

LHC-ATLAS実験における Universal Extra Dimension の探索

山口博史, ^A寺師弘二, ^A金谷奈央子, 浅井祥仁
東京大学大学院理学系研究科
^A素粒子物理国際研究センター

outline

1. Introduction
2. One lepton + ISR Jet 解析
3. Data と Monte carlo との比較
4. Systematic uncertainty と Observed limit
5. 2011年におけるDiscovery potential

introduction

✦ Universal Extra Dimensions (UED)

- $R^{-1} \sim \text{TeV}$ 程度にコンパクト化された余剰次元が存在
- 全ての標準模型粒子が、この余剰次元に伝搬できる

✦ Kaluza-Klein 粒子が存在

✦ 3つのパラメータで模型が決まる

- $1/R = \text{コンパクト化スケール}$
- $\Lambda = \text{カットオフパラメータ}$
- $m_H = \text{Higgs mass (=120 GeV)}$

✦ KK 粒子の質量は

$$m_n^2 = \frac{n^2}{R^2} + m_{SM}^2 \quad (n: \text{Excitation level})$$

✦ 標準模型粒子と同じ量子数を持つ

✦ Production : $g_1 g_1, g_1 q_1, q_1 q_1$ dominant

✦ Decay : cascade decays (SUSY と同じ)

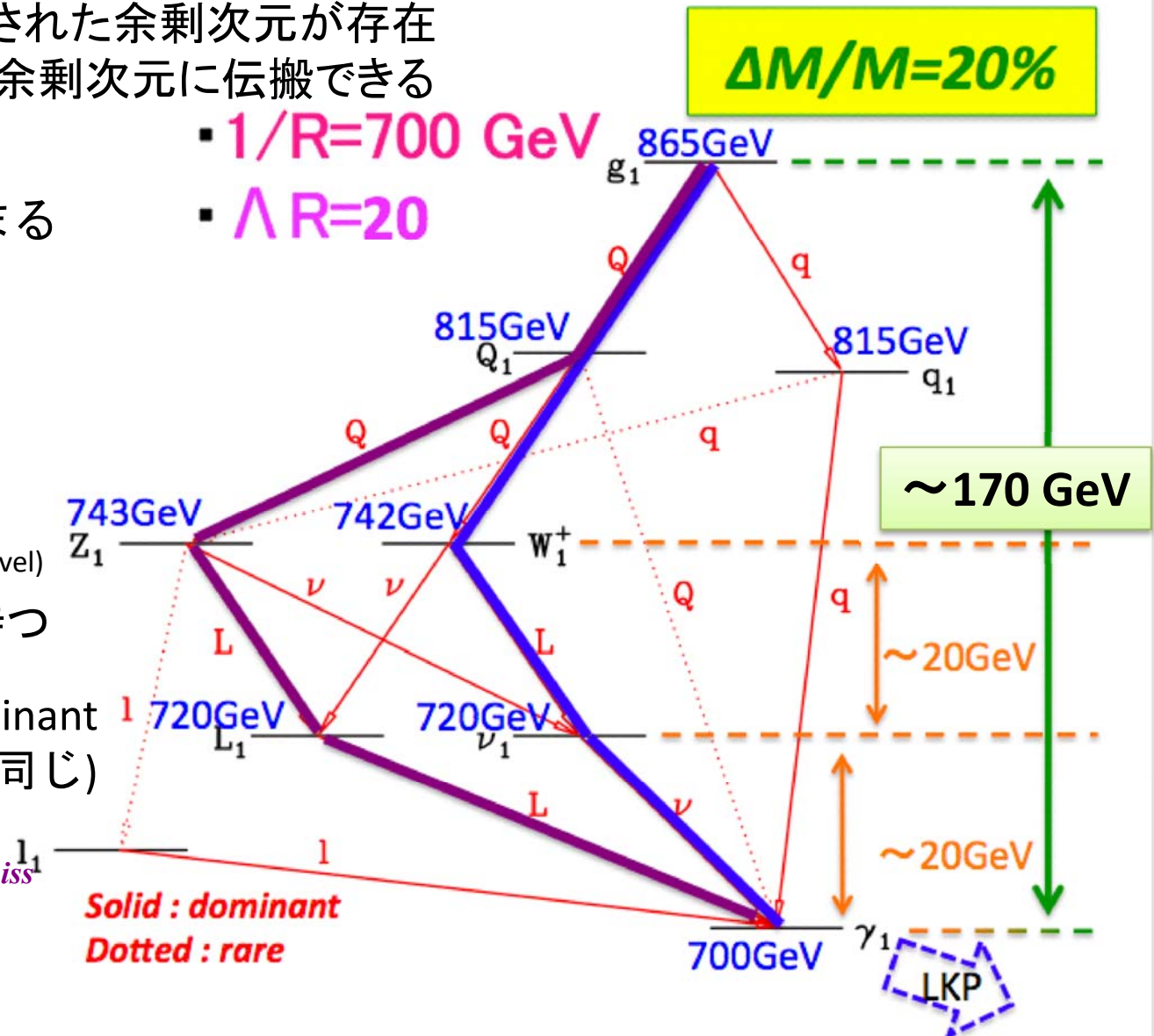
e.g, $g_1 \rightarrow jj + E_T^{\text{miss}}$

$l + jj + E_T^{\text{miss}}, ll + jj + E_T^{\text{miss}}$

解析チャンネル

One lepton + jets + E_T^{miss}

- $1/R = 700 \text{ GeV}$
- $\Lambda R = 20$



Data and Monte Carlo

Data

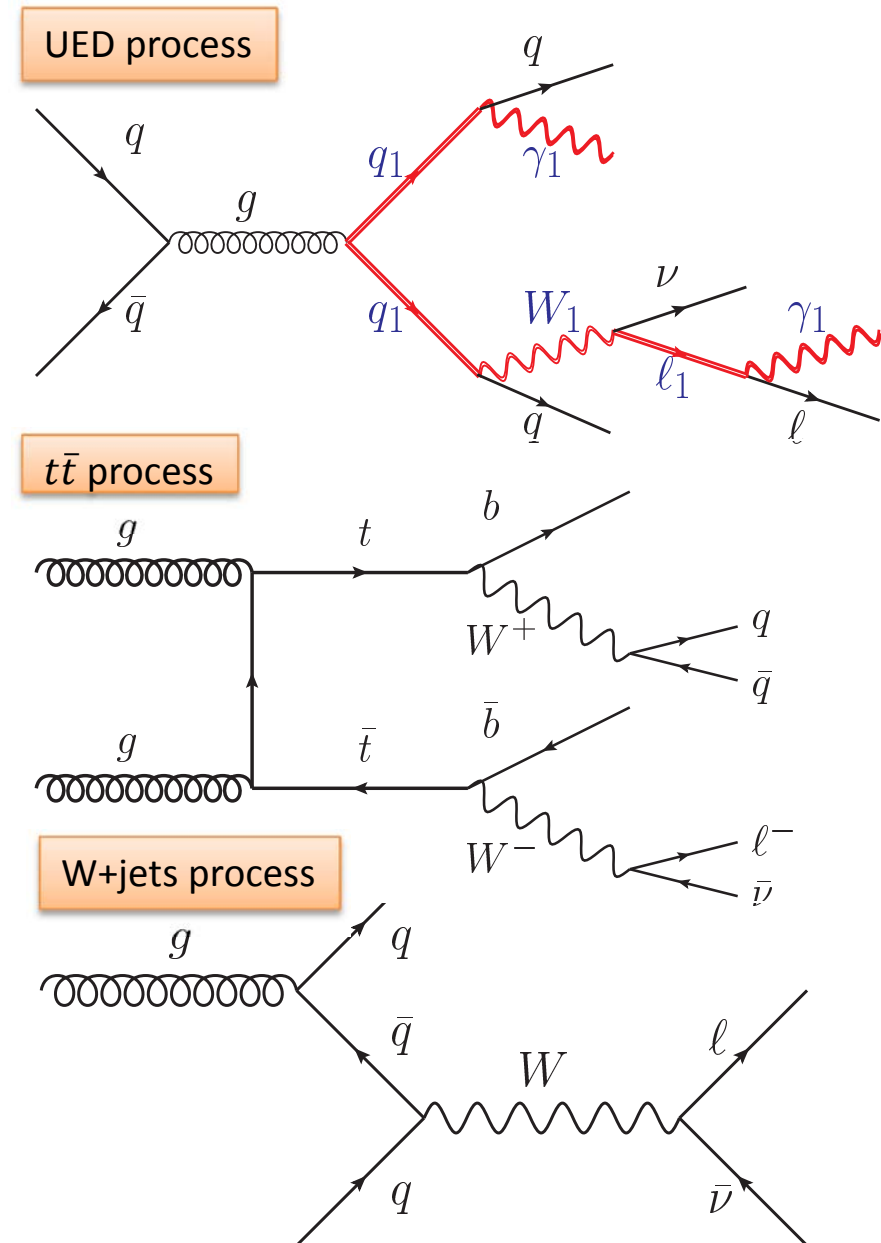
- $L=2.04 \text{ fb}^{-1}$ (2011年3月22日~8月22日)
- Trigger : leading jet $> 75 \text{ GeV}$
 $E_T^{\text{miss}} > 45 \text{ GeV}$

Signal samples

- Full Simulation (Herwig++)
 - $1/R = 300 - 850 \text{ GeV}$
 - $\Lambda R = 2 - 40$ ($dM/M = 5 - 25 \%$)

Background samples

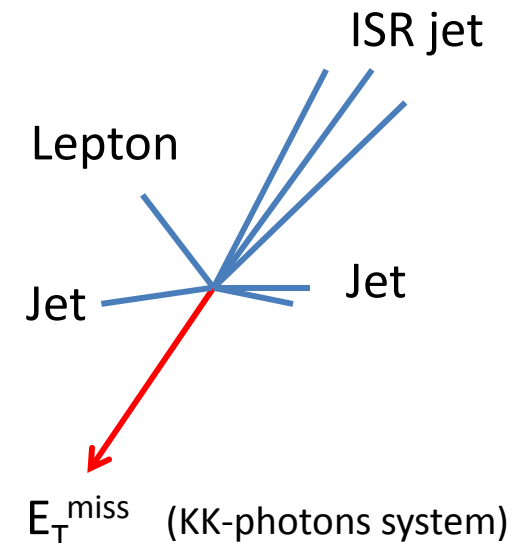
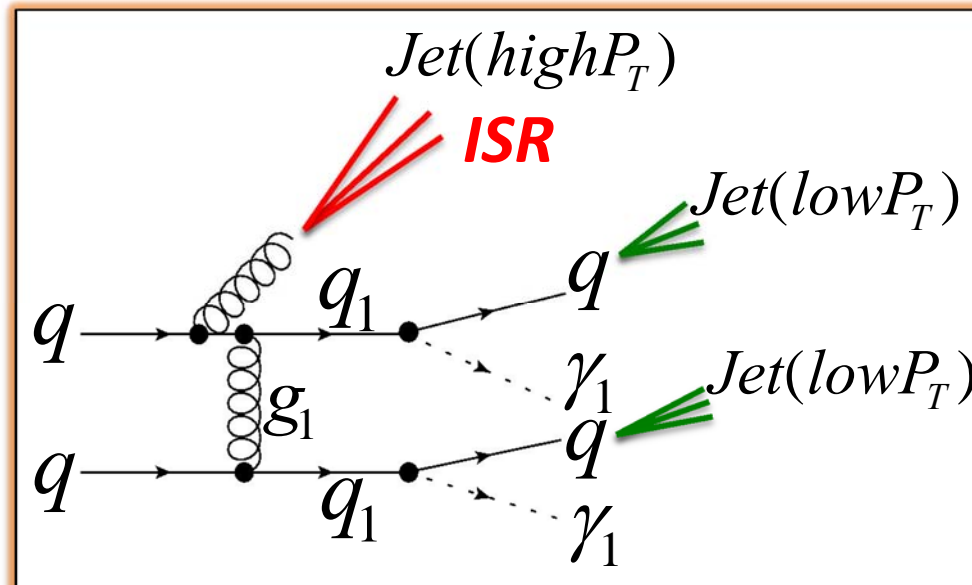
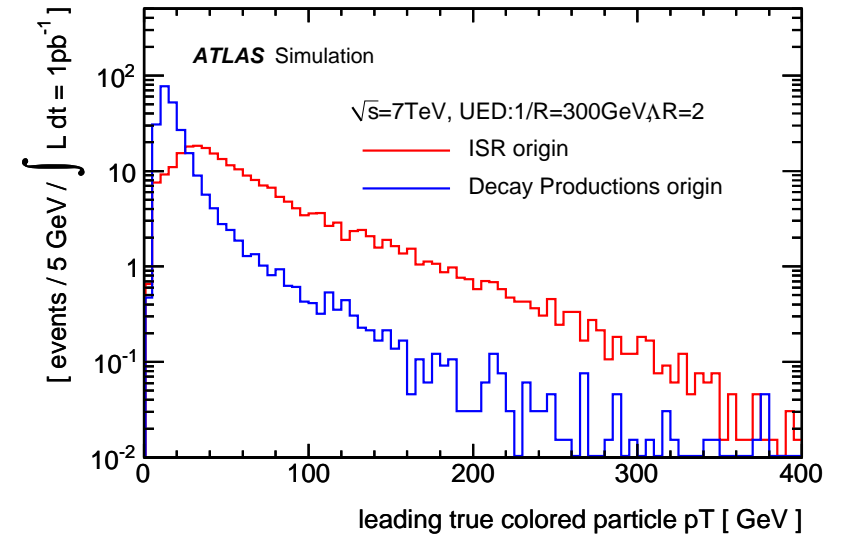
- W+jets (Alpgen/Jimmy) [$3.2 \times 10^4 \text{ pb}$]
- Z+jets (Alpgen/Jimmy) [$3.1 \times 10^3 \text{ pb}$]
- $t\bar{t}$ (McAtNlo) [$1.6 \times 10^2 \text{ pb}$]
- QCD (Pythia) [$1.1 \times 10^{10} \text{ pb}$]



解析手法1 (ISR-jet の利用)

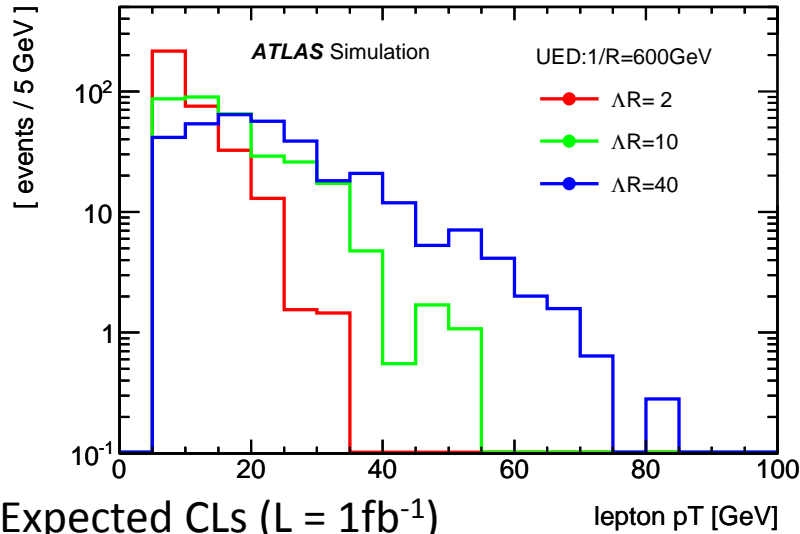
ISR (initial state radiation)

- ISR jet は、生成粒子の質量に応じて大きくなる。
- エネルギー・運動量保存則により、 E_T^{miss} と同等の ISR jet が back-to-back に放出される
- 縮退したモデルでは、Decay process からの jet は soft いため、ISR jet は leading jet になる。

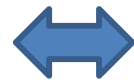


解析手法2 (soft lepton)

縮退したモデルでは、カスケード崩壊の際、エネルギー・運動量の小さい粒子が多く放出される



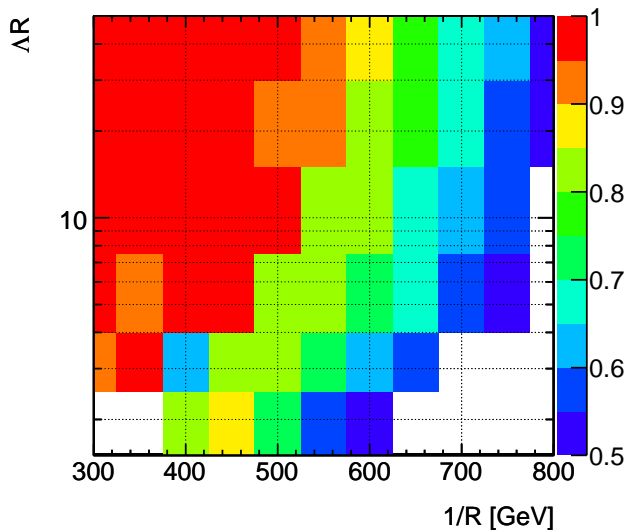
lepton pT threshold を下げる



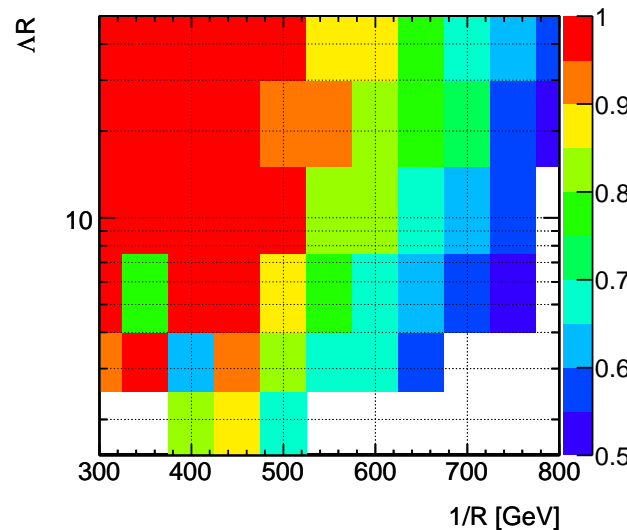
あまり下げても、他のカットで low pT lepton のイベントがカットされる (e.g. M_T cut)

Lepton (electron, muon) pT threshold を 10 GeV に設定

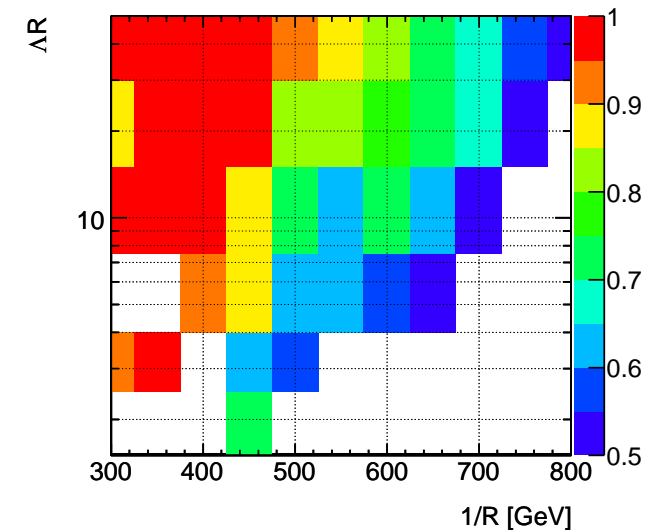
Lepton pT threshold 6 GeV



Lepton pT threshold 10 GeV



Lepton pT threshold 20 GeV



Selection criteria

Selection criteria

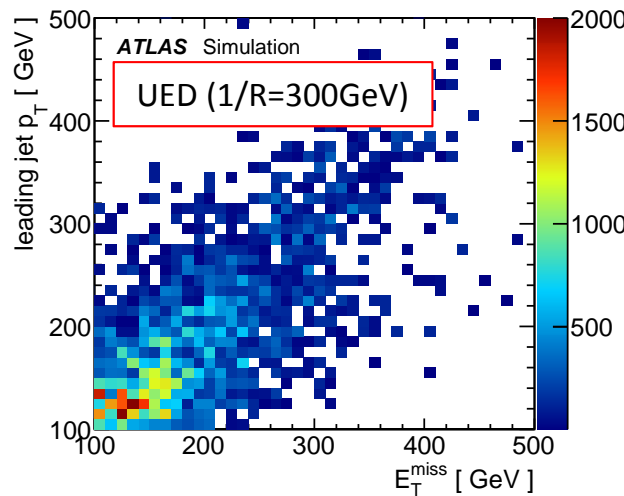
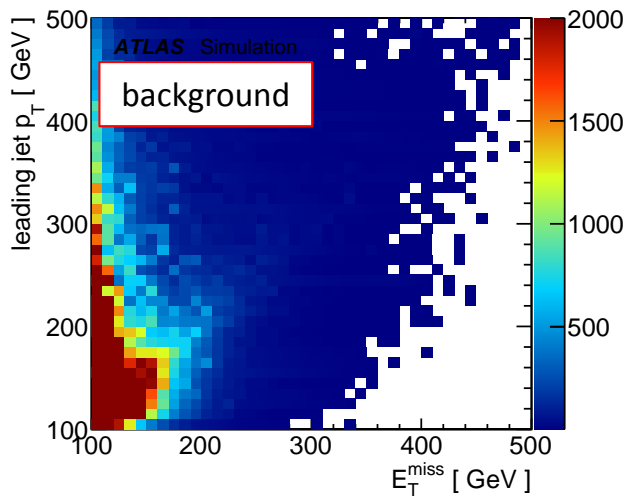
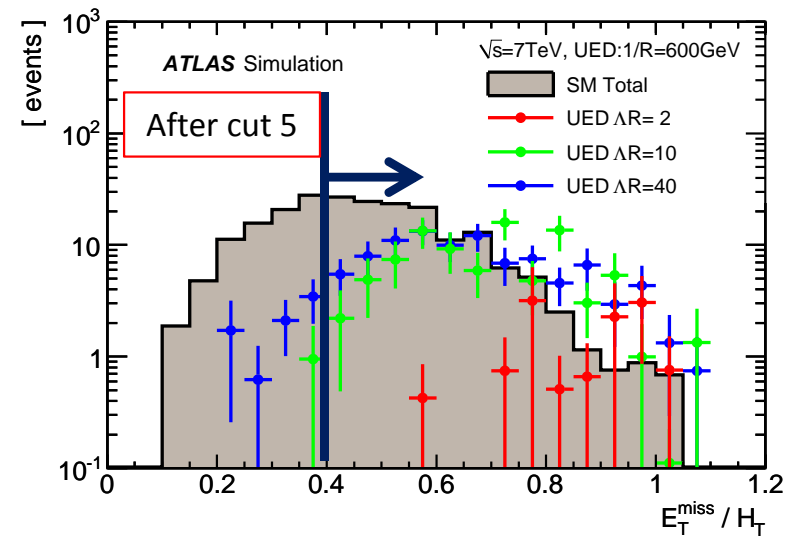
1. $E_T^{\text{miss}} > 130 \text{ GeV}$
2. $p_T^{\text{Jet1st}} > 130 \text{ GeV}$
3. $N_{\text{Lep}} == 1$ ($10 \text{ GeV} < p_T < 50 \text{ GeV}$)
4. $N_{\text{Jet}} \geq 3$ ($p_T > 30 \text{ GeV}$)
5. $M_T > 100 \text{ GeV}$
6. $E_T^{\text{miss}} / H_T > 0.4$
7. $(p_T^{\text{Jet1st}}, E_T^{\text{miss}}) > (200 \text{ GeV}, 200 \text{ GeV})$

$$M_T = \sqrt{2 \cdot E_T^{\text{miss}} \cdot p_T^{\text{lepton}} \cdot (1 - \cos \phi_{p_T^{\text{lepton}} - E_T^{\text{miss}}})}$$

$$H_T = \sum_{\text{selected jets}} |p_T| + \sum_{\text{selected leptons}} |p_T|$$

Number of events

H_T に寄与するのはほぼ leading jet (ISR)
 ■ H_T は E_T^{miss} 近い値になる(1 に近づく)



- Leading jet と E_T^{miss} のカットを強くしていくほど、S/N は良くなる
- Leading jet と E_T^{miss} を symmetric にカットする



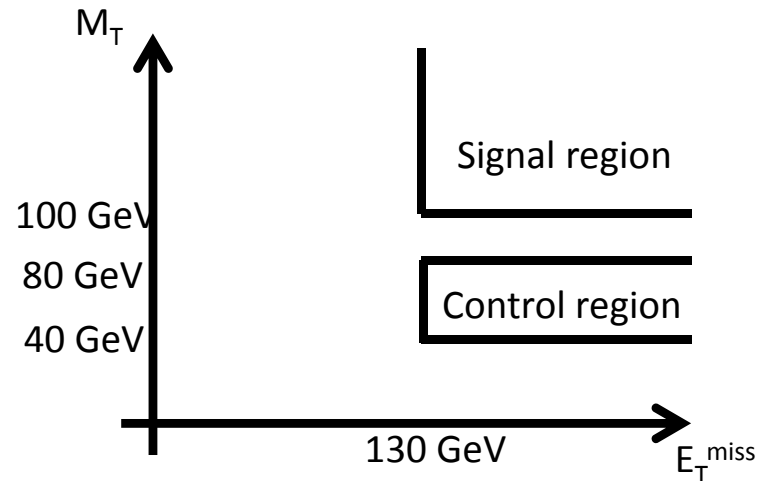
今回は

- $E_T^{\text{miss}} > 200 \text{ GeV}$
- $p_T^{\text{Jet1st}} > 200 \text{ GeV}$

W,Z+jet and top events normalization

Dominant background は W+jet, ttbar イベント

➡ MC の cross section は不定性があるので、Control region で、data と MC を比較して Normalize する



Control region

- ▶ #Lepton=1
- ▶ $E_T^{\text{miss}} > 130 \text{ GeV}$
- ▶ leading jet $p_T > 130 \text{ GeV}$
- ▶ $40 \text{ GeV} < M_T < 80 \text{ GeV}$

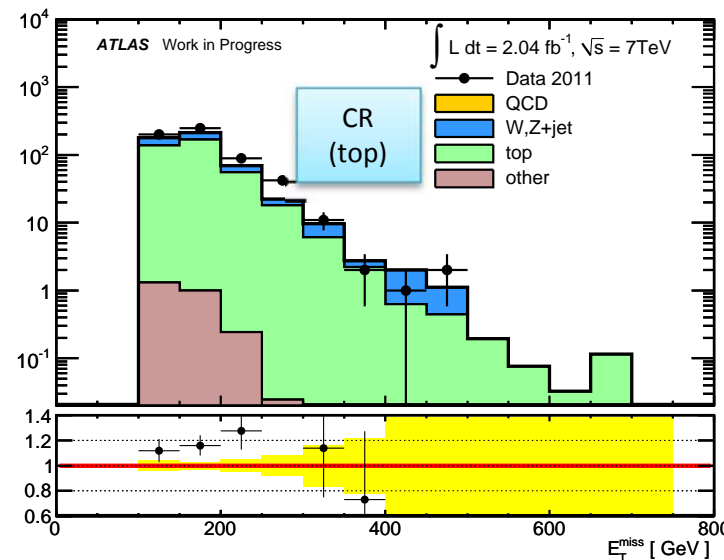
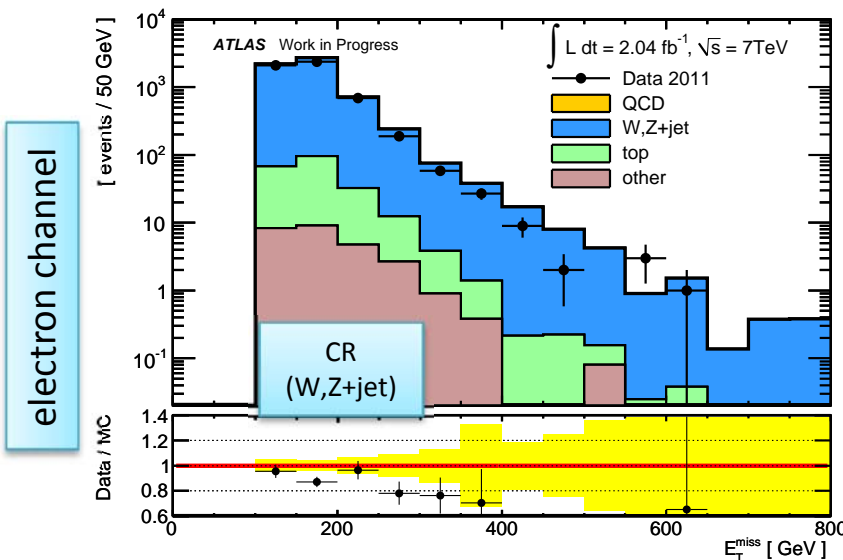
$$N_{data}^{CRt} = A_{top} N_{top}^{CRt} + B_W N_W^{CRt}$$

$$N_{data}^{CRW} = A_{top} N_{top}^{CRW} + B_W N_W^{CRW}$$

In addition

- ▶ ttbar : b-jet tag
- ▶ W+jet : b-veto

各々の Control region の MC のイベント数を定数倍して data と合わせる



Normalization factor

Electron channel

ttbar : 1.36 ± 0.09

W+jet : 0.97 ± 0.05

Muon channel

ttbar : 1.28 ± 0.10

W+jet : 0.90 ± 0.04

Distributions (electron, muon)

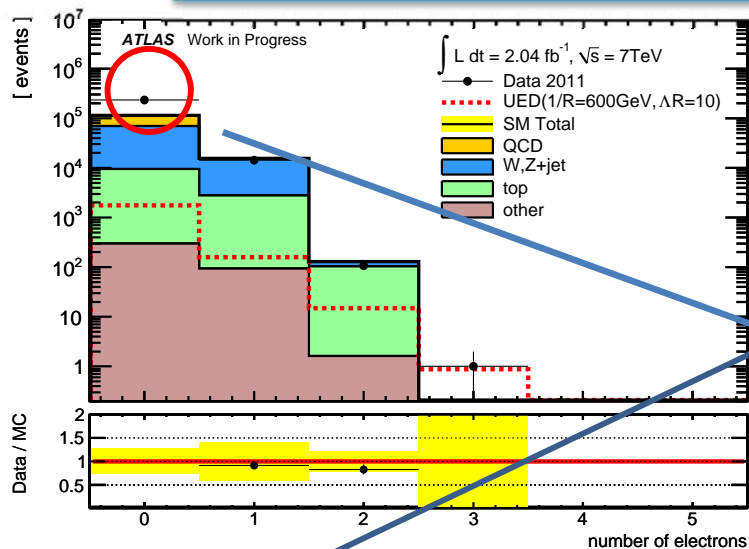
After cut 2

number of electrons and muons

3. $N^{\text{lep}} = 1$

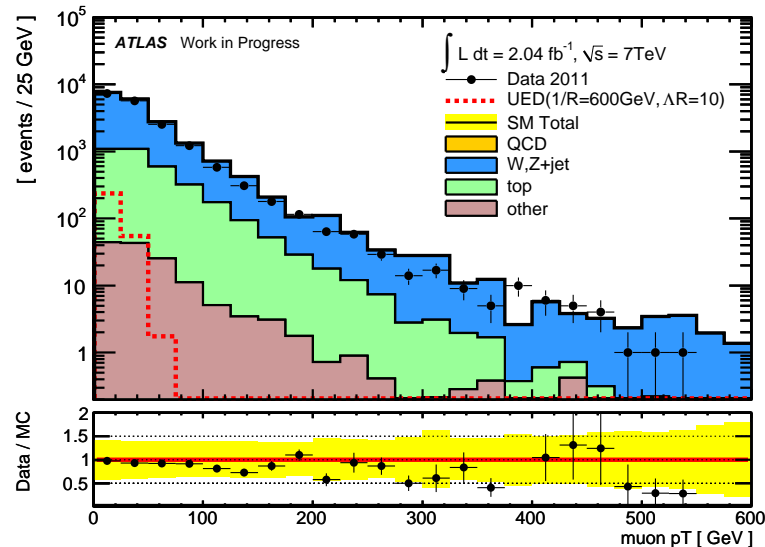
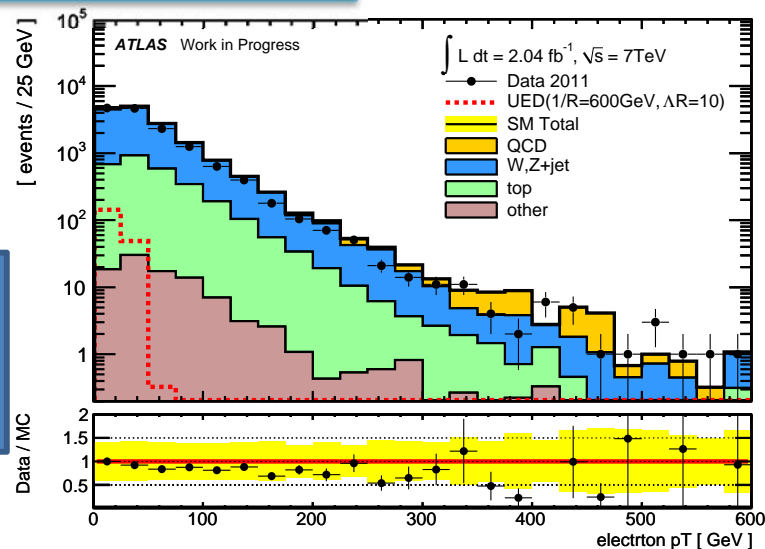
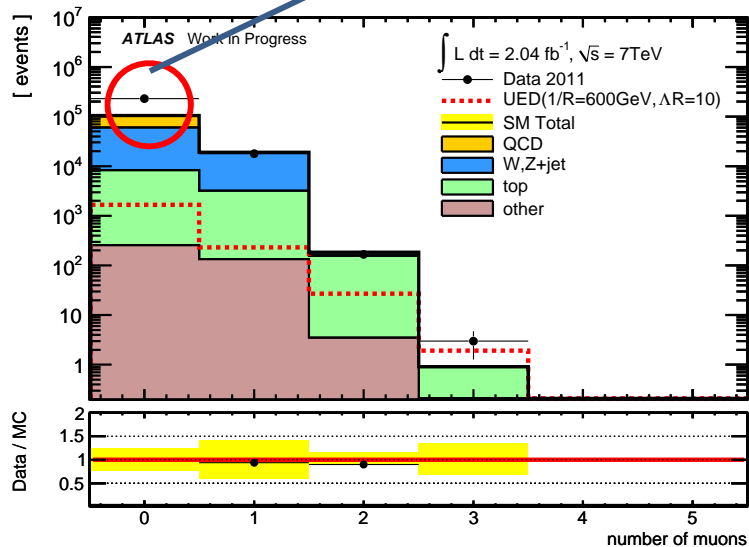
electron and muon pT 3. ($10 \text{ GeV} < p_T^{\text{lep}} < 50 \text{ GeV}$)

electron channel



Non collision の
イベントが MC
に入っていない

muon channel



Distributions (jets)

After cut 3

Leading jet p_T

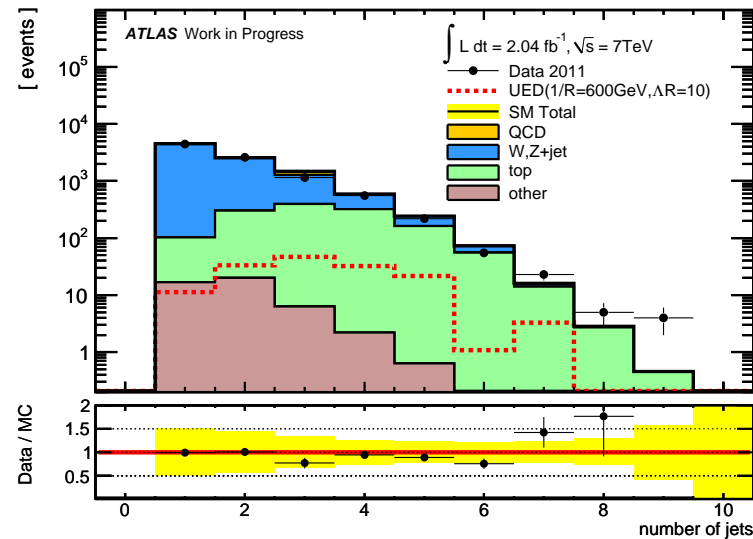
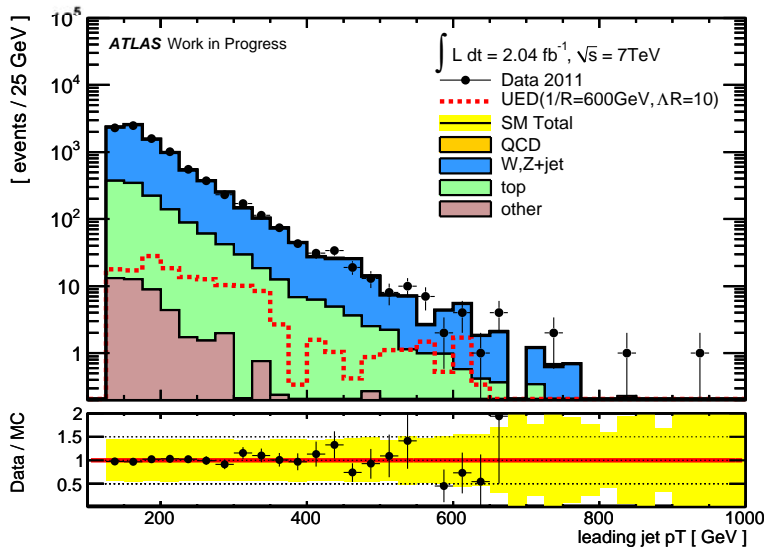
2. $p_{T}^{\text{Jet1st}} > 130 \text{ GeV}$

7. $(p_{T}^{\text{Jet1st}}, E_T^{\text{miss}}) > (200 \text{ GeV}, 200 \text{ GeV})$

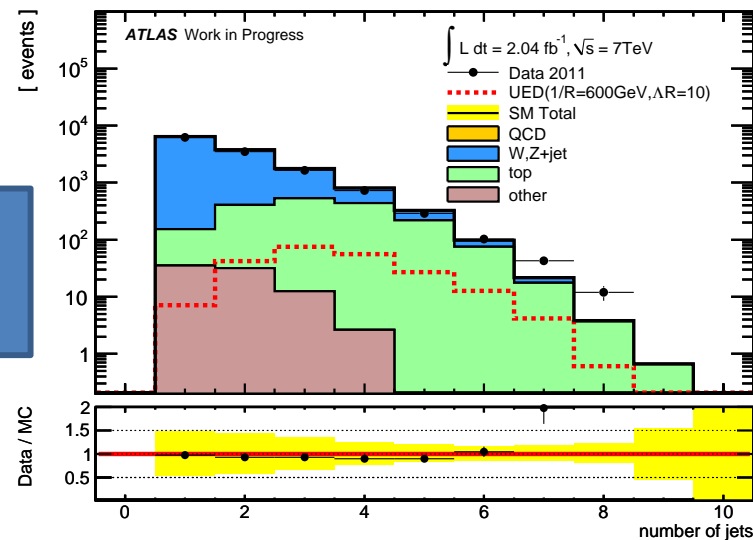
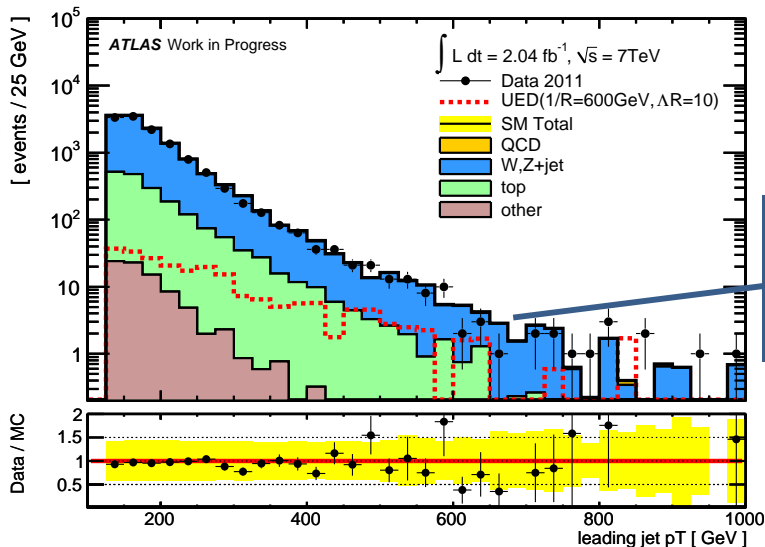
number of jets

4. $N_{\text{Jet}} \geq 3$

electron channel



muon channel



Signal は Background より hard な分布

Distributions (E_T^{miss} , M_T)

After cut 3

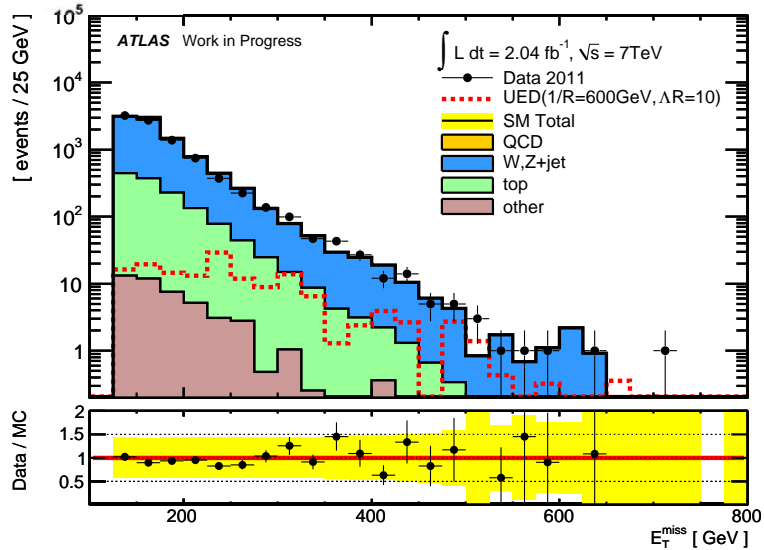
E_T^{miss}

- $E_T^{\text{miss}} > 130 \text{ GeV}$
- $(p_T^{\text{Jet1st}}, E_T^{\text{miss}}) > (200 \text{ GeV}, 200 \text{ GeV})$

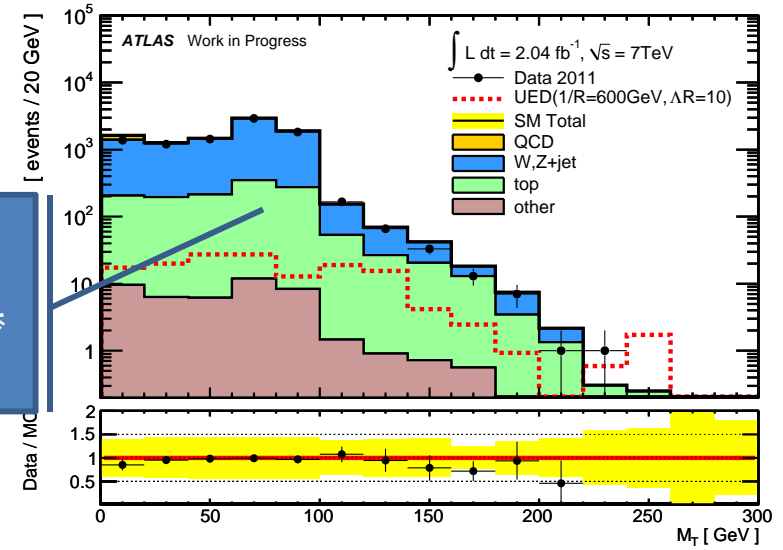
M_T

5. $M_T > 100 \text{ GeV}$

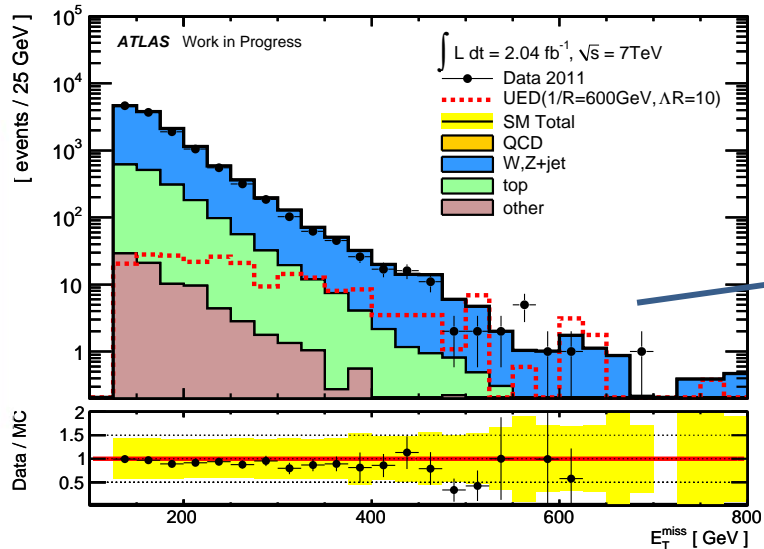
electron channel



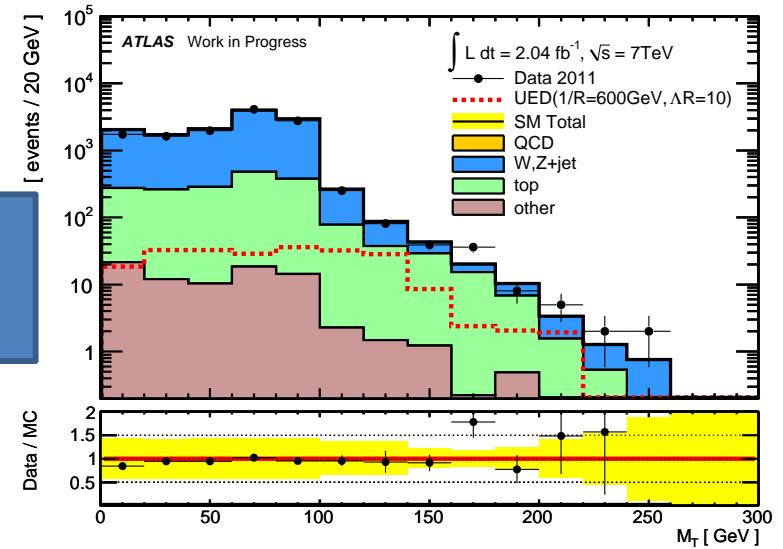
W起源の
Backgroundは
 $M_T > 100 \text{ GeV}$ で
落ちる



muon channel



Signalは
Backgroundより
hardな分布



Cutflow

electron channel

	Data	Total Background	QCD	W,Z+jet	Top	1/R = 600 GeV		
						$\Lambda R=2$	$\Lambda R=10$	$\Lambda R=40$
LepNo=1	9034	9423 ± 4000	257 ± 130	7853 ± 4000	1312 ± 300	83.6 ± 8.7	149 ± 10	151 ± 8
JetNo ≥ 3	2003	2400 ± 690	212 ± 120	1245 ± 640	943 ± 220	19.2 ± 4.2	105 ± 8	116 ± 7
MT >100GeV	106	108 ± 25	0.1 ± 0.1	36 ± 19	72 ± 17	4.5 ± 2.0	27.8 ± 4.3	39.6 ± 4.0
MET/HT >0.4	53	69 ± 16	0 ± 0	23 ± 12	46 ± 11	4.5 ± 2.0	26.8 ± 4.3	34.6 ± 3.7

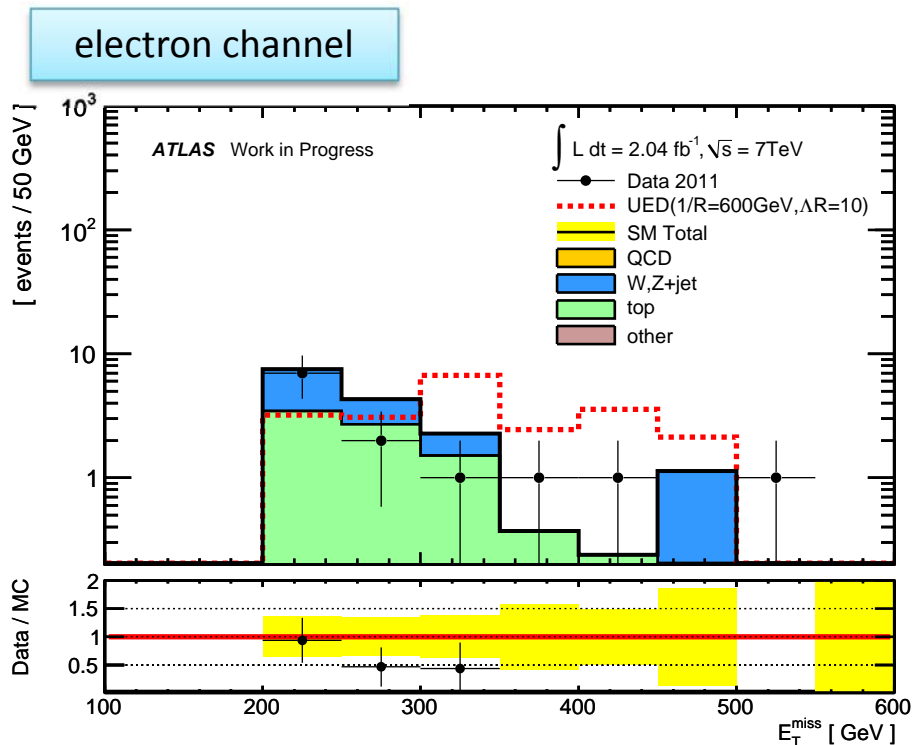
muon channel

LepNo=1	12587	13128 ± 5600	4.8 ± 2.5	11359 ± 5600	1764 ± 270	160 ± 12	224 ± 12	210 ± 9
JetNo ≥ 3	2816	3013 ± 890	2.5 ± 1.7	1740 ± 860	1271 ± 200	34.2 ± 5.6	175 ± 11	157 ± 8
MT >100GeV	162	147 ± 26	0.1 ± 0.0	43 ± 21	104 ± 16	7.2 ± 2.5	61.4 ± 6.5	63.0 ± 5.0
MET/HT >0.4	103	92 ± 16	0 ± 0	24 ± 12	69 ± 11	7.2 ± 2.5	58.4 ± 6.3	60.1 ± 4.9

Only statistics uncertainty

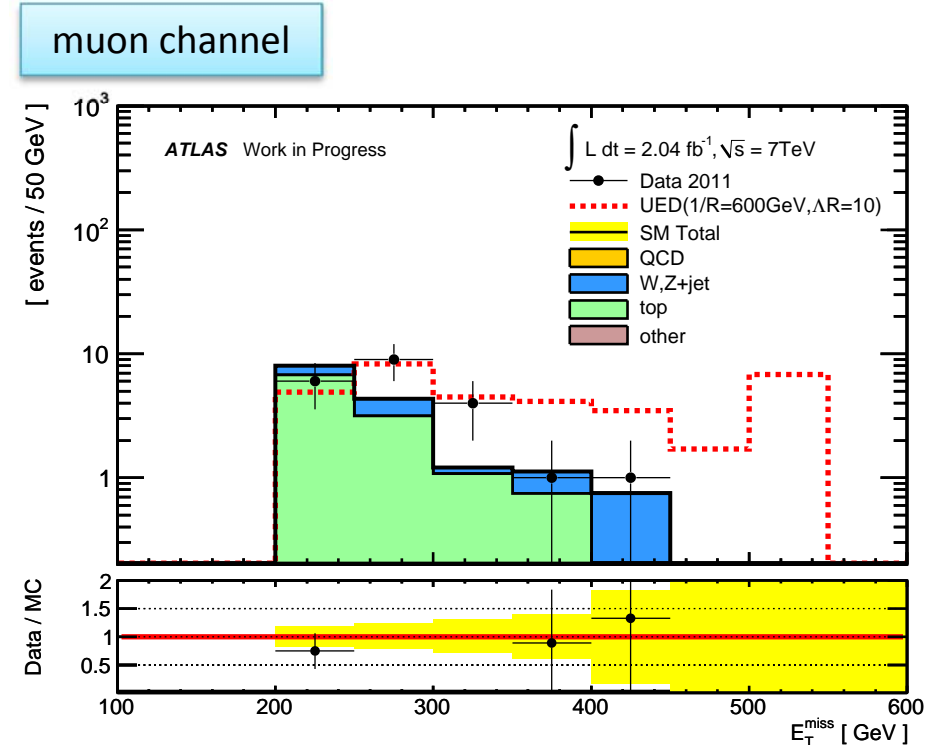
Signal region

- Data と Background は 統計の範囲内で consistent
- Signal region に残ったイベント数を用いて、UED 模型の exclusion upper limit を test hypothesis を用いて判断する



	Data	Total BG	QCD	top	W,Z+jet	UED
$p_T^{\text{Jet1st}}, E_T^{\text{miss}} > 200 \text{ GeV}$	13	15.8 ± 4.3	0 ± 0	8.4 ± 2.0	7.4 ± 3.8	21.4 ± 5.1

UED at 1/R = 600 GeV, $\Delta R = 10$



	Data	Total BG	QCD	top	W,Z+jet	UED
$p_T^{\text{Jet1st}}, E_T^{\text{miss}} > 200 \text{ GeV}$	21	16.0 ± 2.7	0 ± 0	11.9 ± 1.8	4.0 ± 2.0	37.4 ± 7.5

UED at 1/R = 600 GeV, $\Delta R = 10$

Systematic uncertainties

Background

	uncertainty
Normalization factor (including the JES and theory uncertainty)	W+jet : $\pm 17\%$ ttbar : $\pm 16\%$
Total	$\pm 24\%$

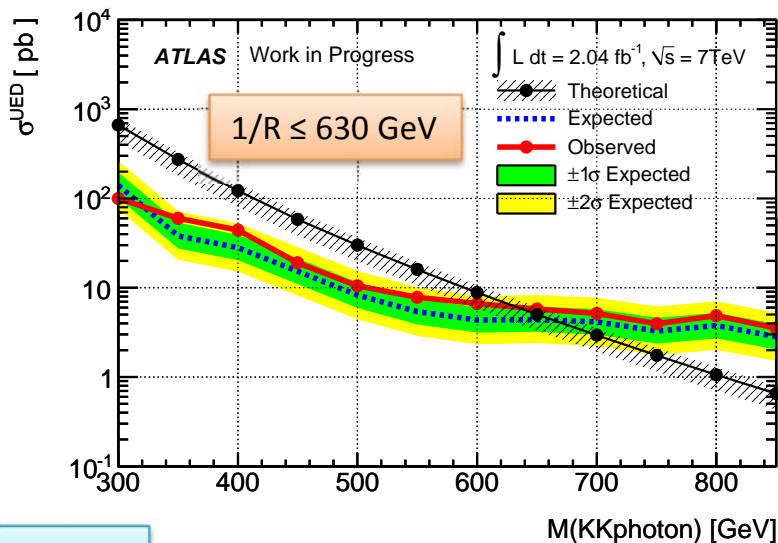
- Normalization factor の systematic は、JES や MC sample を変えた場合の CR と SR のイベント数の ratio の変化量を uncertainty として計上
- Signal の systematic は、各ポイントごとに算出
- ISR は Pythia の Q^2 parameter を 0.25 – 4 倍した時の 変化量を uncertainty として計上
- PDF は Pythia の PDF sample を変えた時の変化量を uncertainty として計上

Signal ($1/R = 600 \text{ GeV}$, $\Lambda R = 10$)

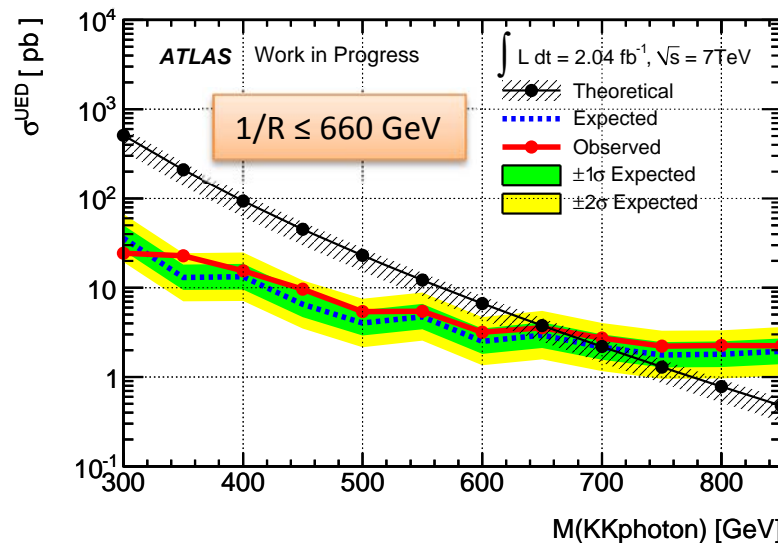
		uncertainty
electron	Energy scale	$< 1\%$
	Energy Resolution	$< 1\%$
	Efficiency	$\pm 2\%$
muon	Momentum scale	$< 1\%$
	Momentum Resolution	$< 1\%$
	Efficiency	$< 1\%$
jet	Energy Scale	$-15\% / +13\%$
	Energy Resolution	$\pm 1\%$
theory	ISR	$-32\% / +17\%$
	PDF	$\pm 12\%$
	MC statistics	$\pm 11\%$
Luminosity		$\pm 3\%$
Total		$-39\% / +27\%$

Exclusion limit (C.L. 95%)

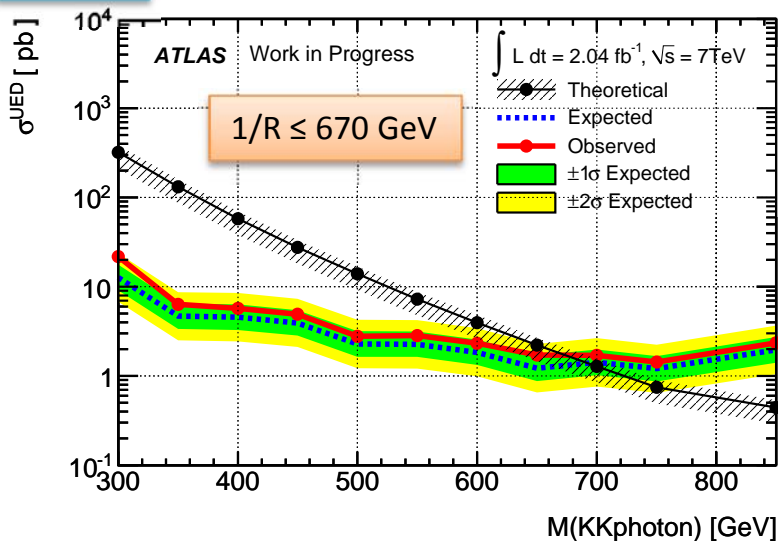
$\Lambda R=5$



$\Lambda R=10$



$\Lambda R=40$



$$E[n] = \mu s + b \quad (s : \text{signal}, b : \text{background})$$

- C.L. 95% の μ の値を求めて、対応する cross section に変換
- Theory の cross section よりも小さい場合は exclusion

$L = 2.0 \text{ fb}^{-1}$ のデータを用いて

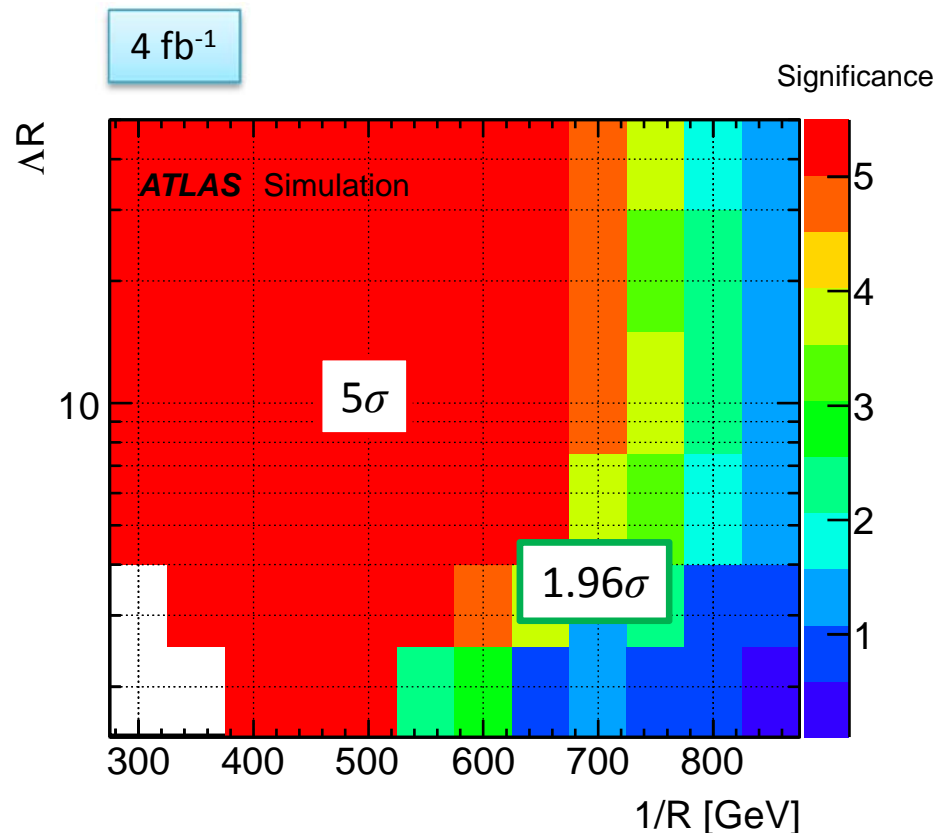
$1/R < 630 \text{ GeV}$ (at $\Lambda R = 5$)

$1/R < 670 \text{ GeV}$ (at $\Lambda R = 40$)

の UED 模型を 95% C.L. で exclude した。

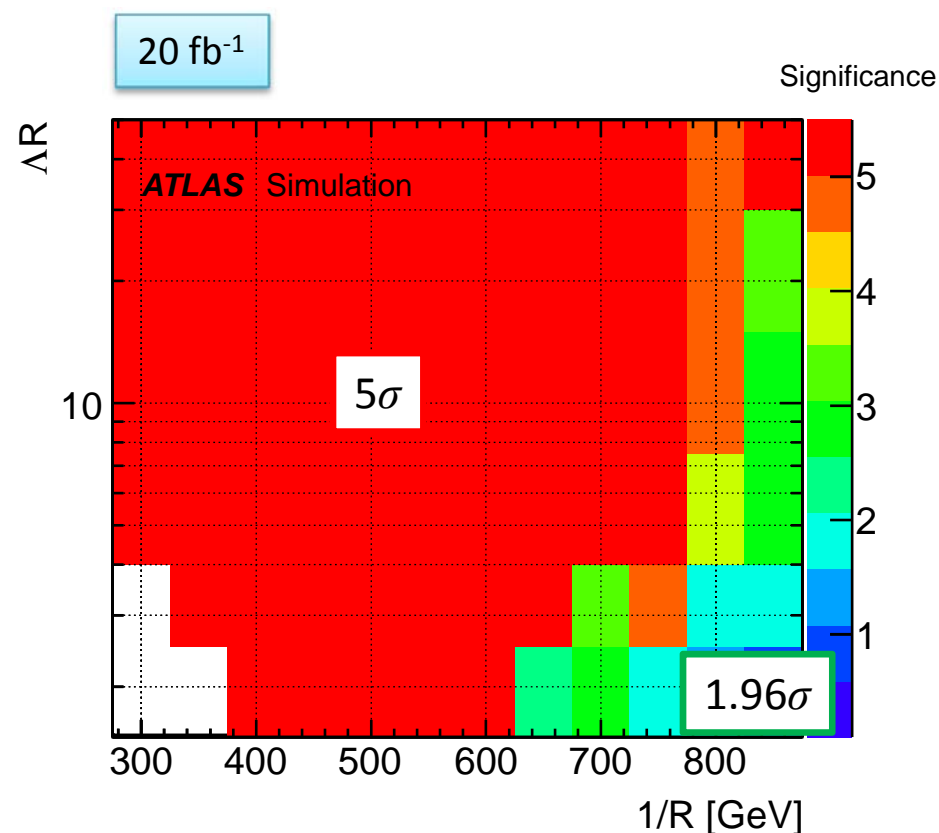
Discovery Potential

LHC は、今年の運転で積分ルミノシティ $L = 4 \text{ fb}^{-1}$ に到達する予定
 $L = 4 \text{ fb}^{-1}$ 及び 20 fb^{-1} (2012年) における UED 粒子の discovery もしくは exclusion の見通し



今年のデータで

- ⊕ Discovery : $1/R \sim 700 \text{ GeV}$
- ⊕ Exclude : $1/R \sim 800 \text{ GeV}$



来年のデータで

- ⊕ Discovery : $1/R \sim 800 \text{ GeV}$
- ⊕ Exclude : $1/R \sim 900 \text{ GeV}$

Conclusion

- 積分ルミノシティ $L = 2 \text{ fb}^{-1}$ を用いて UED 粒子の探索を行った
- $1/R < 630 \text{ GeV}$ (at $\Lambda R = 5$) - $1/R < 670 \text{ GeV}$ (at $\Lambda R = 40$) の領域で、UED 模型を exclude した
- 今年のデータ ($L = 4 \text{ fb}^{-1}$) を用いて $1/R \sim 700 \text{ GeV}$ の領域で UED 粒子の発見、もしくは $1/R \sim 800 \text{ GeV}$ の領域で exclude する予定である

To do list

- ISR jet の系統誤差を
 - 1) matrix element generator を用いて MC でより詳細に評価
 - 2) ISR をタグする selection を作成して、データに適用する
- 統計を増やして、low pT lepton の performance をより詳細に評価する

backup



Object definition

The following object definition is used in this analysis (a la SUSY definition)

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasProtected/SusyObjectDefintions>

Electrons

- $p_T > 10 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 2.47$
- ElectronTight
- AuthorElectron 1 or 3
- Isolation Etcone20/ $p_T < 0.10$
- $\Delta R(e, \text{jet}) < 0.2$ or $\Delta R(e, \text{jet}) > 0.4$

Jets

- AntiKt4H1Topo(EMJES)
- $p_T > 30 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 2.8$
- $\Delta R(e, \text{jet}) > 0.2$

Event veto

- Jet cleaning (loose)
- Cosmic veto
- LAr hole smart veto

Muons

- Staco muon (loose, comb+tagged muons)
- $p_T > 10 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 2.4$
- Inner detector track quality cuts
- Isolation ptcone20 $< 1.8 \text{ GeV}$
- $\Delta R(\mu, \text{jet}) < 0.2$ or $\Delta R(\mu, \text{jet}) > 0.4$

Missing transverse energy

- Simplified RefFinal

Variable

- H_T : scalar sum of selected jets and leptons

$$H_T = \sum_{\text{selected jets}} |p_T| + \sum_{\text{selected leptons}} |p_T|$$

- M_T : transverse mass

$$M_T = \sqrt{2 \cdot E_T^{\text{miss}} \cdot p_T^{\text{lepton}} \cdot (1 - \cos \phi_{p_T^{\text{lepton}} - E_T^{\text{miss}}})}$$

Fake lepton (QCD) estimation

- QCD ($\pi^0 \cdot \pi^\pm \cdot \text{heavy flavor}$)を間違えて lepton (fake lepton) としてしまうことによる background を見積もる
- Data から fake lepton, true lepton が tight な selection をパスする確率を求め、tight lepton にどれくらい fake lepton が含まれているか評価する

$$N_{obs}^{loose} = N_{fake}^{loose} + N_{true}^{loose}$$

$$N_{obs}^{tight} = N_{fake}^{tight} + N_{true}^{tight}$$

$$N_{fake}^{tight} = \epsilon_{fake} N_{fake}^{loose}, \quad N_{true}^{tight} = \epsilon_{true} N_{true}^{loose}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} N_{obs}^{loose} \\ N_{obs}^{tight} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\epsilon_{fake} & 1/\epsilon_{true} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{fake}^{loose} \\ N_{true}^{loose} \end{bmatrix}$$

Loose

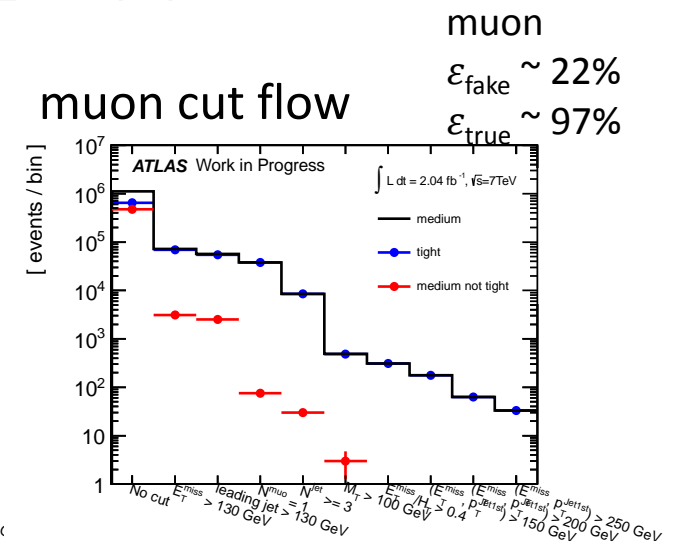
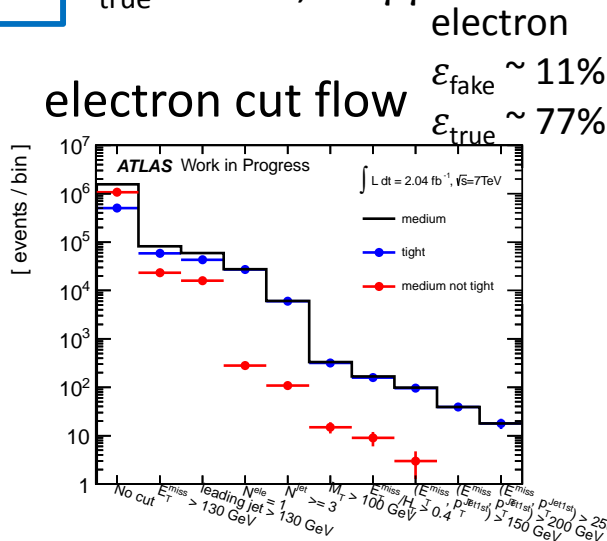
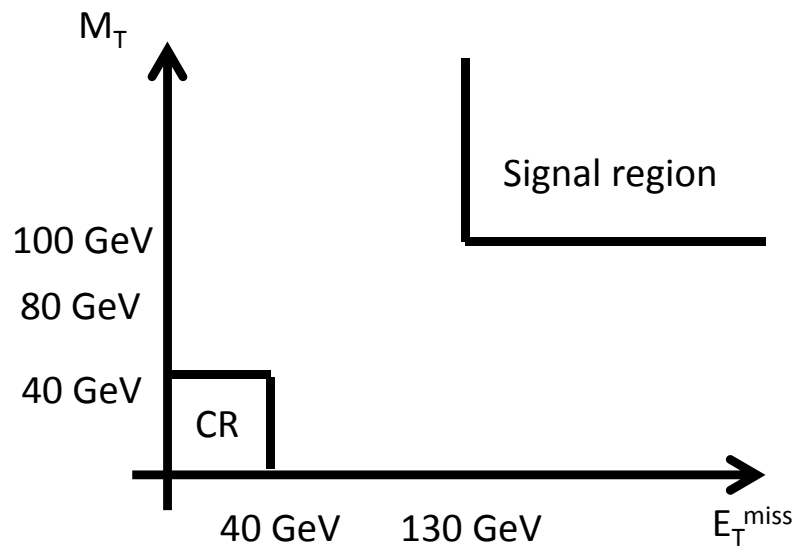
■ 一定以上の tracker を hit している lepton を要求

Tight

■ Loose をパスした lepton の周辺に、lepton 以外の track momentum がない

ϵ_{fake} : QCD イベントが多い領域で評価

ϵ_{true} : $Z \rightarrow ee, Z \rightarrow \mu\mu$ イベントを用い評価



ISR jet tag (proposal)

1. ISR candidate for the following condition

- ISR jets are harder than other jets

$$\frac{\max(p_{Ti}, p_{Tj})}{\min(p_{Ti}, p_{Tj})} > 2$$

- ISR jets are separated from others

$$|\eta_i - \eta_j| > 1.5$$

- ISR jets are distinguished by its m_i/p_{Ti}

$$\frac{\max\left(\frac{m_i}{p_{Ti}}, \frac{m_j}{p_{Tj}}\right)}{\min\left(\frac{m_i}{p_{Ti}}, \frac{m_j}{p_{Tj}}\right)} > 1.5$$

2. Selected jet satisfy

- ISR jets must not be central

$$|\eta_i| > 1.0$$

- ISR jets must not be close to the others

$$|\eta_i - \eta_j| > 0.5$$

- These other jets must not be reasonably close to each other

$$\frac{p_{Tj}}{p_{Tk}} < \rho + \frac{1/2}{1-\alpha} \quad \rho = 2$$
$$\alpha = \frac{\min(p_{Ti}, E_T^{miss})}{\max(p_{Ti}, E_T^{miss})}$$

- These other jets (FSR jets) must not be somewhat central

$$|\eta_j| < 2$$