

# ATLAS実験におけるUED模型の研究

日本物理学会秋季大会 @甲南大学

2009年9月13日

13pSA-2

岡村淳一、浅井祥仁、寺師弘二<sup>A</sup>、  
磯部忠昭<sup>A</sup>、金谷奈央子<sup>A</sup>、小林富雄<sup>A</sup>

東京大理、東京大素七<sup>A</sup>

# 発表の流れ

- 👉 UEDについて
- 👉 サンプル
- 👉 One-lepton + ISR Jet 解析
- 👉 BGの評価 (MT法)
- 👉 Same Sign di-lepton + di-Jet 解析
- 👉 トリガー
- 👉 発見可能性
- 👉 まとめ

# Universal Extra Dimensions(1)

UED : 標準模型の全粒子を高次元に拡張したモデル。

▶それらの粒子をKK(Kaluza-Klein)粒子と呼び、  
量子数やスピンは標準模型粒子のそれと同じである。

▶質量は次式で与えられる

$$m_n^2 = \frac{n^2}{R^2} + m_0^2$$

(  $m_0$  : 標準模型の質量  $R$  : コンパクト化スケール)

(  $n$  : 励起状態のレベル → 無限個のKKモード)

▶  $R^{-1} \sim \text{TeV}$ なので、縮退した質量スペクトラムとなる

▶KK Party 保存

最も軽いKK粒子(KK Photon)は安定 → ダークマターの候補になる

# Universal Extra Dimensions(2)

$\Delta M/M=20\%$

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

重要なパラメータ

▶  $R^{-1}$  = コンパクト化スケール[GeV]

▶  $\Lambda$  = カットオフパラメータ

※ 繰り込み不可能=カットオフ必要

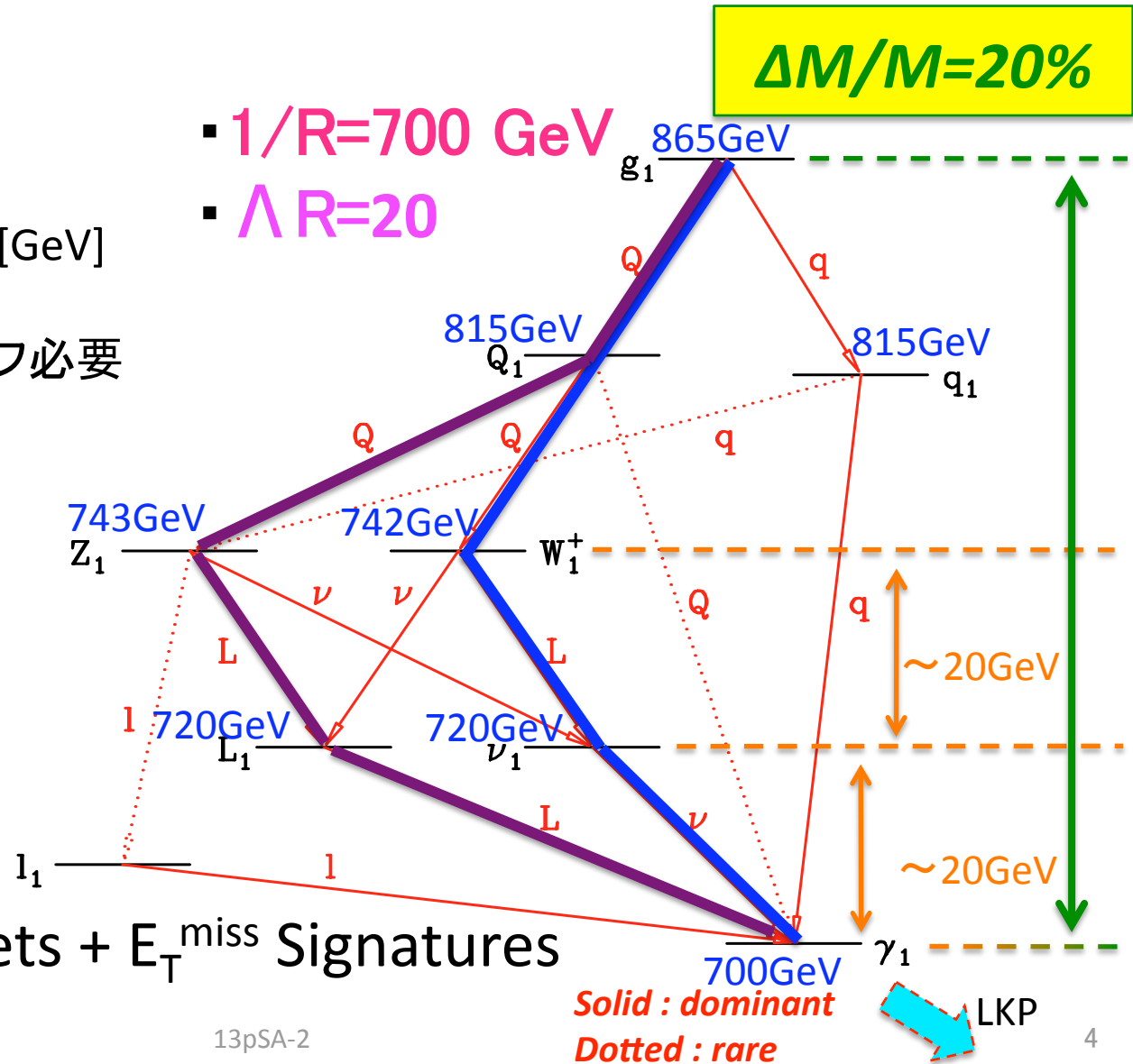
▶  $g_1 g_1, g_1 q_1, q_1 q_1$   
がまず生成される

▶ レプトンを伴った崩壊

$g_1 \rightarrow l + jj + E_T^{\text{miss}}$

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

→ 1/2/4 - lepton + jets +  $E_T^{\text{miss}}$  Signatures



# Universal Extra Dimensions(3)

量子補正によって質量差が生まれる

→  $\Lambda R$ によって縮退度が決められる

▶  $\Lambda R = 20 \rightarrow \Delta M/M \sim 20\%$

▶  $\Lambda R = 2 \rightarrow \Delta M/M \sim 5\%$

※  $\Delta M = M(g_1) - M(\gamma_1)$

▶ 縮退が強くなれば、  
レプトンやジェットがソフトになる。

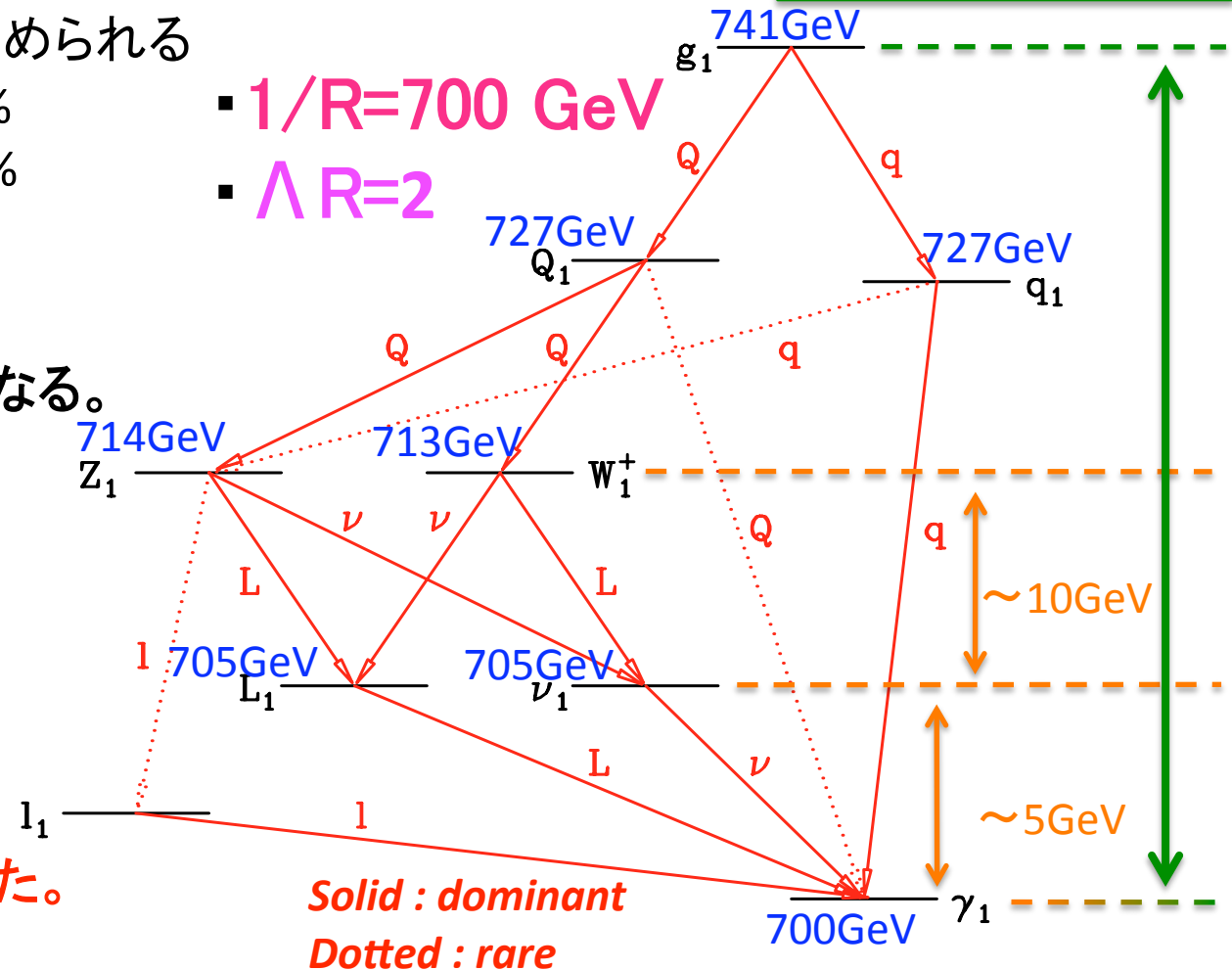


▶ BGに埋もれてしまい、  
発見が難しくなる。



新しい解析方法を開発し、  
発見可能性について研究した。

$\Delta M/M = 5\%$



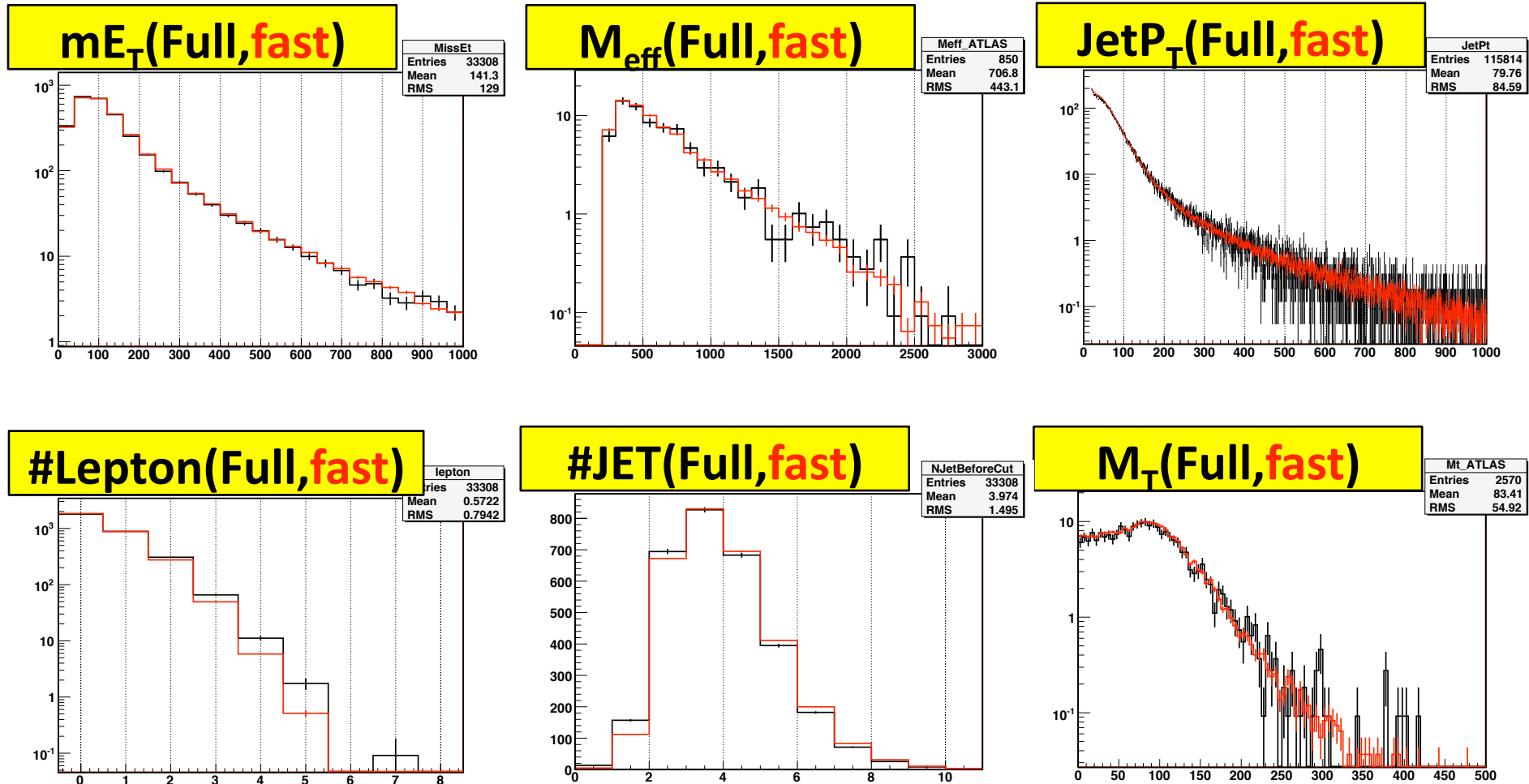
# Framework and Samples : *Signal (UED)*

- ▶  $E_{\text{CM}}=10\text{TeV}$
- ▶ Generator : Pythia (  $\rightarrow$  KK Photon ( $\gamma_1$ ) をStableにした )
- ▶ **Full Sim** :  $1/R=700\text{GeV}$  ,  $\Lambda R=10$
- ▶ **Fast Sim** : (Smearing sample -Atlfast-)
  - $1/R = 400\text{GeV} \sim 1\text{TeV}$  (50-100GeV bin)
  - $\Lambda R = 1.5 \sim 5000$  ( $\Delta M/M = \text{約}3\% \sim 37\%$ ) $\rightarrow$  44 samples (330K events/sample)

5000	<div style="border: 2px solid black; background-color: yellow; padding: 10px; text-align: center;"> <b>Sample : UED</b>            (Atfast- I ) (Pythia 10TeV)         </div>				2.33974 1184.2 749.8 434.4 36.7%	1.44834 1260.3 799.6 460.7 36.6%	0.907505 1336.2 849.4 486.8 36.4%	×	×	
700					3.59633 1099.2 749.9 349.3 31.8%	2.2608 1170.1 799.8 370.3 31.6%	1.44248 1240.9 849.6 391.3 31.5%	0.933308 1311.6 899.5 412.1 31.4%	0.40153 1452.8 999.2 453.6 31.2%	
200	×	<div style="border: 2px solid purple; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Xsec</b>  <math>M(g_1)</math> <math>M(\gamma_1)</math>  <math>\Delta M</math> <math>\Delta M/M</math> </div>		×	×	4.75716 1041.4 750.0 291.4 28.0%	3.02737 1108.9 799.9 309.0 27.9%	1.95053 1176.2 849.8 326.4 27.7%	1.27493 1243.4 899.6 343.8 27.7%	×
50	×			×	10.4245 910.13 700.3 209.8 23.1%	×	4.21775 1036.9 800.0 236.9 22.8%	×	1.81342 1163.3 899.8 263.5 22.6%	×
20	×	<div style="border: 2px solid magenta; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Full Sim</b> </div>		12.8955 865.4 700.3 165.1 19.1%	×	5.29836 986.4 800.1 186.3 18.9%	×	2.31293 1107.1 899.9 207.2 18.7%	1.05929 1227.6 999.6 228.0 18.6%	
10	426.658 479.1 401.1 78.0 16.2%			120.162 596.4 500.9 95.5 16.0%	40.3201 713.3 600.6 112.7 15.8%	15.2824 830.0 700.4 129.6 15.6%	×	6.3176 946.4 800.1 146.3 15.5%	×	2.78845 1062.7 899.9 162.8 15.3%
4	525.385 449.2 400.9 48.3 10.8%	149.064 559.9 500.7 59.2 10.6%	50.5252 670.4 600.5 69.9 10.4%	19.3065 780.7 700.3 80.4 10.3%	×	8.08854 890.8 800.2 90.6 10.2%	×	3.61081 1000.9 900.0 100.9 10.1%	1.69075 1110.8 999.8 111.0 10.0%	
2	620.066 425.2 400.5 24.7 5.8%	178.141 530.6 500.4 30.2 5.7%	60.7682 636.0 600.3 35.7 5.6%	23.3773 741.2 700.2 41.0 5.5%	×	9.84908 846.4 800.1 46.3 5.5%	×	4.42906 951.5 899.9 51.6 5.4%	2.09474 1056.6 999.8 56.8 5.4%	
1.5	×	191.046 518.0 500.2 17.8 3.4%	65.1164 621.1 600.1 21.0 3.4%	25.4193 724.2 700.1 24.1 3.3%	×	10.7383 827.2 800.0 27.2 3.3%	×	×	×	
$\Lambda R$ 1/R	400 [GeV]	500 [GeV]	600 [GeV]	700 [GeV]	750 [GeV]	800 [GeV]	850 [GeV]	900 [GeV]	1000 [GeV]	

# Full-Atlfast Comparison

UED(1/R=700,  $\Lambda R=10$ )を用いた



FullSimとFastSimの振る舞いは良く一致している



# Framework and Samples : **BG**

▶  $E_{CM} = 10\text{TeV}$

▶  $tt$  : MC@NLO  
▶  $W + \text{Jets}$  : APLGEN } Full Sim (Geant4)

→ 本解析では  $tt$  と  $W+\text{Jets}$  が支配的である

	xsec [pb]	number of events
$tt(\text{not Hadronic})$	373.6	$1.99 \cdot 10^6$
W	39652.3	$7.64 \cdot 10^6$

# One-Lepton ISR-Jet 解析 (1)

セレクションクライテリア

- ①  $N_{jet} \geq 3$  ( $P_T > 30 \text{ GeV}$ )
- ②  $Jet^{1st} P_T > 100 \text{ GeV}$
- ③  $mE_T > 100 \text{ GeV}$
- ④  $N_{lep} == 1$  (lepton  $> 10 \text{ GeV}$ )
- ⑤  $M_T > 100 \text{ GeV}$

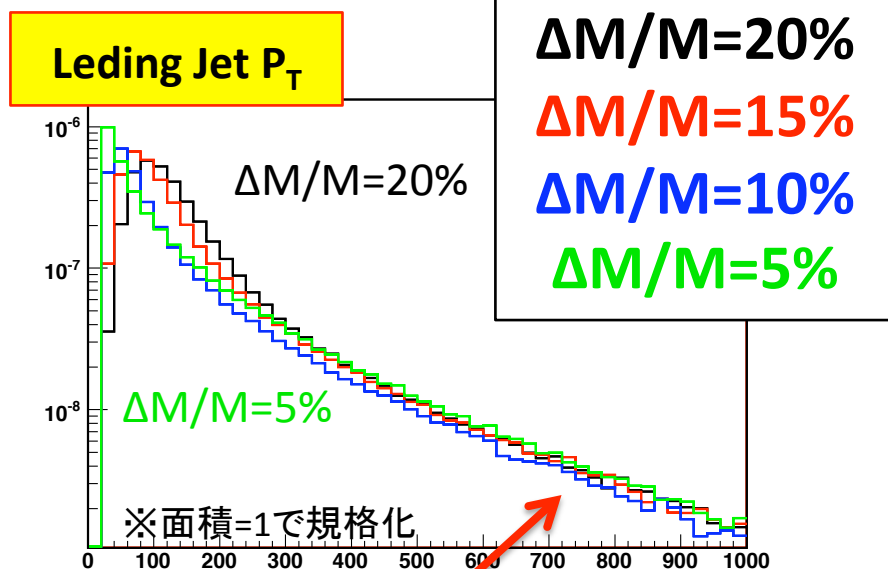
$\Delta M/M$ が小さい  $\rightarrow P_T$  小さい

しかし

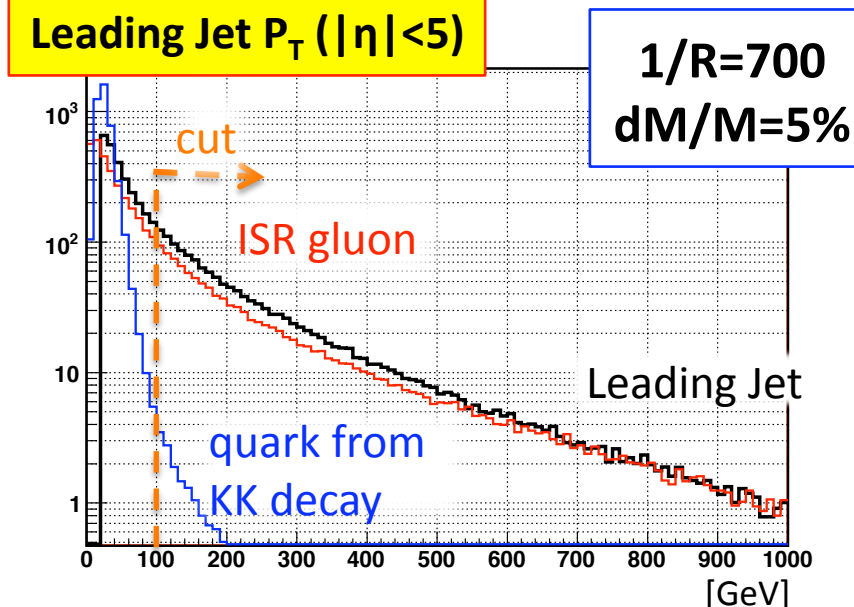
$P_T$  大きい領域は縮退度に依らない

$\leftarrow$  ISR (Initial State Radiation) の寄与

(ISRは 主に colored particle の質量で決まる)



$\Delta M/M$ が小さくても比較的大きな  $P_T$  を持つ Jet が存在。



縮退度に依らず同じ振るまい  $\rightarrow$  ISR!

# One-Lepton ISR-Jet 解析 (2)

セレクションクライテリア

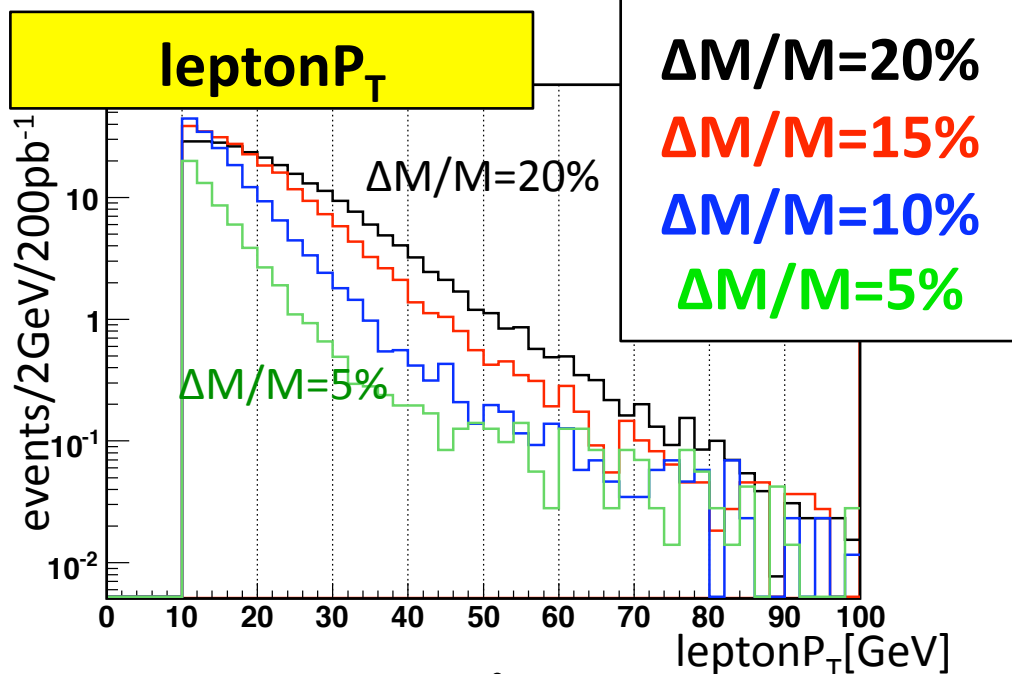
- ①  $N_{jet} \geq 3$  ( $P_T > 30 \text{ GeV}$ )
- ②  $Jet^{1st} P_T > 100 \text{ GeV}$
- ③  $m_{E_T} > 100 \text{ GeV}$
- ④  $N_{lep} == 1$  (lepton  $> 10 \text{ GeV}$ )
- ⑤  $M_T > 100 \text{ GeV}$

$M_T$  (=Transverse mass)

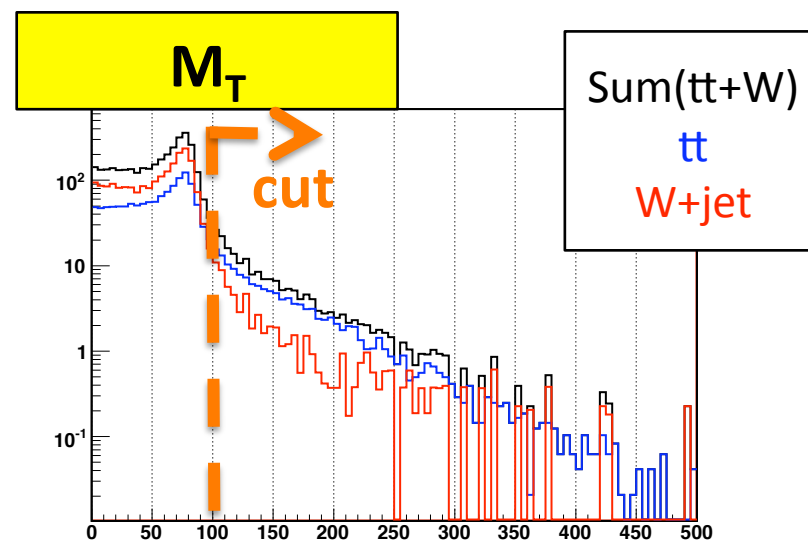
$W \rightarrow l + \nu$  80GeVのヤコビヤンピークをつくる

$$M_T = \sqrt{2E_T P_{Tl} (1 - \cos \phi)} \quad (l = e, \mu)$$

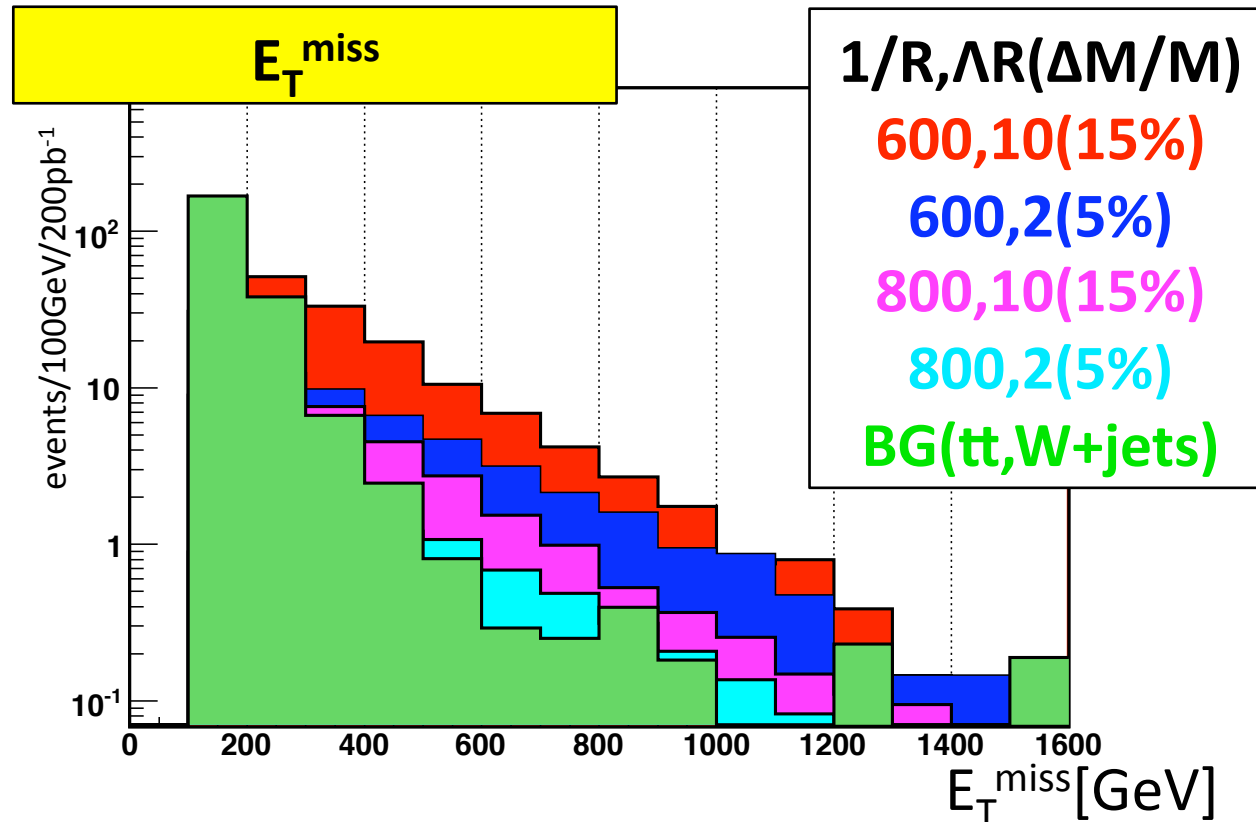
$$\cos \phi = \frac{P_{Xl} E_X + P_{Yl} E_Y}{E_T P_{Tl}}$$



$\Delta M/M$  小さい  $\rightarrow$  レプトン  $P_T$  小さい  
 Efficiencyを保つために  $P_T$  カットをルーズに。  
 ( $P_T > 10 \text{ GeV}$ を適用)



# One - Lepton 解析 (ISR-Jet) の結果

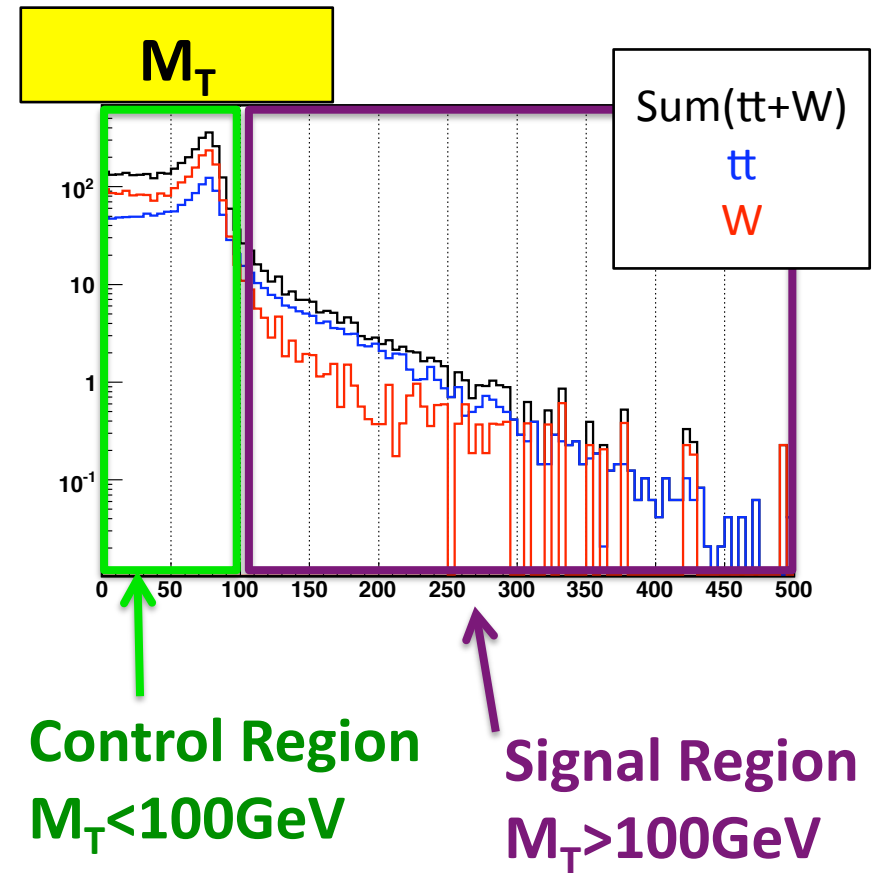
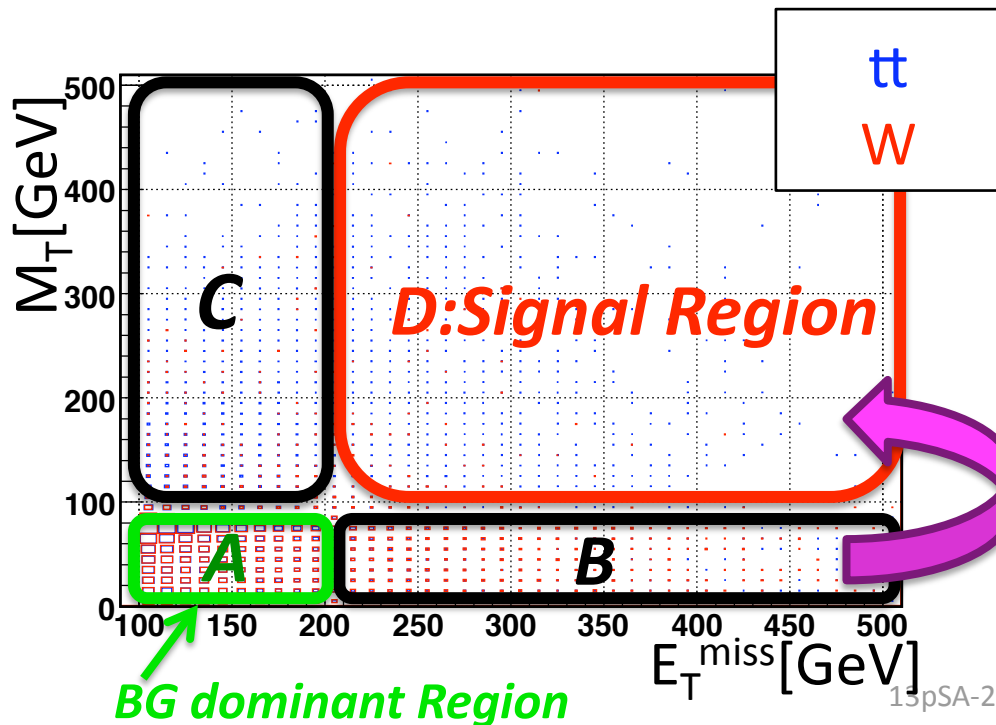


- ▶ Large  $E_T^{\text{miss}}$  で excess が見える
- ▶ 軽い: xsec 大きい ・ 縮退強: イベント数減少
- ▶ BG の内訳は tt(66%), W+jets(34%)
- ▶ 比較的BGが多い

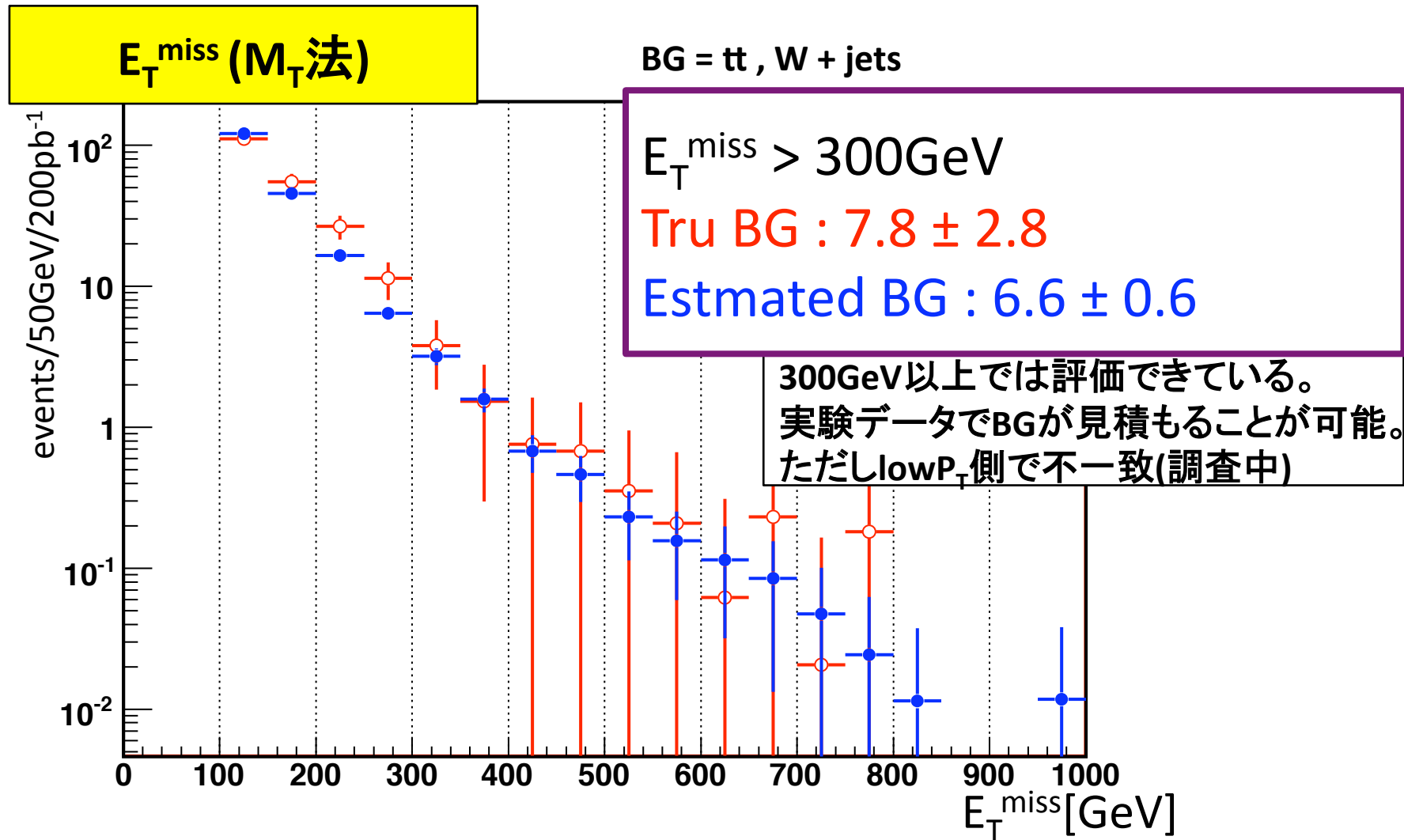
# BGの評価 -MT法- (1)

## $M_T$ 法

- ▶  $M_T$ と $E_T^{\text{miss}}$ は基本的に無相関
- ▶ Control RegionとSignal Regionの $E_T^{\text{miss}}$ 分布は相似形
- ▶ 比(C/A)で規格化し、DのBGを評価



# BGの評価 -MT法- (2)



# Same Sign di-lepton解析

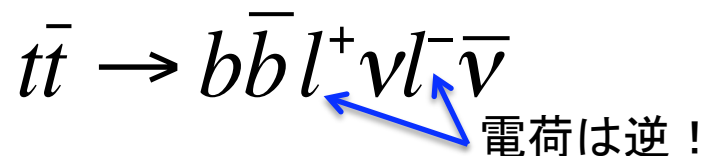
セレクションクライテリア

○小さな $P_T$ の2ジェットとソフトな2レプトン(same sign)を要求

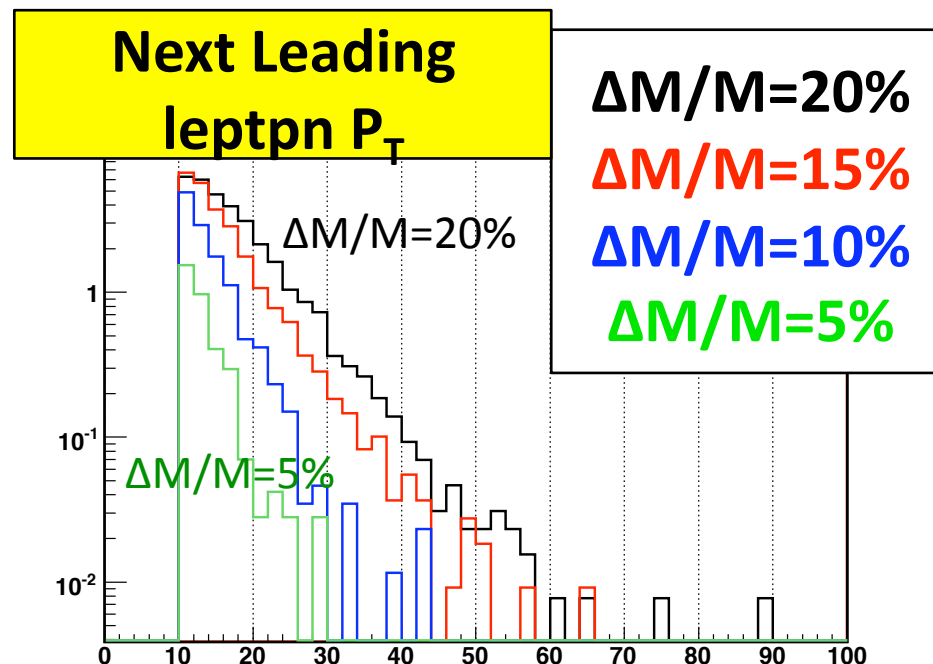
- ① Same Sign di-lepton ( $P_T > 10, 10\text{GeV}$ )
- ② At least 2 jet ( $P_T > 50\text{GeV}$ )
- ③  $E_T^{\text{miss}} > 100\text{GeV}$

▶バックグラウンドをsuppressするために di-leptonを要求する

→主なバックグラウンドは  $t\bar{t}$  プロセス

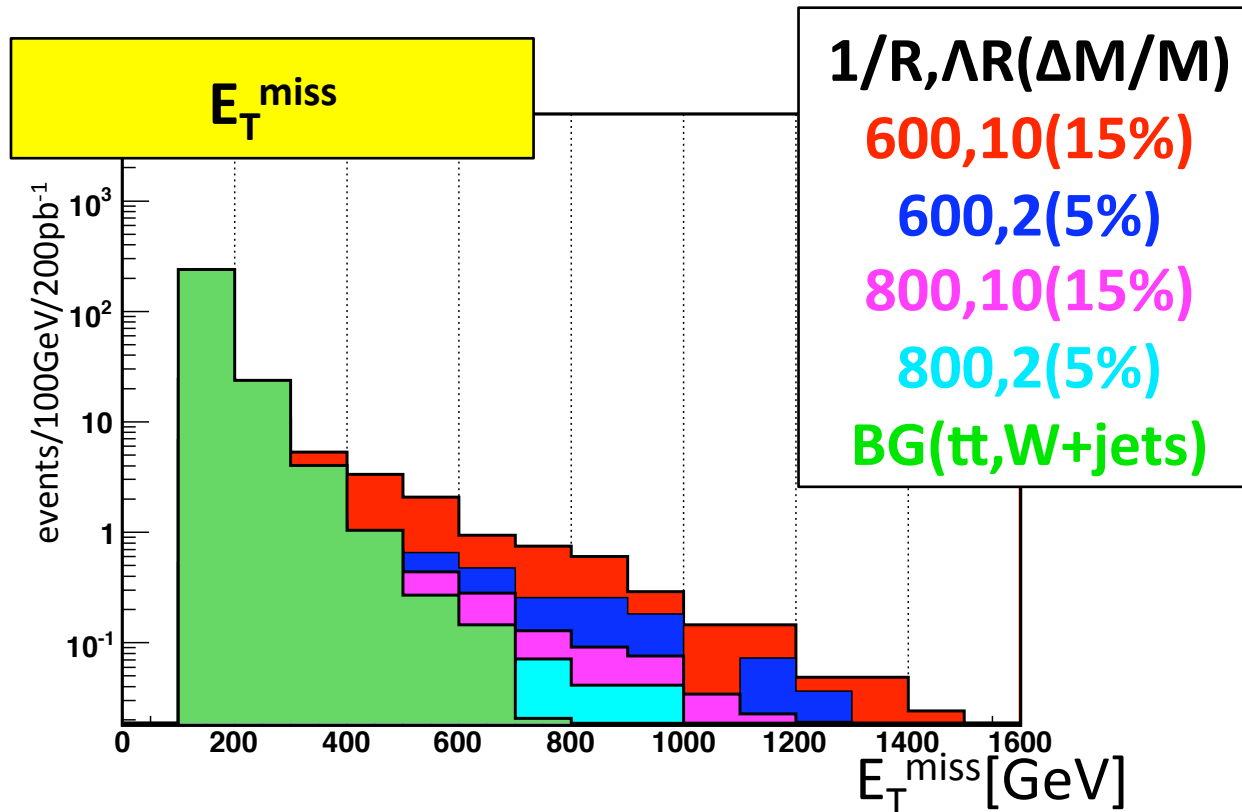


∴ Same Signがバックグラウンドを減らす鍵



▶ $\Delta M/M$ が小さい時、 $P_T$ は小さくなる。  
→signalを残すためルーズなカット( $P_T > 10\text{GeV}$ )

# Same Sign di-lepton解析 結果



- ▶ BG(fast) の内訳は tt(84%), W+jets(16%)
- ▶ BGのほとんどが、bクオークのsemi-leptonic decayから来るもの
- ▶ この解析方法もまた良い感度を持つ
- ▶ FullSimで解析すべき(進行中)
- ▶ ※ W+W+もLHCでは生成される



# トリガー

## *lumi1E31* トリガーマニュー

- ▶ Jet +  $E_T^{\text{miss}}$
- ▶  $E_T^{\text{miss}}$  + Lepton
- ▶ Jet +  $E_T^{\text{miss}}$  + Lepton
- ▶ Jet + Lepton
- ▶ Single Lepton
- ▶ di-Lepton (ss解析用)

※詳細はBackUpへ

- ▶両解析方法とも、90%程度またはそれ以上トリガーにかかる事を確認した。

## オフラインにおけるトリガー効率の定義

$$eff_{\text{trigger}} = \frac{\text{OffLineCut} \cap \text{TriggerPass}}{\text{OffLineCut}}$$

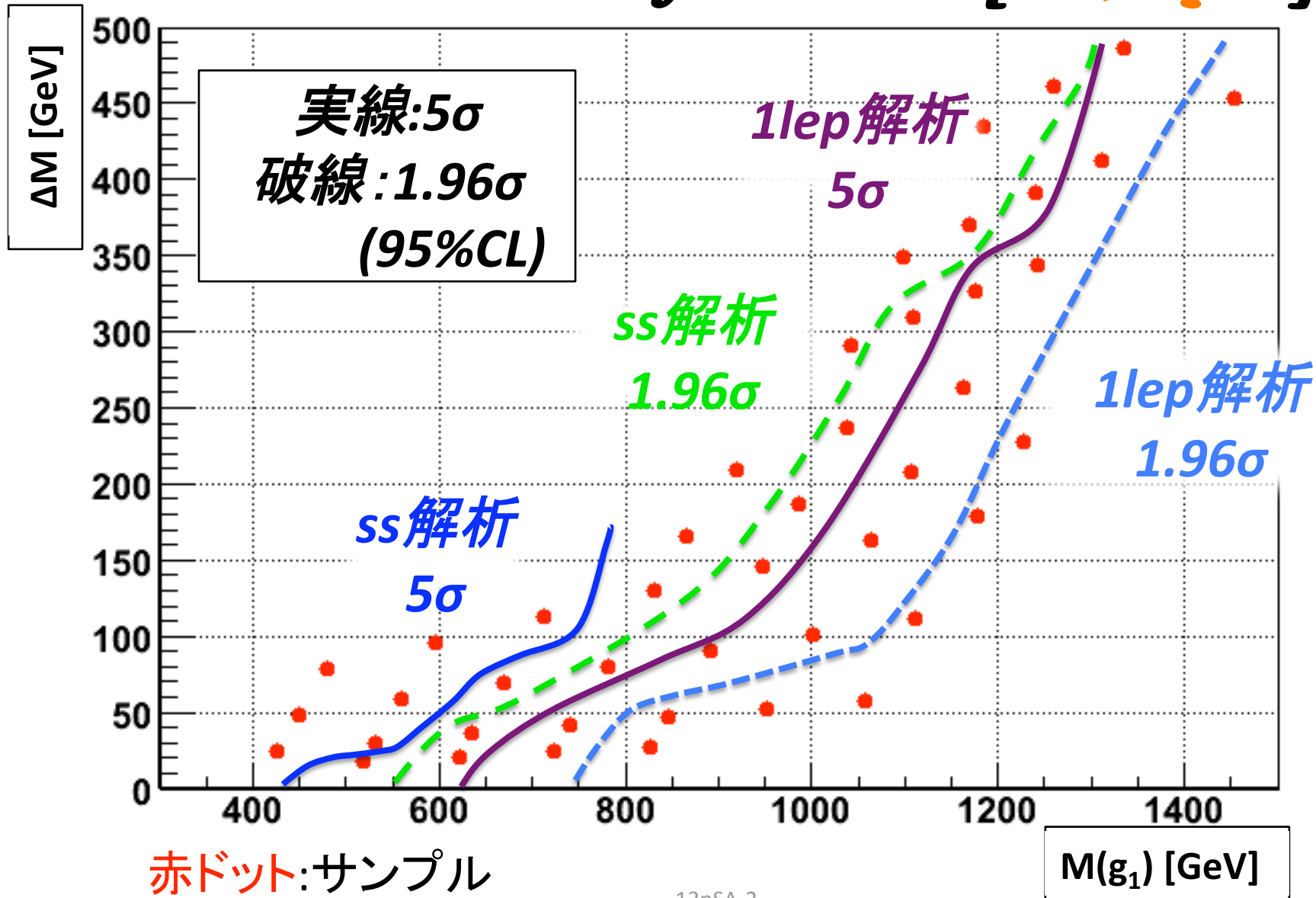
One-lepton ISR 解析	$eff_{\text{trigger}}$
Jet + $E_T^{\text{miss}}$	99.1% ±3.4%
Lep+X のOR	67.3% ±2.8%

Same Sign di-lepton 解析	$eff_{\text{trigger}}$
Jet + $E_T^{\text{miss}}$	89.2% ±4.8%
di-LepのOR	53.7% ±3.8%
Lep+X, di-LepのOR	89.2% ±4.8%

※UED(1/R=700,  $\Lambda_R=10$ )を用いた

# One-lepton + ISR 解析    SS di-lepton 解析

## UED 10TeV Discovery Potential [ $L=200\text{pb}^{-1}$ ]



# まとめ

- ☞ UED模型について有効な2つの解析方法を提案し、その発見能力を検証した。
- ☞ One-lep+ISR解析 と SS di-lepton解析、共によい感度を持ち、10TeV, Lumi=200pb<sup>-1</sup>においても、広い発見能力がある。
- ☞  $M(\gamma_1)=600\text{GeV}, \Delta M/M=3\%$  の非常に縮退した場合や  $M(\gamma_1)=850\text{GeV}, \Delta M/M=30\%$  の重たい場合でも $5\sigma$ 以上で発見が可能。
- ☞ BGの評価法( $M_T$ 法)についても研究を行った。
- ☞ トリガーを確認した。

## 今後

- ☞ SS di-lepton解析におけるBGの評価を正しく行なう。
- ☞ 全てFullSimで行なう。
- ☞ 縮退したSUSYモデルにも応用したい。

# バックアップ

# Framework and Samples : BG

▶ *tt* : *MC@NLO*

▶ *W + Jets* : *APLGEN*

→本解析では *tt* と *W+Jets* が支配的

	# of events	xsec [pb]
tt(not Hdronic)	1.99*E6	373.6

	# of events	xsec [pb]
WenuNp0	1121085	10184.7
WenuNp1	252424	2112.3
WenuNp2	776283	676.0
WenuNp3	179450	203.3
WenuNp4	58872	56.1
WenuNp5	17492	16.6

13pSA-2

	# of events	xsec [pb]
WmunuNp0	1328626	10125.7
WmunuNp1	248220	2155.5
WmunuNp2	749540	682.3
WmunuNp3	223087	202.0
WmunuNp4	58928	55.5
WmunuNp5	17475	16.3

	# of events	xsec [pb]
WtaunuNp0	1326080	10178.3
WtaunuNp1	246827	2106.9
WtaunuNp2	656674	672.8
WtaunuNp3	223162	202.7
WtaunuNp4	58729	55.3
WtaunuNp5	17413	17.0

**Full Simulation (1/R=700GeV,  $\Delta R=10$ )**  
**Trigger efficiency !!**

One-lep解析カット後

単位[%]

	L1	L2	EF
<i>Jet + MET</i>			
j70_xe30	98.6	98.6	98.6
2j42_xe30	91.5	91.5	91.5
<i>MET + Lepton</i>			
e20_xe15	99.7	34.4	20.7
e10_xe30	99.7	51.2	35.3
e15_xe20	99.8	44.8	28.7
e20_xe30	99.4	34.3	20.7
mu15_xe15	35.4	23.7	0.42
mu20_xe30	29.0	14.6	0.32
<i>Jet + MET + Lepton</i>			
j42_xe30_e15i	50.2	23.8	3.89
j42_xe30_mu15	35.4	23.7	0.42

One-lep解析カット後

	L1	L2	EF
<i>Jet + Lepton</i>			
mu10_j18	40.8	33.3	31.0
4j23_e15i	36.9	17.7	3.36
4j23_mu15	23.1	15.7	14.5
<i>Single Lepton</i>			
e10_medium	100	52.2	6.00
e15_medium	99.9	44.8	4.63
e20_loose	99.7	34.4	20.7
mu10	40.8	33.3	31.0
mu15	35.4	23.7	21.8
mu15i_loose	35.4	14.8	14.1
e20i_loose	39.1	17.0	15.5

緑網のメニューで「OR」をとって、どれか引っかかればカウントした。

	L1	L2	EF
OR	100	74.8	64.5±2.6

**Full Simulation (1/R=700GeV,  $\Delta R=10$ )**  
**Trigger efficiency !!**

単位[%] **ss解析カット後**

	L1	L2	EF
<i>Jet + MET</i>			
j70_xe30	84.6	83.9	83.9
2j42_xe30	88.2	87.8	87.8
<i>MET + Lepton</i>			
e20_xe15	97.7	38.3	28.1
e10_xe30	99.8	63.5	56.0
e15_xe20	99.8	53.7	43.5
e20_xe30	97.5	37.6	27.4
mu15_xe15	51.2	34.0	4.08
mu20_xe30	42.0	20.9	2.95
<i>Jet + MET + Lepton</i>			
j42_xe30_e15i	64.9	39.7	6.80
j42_xe30_mu15	50.8	33.8	4.08



	L1	L2	EF
<i>Jet + Lepton</i>			
mu10_j18	59.9	51.9	50.8
4j23_e15i	39.2	25.2	3.85
4j23_mu15	28.8	18.8	17.7
<i>Single Lepton</i>			
e10_medium	100	65.1	10.2
e15_medium	99.8	53.7	6.80
e20_loose	97.7	38.3	28.1
mu10	59.9	51.9	50.8
mu15	51.2	34.0	32.2
mu15i_loose	51.2	24.3	23.4
e20i_loose	48.1	24.9	22.2

黄網のメニューで「OR」をとって、どれか引つかかればカウントした。

	L1	L2	EF
OR	100	89.3	86.2±4.4

ss解析カット後

	L1	L2	EF
<i>e + e</i>			
2e10_loose	99.8	20.9	12.5
2e5_medium	100	30.2	1.36
<i>mu + mu</i>			
2mu4	24.9	21.3	16.3
2mu6	20.2	16.3	14.3
2mu10	17.7	11.8	10.2
<i>e + mu</i>			
e10_mu6	62.1	32.0	24.7

2lep  
オリジナル

青網のメニューで「OR」をとって、どれか引つかかればカウントした。

	L1	L2	EF
OR	100	61.7	47.6±3.2

青網と黄網のメニューで「OR」をとって、どれか引つかかればカウントした。

	L1	L2	EF
OR	100	90.9	86.4±4.4

$S/\sqrt{B} =$   
Significance と signal の count

10発

5 $\sigma$

2 $\sigma$ 以下

(1lep解析で  $m_{ET} > 300 \text{ GeV}$ )  
200  $\text{pb}^{-1}$

Atlfst-UED vs Full-BG

5000	×	×	×	×	10.33 35.03	7.013 23.79	4.667 15.83	×	×
700	×	×	×	×	10.25 34.78	7.264 24.64	5.126 17.39	3.558 12.07	1.768 5.997
200	×	×	×	×	9.324 31.63	6.586 22.34	4.720 16.01	3.381 11.47	×
50	×	×	×	12.30 41.71	×	5.990 20.32	×	2.963 10.05	×
20	×	×	×	12.08 40.97	×	5.672 19.24	×	2.830 9.601	1.420 4.817
10	123.6 419.3	54.80 185.9	23.93 81.18	11.46 38.88	×	5.577 18.92	×	2.752 9.335	1.394 4.730
4	102.7 348.3	36.55 124.0	16.99 57.62	7.942 26.94	×	4.056 13.76	×	2.218 7.523	1.160 3.935
2	70.72 239.9	23.69 80.37	9.115 30.92	3.947 13.39	×	1.852 6.281	×	0.881 2.989	0.477 1.617
1.5	×	20.17 68.43	7.139 24.22	2.693 9.135	×	1.162 3.943	×	×	×
$\Lambda R$ 1/R	400 [GeV]	500 [GeV]	600 [GeV]	700 [GeV]	750 [GeV]	800 [GeV]	850 [GeV]	900 [GeV]	1000 [GeV]

$S/\sqrt{B} =$   
Significance と signal の count

10発

5 $\sigma$

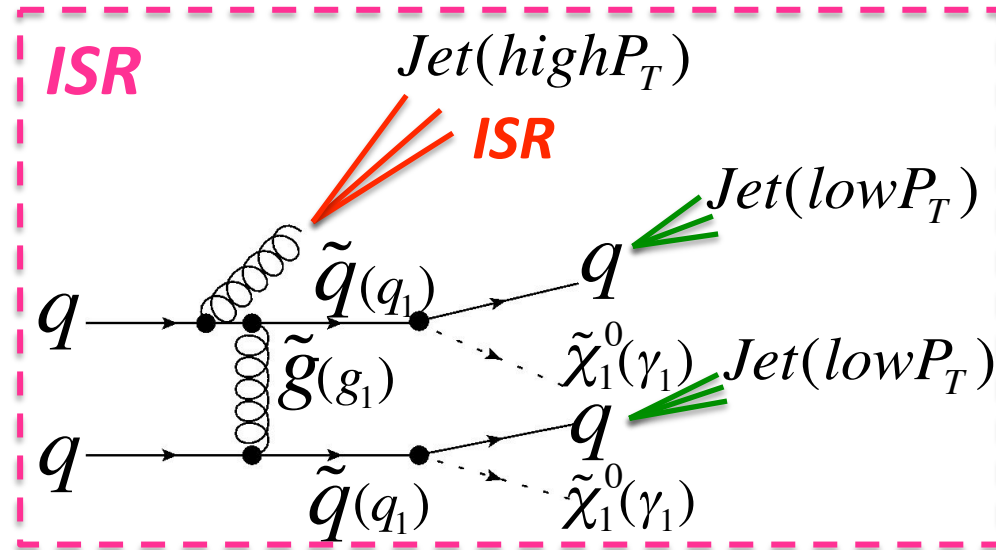
2 $\sigma$ 以下

(ss解析で  $m_{ET} > 300 \text{ GeV}$ )  
200 pb<sup>-1</sup>

Atlfst-UED vs Atlfast-BG

5000	×	×	×	×	2.475 5.795	1.730 4.050	1.241 2.905	×	×
700	×	×	×	×	2.223 5.204	1.606 3.760	1.182 2.767	0.913 2.138	0.481 1.127
200	×	×	×	×	1.934 4.529	1.444 3.380	0.991 2.321	0.778 1.822	×
50	×	×	×	2.775 6.498	×	1.338 3.133	×	0.677 1.584	×
20	×	×	×	2.894 6.777	×	1.378 3.226	×	0.645 1.511	0.338 0.791
10	38.37 89.85	14.53 34.03	5.858 13.71	2.643 6.189	×	1.301 3.047	×	0.660 1.546	0.323 0.757
4	29.89 69.98	9.396 22.00	3.612 8.457	1.895 4.436	×	0.885 2.072	×	0.487 1.139	0.276 0.646
2	20.65 48.36	7.029 16.46	1.714 4.014	0.599 1.403	×	0.305 0.715	×	0.133 0.311	0.085 0.200
1.5	×	3.427 8.023	0.934 2.188	0.410 0.961	×	0.160 0.374	×	×	×
$\Lambda R$ 1/R	400 [GeV]	500 [GeV]	600 [GeV]	700 [GeV]	750 [GeV]	800 [GeV]	850 [GeV]	900 [GeV]	1000 [GeV]

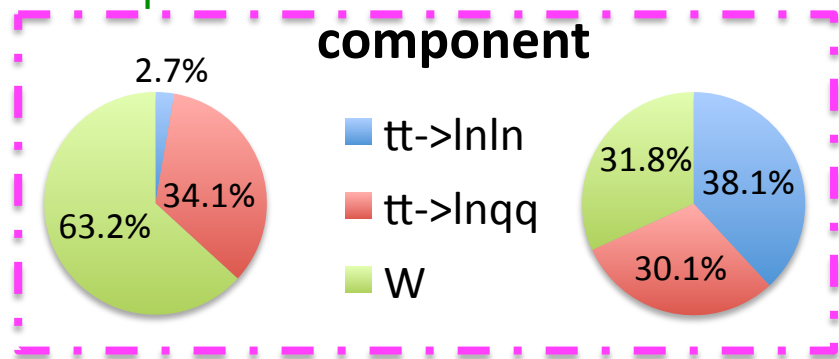
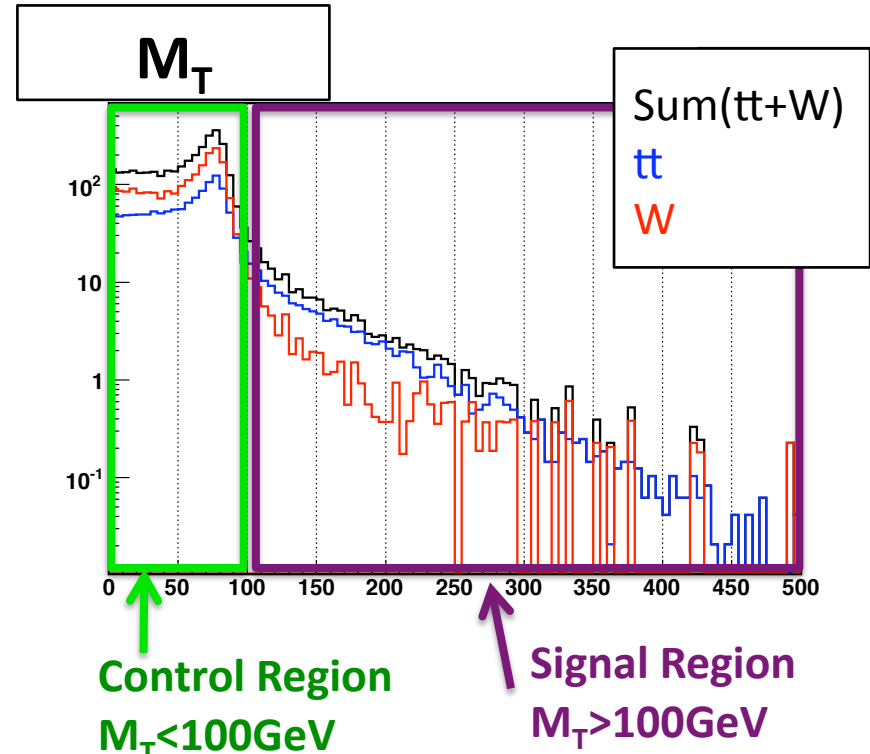
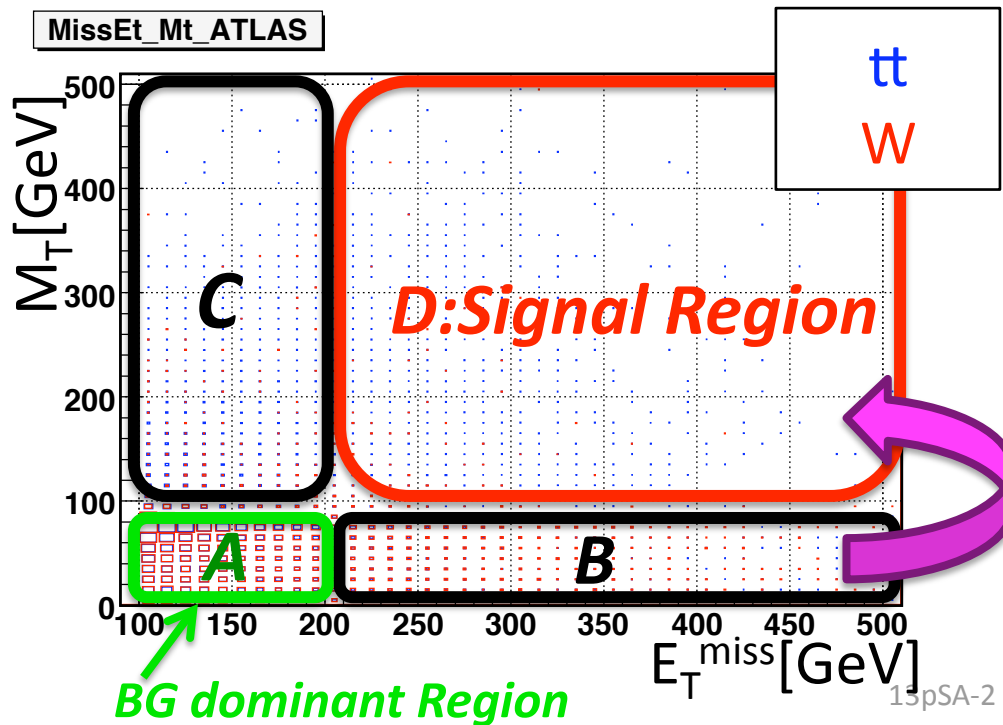
# ISR (Initial State Radiation) とは



- ▶生成されるカラード粒子の質量に応じて  
ISR gluonの $P_T$ も大きくなる。
- ▶系統誤差の不定性はある。

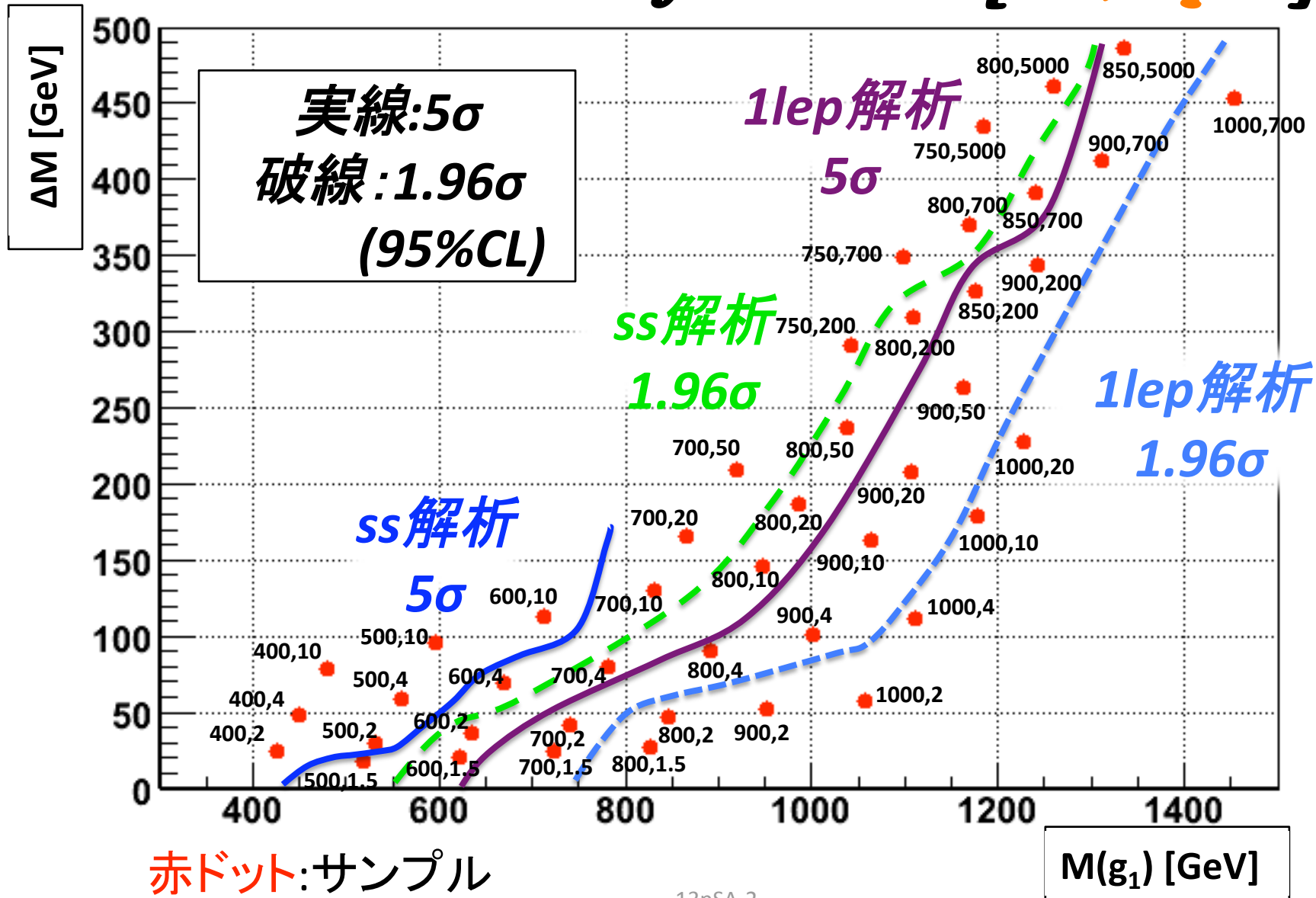
# BGの評価 -MT法-

- $M_T$ 法**
- ▶  $M_T$ と $E_T^{\text{miss}}$ が無相関である
  - ▶ Control RegionとSignal Regionの $E_T^{\text{miss}}$ 分布は相似形
  - ▶ 比(A/C)で規格化し、DのBGを評価



# One-lepton + ISR 解析 SS di-lepton 解析

## UED 10TeV Discovery Potential [ $L=200\text{pb}^{-1}$ ]



# Universal Extra Dimensions

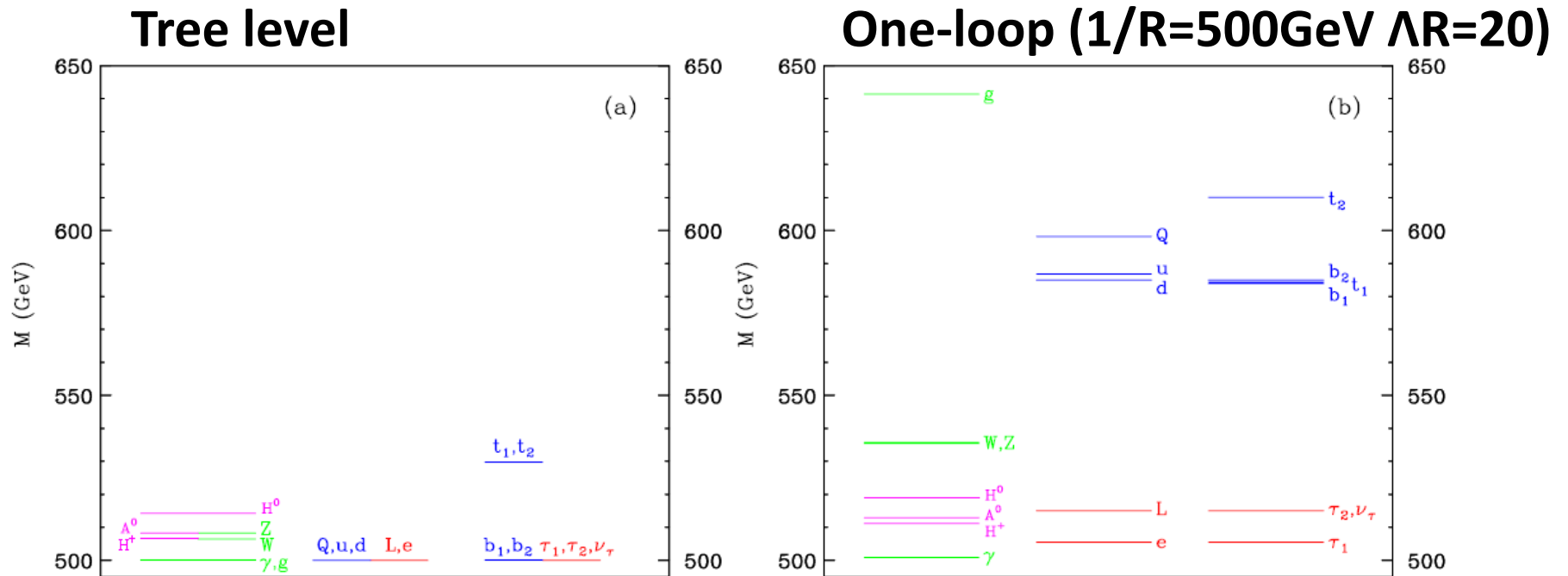
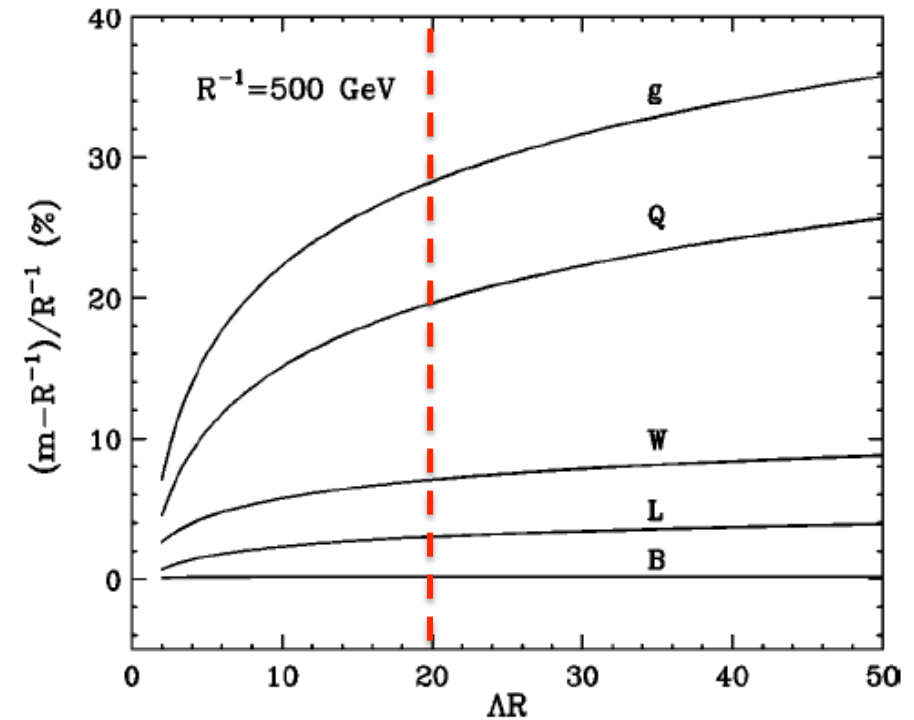
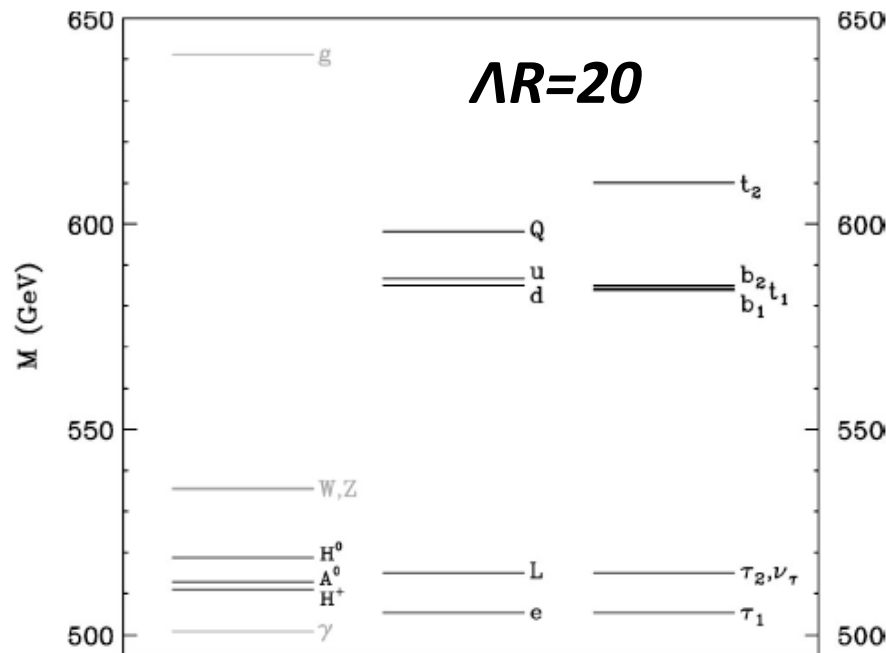


FIG. 6: The spectrum of the first KK level at (a) tree level and (b) one-loop, for  $R^{-1} = 500$  GeV,  $\Lambda R = 20$ ,  $m_h = 120$  GeV,  $\overline{m}_H^2 = 0$ , and assuming vanishing boundary terms at the cut-off scale  $\Lambda$ .



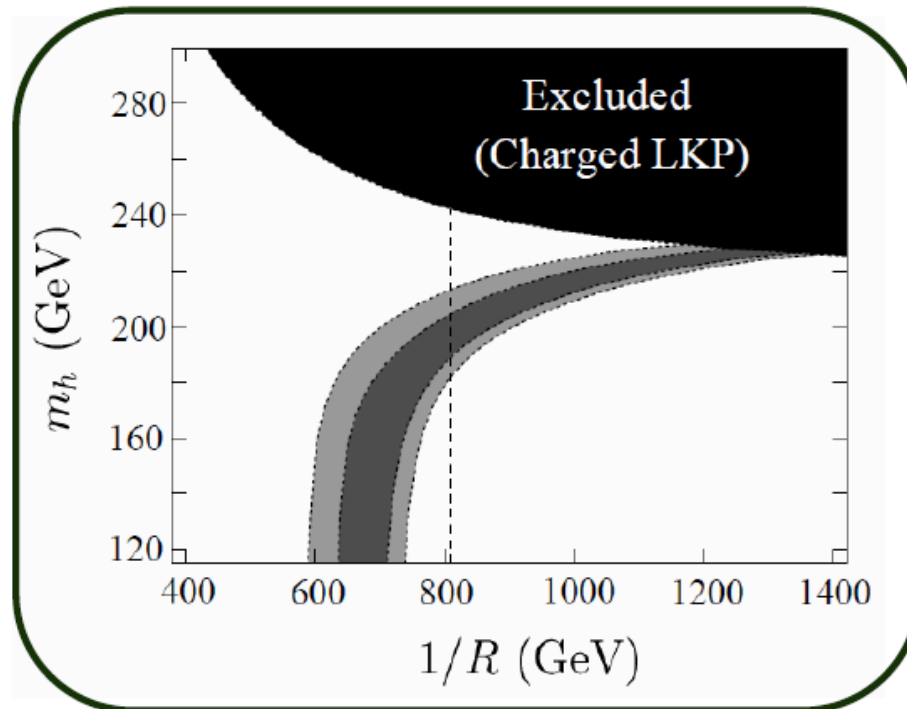
# Universal Extra Dimensions

Radiative Corrections - the degeneracy is lifted



# Universal Extra Dimensions

Relic abundance of dark matter in UED



M.Kakizaki, S.M, M.Senami