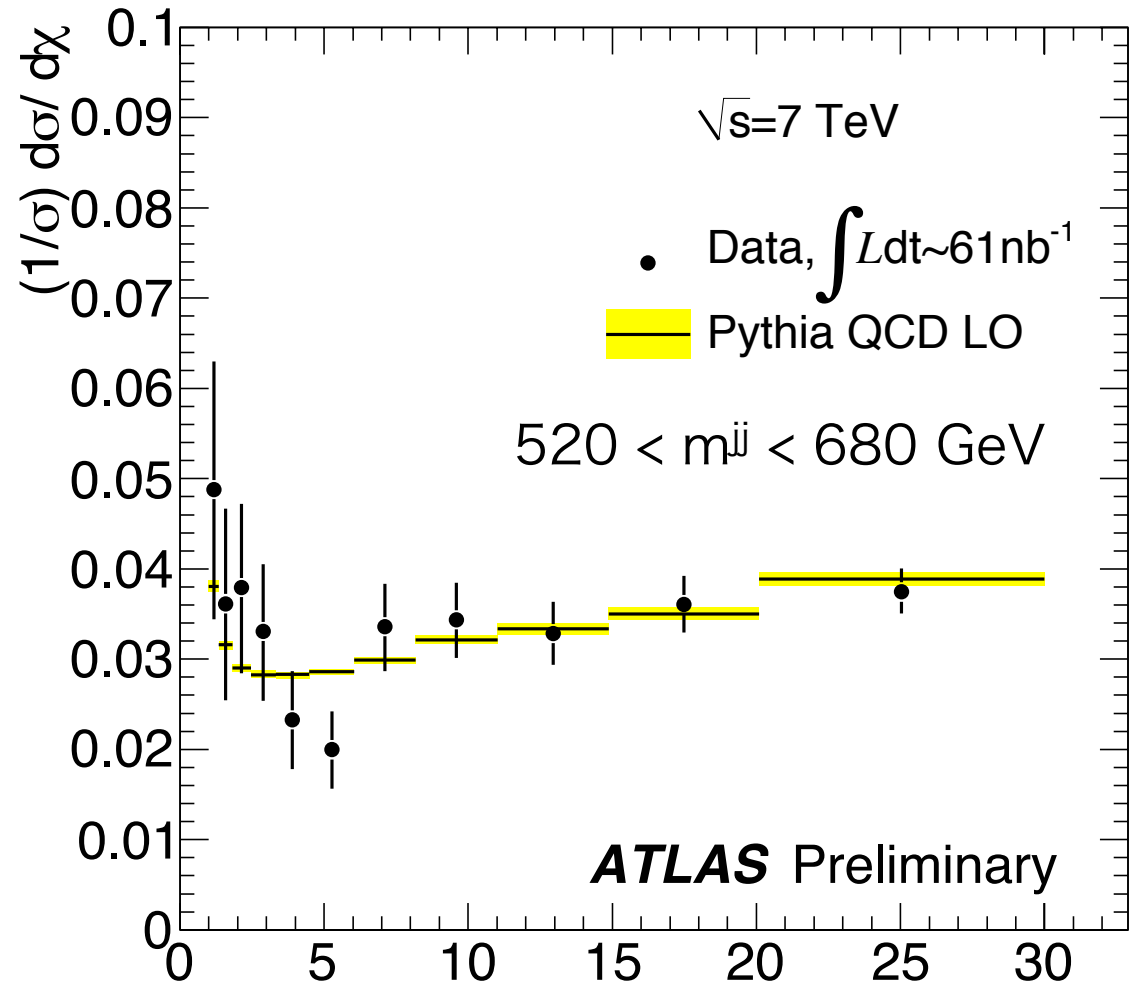
→ +4/-6% at $\chi = 1 \sim 2$

Compositenessスケールに
対する制限 (61 nb⁻¹)

95% C.L. Limit

$\Lambda > 875 \text{ GeV}$

(距離スケール $2.3 \times 10^{-4} \text{ fm}$)



現在の制限 : $\Lambda > 2.8 \text{ TeV}$

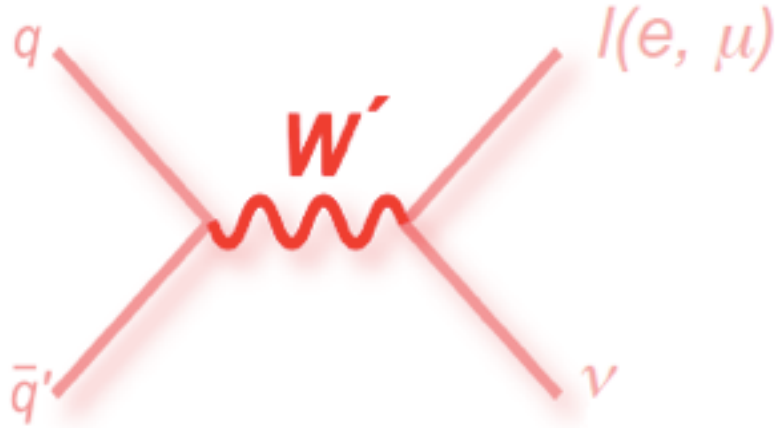
PRL 103(2009), 191803

$$\chi = e^{\frac{|y_1 - y_2|}{2}}$$

~3 pb⁻¹データ解析が進行中 → Best Limitを期待。。。

Lepton+Missing E_T 探索

ベンチマーク : W' \rightarrow lepton + ν (SMフェルミオン結合)



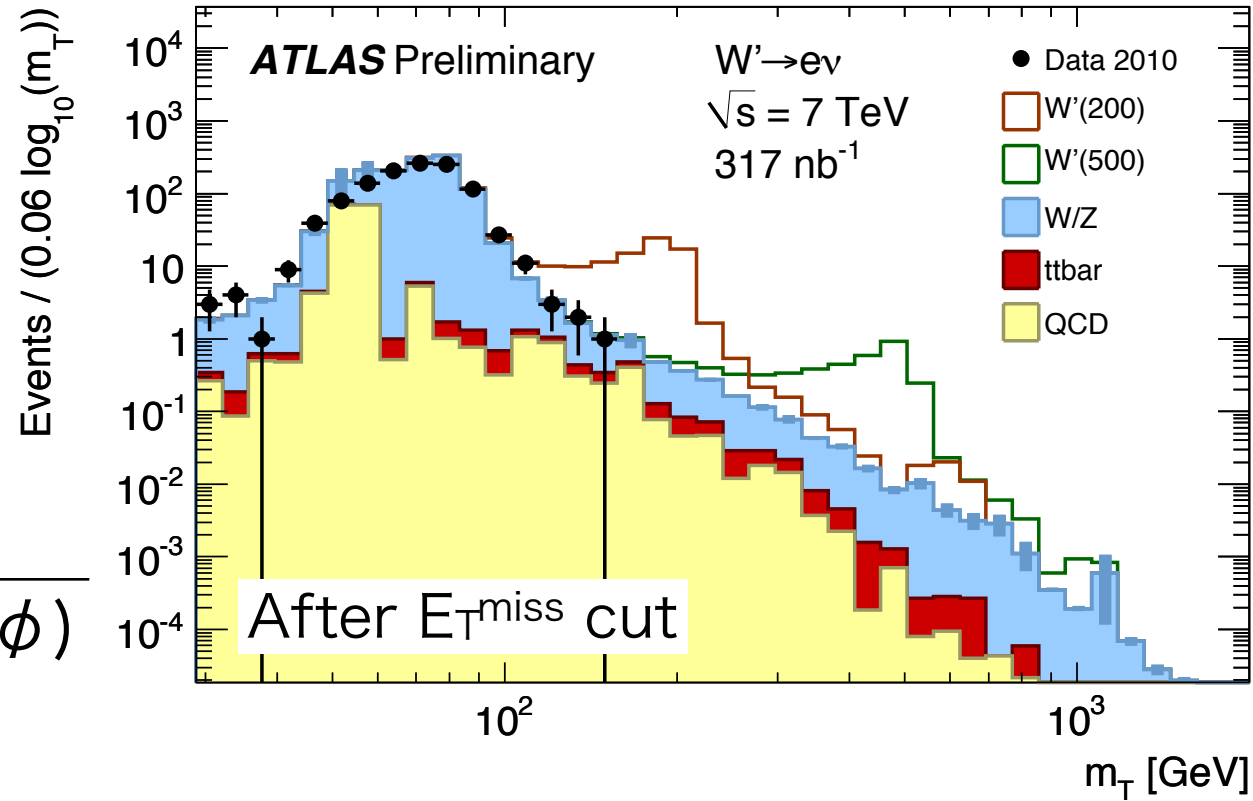
観測量

$$m_T = \sqrt{2 p_T^e E_T^{\text{miss}} (1 - \cos \phi)}$$

- $p_T^e > 20$ GeV (isolated)
- $E_T^{\text{miss}} > 25$ GeV

主なバックグラウンド

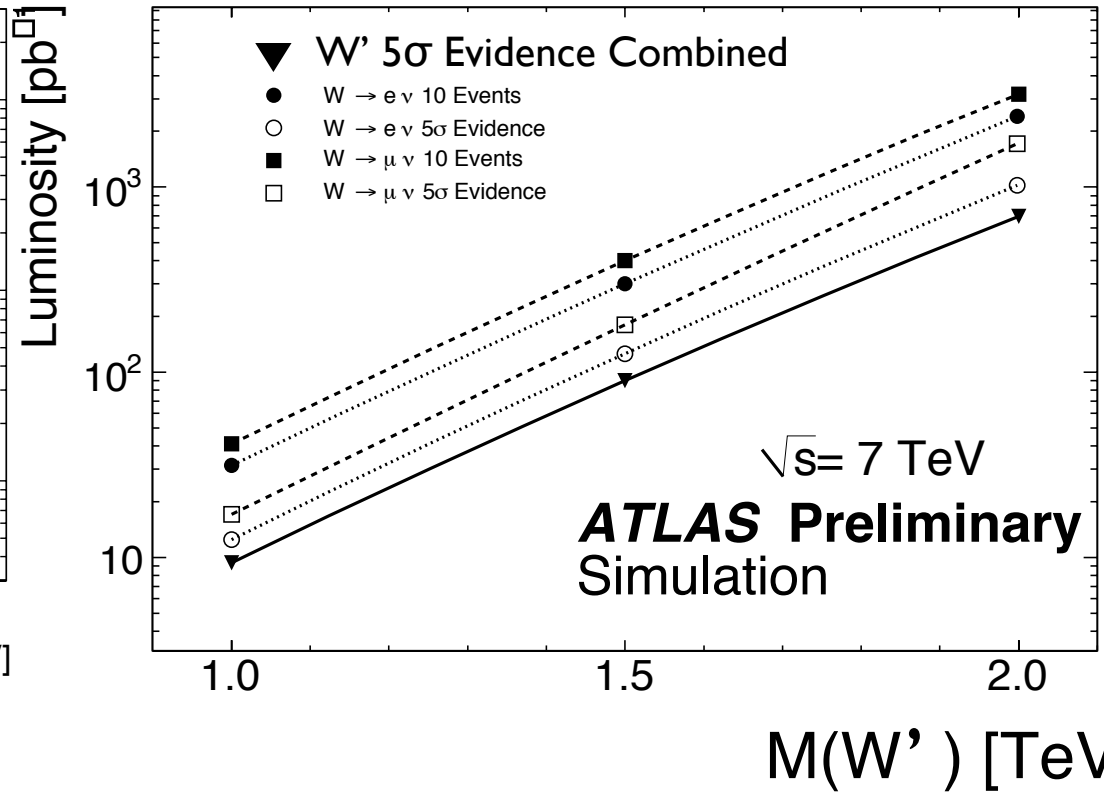
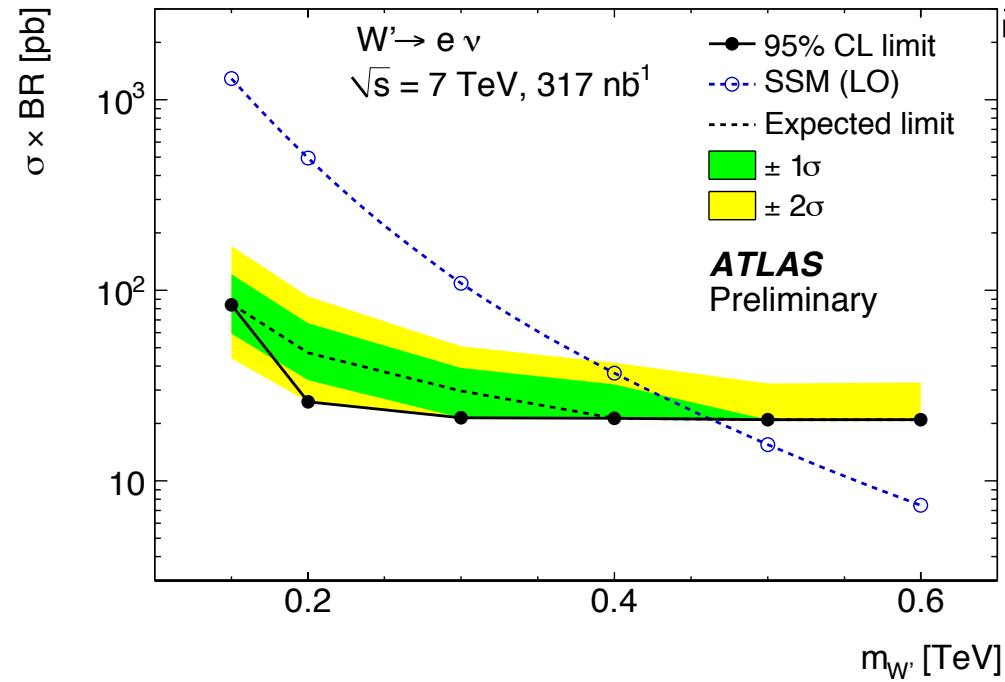
- 標準模型 W/Z過程
- tt対生成
- QCD



- ▶ $W \rightarrow e \nu$ background不定性 : 7 %
 - 質量・スケール・PDF依存性

- ▶ QCD background (LO PYHIA) normalized to data at $20 < m_T < 40$ GeV (scale factor = 0.46)

Lepton+Missing E_T 探索



W' ボゾン質量に対する制限
 (317 nb^{-1})

95% C.L. Limit
 $m_{W'} > 465 \text{ GeV}$

現在の制限: $m_{W'} > 1.0 \text{ TeV}$
 PRL 100(2008), 031804

5 σ (あるいは10イベント) 発見可能性

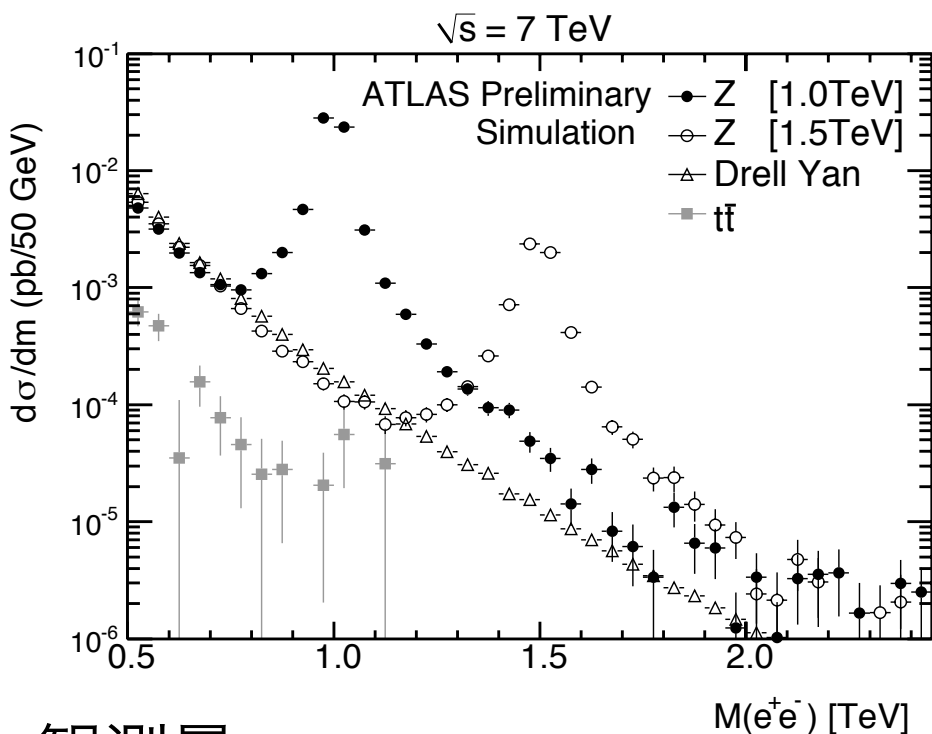
- $W' \rightarrow e \nu / \mu \nu$ and combined

$m_{W'} = 1 \text{ TeV} \rightarrow \sim 10 \text{ pb}^{-1}$ (今年)

$m_{W'} = 2 \text{ TeV} \rightarrow \sim 1 \text{ fb}^{-1}$ (来年)

Di-lepton 探索

ベンチマーク : $Z' \rightarrow \text{lepton-pair}$
(SMフェルミオン結合)



観測量

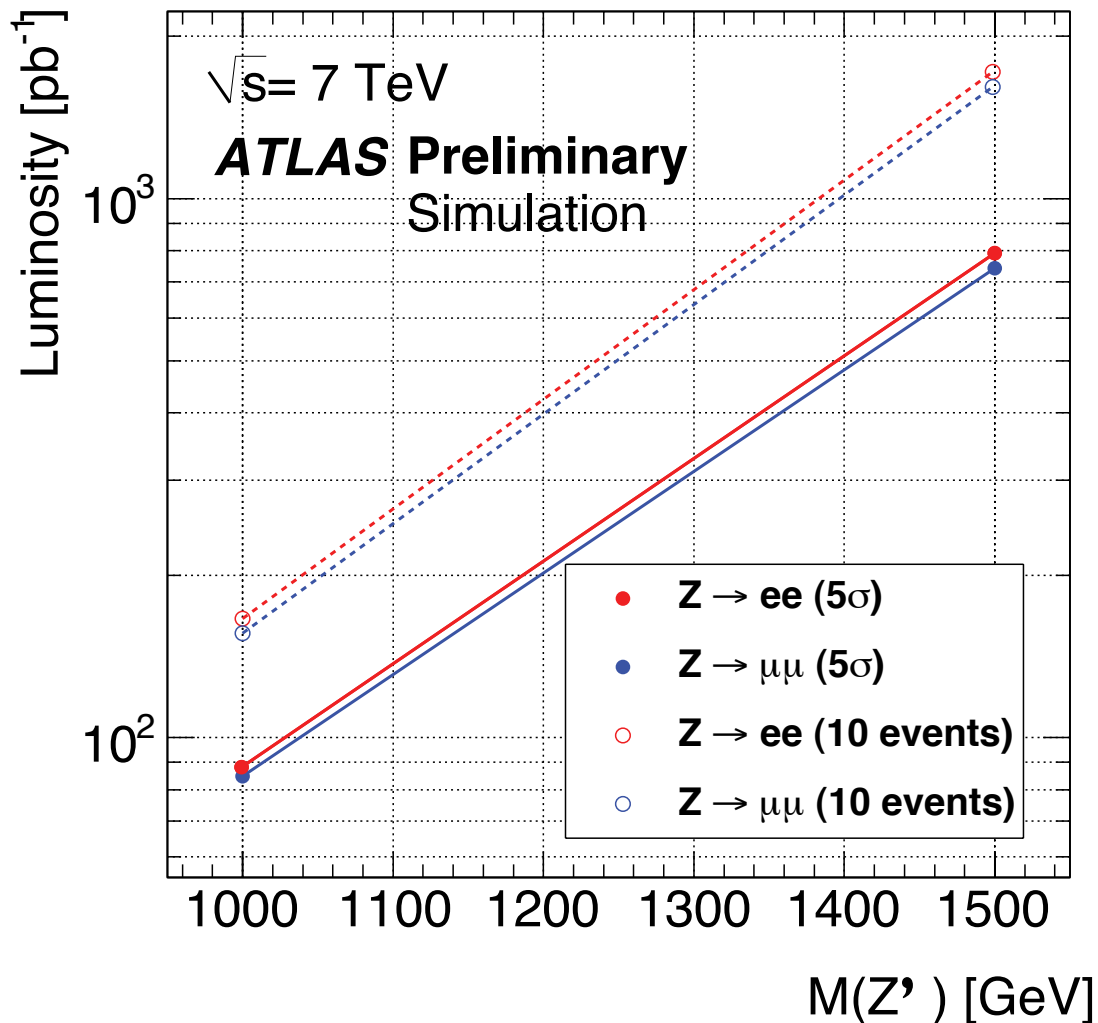
$$m^{\parallel} = \sqrt{(E_{l1} + E_{l2})^2 - (\vec{p}^{\parallel 1} + \vec{p}^{\parallel 2})^2}$$

- $p_{Tl} > 20 \text{ GeV}$

- $|\eta| < 2.5$

現在の制限 : $m_{Z'} > 1.0 \text{ TeV}$

PRL 102(2009), 091805



5σ (あるいは10イベント) 発見可能性

- $Z' \rightarrow ee/\mu\mu$

$m_{W'} = 1 \text{ TeV} \rightarrow \sim 100 \text{ pb}^{-1}$ (来年早々)

$m_{W'} = 1.5 \text{ TeV} \rightarrow \sim 1 \text{ fb}^{-1}$ (来年)

13pSK10: 石川明正 (神戸大)
ATLAS実験におけるミュオンに
崩壊する重い新粒子の探索

Multi-objects 探索

TeVスケール重力モデルを想定

- ▶ フラットなADD余剰n次元 (サイズR)
- ▶ $M_{Pl} = (2\pi R)^n M_D^{n+2}$
→ 真のPlanckスケール $M_D \sim \text{TeV}$
- ▶ Collider実験からの制限
 - $M_D > 940 \text{ GeV}$ ($n=6$)
 - $M_D > \sim 800 \text{ GeV}$ ($n>6$)

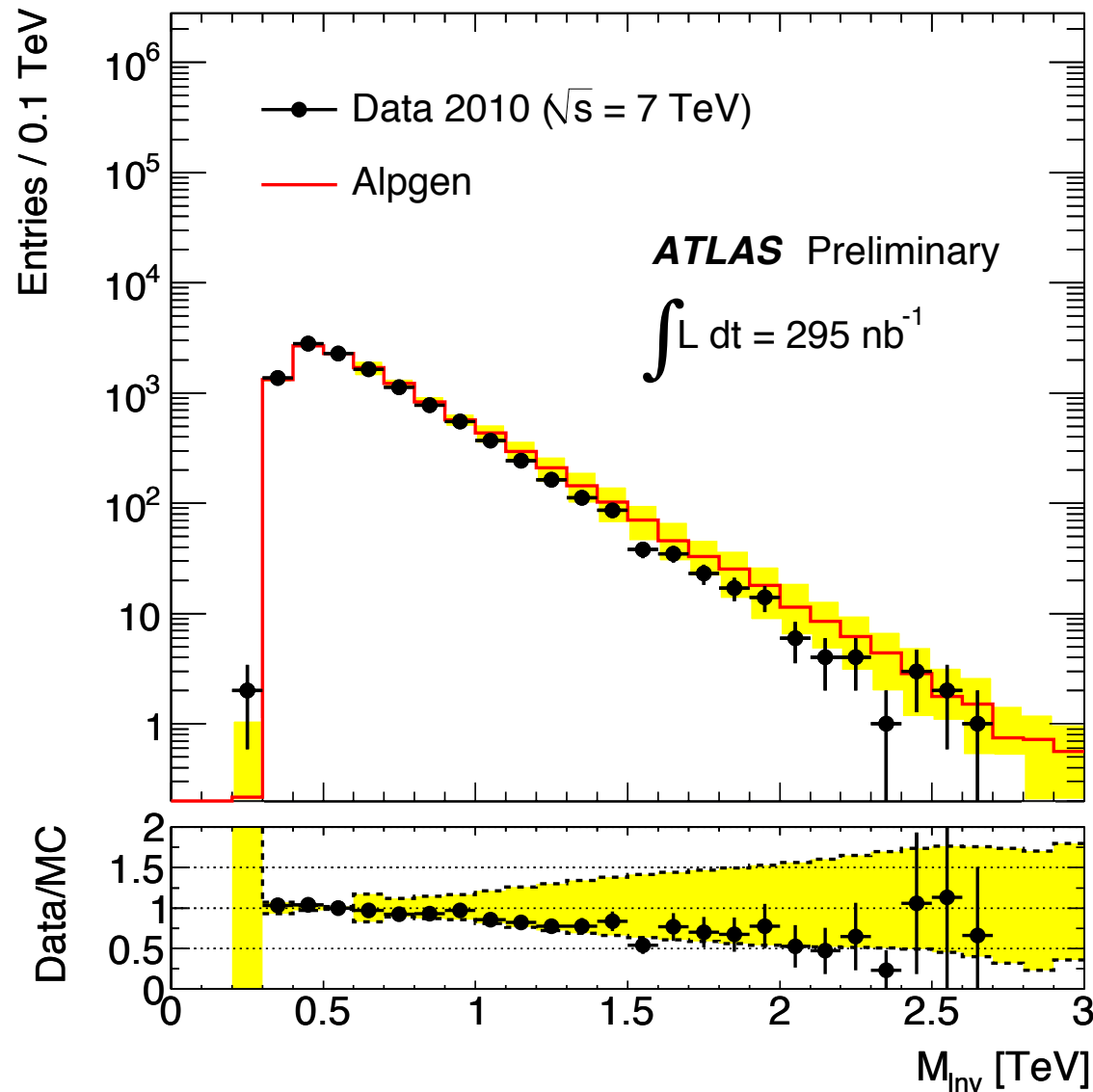
観測量

$$M_{inv} = \sqrt{(\sum_{i=\text{object}} p_i + p^{\text{miss}})^2}$$

$$p^{\text{miss}} = (E_T^{\text{miss}}, E_X^{\text{miss}}, E_Y^{\text{miss}}, 0)$$

- Jet : $p_T > 40 \text{ GeV}$
- Electron/Photon : $p_T > 20 \text{ GeV}$
- Muon : $p_T > 20 \text{ GeV}$

→ イベント中に少なくとも3つのオブジェクトを要求



QCD background (LO ALPGEN)
normalized to the data with

- ▶ $\sum_{i=\text{object}} p_T > 300 \text{ GeV}$
- ▶ $300 < M_{inv} < 800 \text{ GeV}$

(scale factor = 1.15)

Multi-objects 探索

ベンチマーク :

TeVスケール重力効果 (Black Hole)

Signal Region :

▶ $\sum_{i=\text{object}} p_{T} > 700 \text{ GeV}$

▶ $M_{\text{inv}} > 800 \text{ GeV}$

→ LO ALPGEN予想と無矛盾

データ : 193イベント

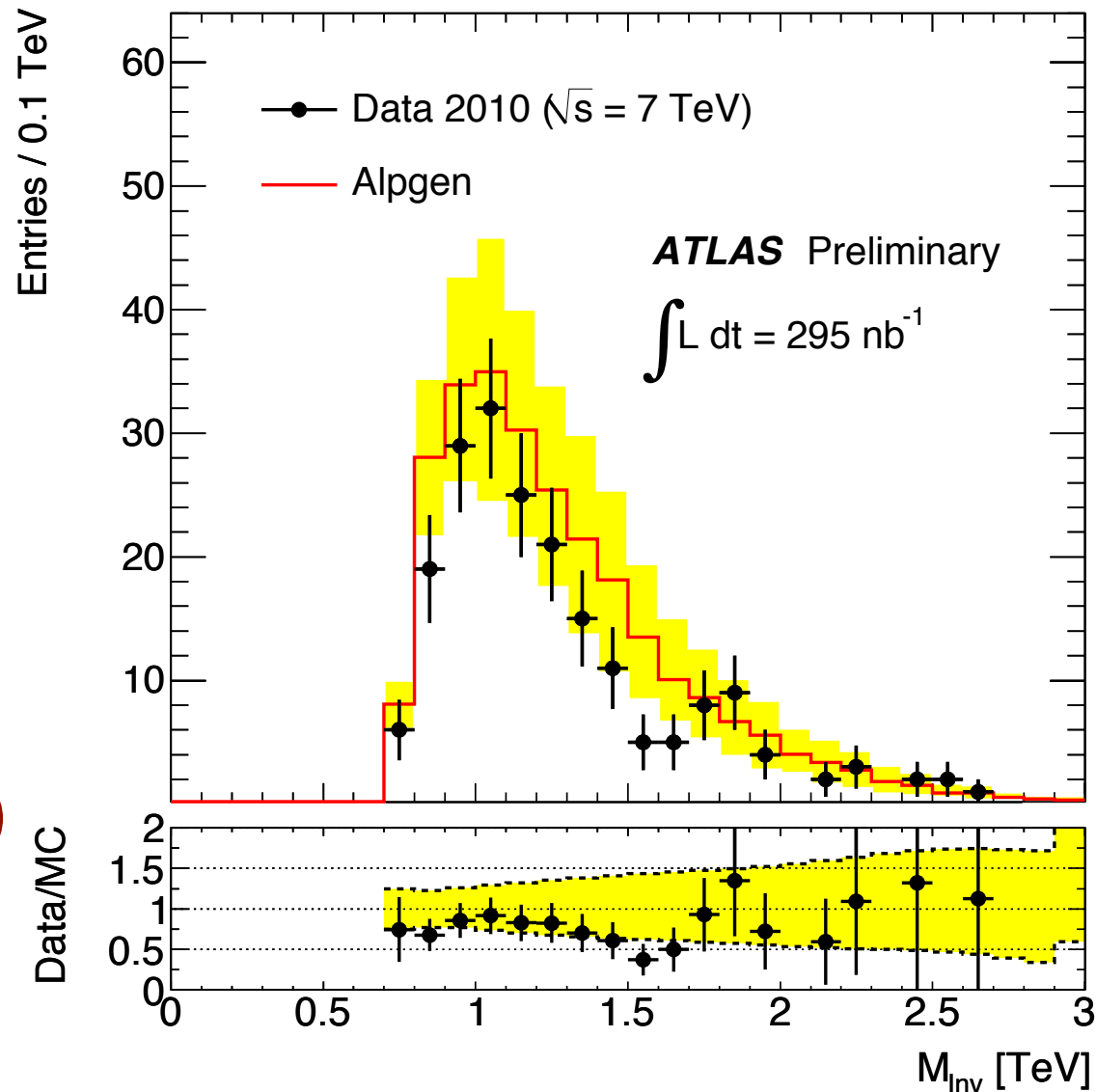
BG : $254 \pm 18(\text{stat}) \pm 84(\text{syst})$
イベント

$\sigma \cdot \text{Acceptance}$ に対する
制限 (295 nb^{-1})

95% C.L. Limit

$\sigma \cdot A < 0.34 \text{ nb}$

Signal Regionでの M_{inv} 分布

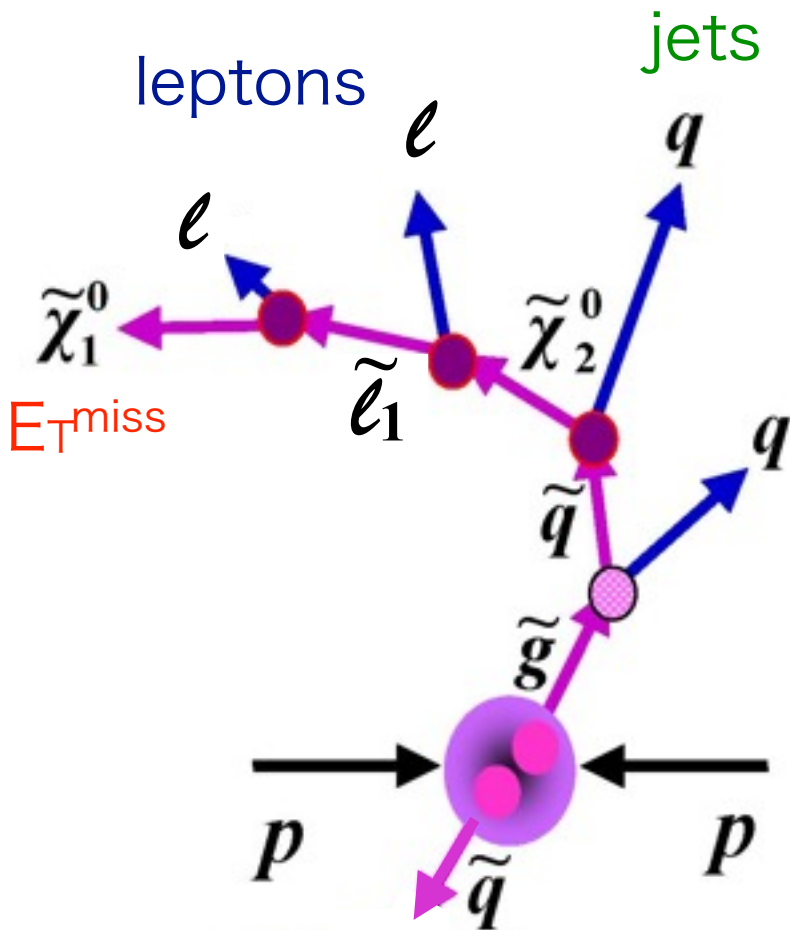


データに基づくBG評価と $\sim 3 \text{ pb}^{-1}$ データを使ったBlack Hole探索の解析

14aSL08: 兼田充 (東京大)

ATLAS実験におけるTeVスケール重力の探索

Inclusive SUSY 探索



LHCでのSUSY生成過程

- ▶ 強い相互作用で生成されるgluino/squark対
- ▶ より軽いSUSY粒子へのカスケード崩壊
- ▶ 安定なLSP (R-パリティの保存)

→ **Multi-jets + E_T^{miss} + X** トポロジー

トポロジーに基づいたInclusive探索

- ▶ 現在のTevatronによる制限

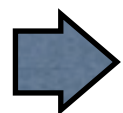
- $M_q > 380 \text{ GeV}$

- $M_g > 300 \text{ GeV}$

- $(M_q = M_q) > 390 \text{ GeV}$ PRL 102(2009), 121801

- PLB 660(2008), 449

- ▶ $\sim 100 \text{ nb}^{-1}$ のデータでは感度が足りない。



標準模型バックグラウンドの理解を中心に進められてきた。

- バックグラウンドの理解 (MCとの比較)
- コントロール領域の設定 (規格化定数の決定)
- 信号に感度のある観測量のチェック

Working SUSY Model

ATLAS SUSY解析の多くは、R-パリティ保存を仮定したMSSMフレームワークに基づいて行われている。

SUSY対称性の破れ：**mSUGRA**

ベンチマーク ポイント

| | m_0 (GeV) | $m_{1/2}$ (GeV) | A_0 (GeV) | $\tan\beta$ | μ | σ_{NLO} (pb) | $m_{\tilde{g}} / m_{\tilde{q}}$ (GeV) |
|------------|----------------|--------------------|----------------|-------------|-------|-------------------------------|--|
| SU4 | 200 | 160 | -400 | 10 | >0 | 60 | ~410-420 |

Tevatronによる制限の少し上。

以下では ≥ 2 jetsを要求する解析結果に焦点をあてる。

→ 1 jet + $E_{\text{T}}^{\text{miss}}$ チャンネル (3 pb⁻¹データを使ったKKグラビトンの探索)

14pSK02: 風間慎吾 (東京大)

LHC-ATLAS実験を用いたmono-jet事象の探索

SUSY探索 : Jets + E_T^{miss} (No Lepton)

≥ 2 jets + E_T^{miss} チャンネル

- $p_T^{\text{jet}1(2)} > 70(30)$ GeV
- $|\eta^{\text{jet}1,2}| < 2.5$

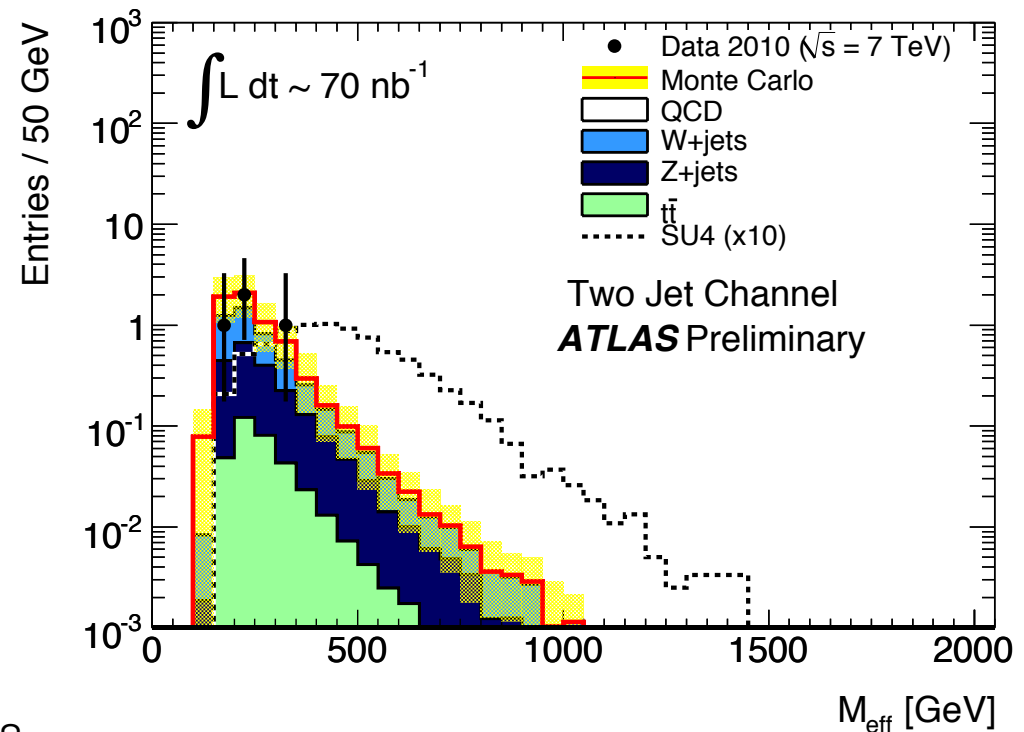
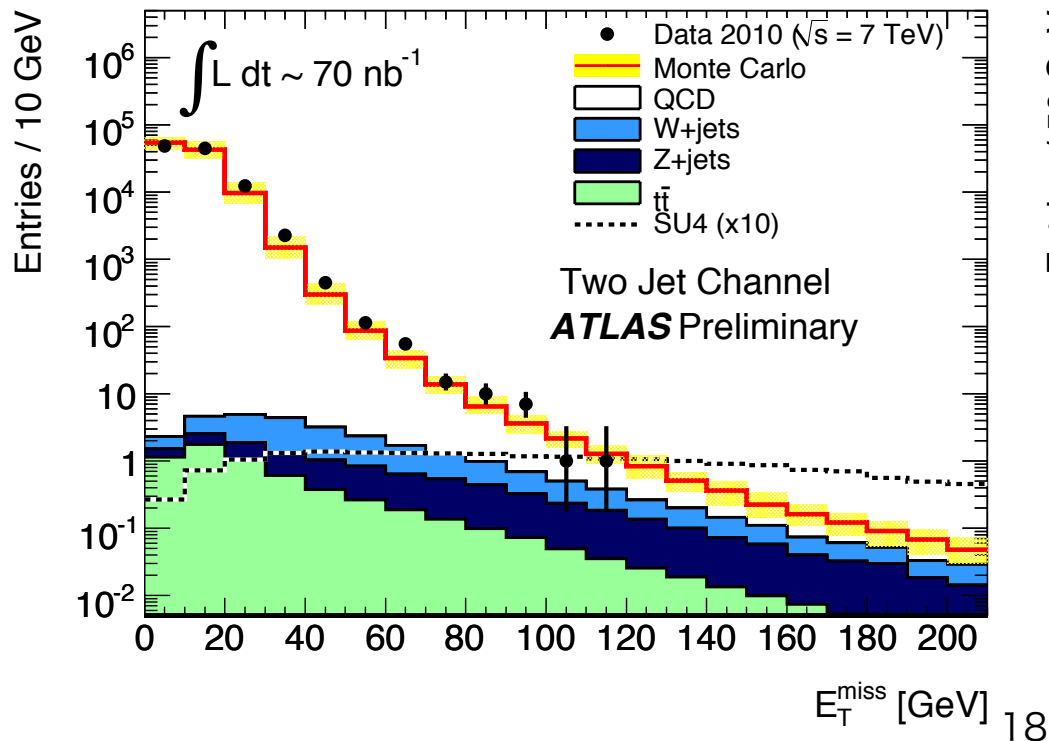
→ QCD background (LO PYTHIA)
normalized to the data
(scale factor = 0.61)

Signal selection cuts:

- $E_T^{\text{miss}} > 40$ GeV
- $\Delta\phi(\text{jet}_{1,2}, E_T^{\text{miss}}) > 0.2$
- $E_T^{\text{miss}}/M_{\text{eff}} > 0.3$

→ データ : 4 イベント

BG : 6.6 ± 3 イベント



SUSY探索 : Jets + E_T^{miss} (No Lepton)

≥ 3 jets + E_T^{miss} チャンネル

- $p_{T^{\text{jet}1(2,3)}} > 70(30)$ GeV
- $|\eta^{\text{jet}1,2,3}| < 2.5$

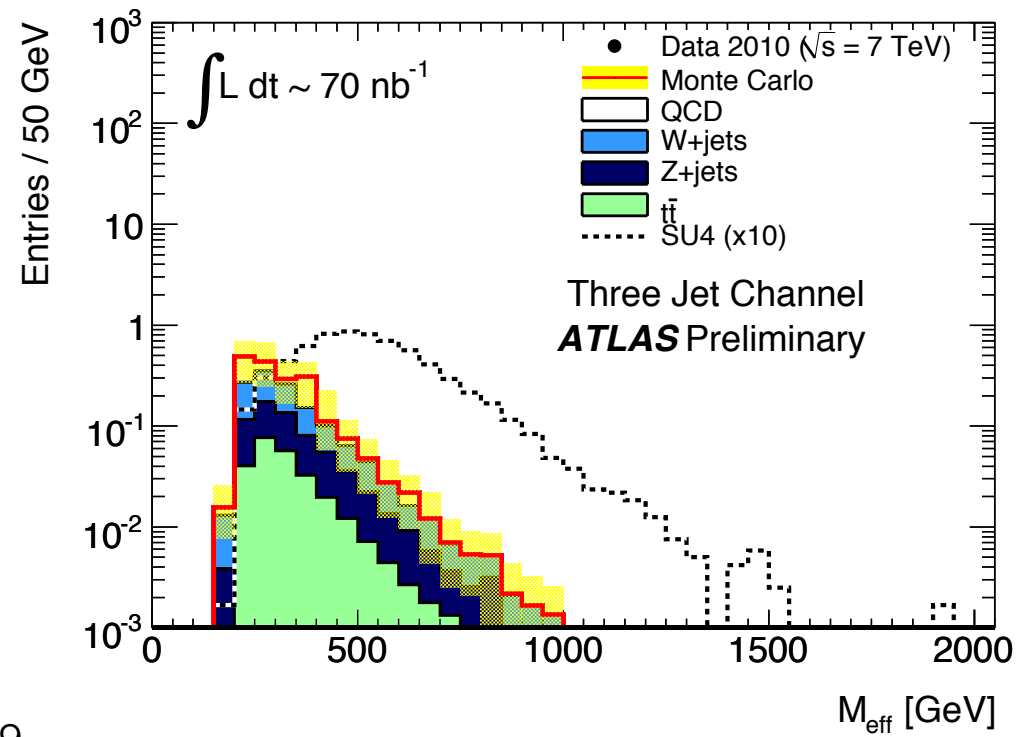
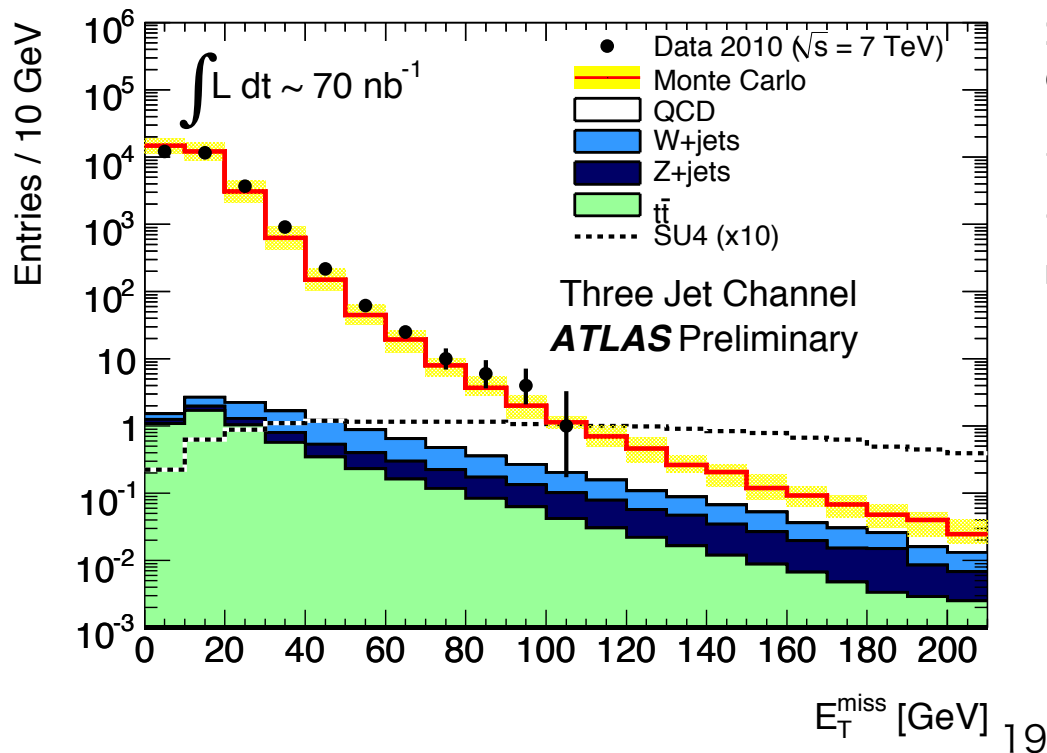
→ QCD scale factor in ≥ 2 jets channel used

Signal selection cuts:

- $E_T^{\text{miss}} > 40$ GeV
- $\Delta\phi(\text{jet}_{1,2,3}, E_T^{\text{miss}}) > 0.2$
- $E_T^{\text{miss}}/M_{\text{eff}} > 0.25$

→ データ : 0 イベント

BG : 1.9 ± 0.9 イベント



SUSY探索 : Jets + E_T^{miss} (No Lepton)

≥ 4 jets + E_T^{miss} チャンネル

- $p_{T^{\text{jet}1(2,3,4)}} > 70(30)$ GeV
- $|\eta^{\text{jet}1,2,3,4}| < 2.5$

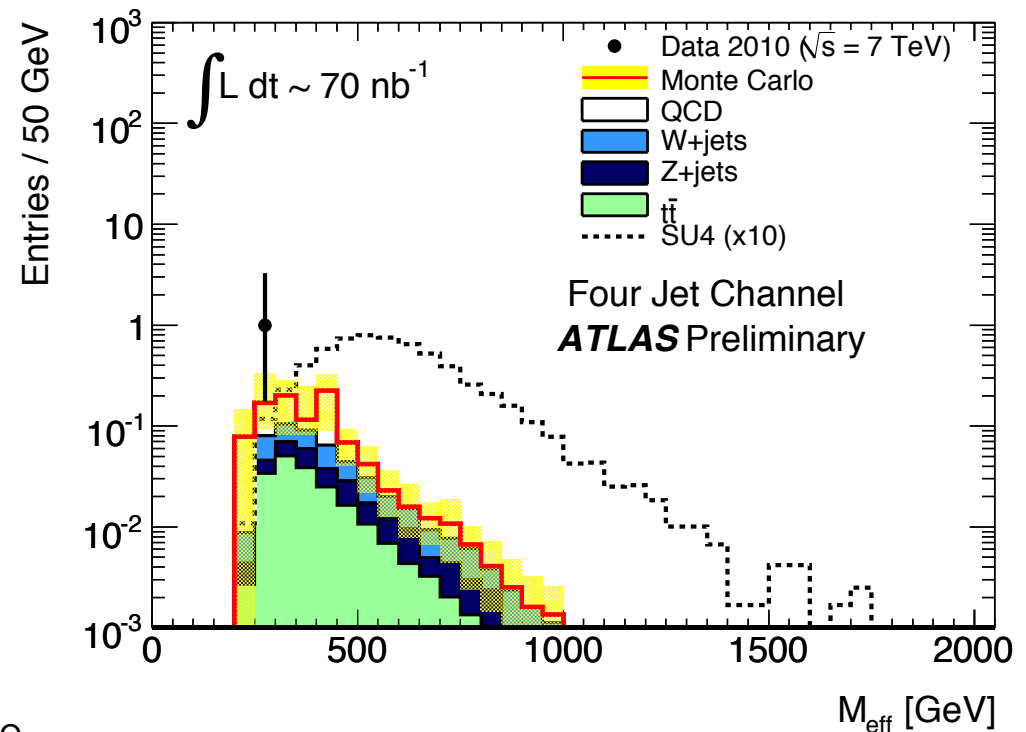
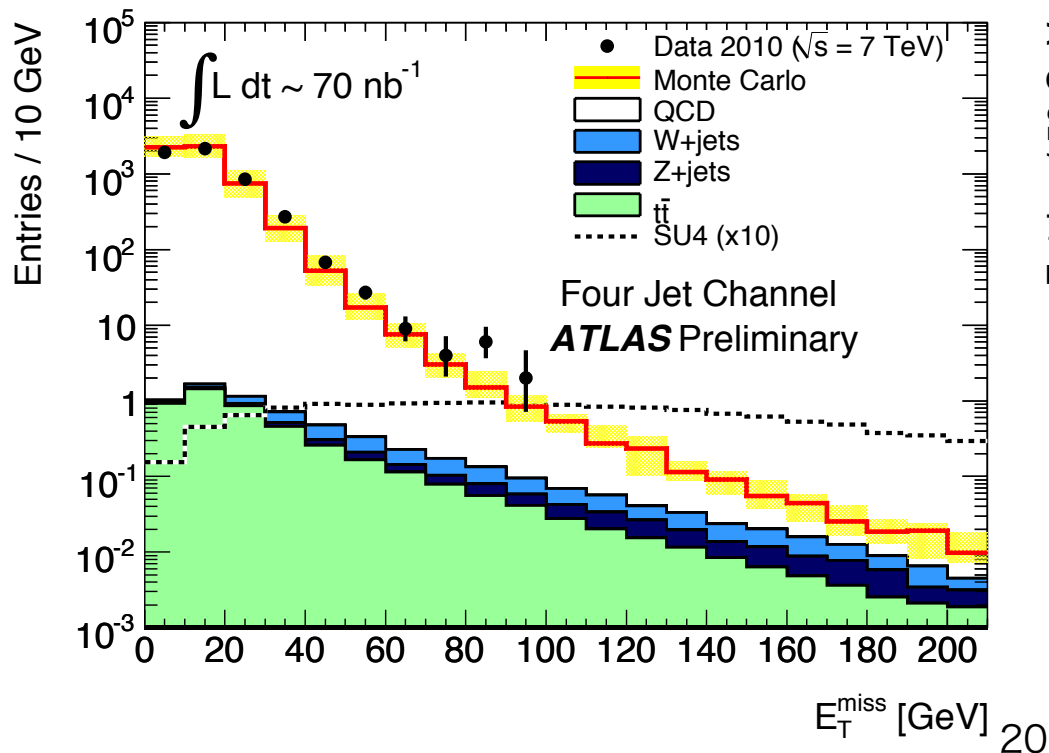
→ QCD scale factor in ≥ 2 jets channel used

Signal selection cuts:

- $E_T^{\text{miss}} > 40$ GeV
- $\Delta\phi(\text{jet}_{1,2,3}, E_T^{\text{miss}}) > 0.2$
- $E_T^{\text{miss}}/M_{\text{eff}} > 0.2$

→ データ : 1 イベント

BG : 1.0 ± 0.6 イベント



SUSY探索 : Jets + E_T^{miss} + Lepton

≥ 2 jets + E_T^{miss} + 1 lepton チャンネル

- $p_T^{\text{lepton}} > 20$ GeV
- $p_T^{\text{jet}} > 30$ GeV

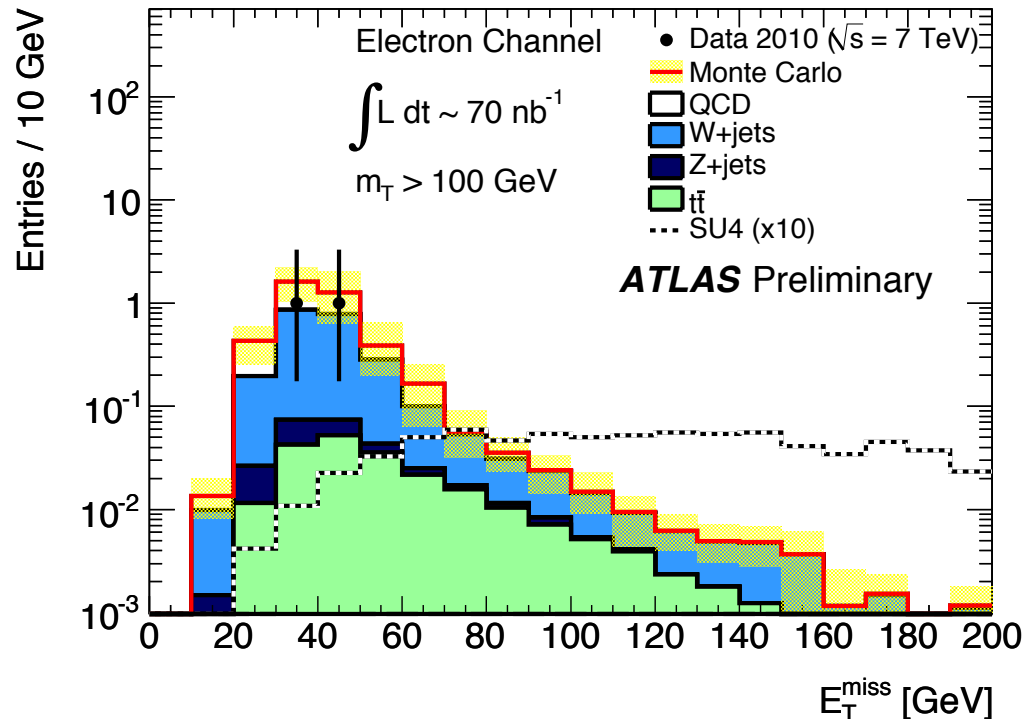
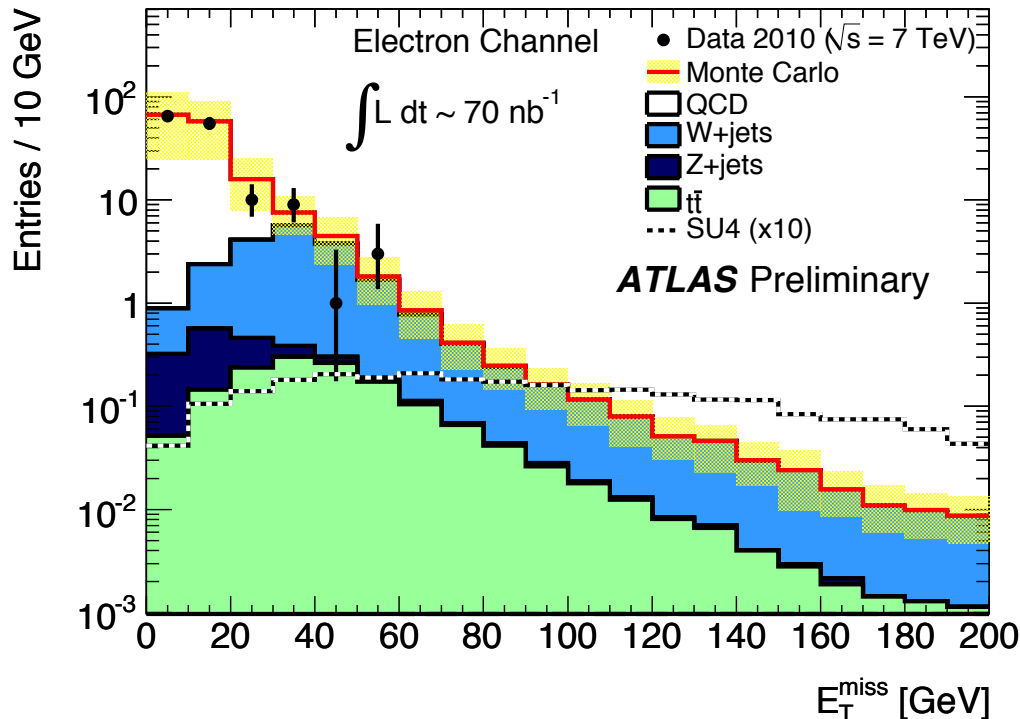
→ QCD (W+jets) background normalized to the data with $m_T < 40$ GeV, $E_T^{\text{miss}} < 40$ GeV ($40 < m_T < 80$ GeV, $30 < E_T^{\text{miss}} < 50$ GeV)

Signal selection cuts:

- $m_T > 100$ GeV
- $E_T^{\text{miss}} > 30$ GeV

Electron(Muon) チャンネル :

- ▶ データ : 2(1) イベント
- ▶ BG : 3.6 ± 1.6 (2.8 ± 1.2) イベント



3 pb⁻¹ データ
を使った解析

14aSL09: 佐々木雄一 (東京大)

ATLAS検出器を用いた1Leptonモードにおける超対称性粒子探索

SUSY探索 : b-Jets + E_T^{miss} (No Lepton)

≥ 2 jets + E_T^{miss} + ≥ 1 b-tag チャンネル

- $p_{T^{\text{jet}}1(2)} > 70(30)$ GeV
- No lepton with $p_{T^{\text{lepton}}} > 10$ GeV
- $E_T^{\text{miss}}/\sqrt{\Sigma E_T} > 2 \sqrt{\text{GeV}}$
- ≥ 1 jets with $L/\sigma(L) > 6$ ($\epsilon_{\text{b-tag}} \sim 50\%$)

SU4

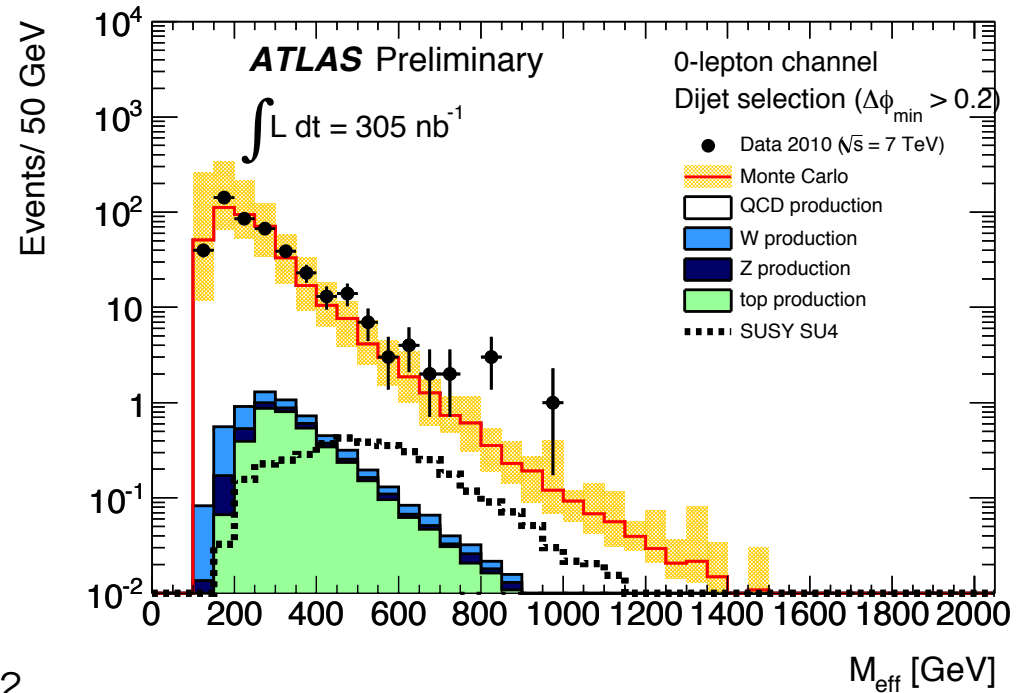
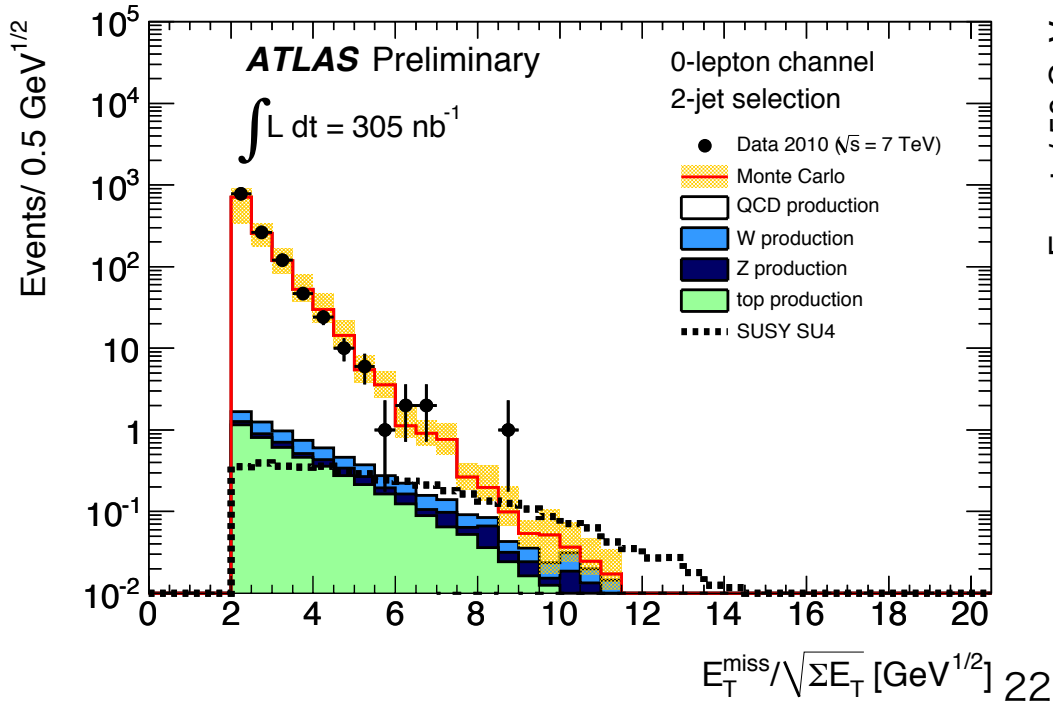
- $m(\tilde{b}_1) = 361$ GeV
- $m(\tilde{t}_1) = 196$ GeV

Signal selection cuts:

- $\Delta\phi(\text{jet}_{1,2,3}, E_T^{\text{miss}}) > 0.2$

→ QCD background (LO PYTHIA)
normalized to the data with
 $E_T^{\text{miss}}/\sqrt{\Sigma E_T} < 2$ (scale factor = 0.61)

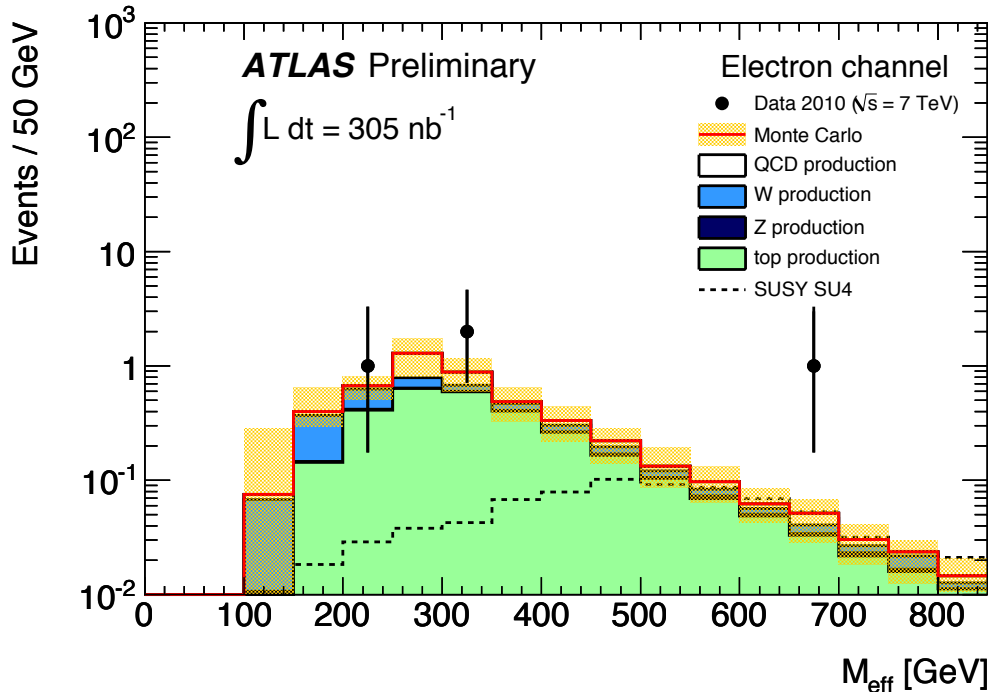
→ データ : 446 イベント
BG : 410^{+150}_{-180} イベント



≥ 2 jets + E_T^{miss} + ≥ 1 lepton + ≥ 1 b-tag チャンネル

- $p_T^{\text{lepton}} > 20$ GeV
- $p_T^{\text{jet}} > 30$ GeV
- $E_T^{\text{miss}}/\sqrt{\sum E_T} > 2 \sqrt{\text{GeV}}$
- ≥ 1 jets with $L/\sigma(L) > 6$

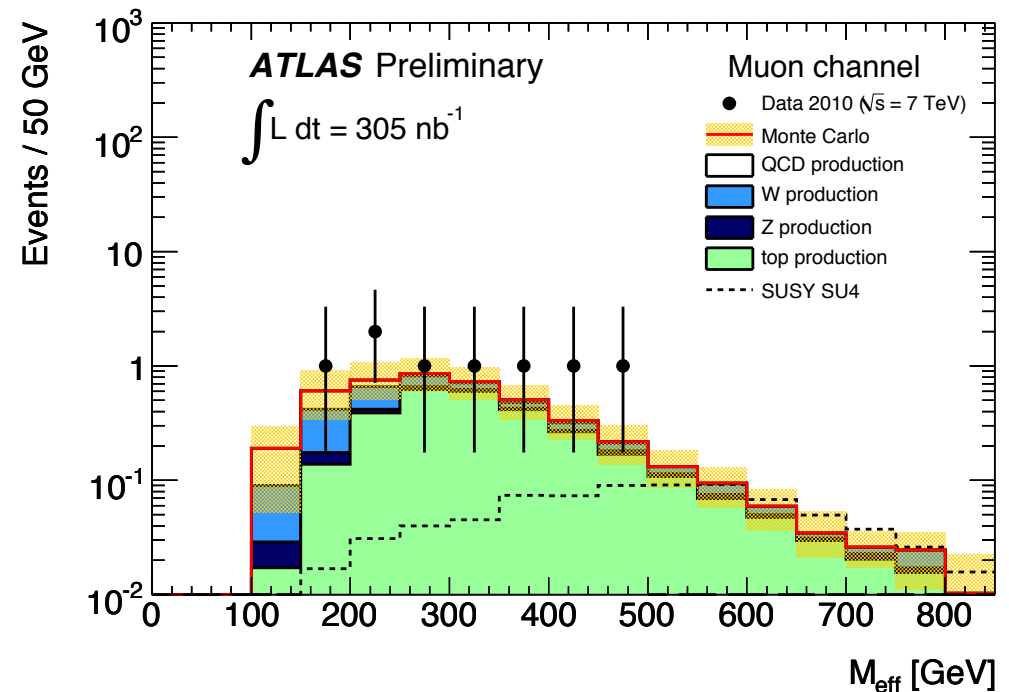
→ QCD background (LO PYTHIA)
normalized to the data with
 $m_T < 40$ GeV, $E_T^{\text{miss}}/\sqrt{\sum E_T} < 2$
(scale factor = 0.3-0.4)



SUSY探索 : b-Jets + E_T^{miss} + Lepton

Electron(Muon) チャンネル :

- ▶ データ : 4(8) イベント
- ▶ BG : $4.8_{-1.5}^{+1.7}$ ($4.7_{-1.5}^{+1.7}$) イベント
- ▶ SU4 : 0.81 ± 0.02 (0.80 ± 0.02) イベント



3 pb⁻¹データ
を使った解析

14aSL10: 山中隆志 (東京大)

LHC-ATLAS実験における第三世代粒子への崩壊を用いた超対称性粒子の探索

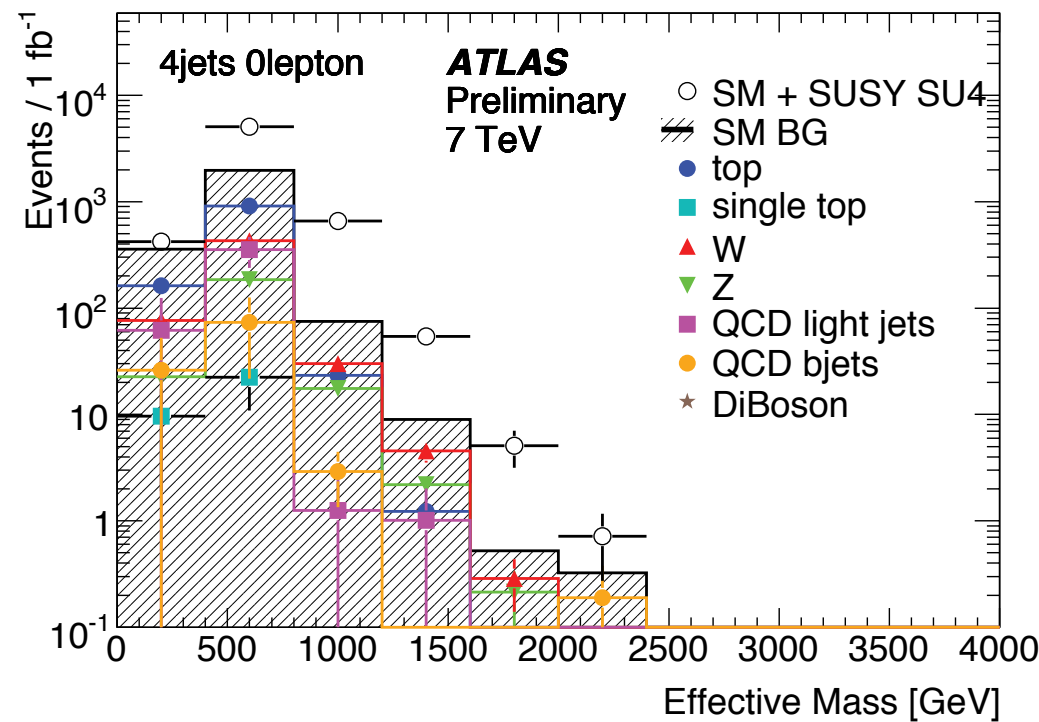
SUSY探索 : Prospects

≥ 4 jets + E_T^{miss} チャンネル

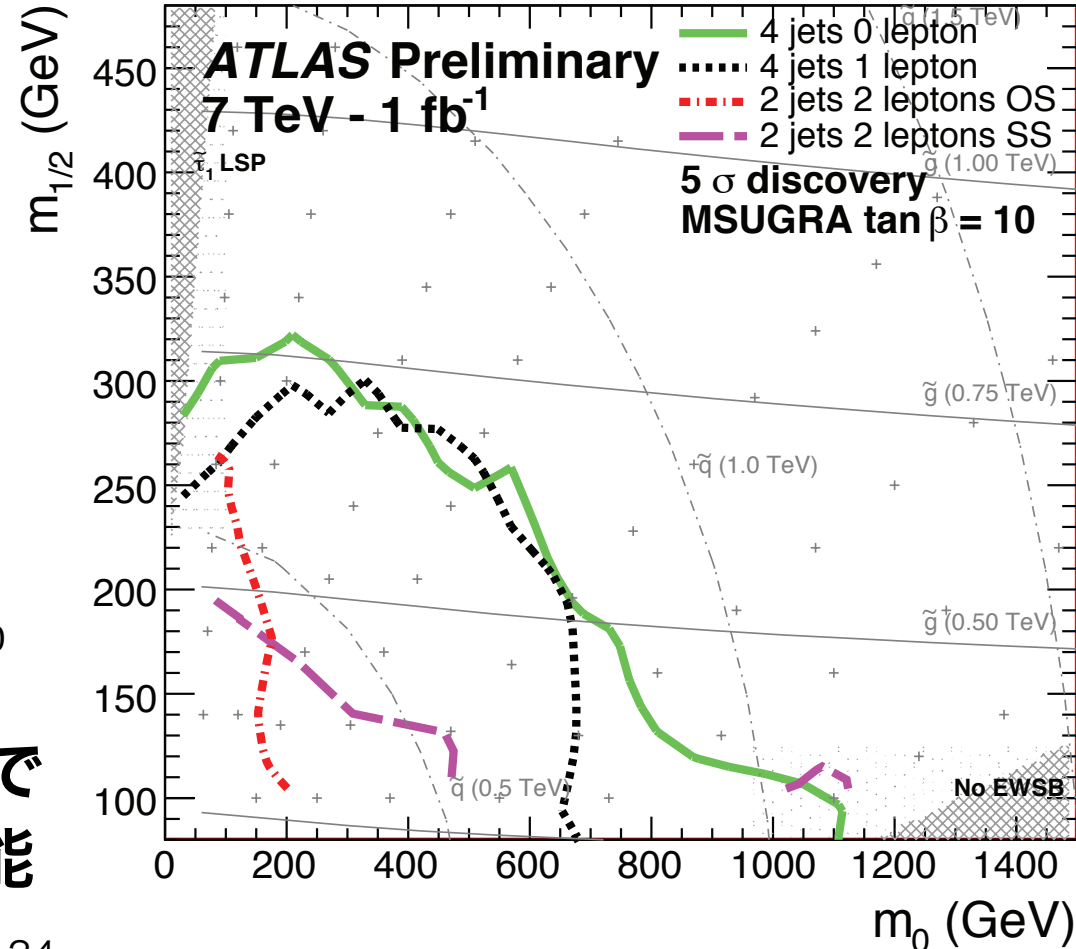
- 最も発見能力が高い。
- 主なバックグラウンド
tt対生成・SM W/Z+jets

5 σ 発見の可能性 (mSUGRA)

- 7 TeV, ルミノシティ 1 fb⁻¹
- M_{eff}カットを最適化
- バックグラウンドの不定性
~50% (1 fb⁻¹)



➡ 1 fb⁻¹で質量~700 GeVまでのsquark/gluino発見が可能



バルクRundall-Sundrum余剰次元モデル

- ▶ 全てのSM粒子が余剰次元バルクに飛ぶ。
- ▶ KK gluon⁽¹⁾ : spin 1, color-octet
- ▶ tt対に崩壊 (Br ~ 93%)
- ▶ 質量 1 (2) TeVのKK gluon⁽¹⁾
→ $\sigma_{\sqrt{s}=10\text{TeV}} \sim 4(0.14) \text{ pb}$

→ 高い p_T のトップクォーク

→ トップ崩壊生成物がoverlapする。

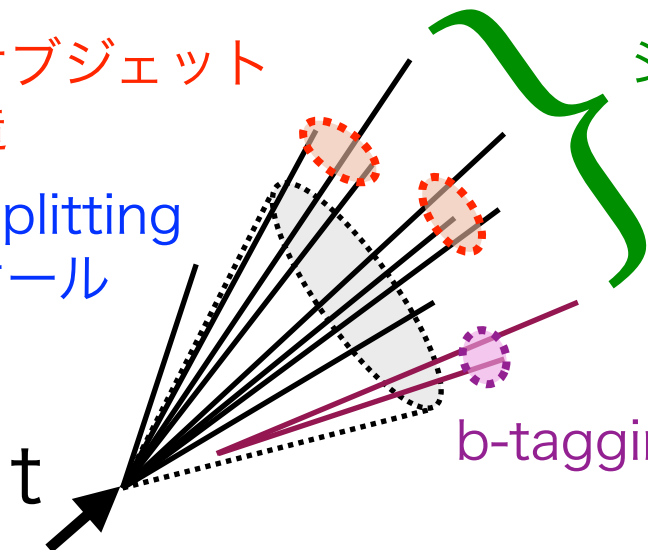
Hadronic トップの同定

3-サブジェット
構造

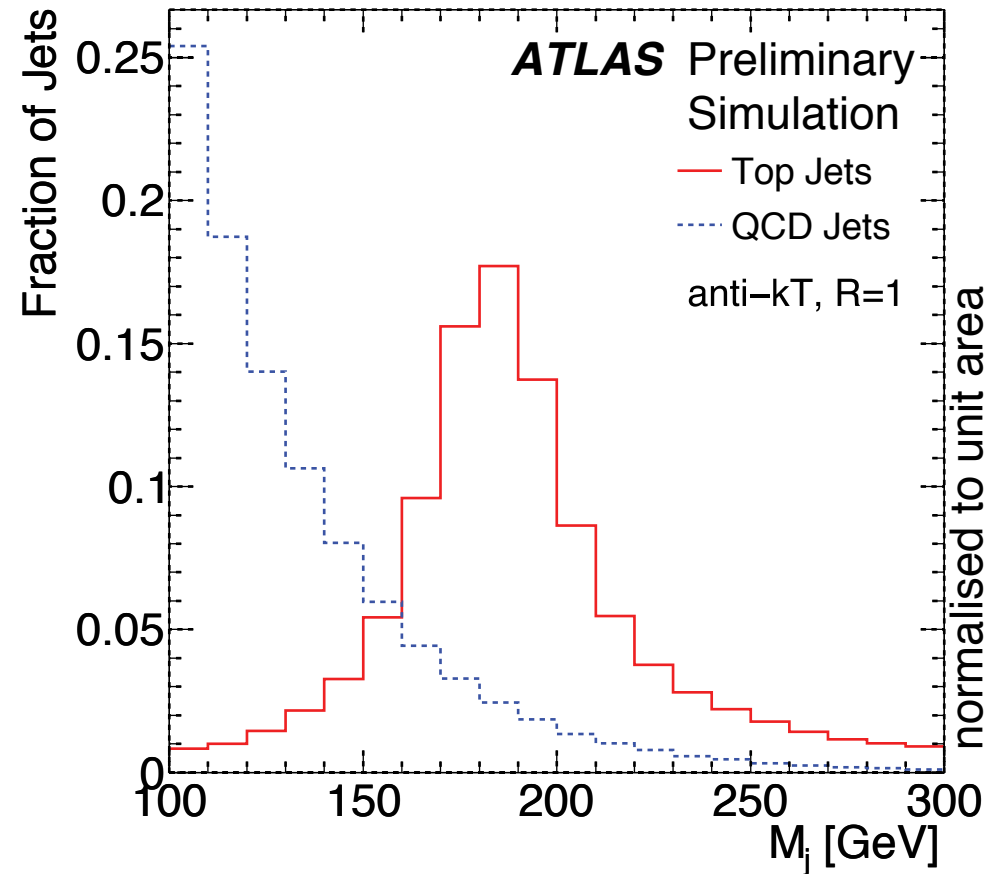
k_T splitting
スケール

ジェット質量

b-tagging



Boosted Top : Prospects (I)

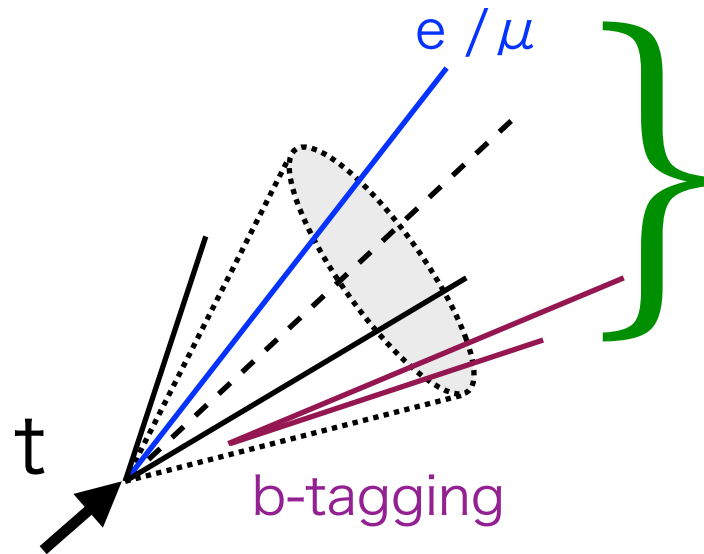


ジェット質量分布 ($Z' \rightarrow tt$, QCD)

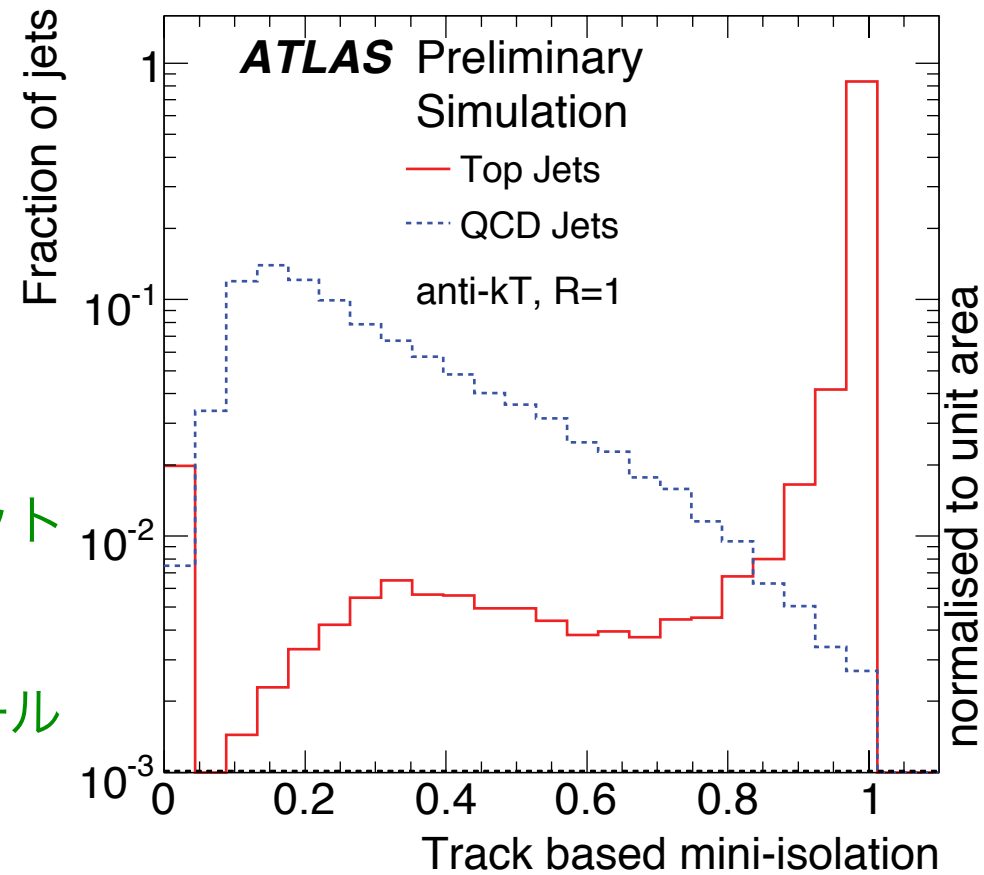
- Anti- k_T アルゴリズム ($R=1.0$)
- $p_T^{\text{jet}} > 200 \text{ GeV}$, $m^{\text{jet}} > 100 \text{ GeV}$

Boosted Top : Prospects (II)

Leptonic トップの同定



- レプトン/ジェット エネルギー比
- (近似) “ k_T splitting” スケール
- レプトン mini-isolation



レプトン mini-isolation 分布 ($Z' \rightarrow tt$, QCD)

- Mini Isolation = $p_T^{\text{lepton}} / \sum_{R < \Delta R} p_T^i$
- $\Delta R = 15 / p_T^{\text{lepton}} \text{ (GeV)}$
- $p_T^{\text{jet}} > 200 \text{ GeV}$, $m^{\text{jet}} > 100 \text{ GeV}$

▶ Hadronic/Leptonic トップの同定

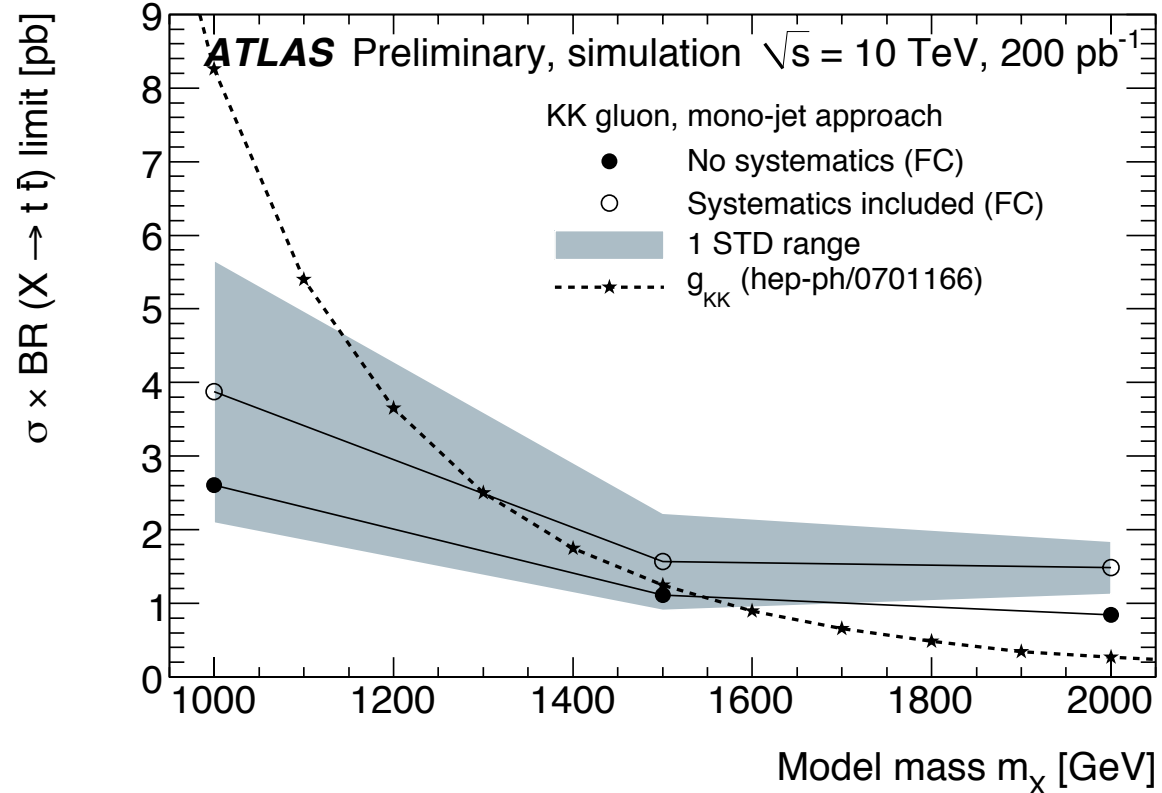
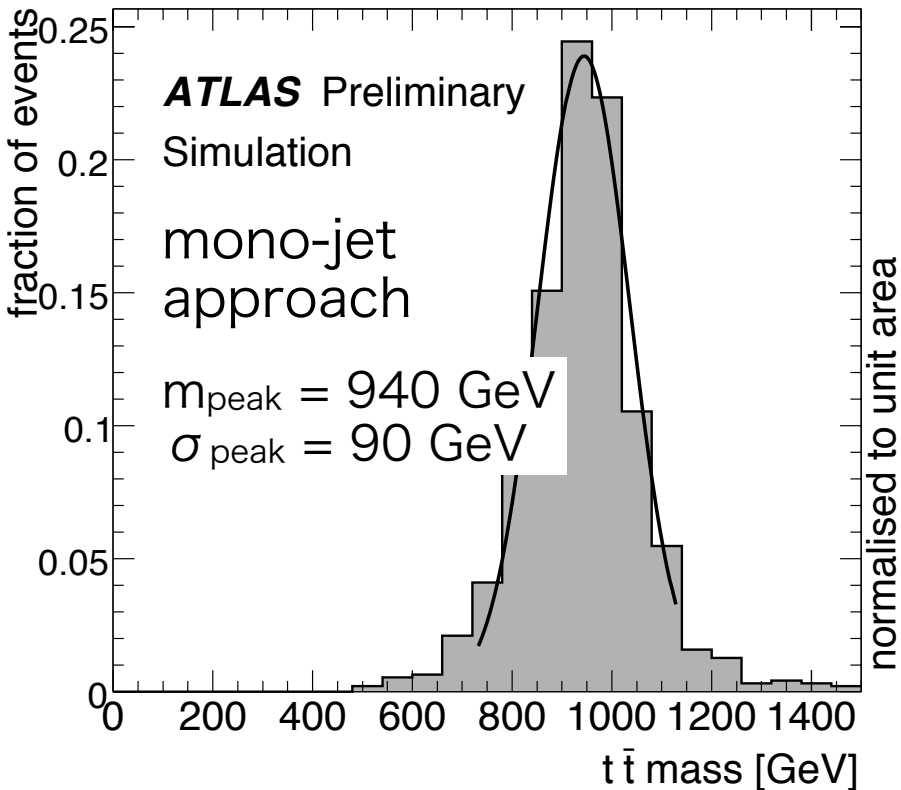
▶ tt 対質量の再構成

→ $X \rightarrow tt$ 状態の探索

Boosted Top : Prospects (III)

1 TeV Z' \rightarrow $t\bar{t}$ \rightarrow l+jets
e/ μ channel

$\sqrt{s}=10$ TeV



- ▶ KK gluon⁽¹⁾ : spin 1, color-octet
- ▶ $\Gamma/m \sim 15\%$

10 TeV, 200 pb^{-1} (7 TeV, 1 fb^{-1} に相当)

→ $M_{g(1)}=1$ TeVで $\sigma \cdot \text{Br}(g^{(1)} \rightarrow t\bar{t}) < 4 \text{ pb}$ (95% C.L.)程度の感度。

→ RS理論予想と同等。

まとめ

LHC・ATLAS実験では、今まで未踏の領域だったTeVスケールでの新粒子探索を行っている。

- ▶ Dijet Resonance : 0.3 pb^{-1} (今では半日分のデータ!) で最も厳しいExcited Quarkへの制限を得ることが出来た。

W' ・ Z' 、Black Hole、SUSYなどの重要なベンチマーク過程についても、実験探索が精力的に行われている。

- ▶ Jet・Electron・Muon・ E_T^{miss} ・Photon・b-taggingのパフォーマンスの(高い p_T 領域での)理解。
- ▶ 標準模型バックグラウンドを評価する手法の開発。
- ▶ すぐに現在の制限を越える感度に到達できると期待される。
 - SUSY SU4の除外? → Parallel Sessionへ!