

# ATLAS実験における $Z \rightarrow \mu\mu$ ( $W \rightarrow \mu\nu$ ) 事象の測定

久保田隆至, 織田勸, 結束晃平, 山下了, 松下崇<sup>A</sup> (東大素セ, 神戸大理<sup>A</sup>)

他 ATLAS日本標準モデルグループ, ATLAS Collaboration

日本物理学会2010年秋季大会@九州工業大学

2010年9月13日



## ATLAS実験: 約 $300 \text{ nb}^{-1}$ の統計での $Z \rightarrow \mu\mu$ 、 $W \rightarrow \mu\nu$ 断面積測定の論文を準備中

- ミューオン検出器の性能測定
  - トラッキング効率の測定
  - トリガー効率の測定
    - 論文の解析に貢献
- $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象の断面積
- $W \rightarrow \mu\nu$ 事象の断面積
  - W/Z 解析グループ公式の手法にもとづいた解析結果
- 8月末までのデータ ( $\sim 2.7 \text{ pb}^{-1}$ ) での解析 (preliminary)
  - $Z \rightarrow \mu\mu$ 、 $W \rightarrow \mu\nu$ 候補事象の分布のMCとの比較

$$\bullet (W/Z) \times Br(W/Z) = \frac{N_{yeild} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot SF_{reco} \cdot SF_{trig} \cdot L_{int}}$$

- $N_{yeild}$  – シグナル事象数
- $N_{bg}$  – 背景事象数
- $A$  – geometrical / kinematical acceptance (MC)
- $C$  – 事象再構成効率 (MC)
- $SF_{reco}$  – データとMCのミュオントラッキング効率の比 ( $\epsilon_{data} / \epsilon_{MC}$ )
- $SF_{trig}$  – データとMCのミュオントリガー効率の比 ( $\epsilon_{data} / \epsilon_{MC}$ )
- $L_{int}$  – 積分ルミノシティ

# ATLASミュオン検出器

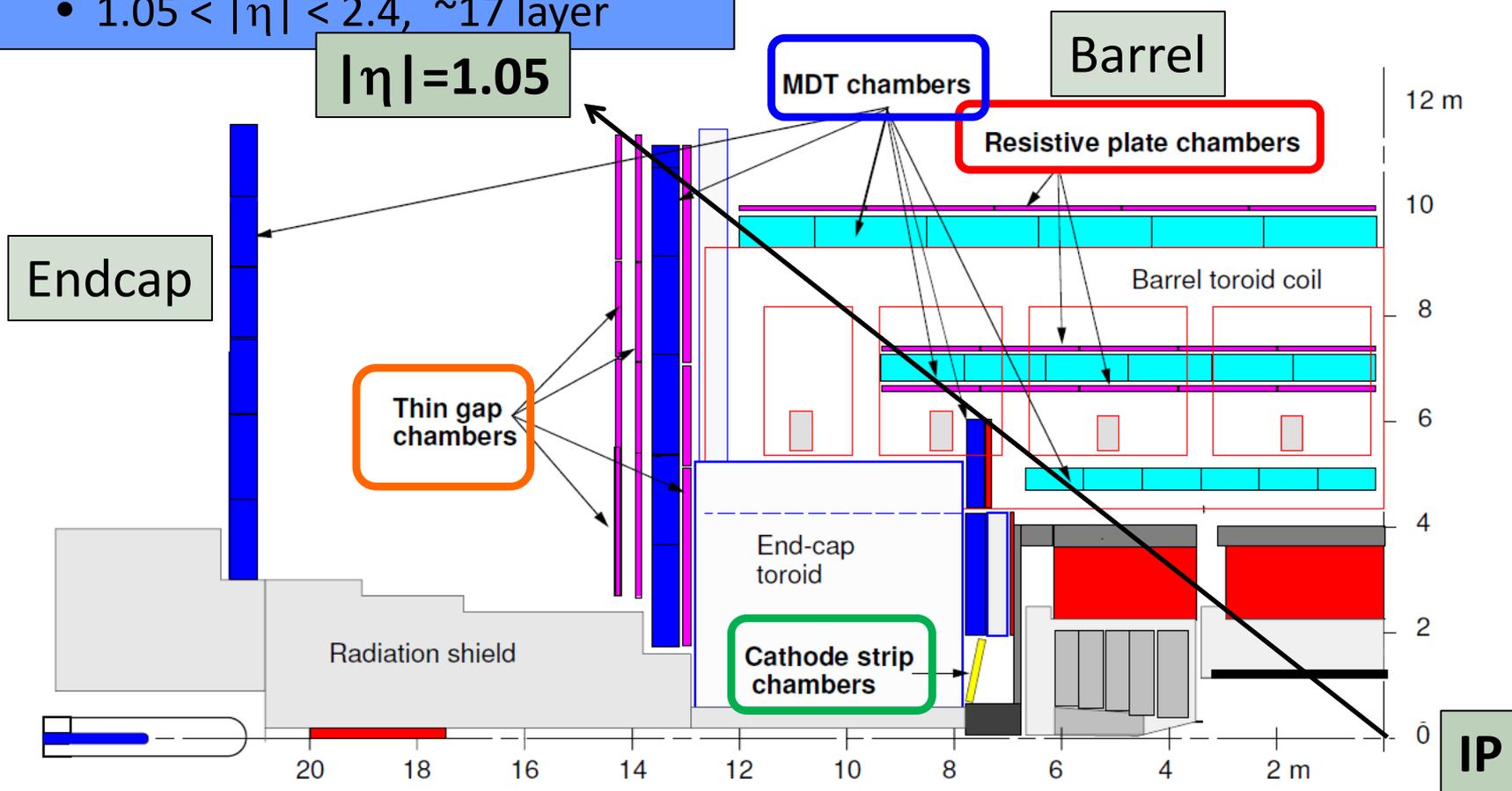
## トラッキング

- **Monitored Drift Tube (MDT)**
  - $|\eta| < 2.7$ , ~20 layer
- **Cathode Strip Chamber (CSC)**
  - $2.0 < |\eta| < 2.5$ , ~4 layer

## トリガー

- **Resistive Plate Chamber (RPC)**
  - $|\eta| < 1.05$ , ~12 layer
- **Thin Gap Chamber (TGC)**
  - $1.05 < |\eta| < 2.4$ , ~17 layer

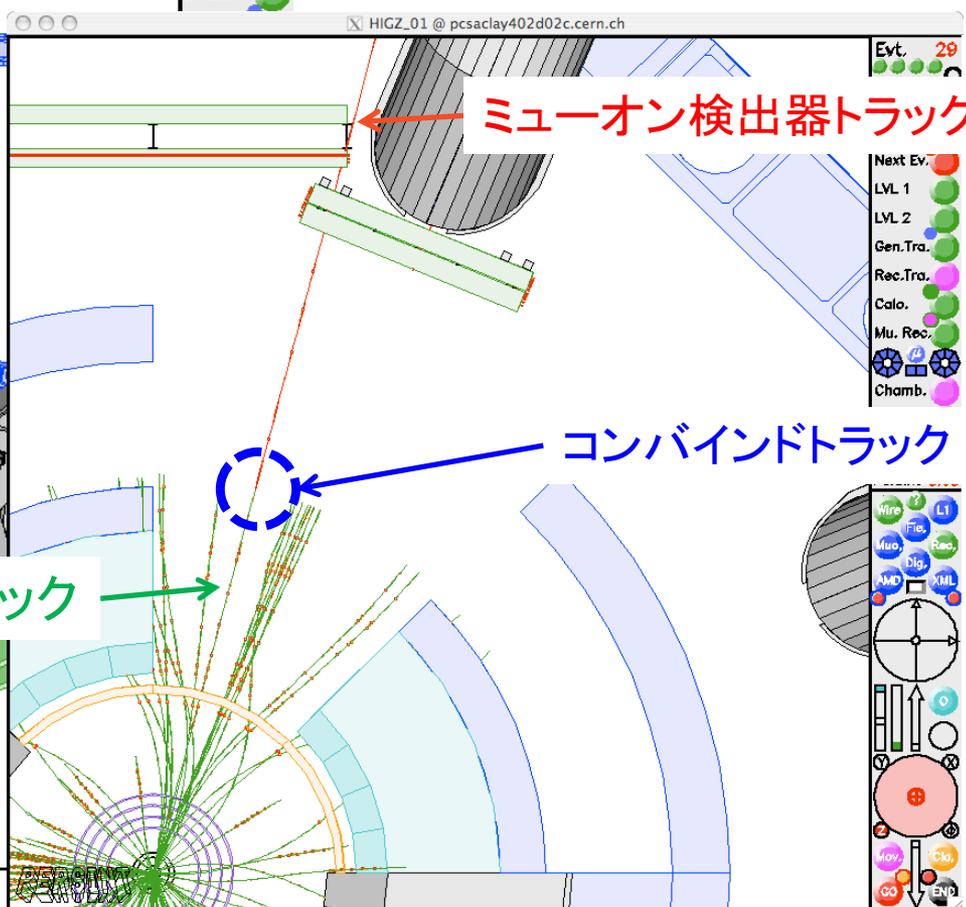
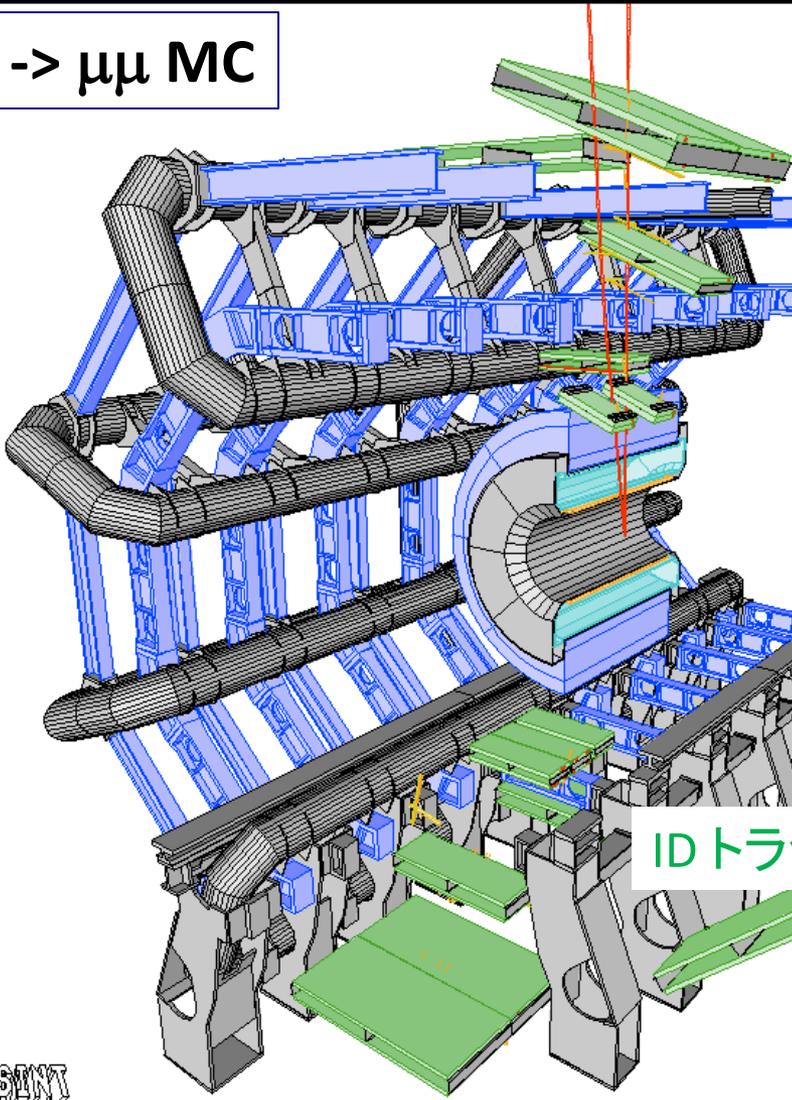
$|\eta| = 1.05$



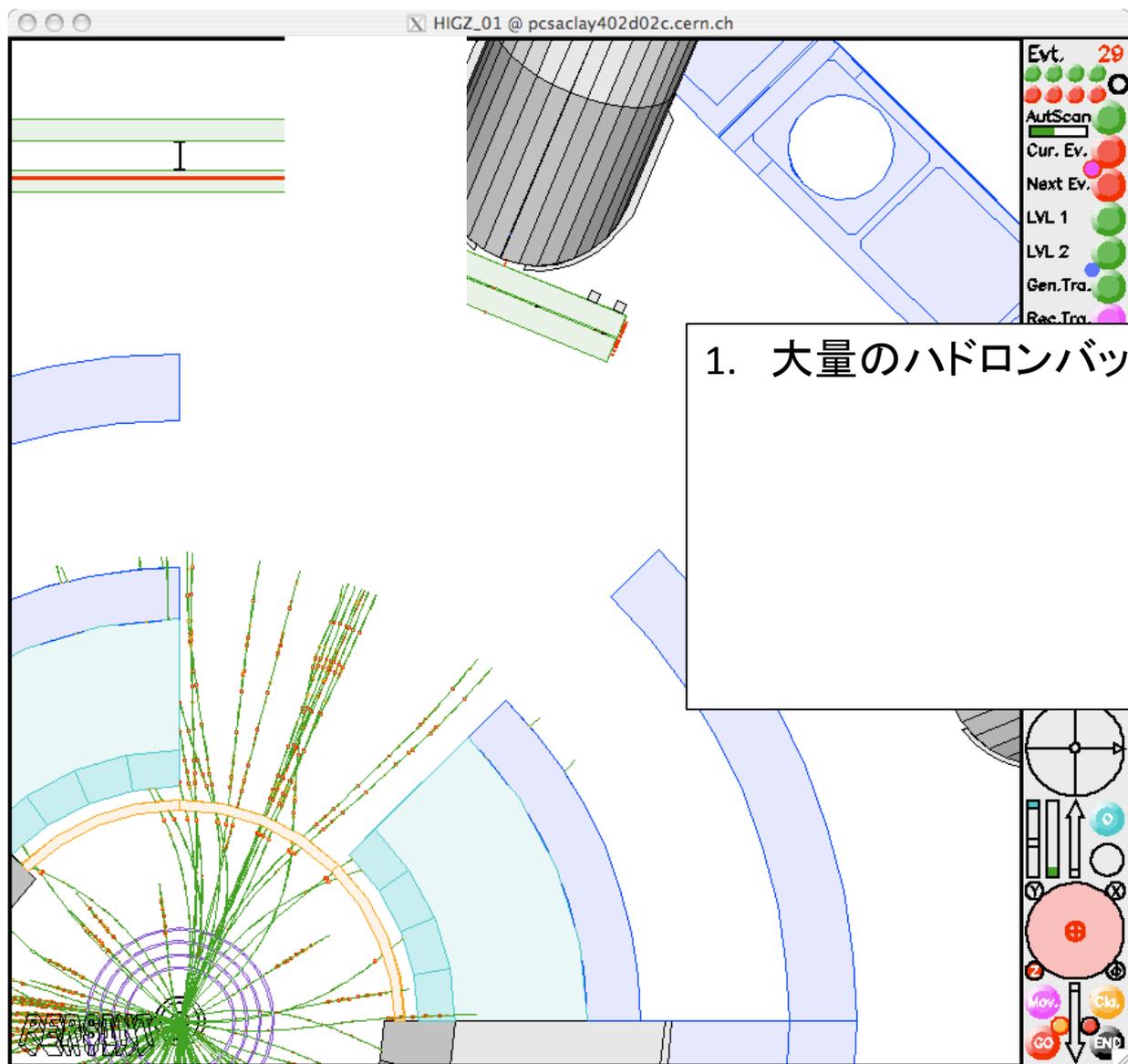
# ミュオントラッキング

tt ->  $\mu\mu$  MC

ミュオン検出器トラック  
+ 内部飛跡検出器 (ID) トラック  
→ **コンバインドトラック**

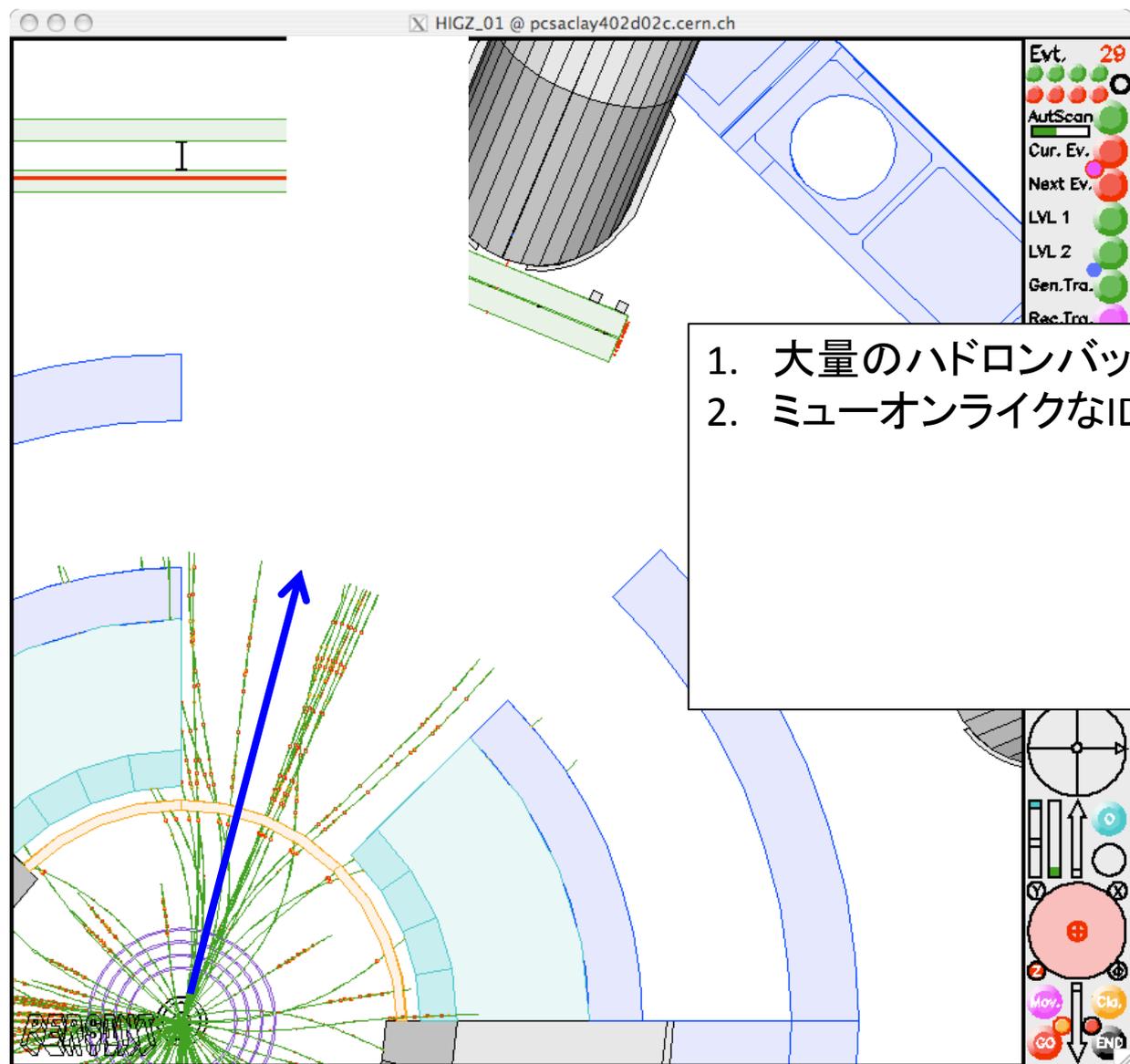


# ミュオントラッキング効率の評価

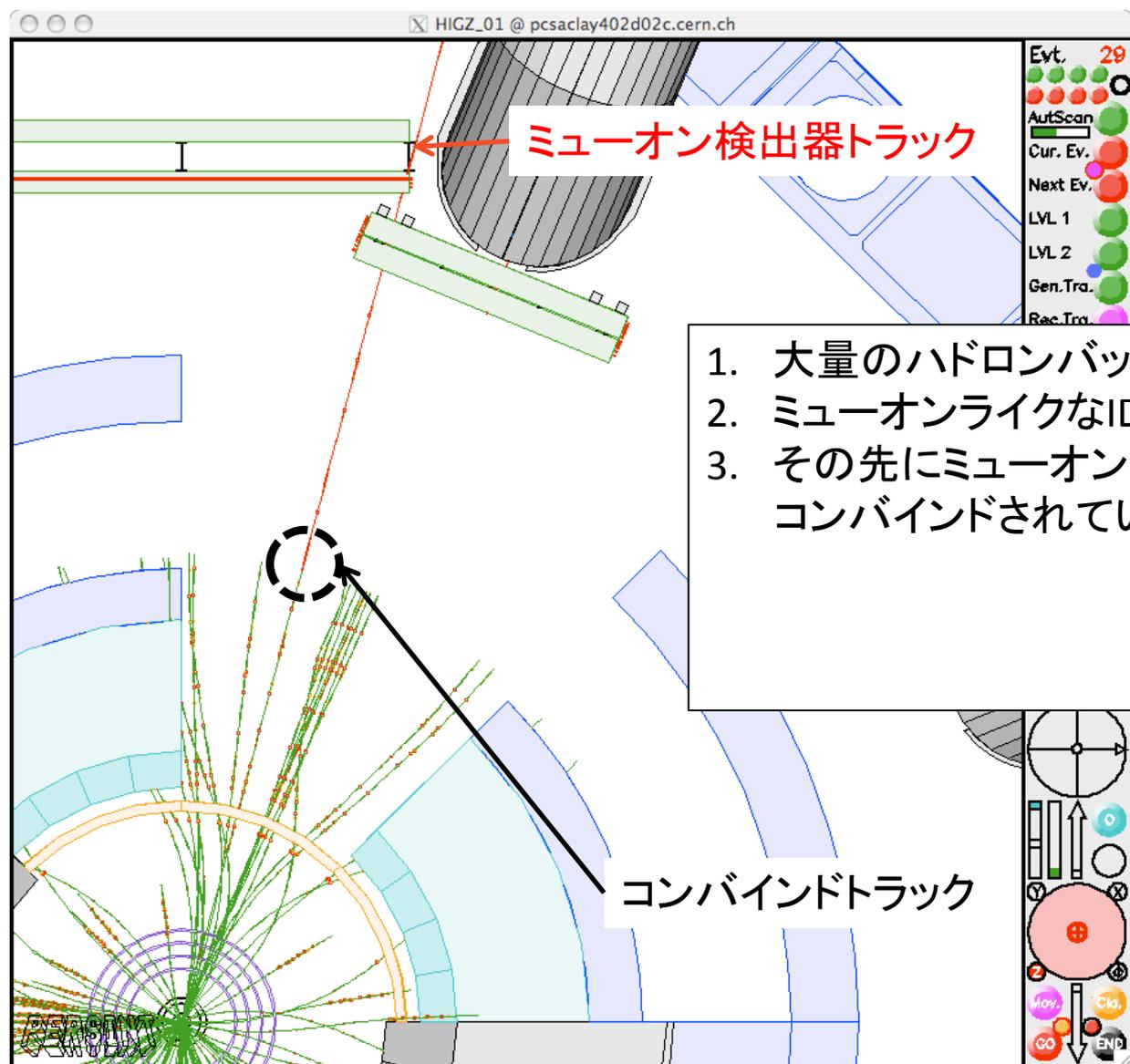


1. 大量のハドロンバックグラウンドトラック

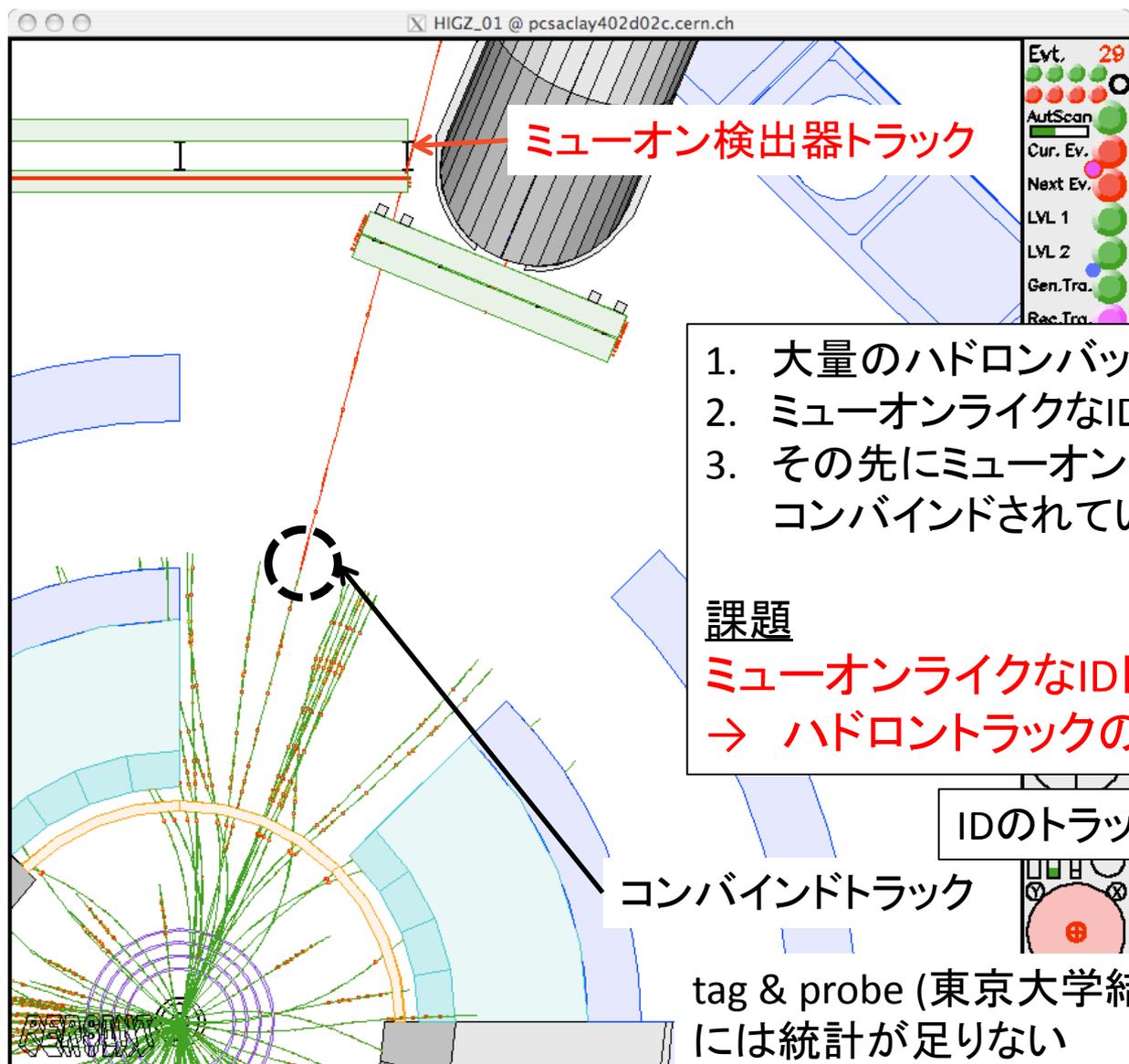
# ミュオントラッキング効率の評価



# ミュオントラッキング効率の評価



# ミュオントラッキング効率の評価



1. 大量のハドロンバックグラウンドトラック
2. ミュオンライクなIDトラックを選別する
3. その先にミュオン検出器のトラックがあるか、コンバインドされているか調べて、効率を評価

## 課題

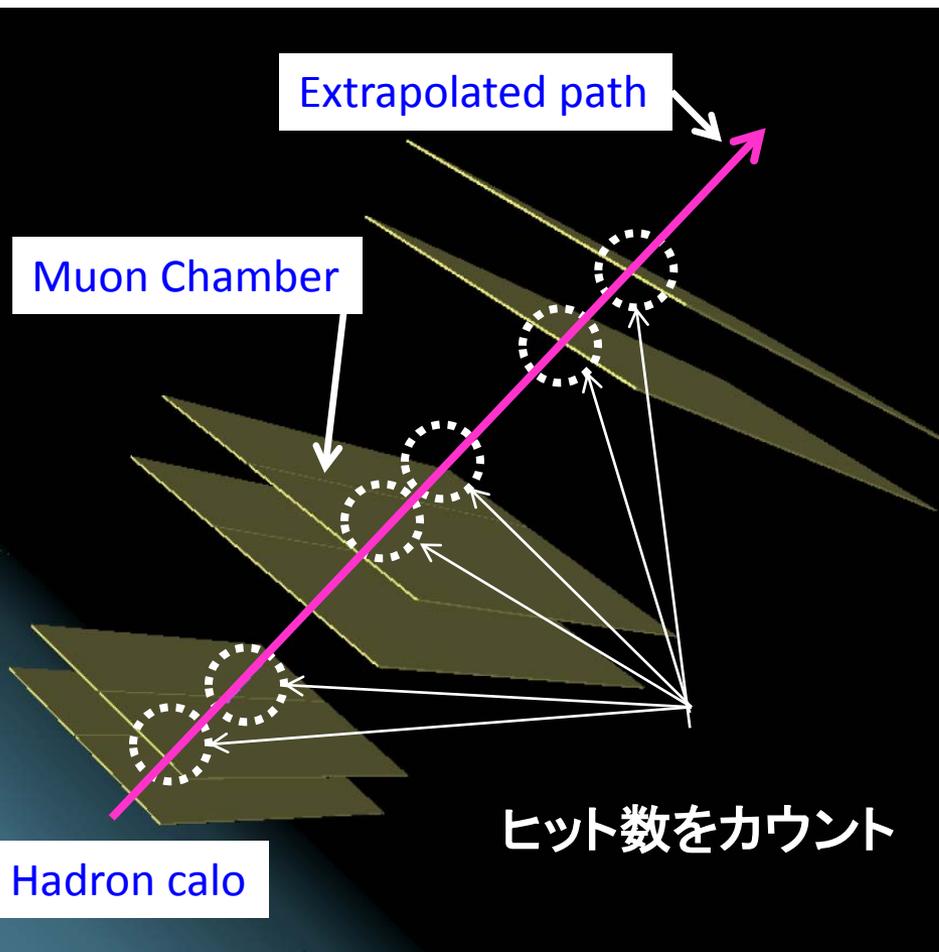
ミュオンライクなIDトラックの選別  
→ ハドロントラックの除去

IDのトラッキング効率は~100%を仮定

tag & probe (東京大学結束氏のトーク(13pSK2))  
には統計が足りない

# Muon Spectrometer (MS) hit method

ハドロンはカロリメータで吸収され、ミューオン検出器に届かない  
→ IDトラックの外挿先に、バイアスとならない範囲で**ミューオン検出器のヒット**を要求しバックグラウンドを除く



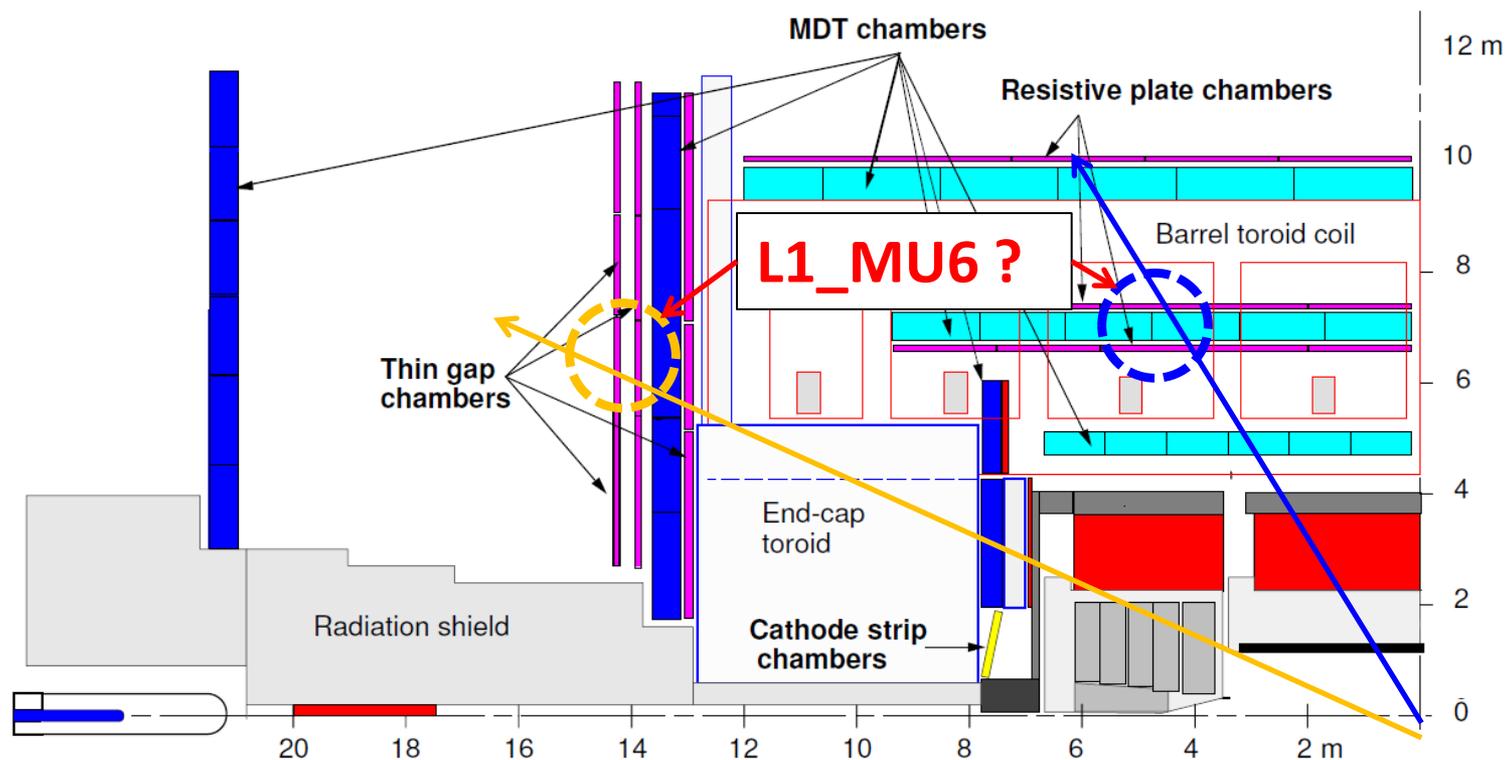
ハーバード大学のチームと共同研究

- 外挿先のMDTのヒット数をカウントするツールの開発 (2009年秋季大会11pSB3)
- 解析用Ntuple作成コードの実装

トラッキング効率 ( $p_T > 20 \text{ GeV}$ ):  
Data: 99.4 +/- 2.5 %  
**MC: 98.6 %**  
(解析では検出器を1ビンとして扱う)

# ミュオントリガー効率測定

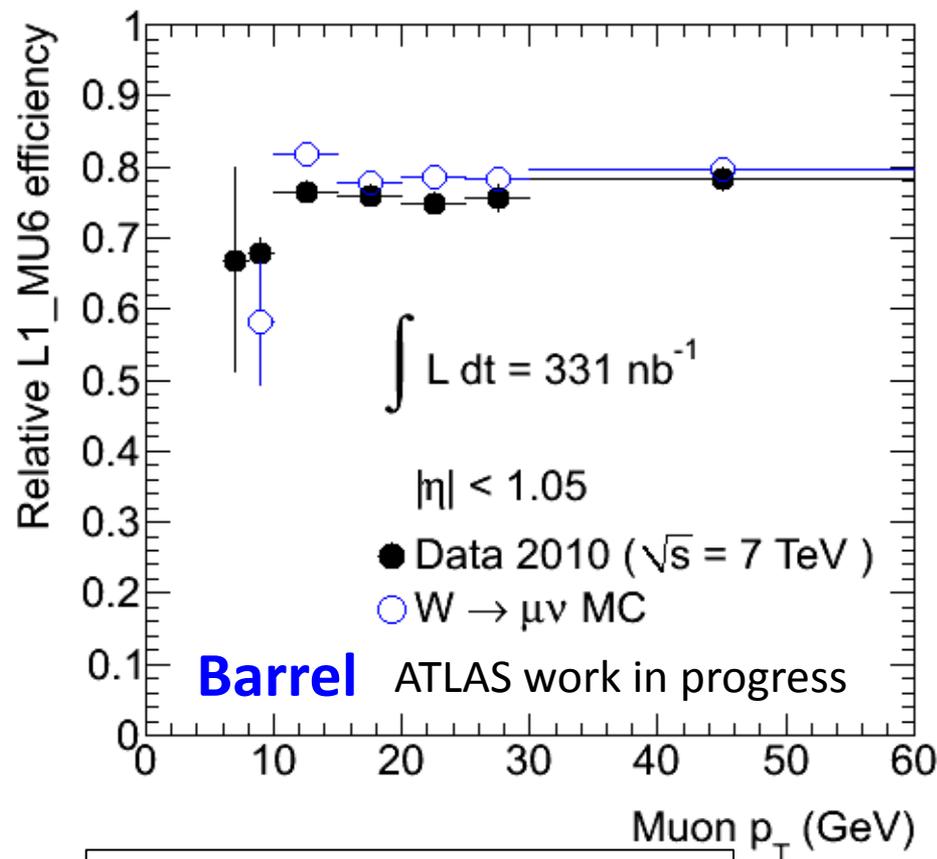
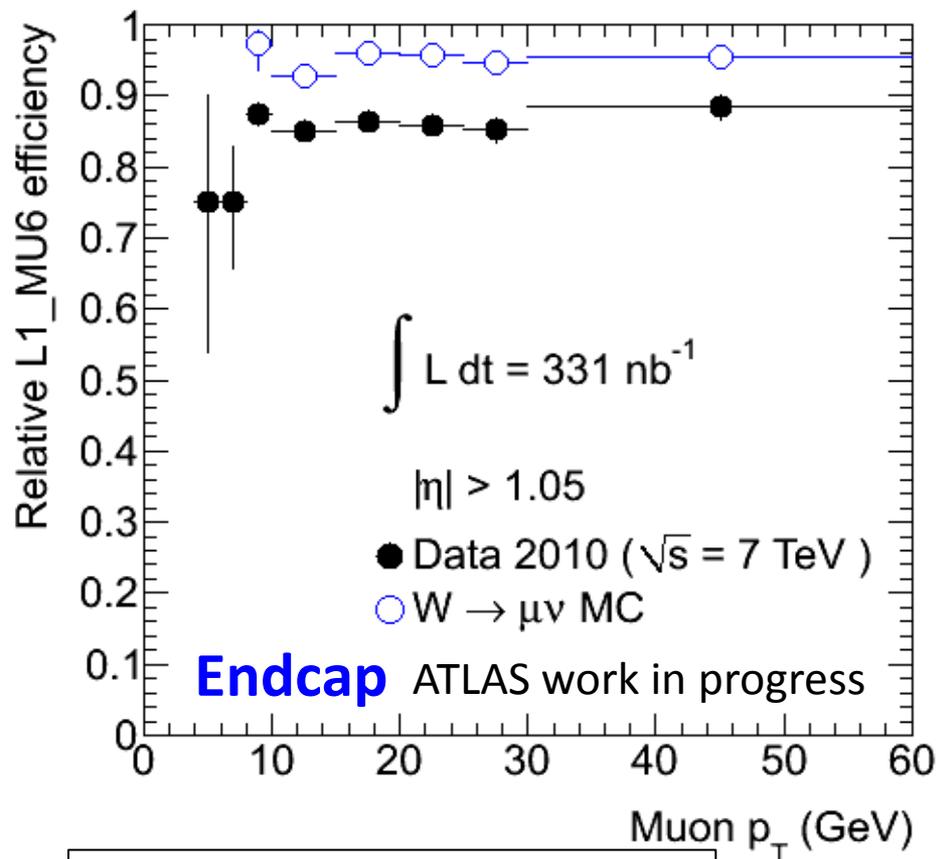
1. 再構成されたミュオンをトリガー検出器へ外挿
2. 外挿先でL1\_MU6 ( $p_T$  閾値 6 GeV のレベル1ミュオントリガー) が鳴っているか判定



- W / Z 解析の予事象選択と同じクオリティ(後述)のミュオン選抜
- イベントに**ジェットトリガー**を要求、バイアスを排除

# ミューオントリガー効率

- Endcap – Barrelの2ビン
- 20GeV以上の効率をW / Z の解析に使用

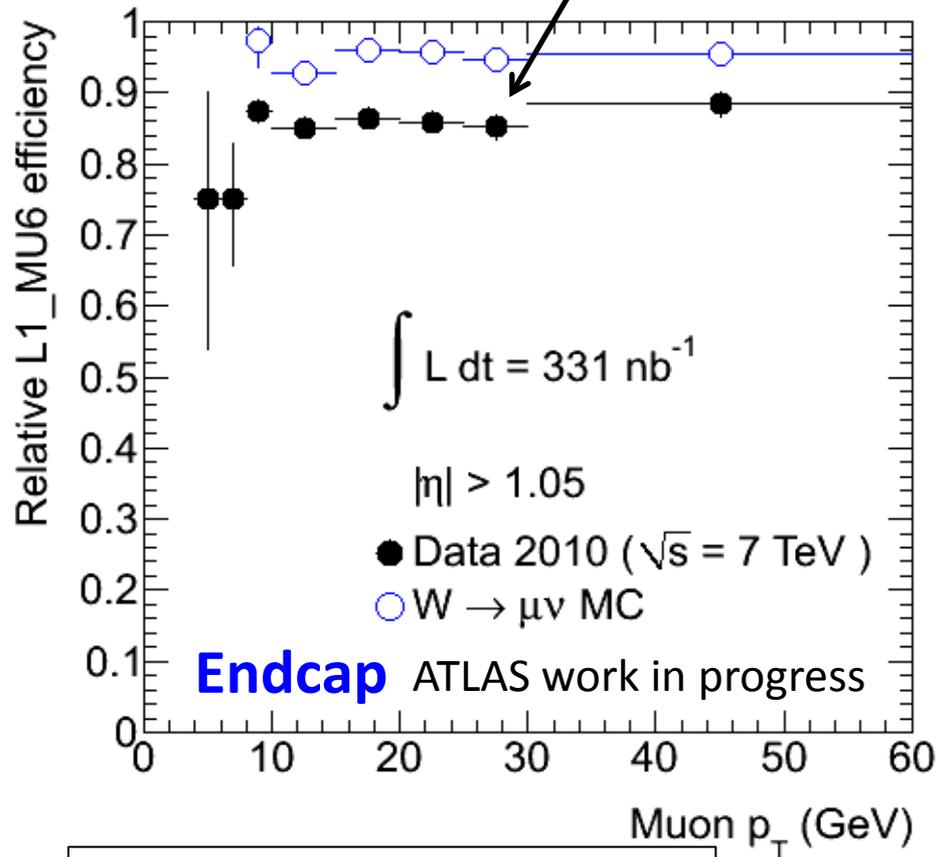


トリガー効率 ( $p_T > 20\text{GeV}$ ):  
 Data:  $86.3 \pm 2.2\%$   
 MC:  $95.1 \pm 0.2\%$

トリガー効率 ( $p_T > 20\text{GeV}$ ):  
 Data :  $76.0 \pm 2.0\%$   
 MC:  $79.2 \pm 0.3\%$

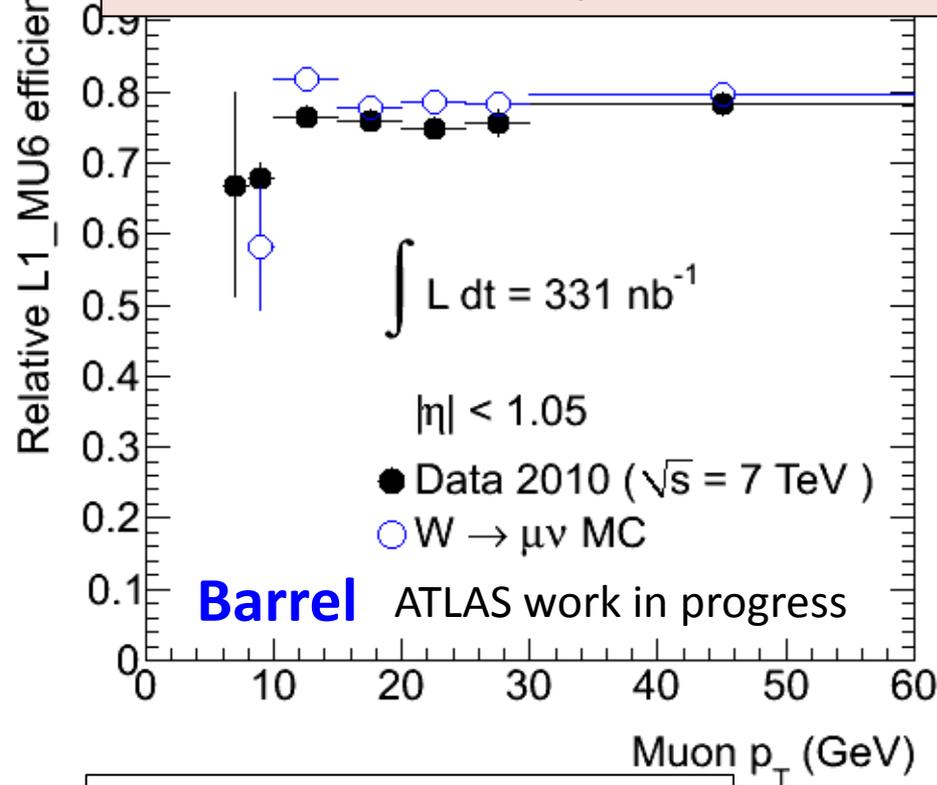
# ミューオントリガー効率

名古屋大学杉本氏のトーク(14pSM-9)



トリガー効率 ( $p_T > 20\text{GeV}$ ):  
 Data:  $86.3 \pm 2.2\%$   
 MC:  $95.1 \pm 0.2\%$

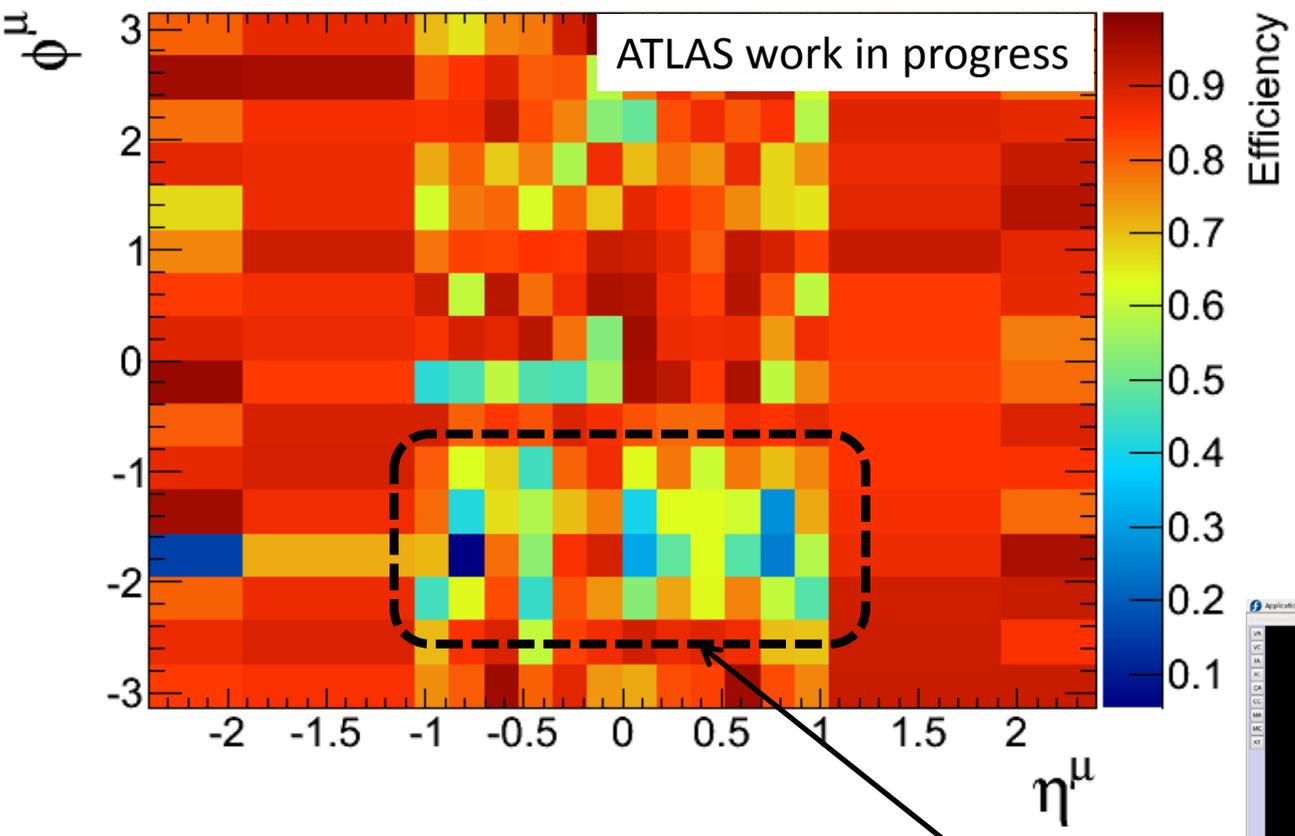
Geometrical acceptance  $\sim 80\%$



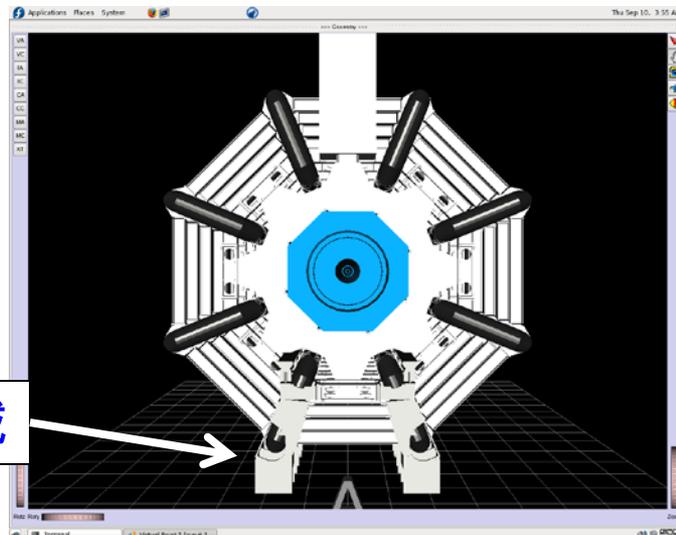
トリガー効率 ( $p_T > 20\text{GeV}$ ):  
 Data :  $76.0 \pm 2.0\%$   
 MC:  $79.2 \pm 0.3\%$

# ミューオントリガー効率

トリガー効率 ( $p_T > 15\text{GeV}$ )



“足”の領域



## ここまで

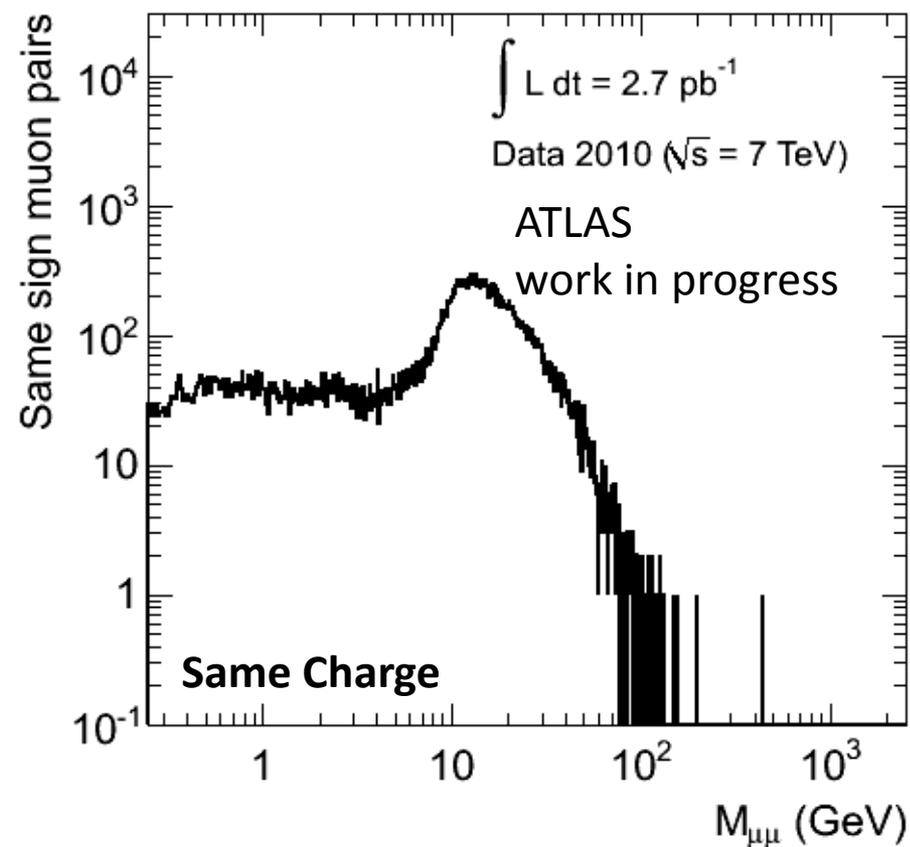
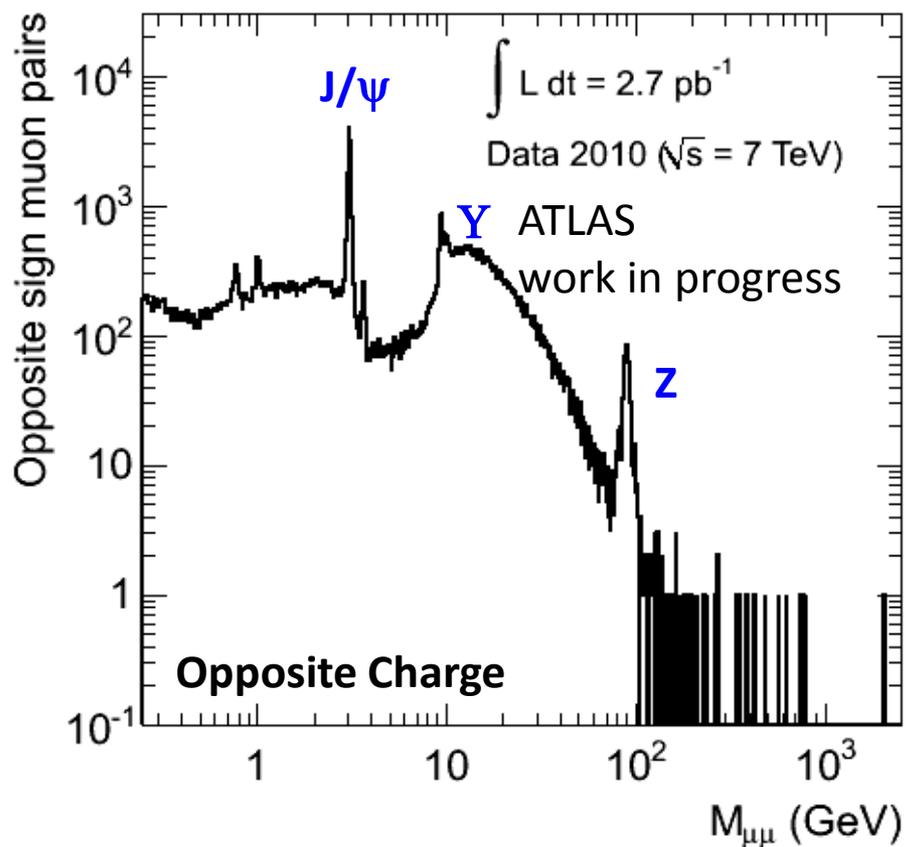
- $300 \text{ nb}^{-1}$ でのミュオン検出器の性能評価
    - トラッキング効率:  $99.4 \pm 2.5 \%$  (Data),  $98.6 \%$  (MC)
    - トリガー効率: Endcap -  $86.3 \pm 2.2\%$  (Data),  $95.1 \pm 0.2 \%$  (MC)  
: Barrel -  $76.0 \pm 2.0\%$  (Barrel),  $79.2 \pm 0.3 \%$  (MC)
- 性能の理解も進んでいる

## ここから

- W / Z 信号事象の分布、MCとの比較
  - 8月末までに取得された( $\sim 2.7 \text{ pb}^{-1}$ )の統計での結果 (very preliminary)
  - データ取得期間中のトラッキング、トリガー効率は未評価 (評価用データセットのプロダクションが未完了)
  - 分布はイベント数で規格化
- 断面積の計算結果
  - $300 \text{ nb}^{-1}$ での結果

# ミューオン対不変質量分布

- $2.7 \text{ pb}^{-1}$ , 全ミューオン対不変質量分布
- $p_T^{\text{CO}} > 6 \text{ GeV}$ ,  $p_T^{\text{ID}} > 4.0 \text{ GeV}$ ,  $p_T^{\text{MS}} > 2.5 \text{ GeV}$



## 衝突事象選別

### 陽子陽子衝突事象の選別

- Good Run Quality
- colliding beam crossing bunch
- L1\_MU6 trigger
- primary vertex ( # tracks ≥ 3 )
- $|Z_{pV}| < 150\text{mm}$

## 予事象選別

- combined muon
- $|\eta| < 2.4$
- $|Z_0 - Z_{pV}| < 10\text{mm}$
- $|p_T^{\text{ms}} - p_T^{\text{ID}}| < 15\text{ GeV}$
- $p_T^{\text{ms}} > 10\text{ GeV}$
- $p_T^{\text{comb}} > 15\text{ GeV}$

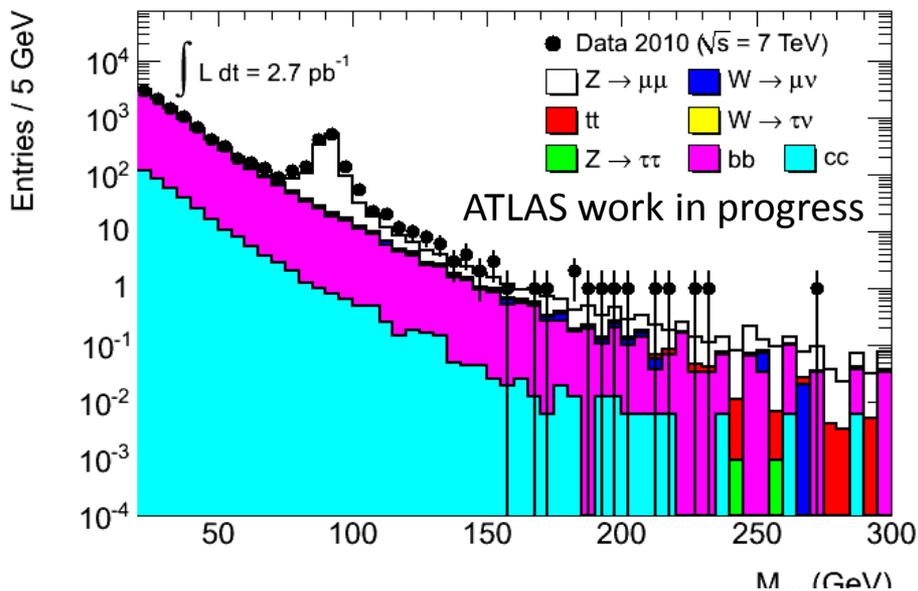
### Isolateした異電荷ミュオン対の選別

## Z → μμ 事象選別

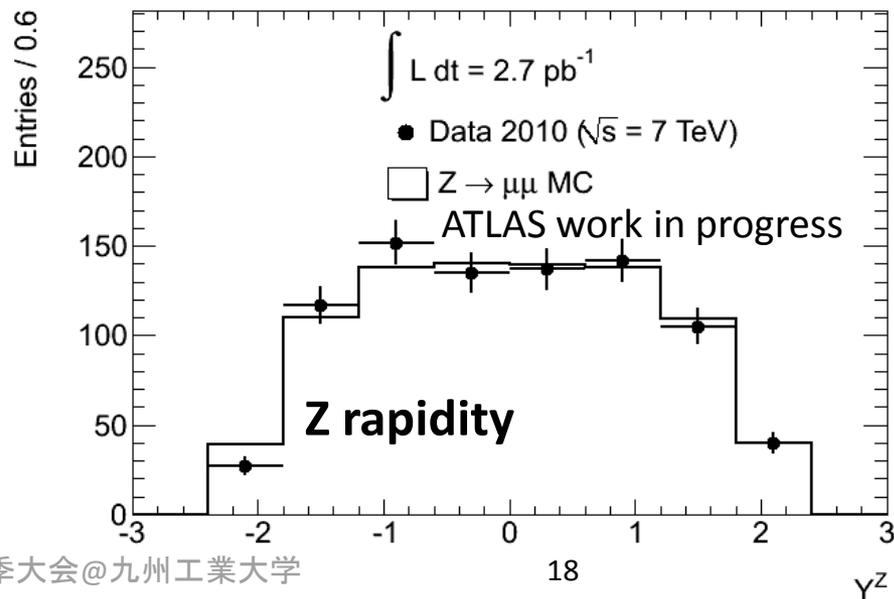
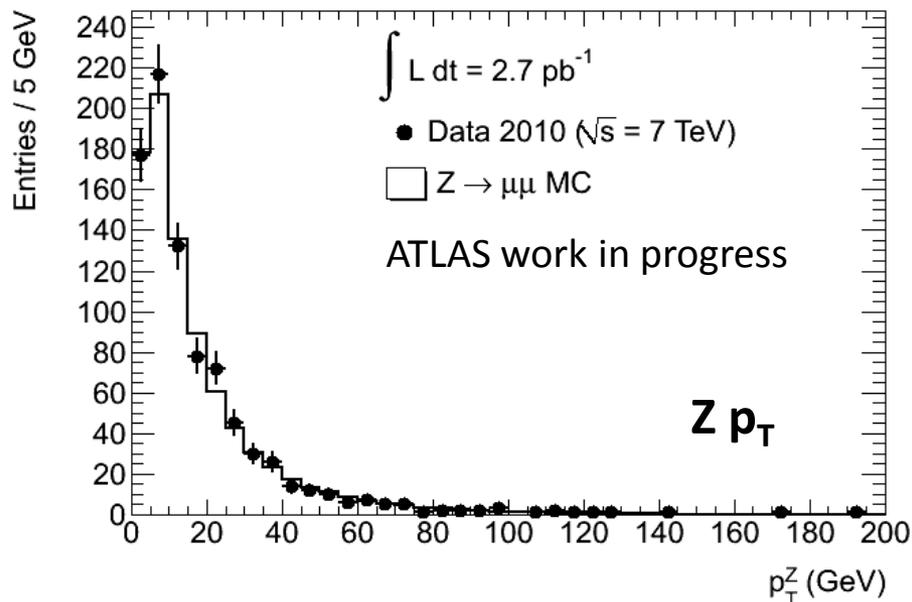
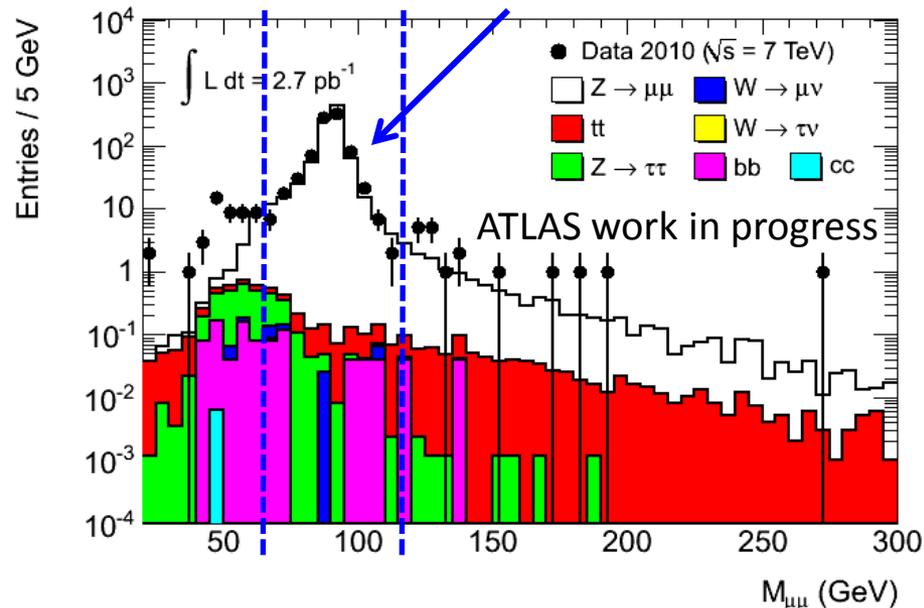
- $p_T^{\text{comb}} > 20\text{ GeV}$ ,  $|\eta| < 2.4$  for both muons
- Muon Quality  
(High  $p_T$  selection for both muons)
- $\Sigma p_T^{\text{ID}} / p_T^{\text{comb}} < 0.2$  (cone DR = 0.4)
- opposite charge
- **$66 < M_{\mu\mu} < 116\text{ GeV}$**

横運動量が高く、クオリティの良い (decay in flight でない)  
ミュオンを含む事象の選別

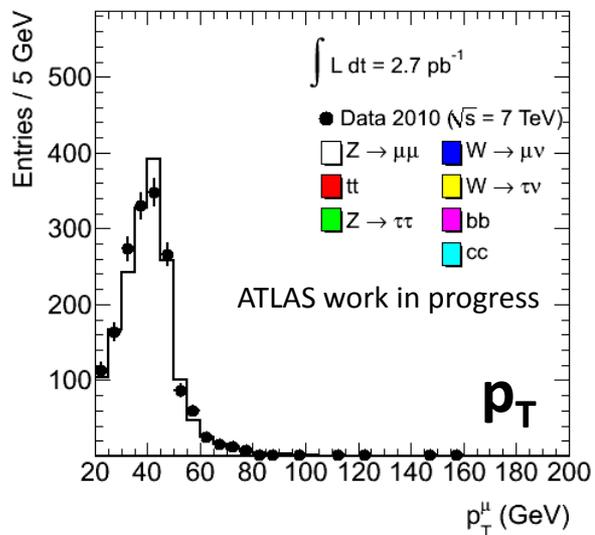
予事象選別後



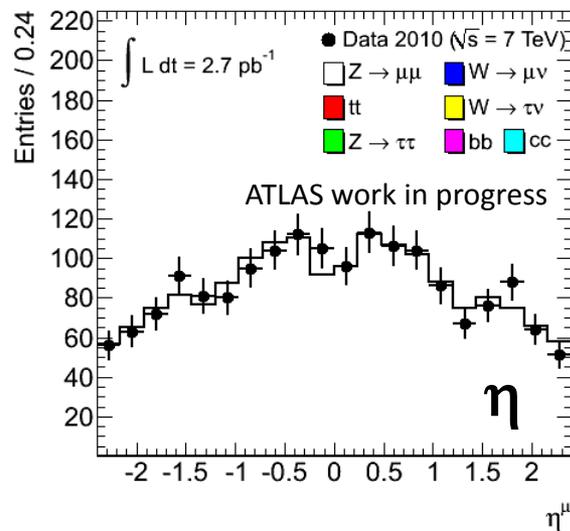
不変質量以外のカット 855 Z事象



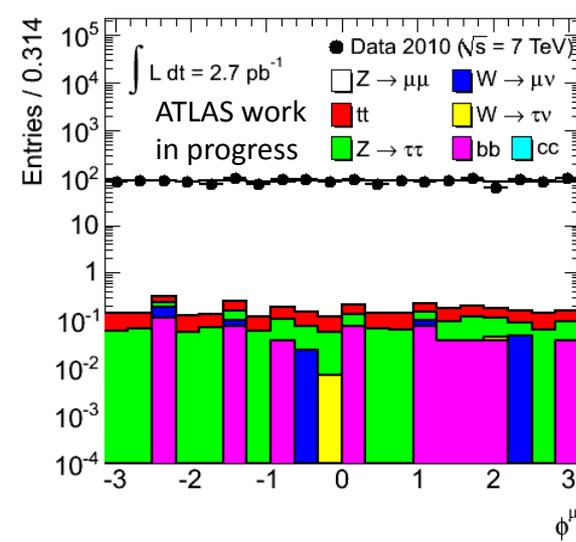
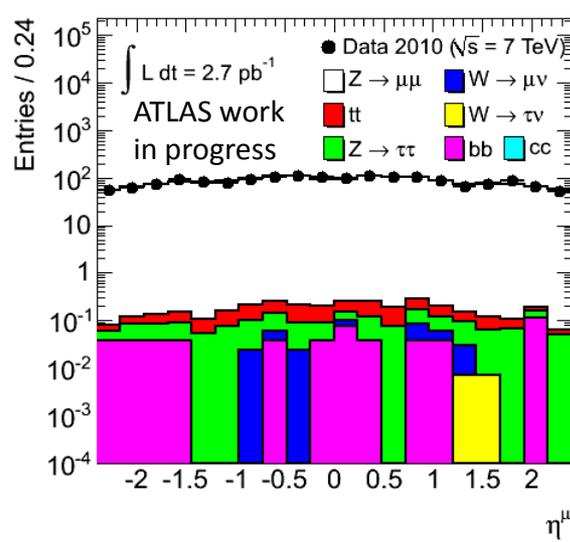
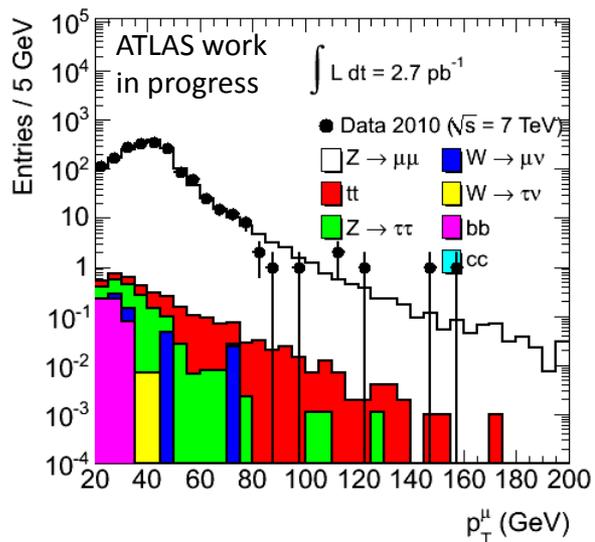
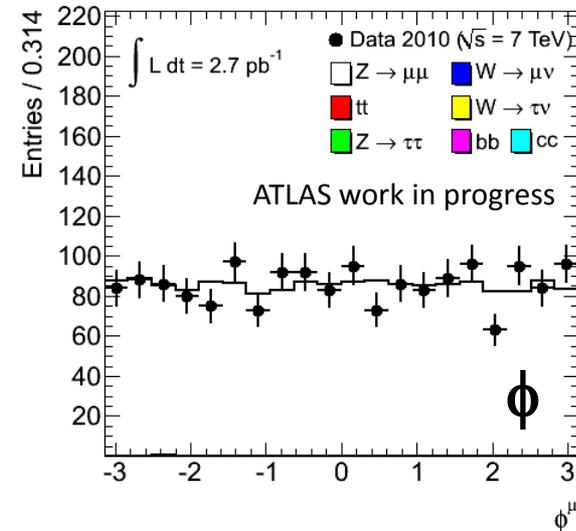
全カット後



全カット後



全カット後



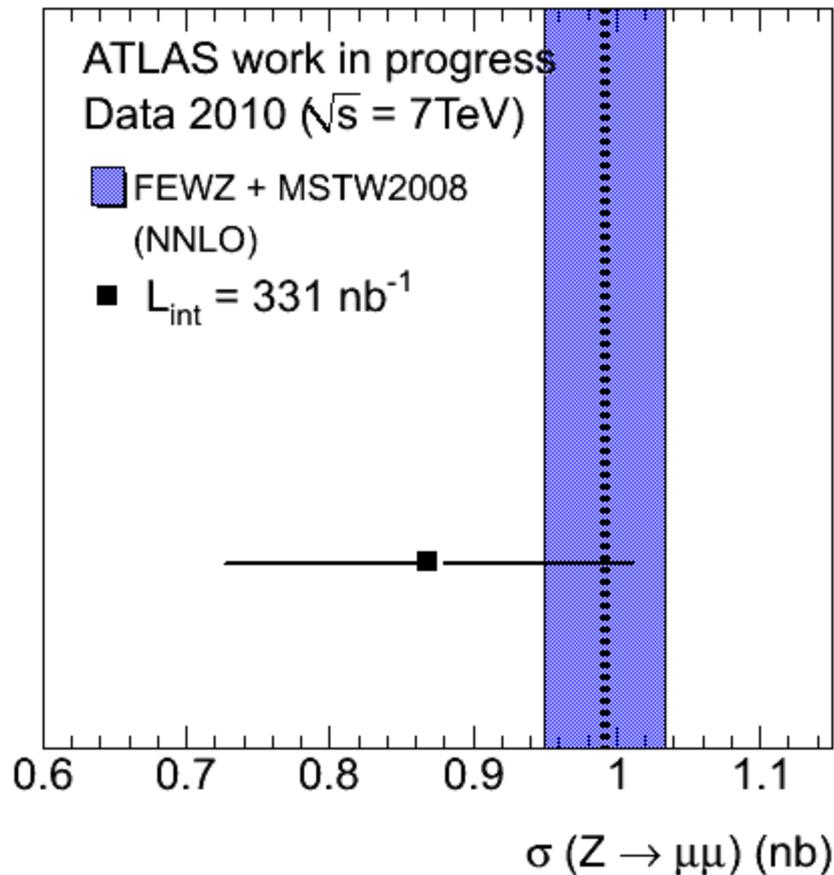
# Z → μμ 断面積計算 (300 nb<sup>-1</sup>)

$$\bullet (Z \rightarrow \mu\mu) = \frac{N_{yeild} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot SF_{reco} \cdot SF_{trig} \cdot L_{int}}$$

sample	# of events
tt	0.108 +/- 0.010
Z → ττ	0.087 +/- 0.007
W → μν	0.014 +/- 0.007
bb	0.038 +/- 0.041
N <sub>bg</sub>	<b>0.247 +/- 0.47</b>
N <sub>yeild</sub>	<b>109</b>

- A: 0.486 +/- 0.014
- C: 0.773 +/- 0.048  
(SF<sub>reco</sub>, SF<sub>trig</sub> corrected)
- L<sub>int</sub>: 331 +/- 36 .4nb<sup>-1</sup>

ATLAS work in progress



- = 0.87 +/- 0.08 (stat.) +/- 0.06 (syst.) +/- 0.10 (lumi.) nb.
- = 0.989 + 0.045 - 0.039 nb. (NNLO: FEWZ + MSTW2008)

## 衝突事象選別

### 陽子陽子衝突事象の選別

- Good Run Quality
- Colliding beam crossing bunch
- **Jet cleaning**
- L1\_MU6 trigger
- primary vertex ( # tracks ≥ 3 )
- $|Z_{PV}| < 150\text{mm}$

## 予事象選別

- combined muon
- $|\eta| < 2.4$
- $|Z_0 - Z_{PV}| < 10\text{mm}$
- $|p_T^{ms} - p_T^{ID}| < 15\text{ GeV}$
- $p_T^{ms} > 10\text{ GeV}$
- $p_T^{comb} > 15\text{ GeV}$

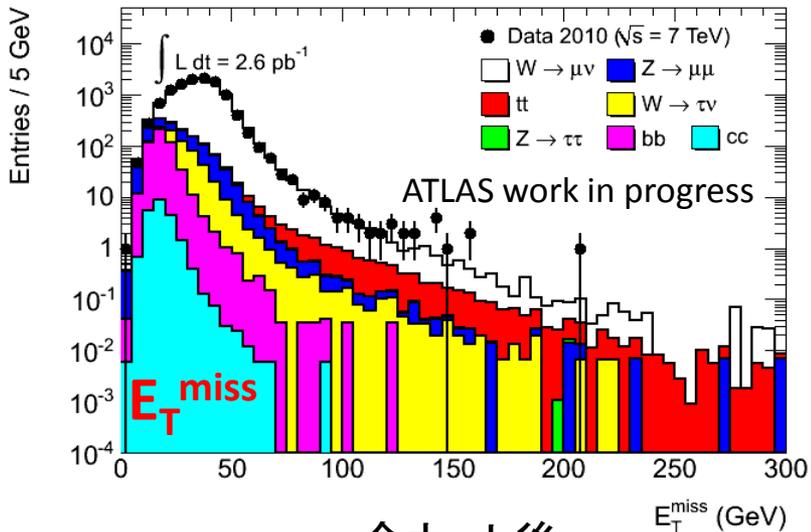
Isolateしたミュオン  
大きなmissing  $E_T$

## W → μν 事象選別

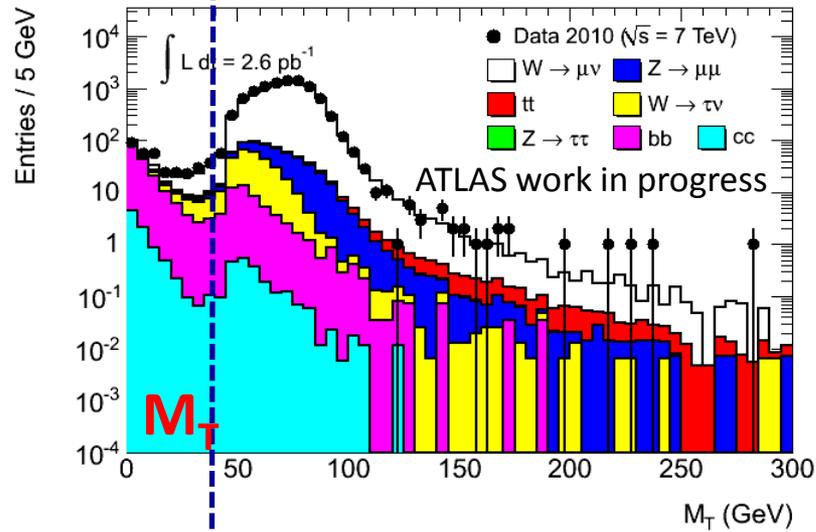
- $p_T^{comb} > 20\text{ GeV}, |\eta| < 2.4$
- $\Sigma p_T^{ID} / p_T^{comb} < 0.2$  (cone DR = 0.4)
- $E_T^{miss} > 25\text{ GeV}$
- **$M_T > 40\text{ GeV}$**

横運動量が高く、クオリティの良い (decay in flight でない)  
ミュオンを含む事象の選別

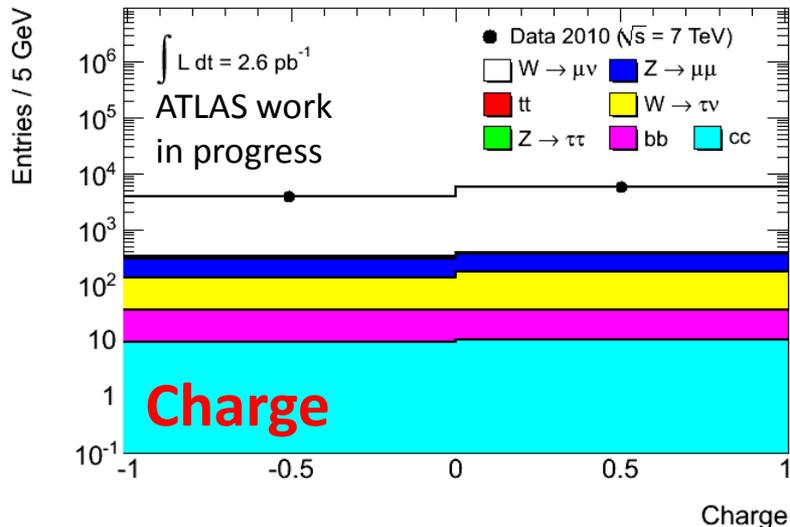
$E_T^{\text{miss}}$  以外のカット



$M_T$  以外のカット



全カット後

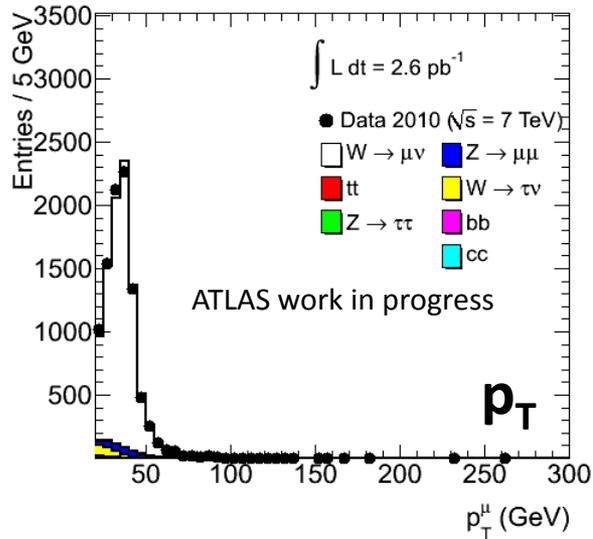


$W \rightarrow \mu\nu$  事象数 = 9365

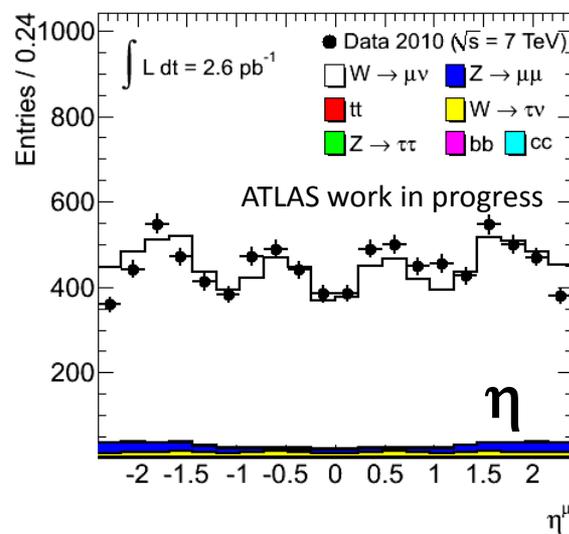
$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu$  事象数 = 5669

$W^- \rightarrow \mu^- \nu$  事象数 = 3696

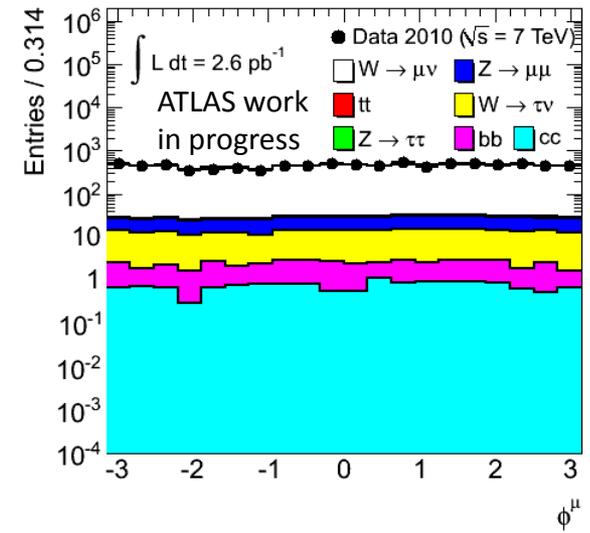
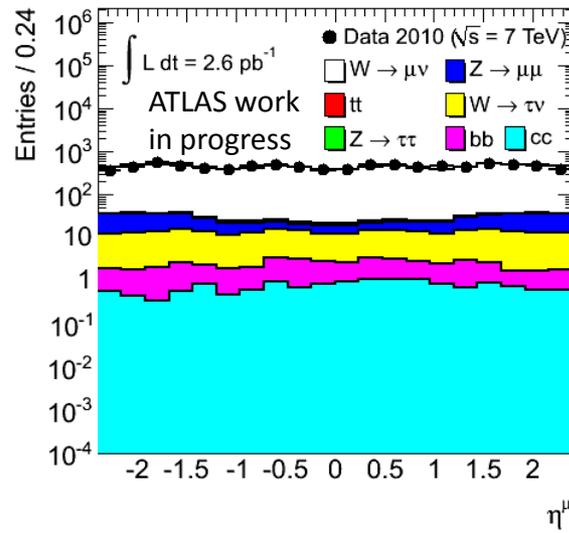
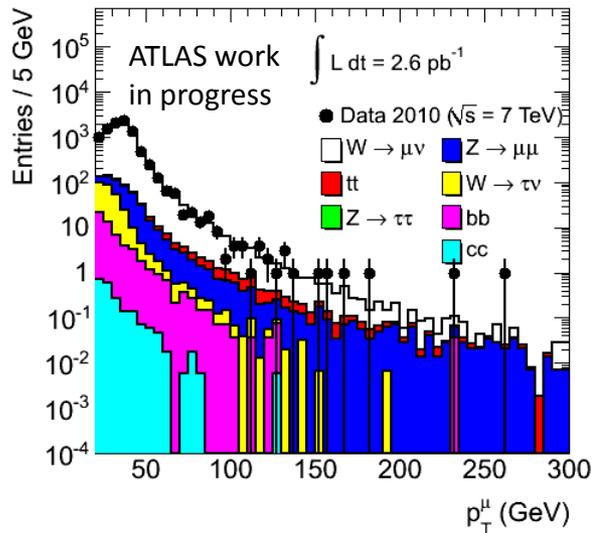
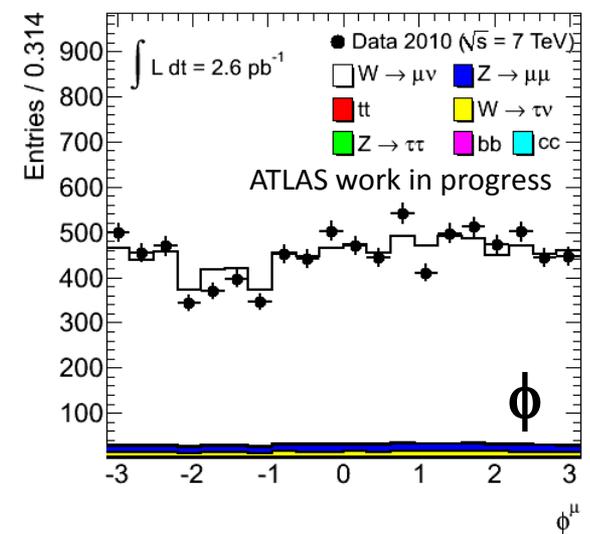
全カット後



全カット後



全カット後



$$\bullet (W \rightarrow \mu\nu) = \frac{N_{yeild} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot SF_{reco} \cdot SF_{trig} \cdot L_{int}}$$

Sample	W	W+	W-
Z → μμ	40.7 +/- 2.6	21.2 +/- 1.4	19.4 +/- 1.3
W → τν	31.8 +/- 2.0	18.6 +/- 1.2	13.2 +/- 0.9
Z → ττ	1.4 +/- 0.1	0.7 +/- 0.0	0.7 +/- 0.0
tt	4.3 +/- 0.3	2.2 +/- 0.2	2.1 +/- 0.2
QCD	21.1 +/- 9.8	11.1 +/- 5.4	10.1 +/- 4.8
total BG	99.3 +/- 11.0	53.8 +/- 5.7	45.5 +/- 4.8
signal yield	1181	709	472

- A: 0.480 +/- 0.014 (W), 0.484 +/- 0.015 (W+), 0.474 +/- 0.014 (W-)
- C: 0.758 +/- 0.031 (W), 0.765 +/- 0.031 (W+), 0.748 +/- 0.030 (W-)  
(SF<sub>reco</sub>, SF<sub>trig</sub> corrected)
- L<sub>int</sub>: 310 +/- 34.1 nb<sup>-1</sup>

ATLAS work in progress

- σ (W) = 9.59 +/- 0.30 (stat.) +/- 0.50 (syst.) +/- 1.06 (lumi.) nb.
- σ (W+) = 5.71 +/- 0.23 (stat.) +/- 0.29 (syst.) +/- 0.63 (lumi.) nb.
- σ (W-) = 3.88 +/- 0.20 (stat.) +/- 0.20 (syst.) +/- 0.43 (lumi.) nb.

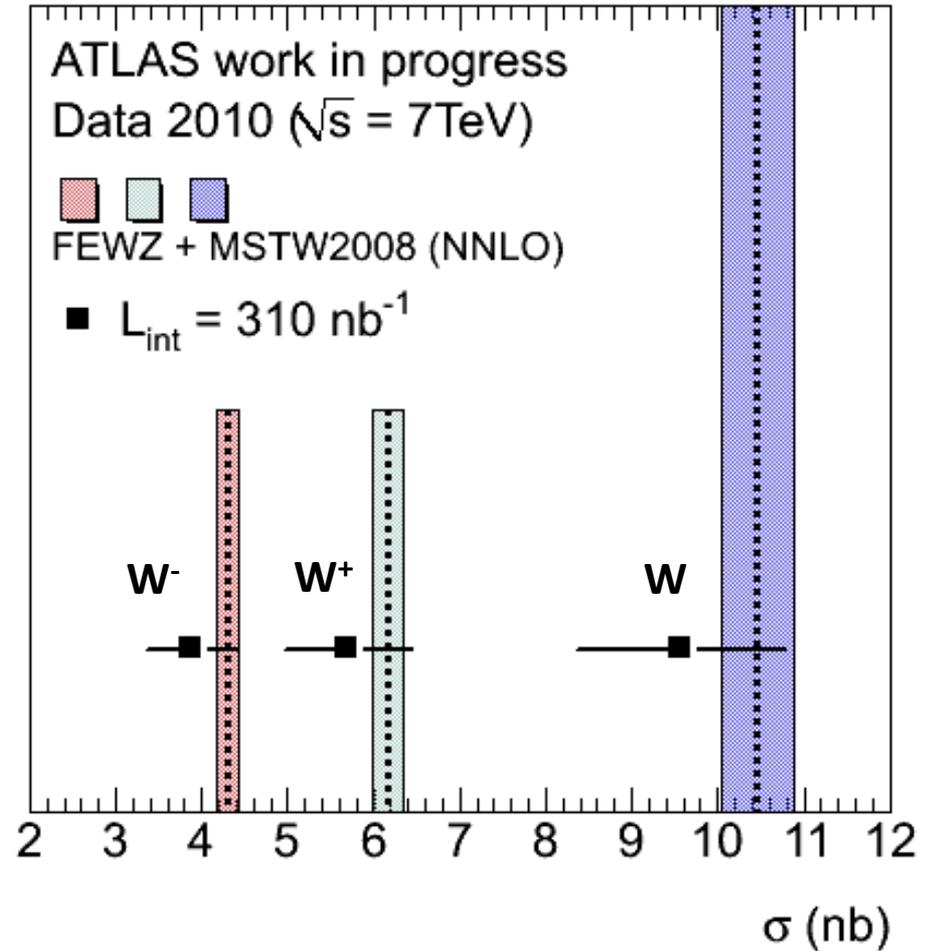
# $W \rightarrow \mu\nu$ 断面積計算 ( $300 \text{ nb}^{-1}$ )

NNLO (FEWZ + MSTW2008)

$$\sigma(W) = 10.46 \pm 0.42 \text{ nb}$$

$$\sigma(W^+) = 6.16 \pm 0.18 \text{ nb}$$

$$\sigma(W^-) = 4.30 \pm 0.13 \text{ nb (NNLO)}$$

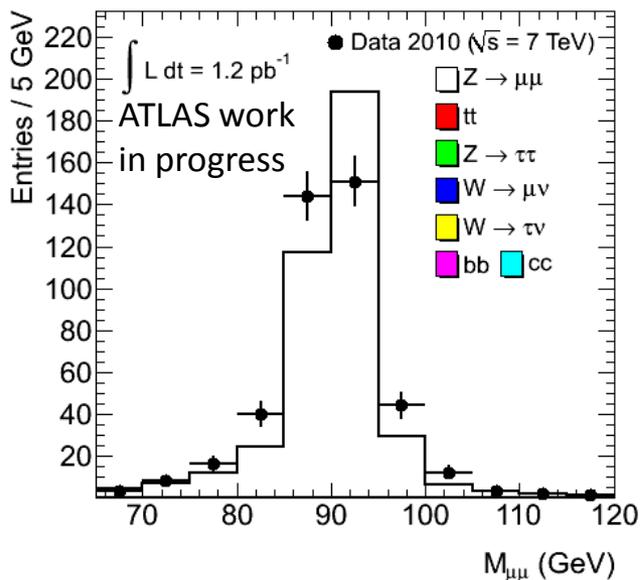


# Z tag & probe

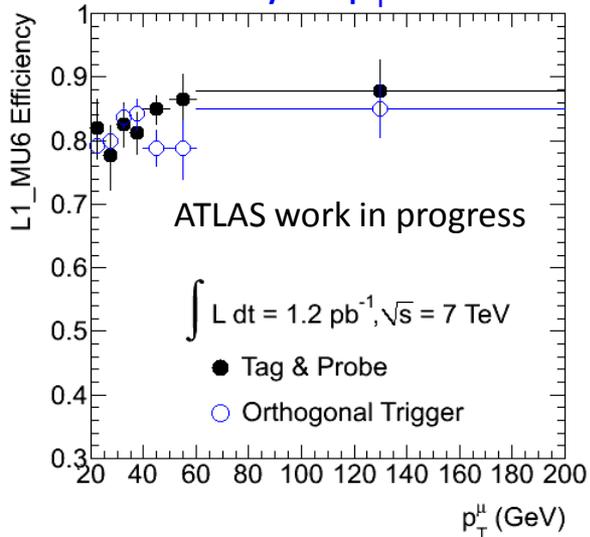
- tag & probeによる性能評価スタート！
- $1.2 \text{ pb}^{-1}$ , 424 Z's = 848トラック

## tag & probe

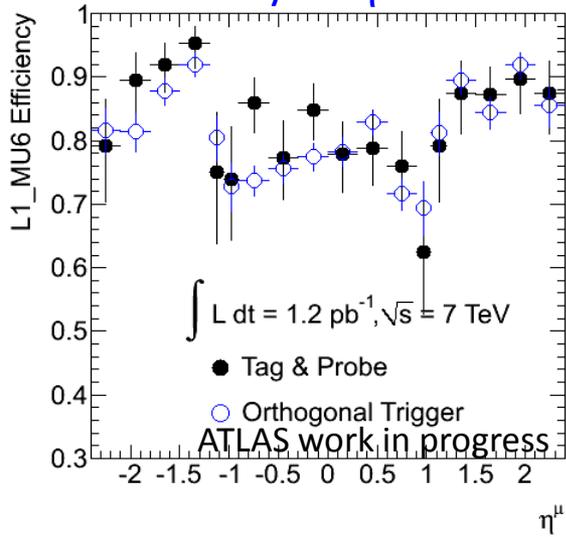
- Zの質量ピーク下のトラック対をミュオンと同定、トリガー、トラッキング効率の評価
- 精密な測定(バックグラウンド、バイアスが小さい)
- が、統計が少ない(ATLAS実験では  $400 \text{ Z's} / \text{pb}^{-1}$ )



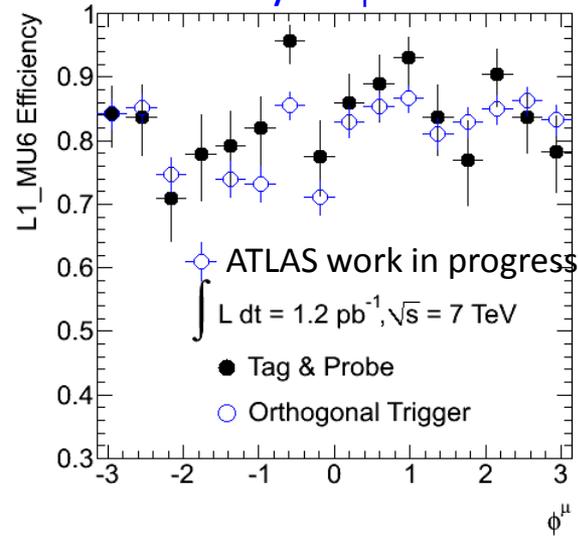
## efficiency vs $p_T$



## efficiency vs $\eta$



## efficiency vs $\phi$



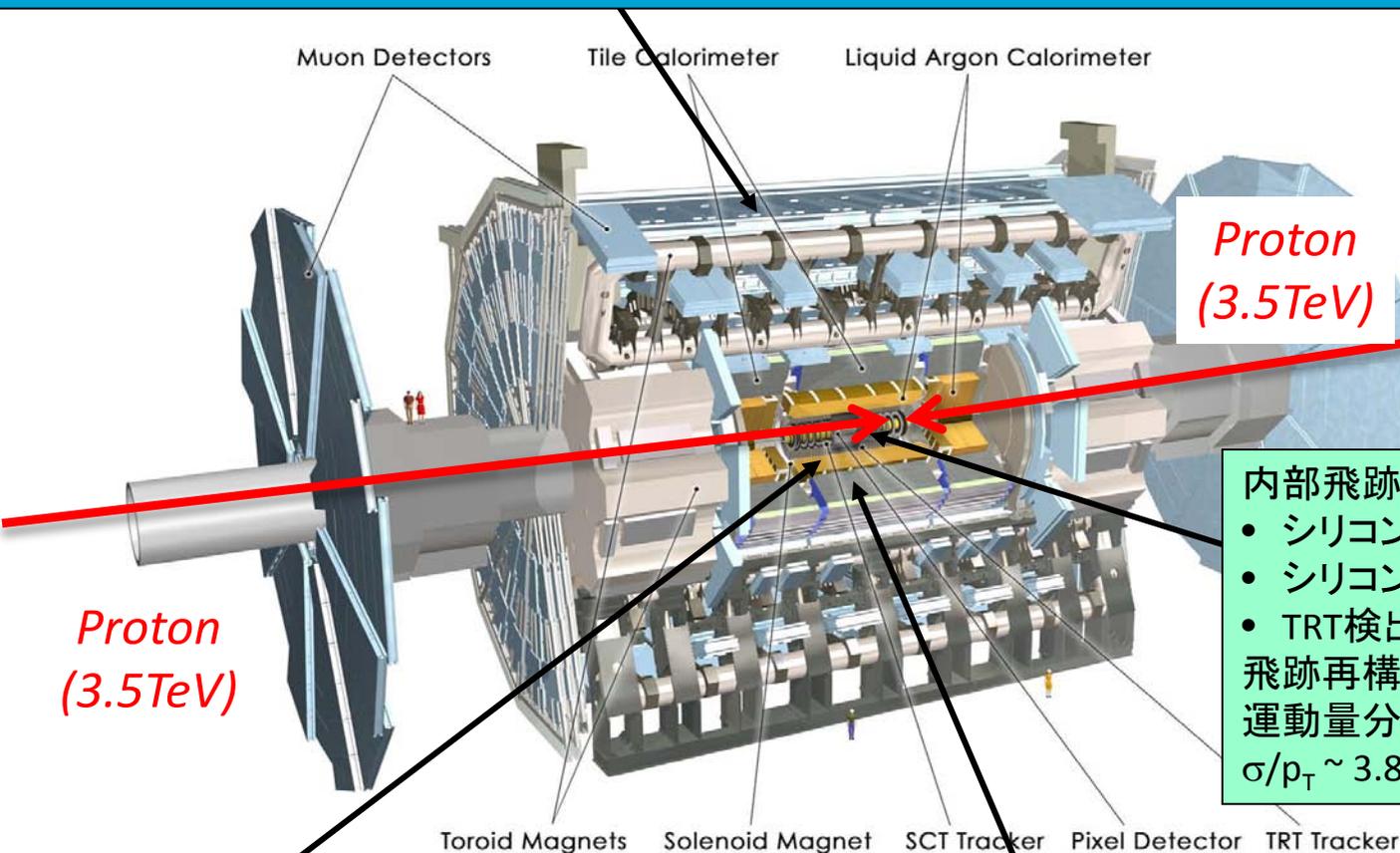
- 300 nb<sup>-1</sup>の統計を用いたミュオン測定器の性能評価
  - トラッキング効率: 99.4 +/- 2.5 % (Data), 98.6 % (MC)
  - トリガー効率: Endcap - 86.3 +/- 2.2% (Data), 95.1 +/- 0.2 % (MC)  
: Barrel - 76.0 +/- 2.0% (Barrel), 79.2 +/- 0.3 % (MC)

→ 解析手法、結果はATLAS実験のW / Z 断面積測定論文に採用
- 300 nb<sup>-1</sup>のデータを用いた断面積の測定
  - $\sigma (Z \rightarrow \mu\mu) = 0.87 \pm 0.08 \text{ (stat.)} \pm 0.06 \text{ (syst.)} \pm 0.10 \text{ (lumi.) nb.}$
  - $\sigma (W \rightarrow \mu\nu) = 9.59 \pm 0.30 \text{ (stat.)} \pm 0.50 \text{ (syst.)} \pm 1.06 \text{ (lumi.) nb.}$
  - $\sigma (W^+ \rightarrow \mu^+\nu) = 5.71 \pm 0.23 \text{ (stat.)} \pm 0.29 \text{ (syst.)} \pm 0.63 \text{ (lumi.) nb.}$
  - $\sigma (W^- \rightarrow \mu^-\nu) = 3.88 \pm 0.20 \text{ (stat.)} \pm 0.20 \text{ (syst.)} \pm 0.43 \text{ (lumi.) nb.}$

誤差の範囲でNNLOの理論予想と一致
- 2.7 pb<sup>-1</sup>の統計で855個のZ、9365個のW候補事象の分布をMCと比較
  - イベント数による規格化で良く一致
  - Zピークを用いたtag & probeによる性能評価を開始した

# ATLAS実験

ミュオン検出器 ( $|\eta| < 2.7$ ): 空芯トロイド磁場 + トリガー、トラッキングチェンバー  
運動量 1 TeV までのミュオンを  $< 10\%$  の分解能でトリガー、再構成



3段階トリガー:  
レベル1: ハードウェア  
レベル2、Event Filter:  
ソフトウェア

Proton  
(3.5 TeV)

Proton  
(3.5 TeV)

内部飛跡検出器 (ID) ( $|\eta| < 2.5, B=2T$ ):

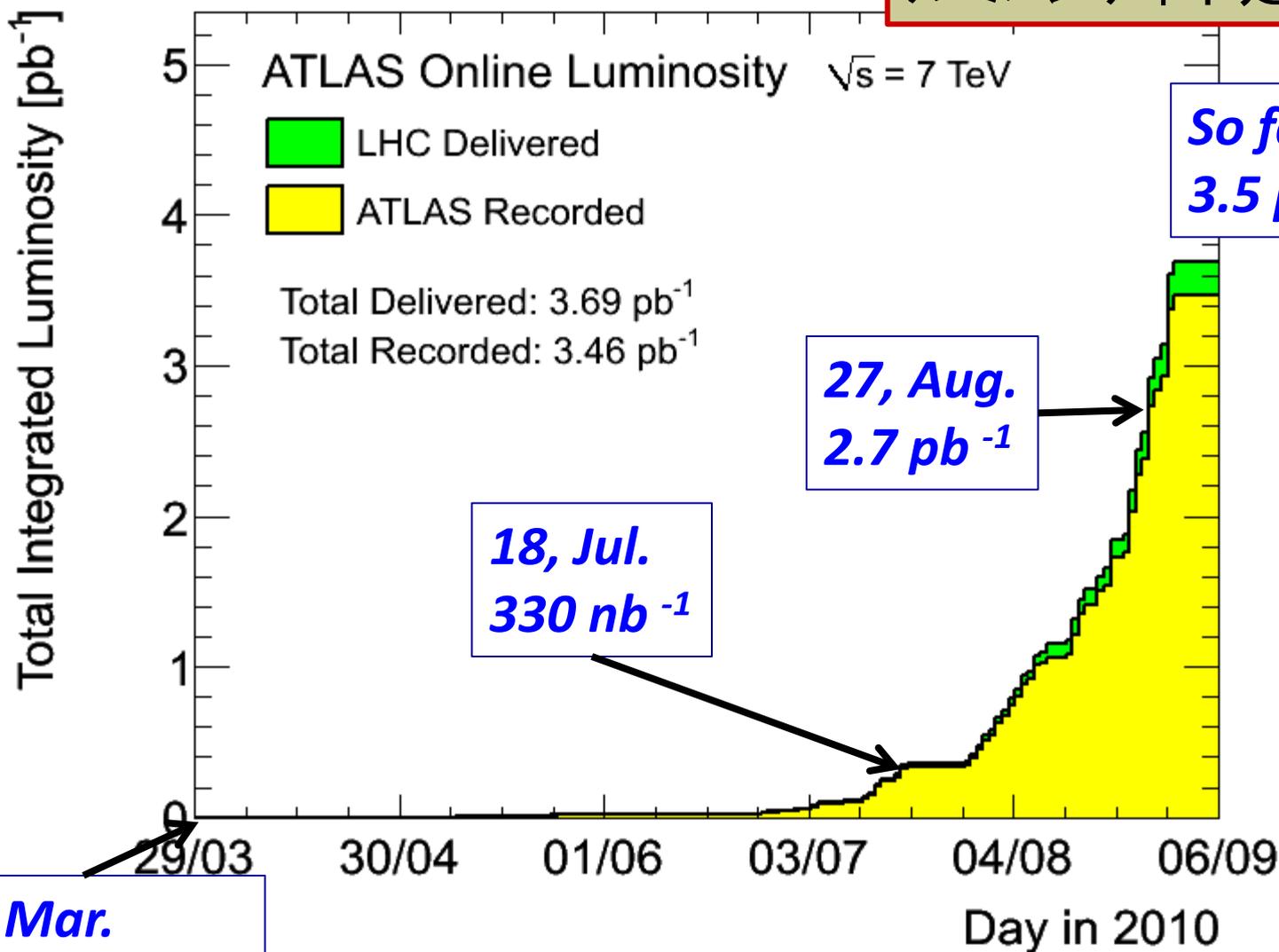
- シリコンピクセル検出器
- シリコンストリップトラッカー
- TRT検出器

飛跡再構成 + vertexing  
運動量分解能:  
 $\sigma/p_T \sim 3.8 \times 10^{-4} p_T (\text{GeV}) \oplus 0.015$

電磁カロリメータ: Pb-LAr アコーディオン  
e/ $\gamma$ トリガー、再構成  
エネルギー分解能:  $\sigma/E \sim 10\%/\sqrt{E}$

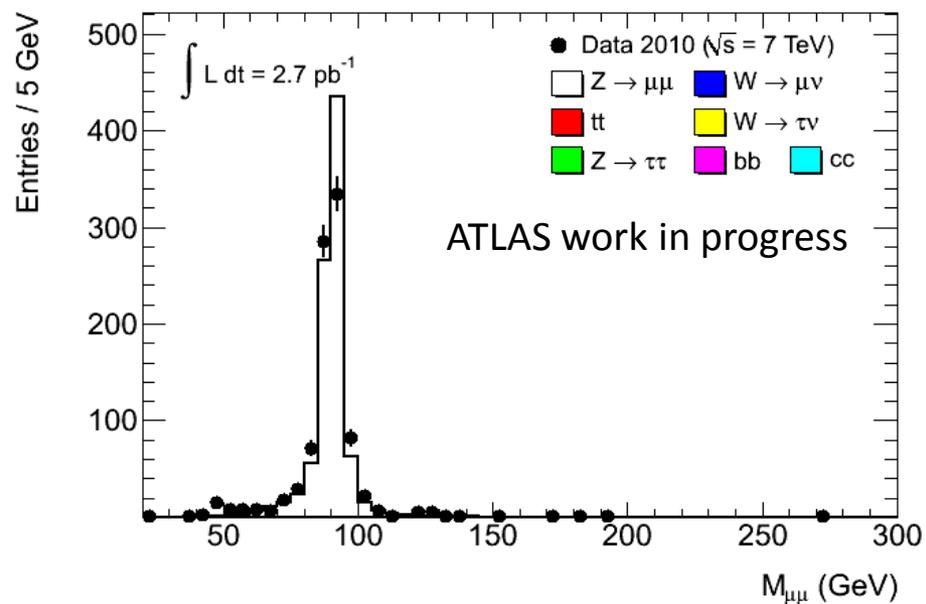
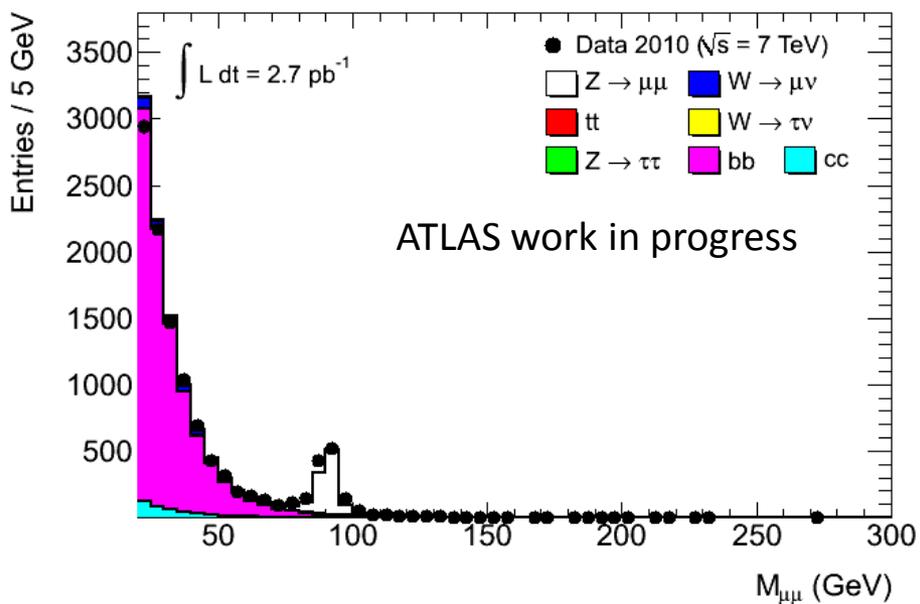
ハドロンカロリメータ ( $|\eta| < 5$ ):  
鉄・シンチレータータイル (central), Cu/W-LAr (fwd)  
ジェット、タウ、missing  $E_T$  トリガー、再構成  
エネルギー分解能:  $\sigma/E \sim 50\%/\sqrt{E} \oplus 0.03$

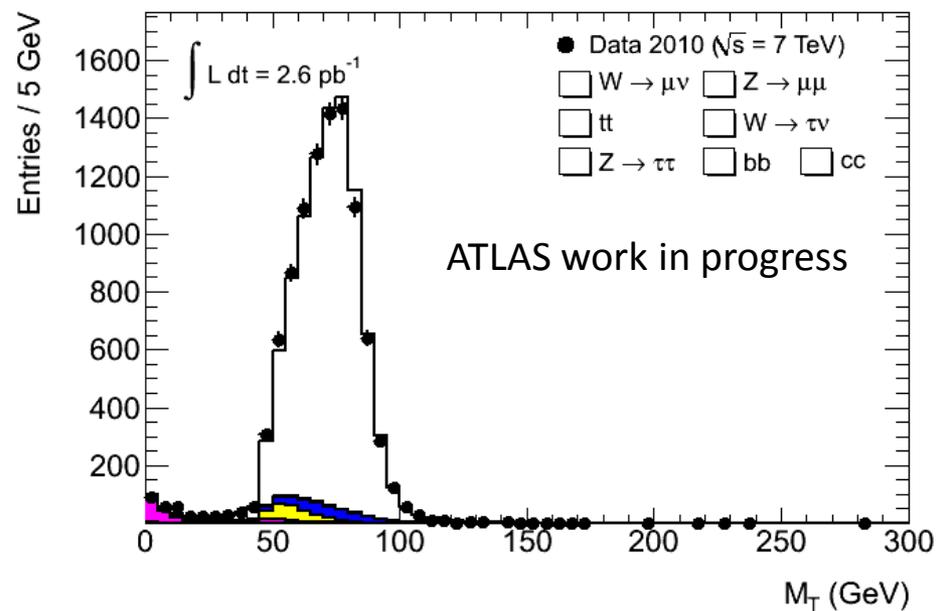
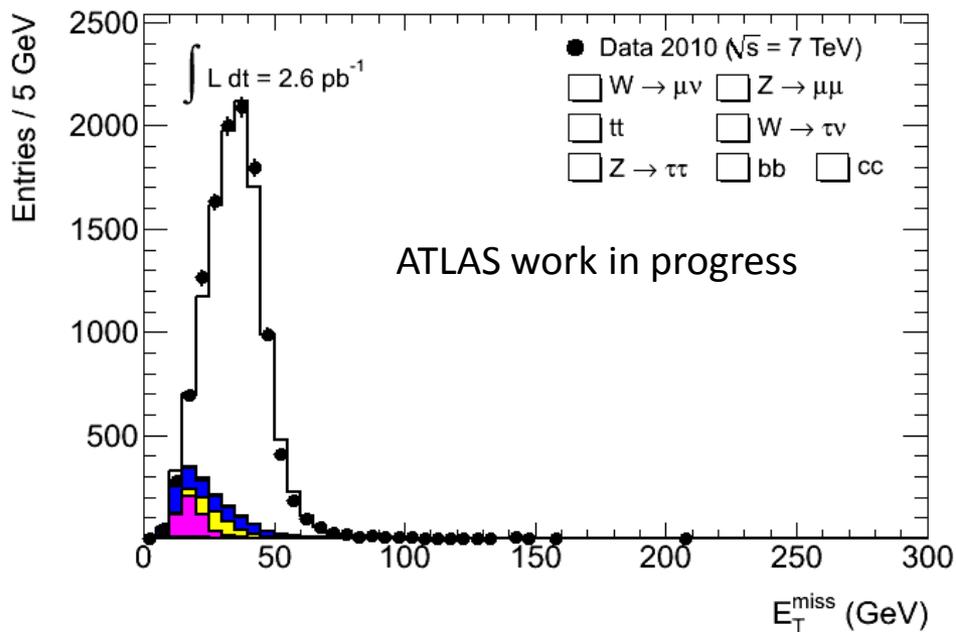
ルミノシティ不定性 ~11%



30, Mar.  
First collision!

# Zの $p_T$ , ラピディティ





# 系統誤差 ( $Z \rightarrow \mu\mu$ )

parameter	$\delta C_w$ (%)
Trigger efficiency	0.7
Reconstruction efficiency	5.0
Muon momentum scale	0.45
Muon momentum resolution	0.48
Isolation efficiency	2.0
Total	5.5

Parameter	$\delta A_w$ (%)
Theoretical uncertainty	3.0

# 系統誤差 ( $W \rightarrow \mu\nu$ )

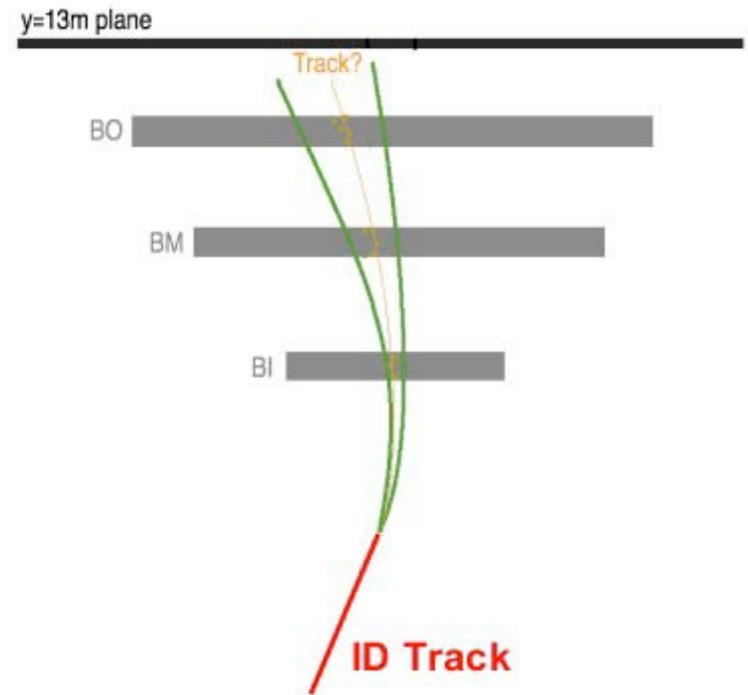
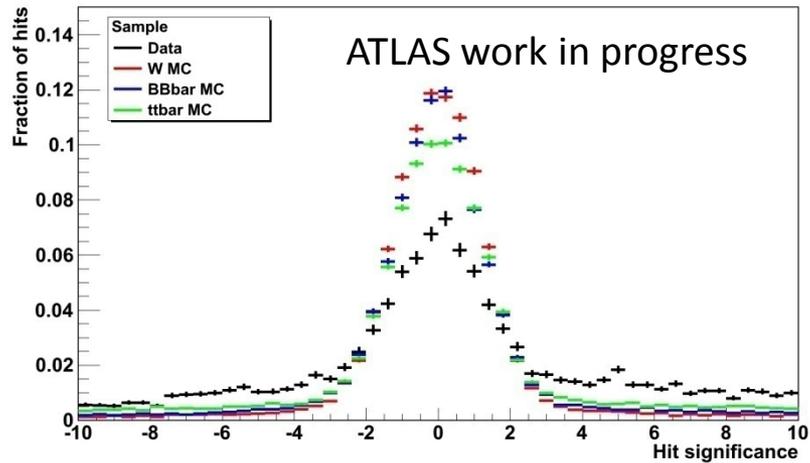
parameter	$\delta C_w$ (%)
Trigger efficiency	1.9
Reconstruction efficiency	2.5
Muon momentum scale	1.2
Muon momentum resolution	0.2
Muon Spectrometer miss alignment	1
Emiss scale and resolution	2
Isolation efficiency	1.0
Total	4.0

Parameter	$\delta A_w$ (%)
Theoretical uncertainty	3.0

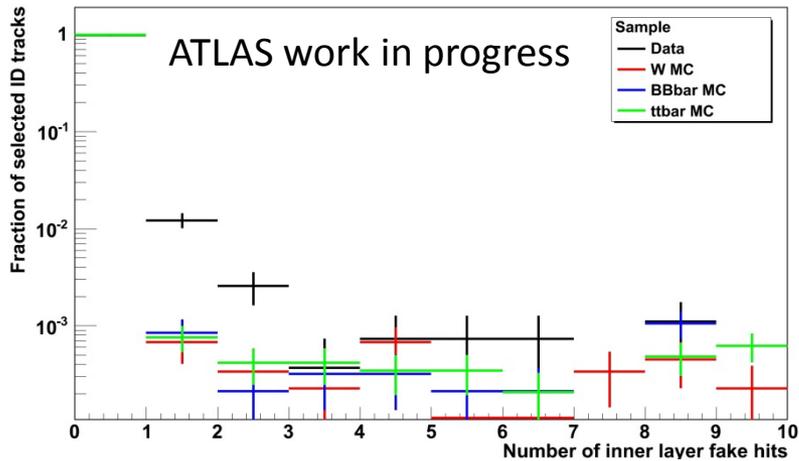
Process	Dataset	Generator	Cross-section (pb)
$W \rightarrow \mu \nu$	106044	PYTHIA	10 454
$Z \rightarrow \mu \mu$	106047	PYTHIA	989
$W \rightarrow \tau \nu$	106022	PYTHIA	10 454
$Z \rightarrow \tau \tau$	106052	PYTHIA	989
$t\bar{t}$	105861	POWHEG	161
$b\bar{b}$	108405	PYTHIA	$7.39 \times 10^4$
$c\bar{c}$	106059	PYTHIA	$2.84 \times 10^4$

# MS hit method

Hit significance for inner layer hits



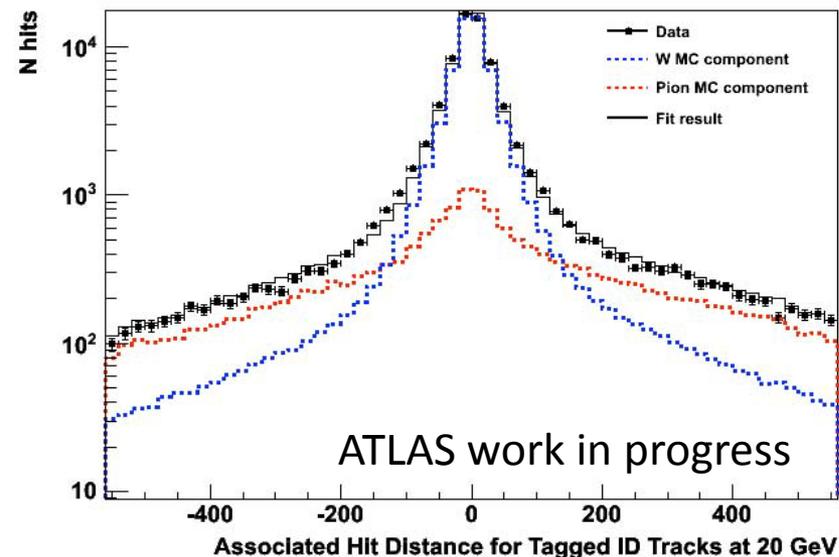
Number of inner layer fake hits per selected ID track



# ミュオン飛跡再構成効率

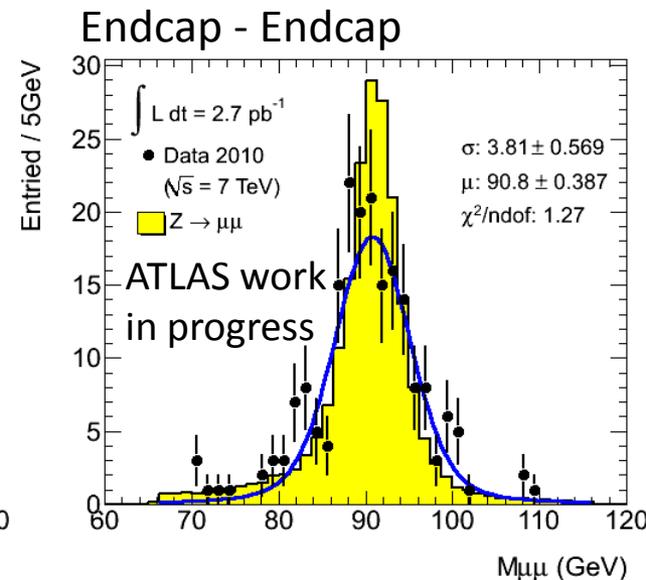
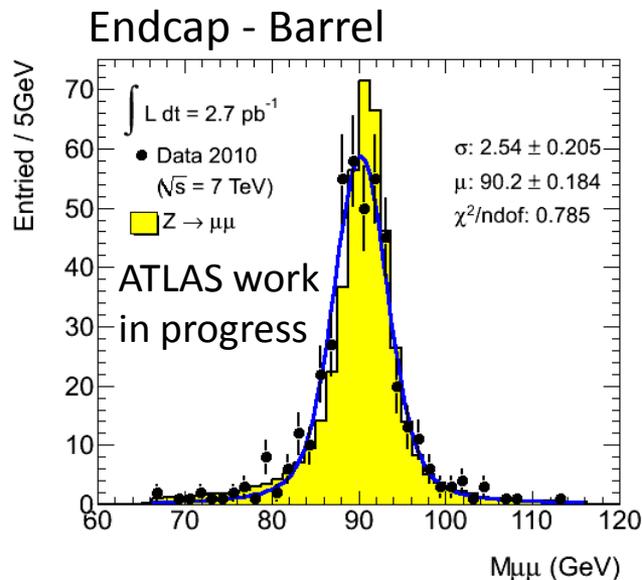
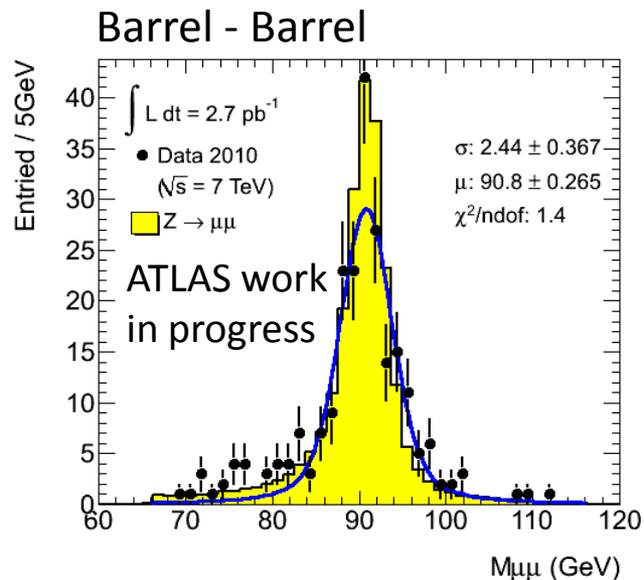
Event selection	
Quality	W Good Runs List
Primary vertex	$N_{vx} \geq 1$ with $N_{tracks} \geq 3$ $ z_{vx}  < 150$ mm
Trigger	L1_MU6
Tagged ID track selection	
$p_T$	$> 20$ GeV
Pixel Hits	$\geq 1$
Silicon Hits	$\geq 6$
TRT Hits	$\geq 10$
Isolation	Relative track isolation less than 0.2
Associated hits	2 of 3: inner $\geq 4$ , middle $\geq 3$ , outer $\geq 3$

Template fits for decay in flight elimination



## Official result

Sample	Muid Combined	Staco
Data Efficiency	$0.987 \pm 0.007$ (stat) $\pm 0.024$ (syst)	$0.994 \pm 0.006$ (stat) $\pm 0.024$ (syst)
MC Efficiency	0.988	0.986
Scale Factor	$0.999 \pm 0.007$ (stat) $\pm 0.024$ (syst)	$1.008 \pm 0.006$ (stat) $\pm 0.024$ (syst)



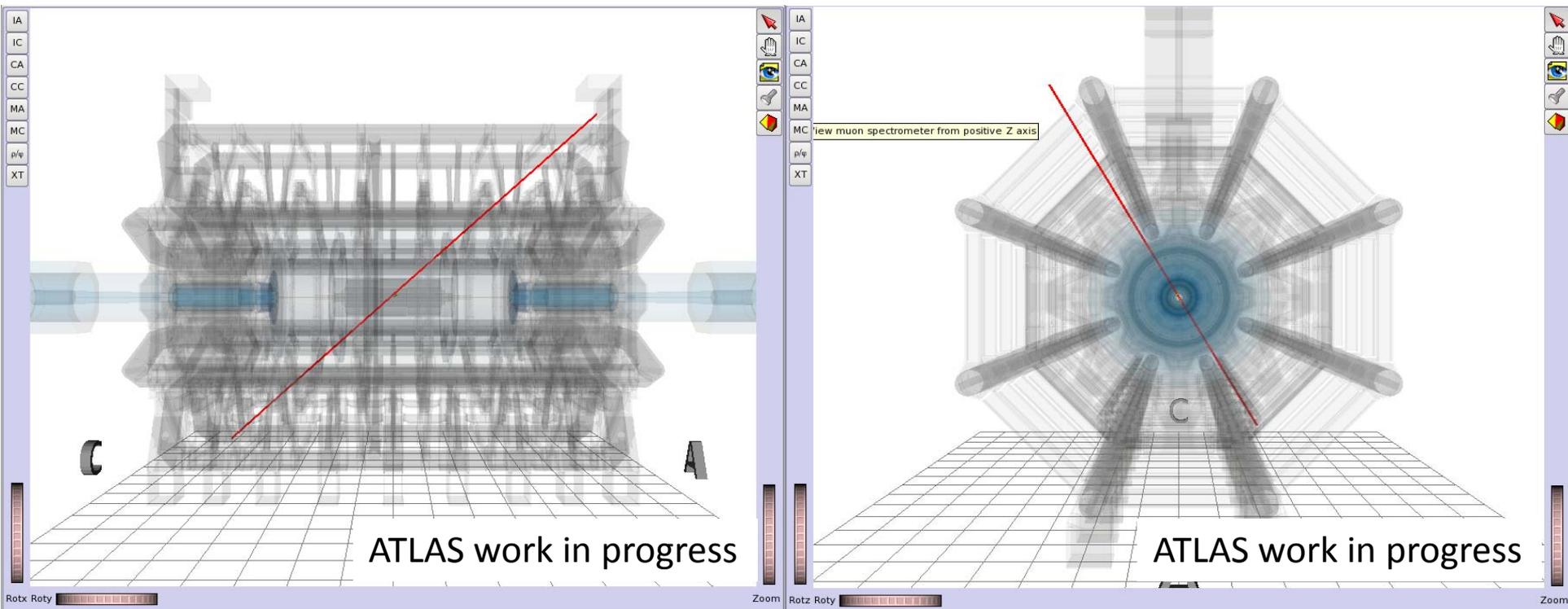
- Voigt function

$$V(x; \sigma, \gamma, \mu)$$

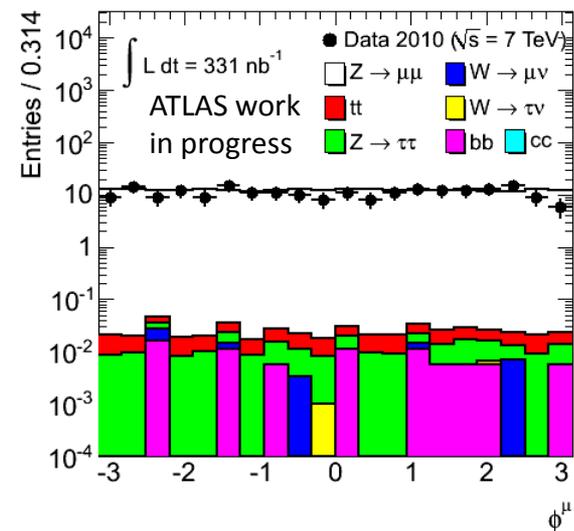
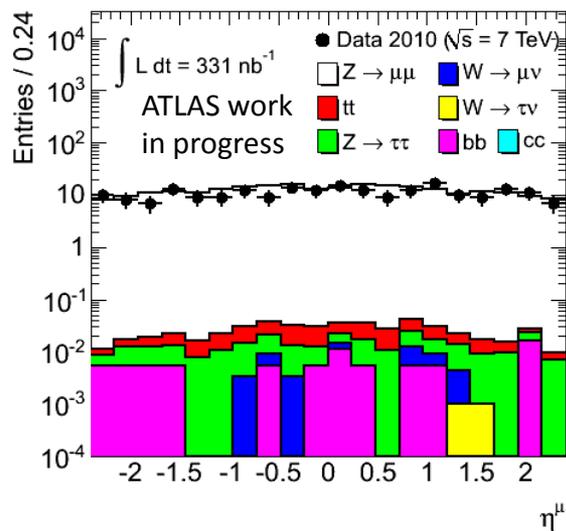
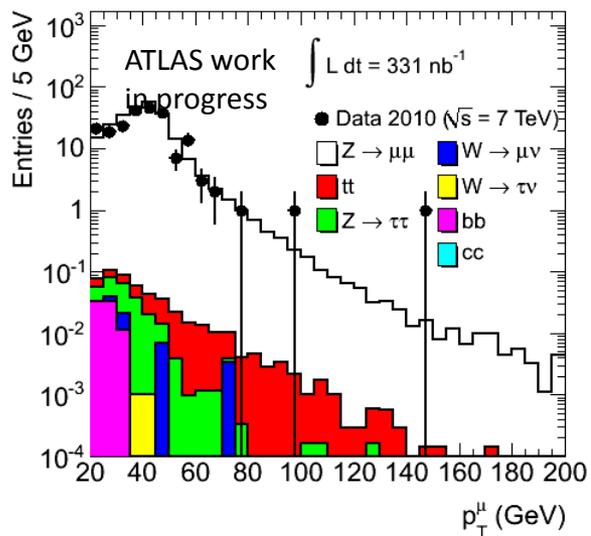
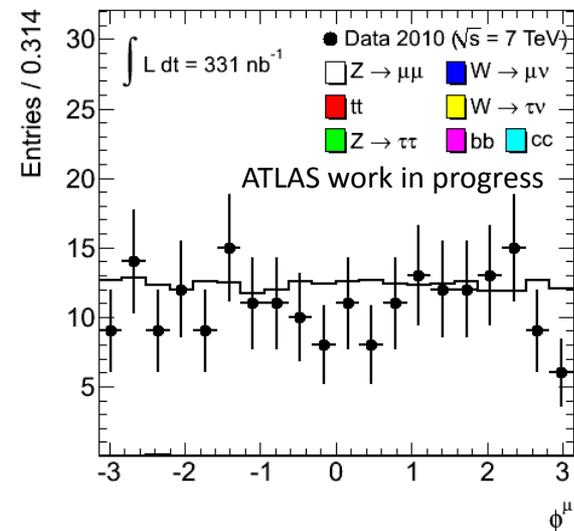
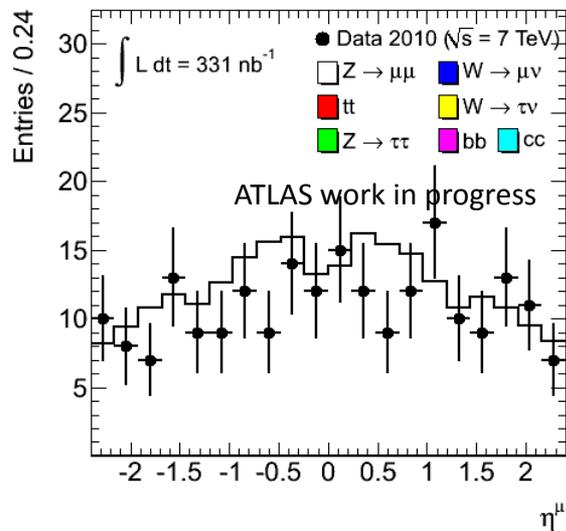
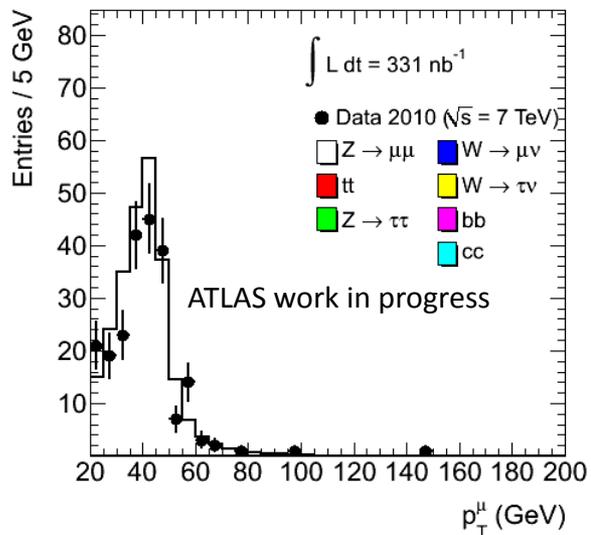
$$= \int_{-\infty}^{\infty} G(x'; \sigma, \mu) L(x - \mu - x'; \gamma) dx'$$

- Z width = 2.495 GeV fixed
- Gaussian resolution  $\sigma$ , mean  $\mu$
- fit range 66 – 116 GeV

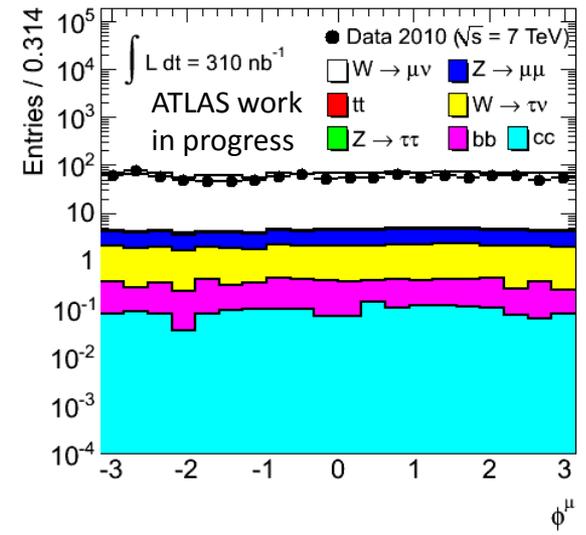
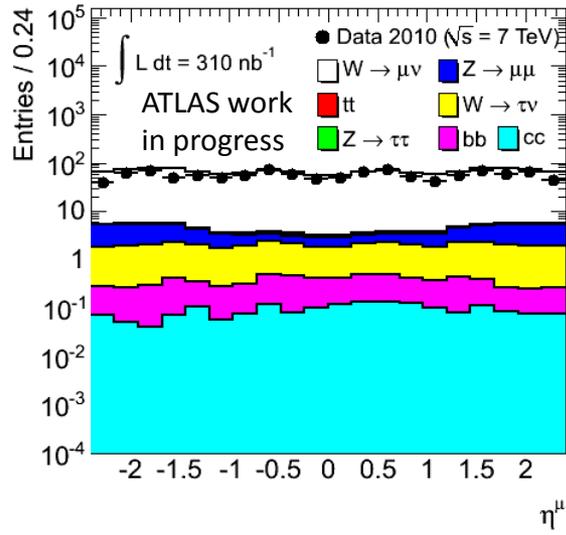
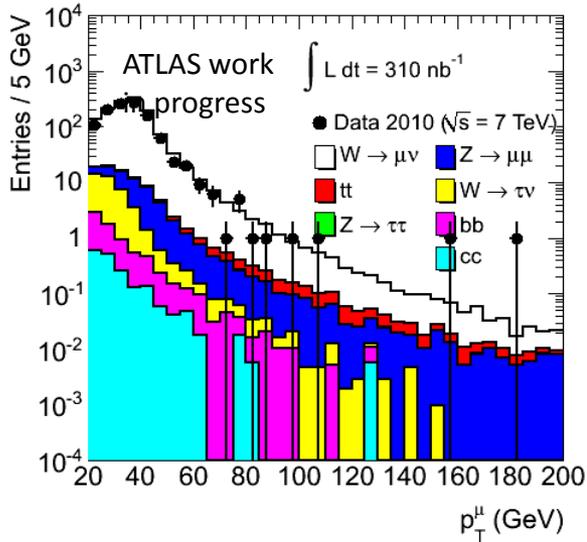
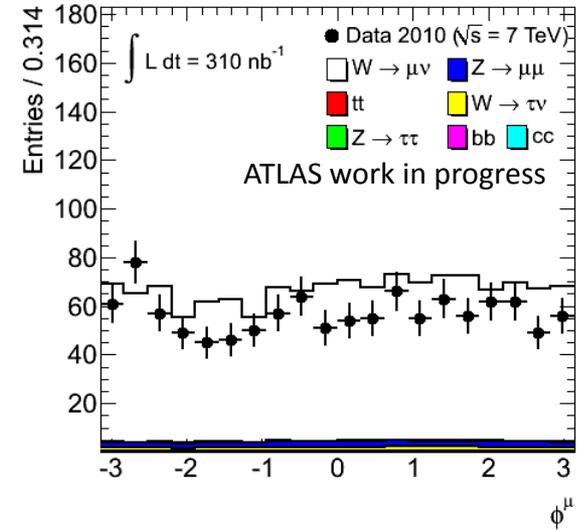
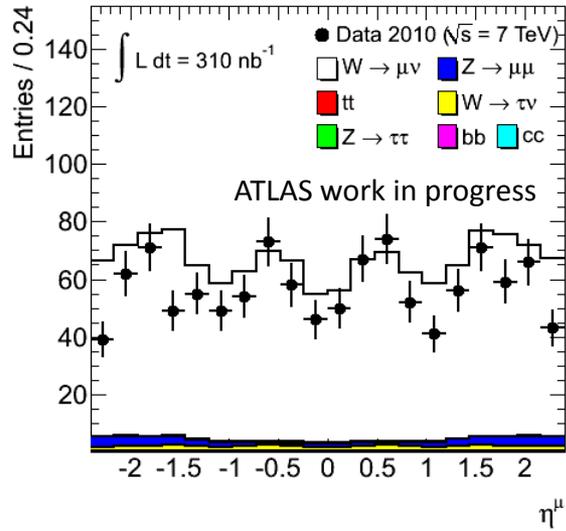
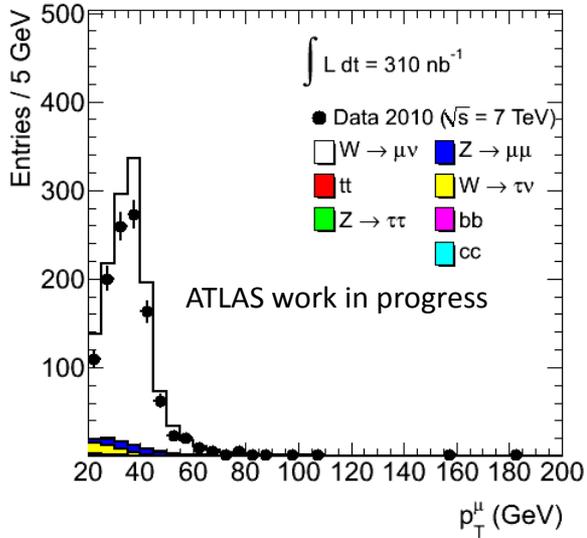
Type	# of Z's	Mean (GeV)	Width (GeV)
all	855	90.4 +/- 0.14 (90.8 +/- 0.01)	2.80 +/- 0.17 (1.98 +/- 0.01)
barrel / barrel	229	90.8 +/- 0.27 (90.9 +/- 0.02)	2.44 +/- 0.37 (1.64 +/- 0.02)
barrel/ endcap	431	90.2 +/- 0.18 (90.8 +/- 0.01)	2.54 +/- 0.21 (1.99 +/- 0.02)
endcap / endcap	195	90.8 +/- 0.39 (90.9 +/- 0.02)	3.81 +/- 0.57 (2.39 +/- 0.03)



# ミューオン分布 ( $Z \rightarrow \mu\mu$ ): $330\text{nb}^{-1}$



# ミューオン分布 ( $W \rightarrow \mu\nu$ ): $330 \text{ nb}^{-1}$



# $M_T, E_T^{\text{miss}} (W \rightarrow \mu\nu): 330 \text{ nb}^{-1}$

