

アトラス検出器を用いた重心系エネルギー7TeVでの  
陽子・陽子衝突におけるミュオンを伴う事象での  
ウィークボソンの生成断面積の測定

---

久保田 隆至

東京大学理学系研究科物理学専攻(学籍番号35 - 67018)

博士論文審査会

2011 / 01 / 20

# 発表の概要

---

- 本研究の背景、目的、内容
- 測定手法
- 実験装置、データセット
  - LHC加速器
  - ATLAS検出器
  - 解析用データセット
- 測定の結果
  - ミューオントリガー効率
  - $W \rightarrow \mu\nu$ 事象の断面積
  - $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象の断面積
- 結論

# 研究の背景、目的、内容

---

- 研究の背景

- LHC加速器が2010年3月に稼働し、世界最高エネルギー( $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ )の陽子陽子衝突を用いたTeVスケールの物理探索が行われている
- 陽子陽子衝突の構造を理解することはLHCで行われる全ての物理解析において重要
- 理論的不定性の少ないW / Z 粒子の生成断面積は良いプローブ
- ミューオンへの崩壊事象( $Z \rightarrow \mu\mu$ 、 $W \rightarrow \mu\nu$ )はクリーンな信号  
特に $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象は検出器、モンテカルロシミュレーションの較正に重要

- 研究の目的

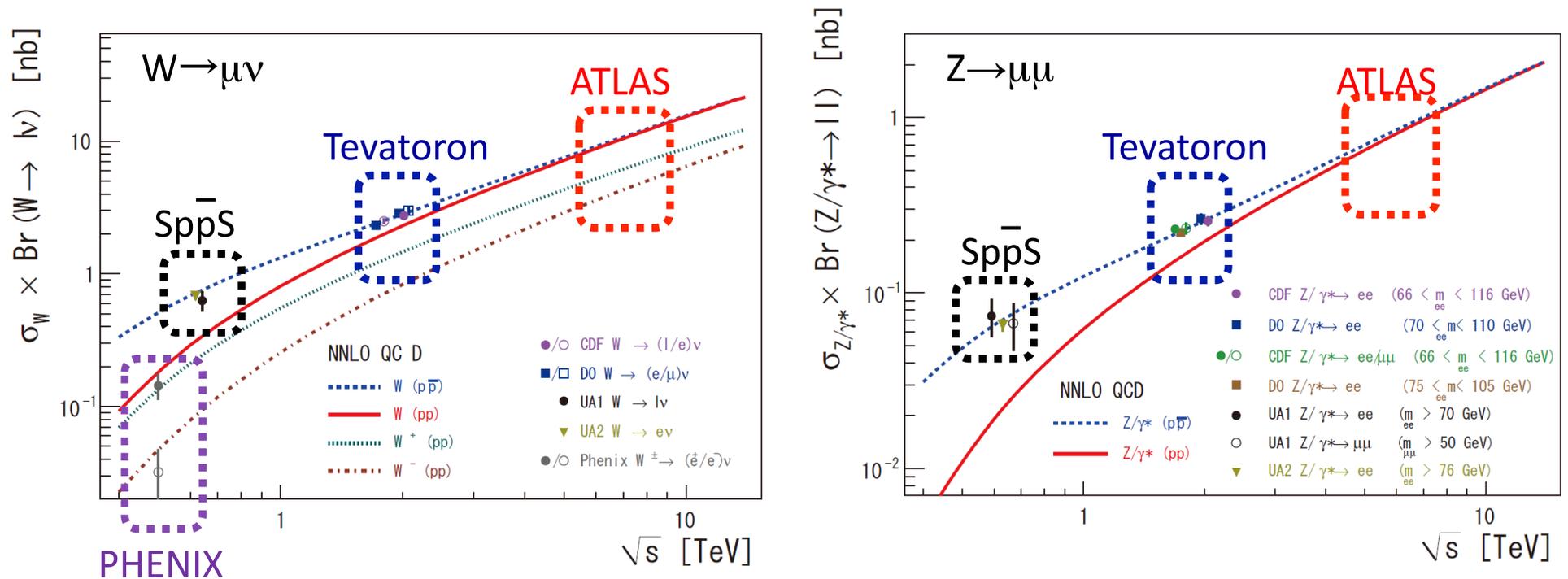
- 世界最高エネルギー( $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ )でのpp衝突におけるW / Z 粒子の生成断面積が理論予想と一致するかを検証する

- 研究の内容

- LHC加速器のpp衝突で生成される $Z \rightarrow \mu\mu$ 、 $W \rightarrow \mu\nu$ 事象の断面積の測定

# pp (p $\bar{p}$ ) 衝突でのウィークボソン生成断面積測定

- レプトンに崩壊するモードでの測定結果
  - Sp $\bar{p}$ S (CERN): UA1実験、UA2実験  $\sqrt{s} = 0.63$  TeV
  - Tevatoron (Fermilab): CDF実験、D0実験  $\sqrt{s} = 1.8, 1.96$  TeV
  - RHIC (BNL): PHENIX実験  $\sqrt{s} = 0.5$  TeV



- LHC (CERN): ATLAS実験  $\sqrt{s} = 7$  TeV

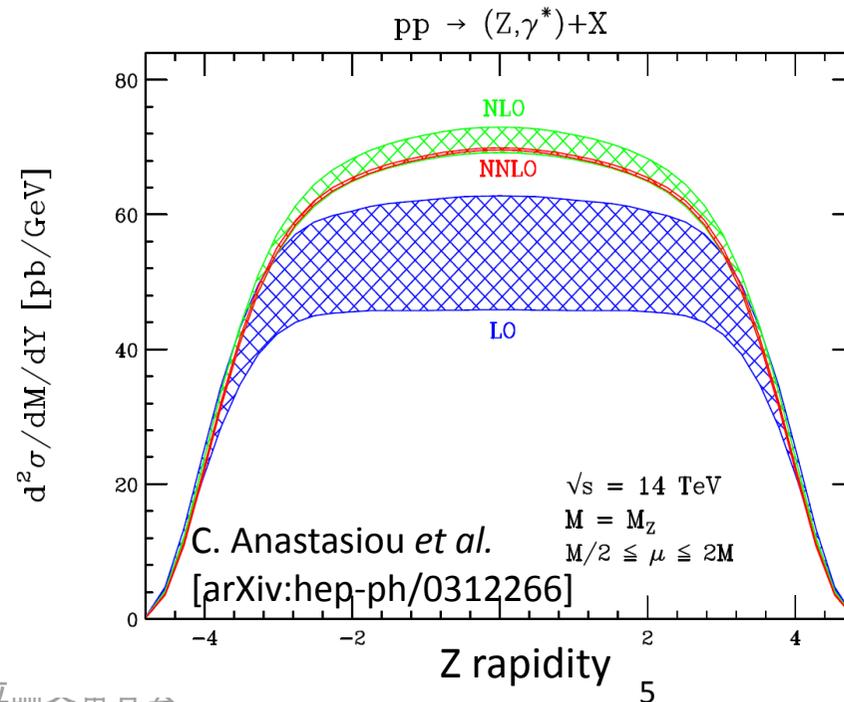
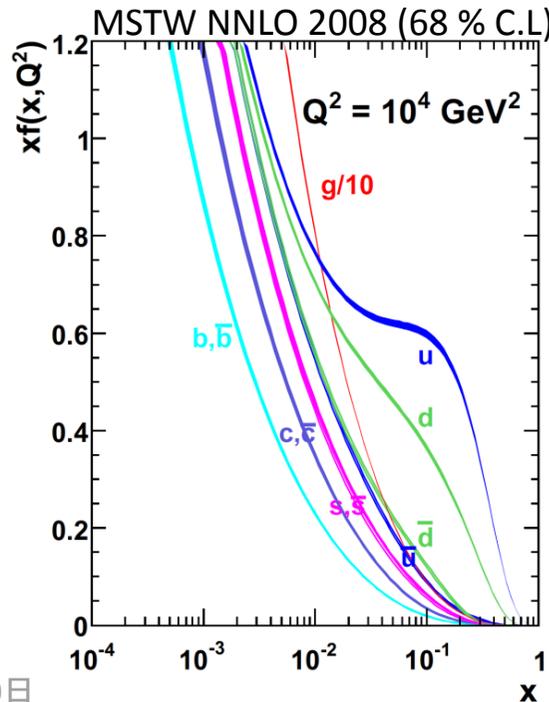
# 生成断面積計算の不定性

- Next-to-Next-to leading order (NNLO)精度の計算
- PDF (MSTW 2008 NNLO) + パarton断面積(FEWZ): 系統誤差 5%
  - PDFの不定性
    - $\alpha_s$  (0.1145 ~ 0.1176) 由来: < 2.5 %
    - Fitting parameter由来 (90 % C.L.): < 3.5 %
  - 断面積計算の不定性
    - Renormalization and factorization scale由来: < 1.0 %

$$\sigma_W \times BR(W \rightarrow \ell\nu) = 10.46 \pm 0.52 \text{ nb.}$$

$$\sigma_Z \times BR(Z \rightarrow \ell\ell) = 0.96 \pm 0.05 \text{ nb.}$$

(66 < M<sub>ℓℓ</sub> < 116 GeV)

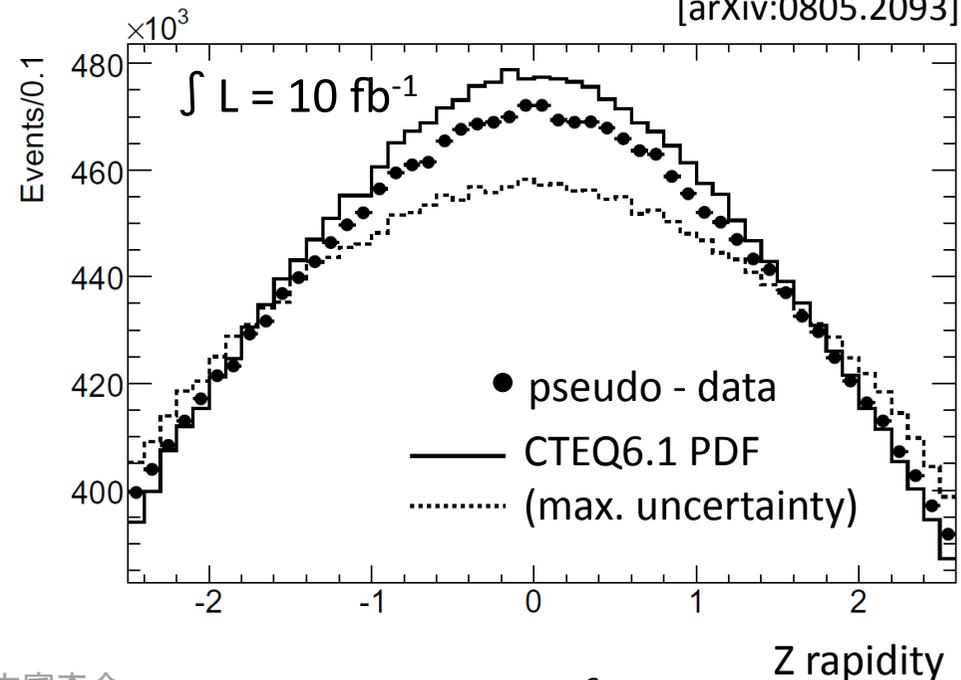


# Z → μμ、W → μν 事象

- High- $p_T$  のレプトン: 実験的にクリアな信号
  - 生成断面積測定の良いプローブ
- Z → μμ: 終状態運動学を完全再構成可能
  - + 性質(質量、幅)が精密に測られている
    - 検出器の較正
      - ミューオン検出器の検出効率
      - ミューオン検出器の運動量スケール、分解能
    - 理論計算、シミュレーションへのフィードバック
      - パarton分布関数 (Z粒子ラピディティ)
      - W/Zの初期運動量 (Z粒子の横運動量)

$$M_Z = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$
$$\Gamma_Z = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}$$

N. Besson *et al.*  
[arXiv:0805.2093]



---

# 測定手法

# 生成断面積測定手法

---

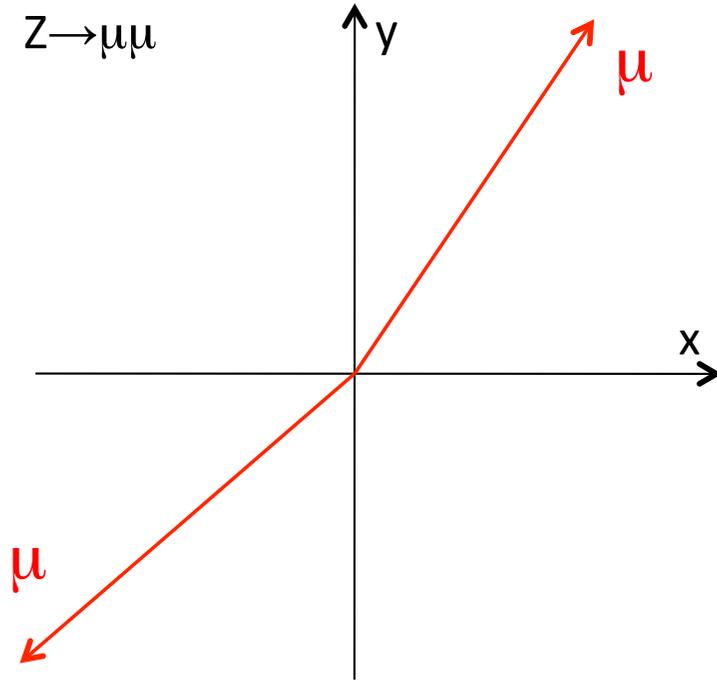
$$\sigma_{W/Z} \times \text{Br}(W/Z) = \frac{N_{\text{sig}} - N_{\text{bg}}}{A \cdot C \cdot L_{\text{int}}}$$

- $N_{\text{sig}}$  – ATLAS実験で観測された信号事象数
- $N_{\text{bg}}$  – 背景事象の推定数
- $A$  (acceptance) –  
geometrical / kinematical acceptance (MCシミュレーション)
- $C$  (correction factor) – 事象再構成の効率 (MCシミュレーション)
- $L_{\text{int}}$  – 積分ルミノシティ

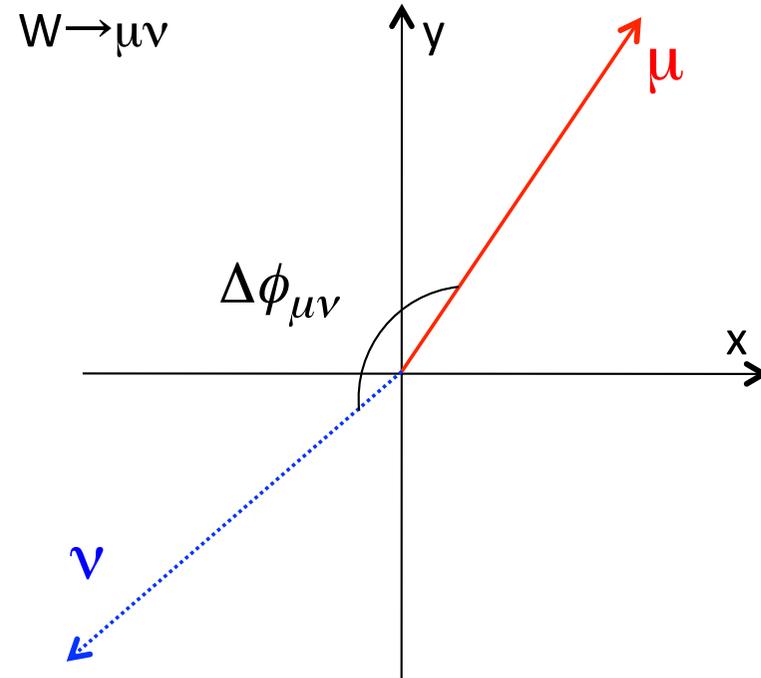
各要素を測定し組み合わせる

# Z → μμ、W → μν事象

$$\frac{N_{sig} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot L_{int}}$$



- 2本のhigh- $p_T$ 、isolated ミューオン
- 反対の電荷
- Z粒子の不変質量  
( $66 < M_{\mu\mu} < 116$  GeV)



- 1本のhigh- $p_T$ 、isolated ミューオン
- 大きな $E_T^{miss}$
- 大きな横質量( $m_T$ )

$$m_T = \sqrt{2p_T^\mu p_T^\nu (1 - \cos(\Delta\phi_{\mu\nu}))}$$

$$\frac{N_{sig} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot L_{int}}$$

- $W/Z$ 粒子の他のモードへの崩壊 ( $Z \rightarrow \tau\tau$ ,  $W \rightarrow \tau\nu \rightarrow \mu\nu\nu$ )
- トップクォーク対
- High- $p_T$ のミューオン、ニュートリノの生成
  
- QCDのdi-jet事象
- 生成断面積が大きい → コンビナトリアルな組み合わせ
  
- 宇宙線事象
- 崩壊点近傍を通った場合、ミューオン対をフェイク

# アクセプタンス計算

$$\frac{N_{sig} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot L_{int}}$$

- MCシミュレーションで信号事象のアクセプタンスを見積もる(\*)
  - $N_1$ : 生成された全事象数
  - $N_2$ : 解析での位相空間のカット内に入った事象数 (Truth情報)
    - for Z:  $p_T^\mu > 20 \text{ GeV}$ ,  $|\eta^\mu| < 2.4$ ,  $66 < m_{\mu\mu} < 116 \text{ GeV}$
    - for W :  $p_T^\mu > 20 \text{ GeV}$ ,  $|\eta^\mu| < 2.4$ ,  $p_T^\nu > 25 \text{ GeV}$ ,  $m_T > 40 \text{ GeV}$
  - $N_3$ : 再構成され、解析の事象選択を通過する事象数 (再構成情報)
  - $A = N_2 / N_1$ ,  $C = N_3 / N_2$

- 系統誤差

- $\delta A$ : 3 % (W), 4 % (Z)
  - PDFセット内でのfitting parameterの不定性: 1.8 % (W), 1.6 % (Z)
  - 3種類のPDFセット間の比較: 1.1 % (W), 2.0 % (Z)
  - 計算のモデリング (PYTHIAとMC@NLOの比較): 1.6 % (W), 2.8 % (Z)
- $\delta C$ : 0.4 % (W, Z)
  - 3種類のPDFセット間の比較: 0.3 % (W, Z)
  - 低エネルギー (< 1 GeV) Final State Radiationモデリング: 0.2 % (W, Z)

\*Default set: PYTHIA (event generator)+ MRST LO\* (PDF)

# アクセプタンス補正

$$\frac{N_{sig} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot L_{int}}$$

- 実データの測定から“C”に補正をかける  
(ミュオントリガー etc.)

$$C_{corrected} = C \times \frac{\epsilon_{data}}{\epsilon_{MC}} \quad \text{scale factor}$$

$\epsilon_{data}$ : 実データでの測定値

$\epsilon_{MC}$ : 実データと同じ手法で求めた測定値

# ルミノシティ測定

$$\frac{N_{sig} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot L_{int}}$$

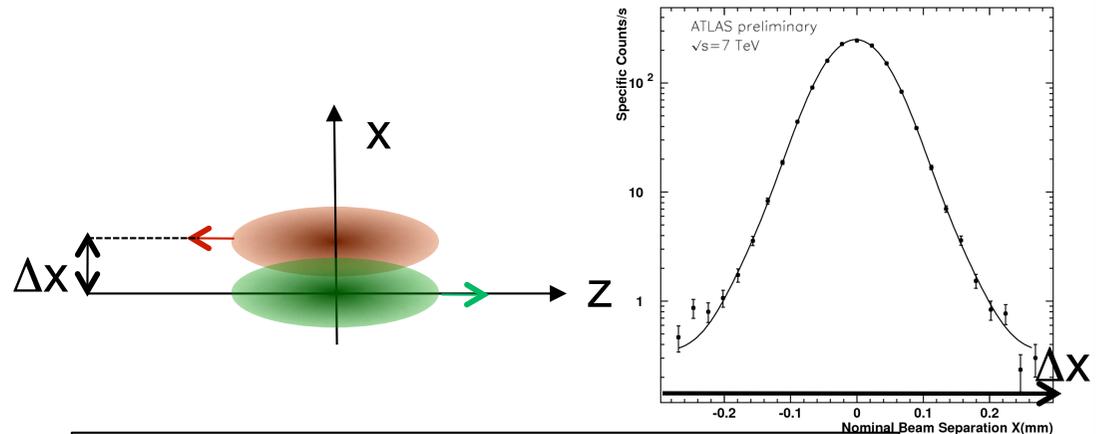
- pp非弾性散乱の基準断面積 ( $\sigma_{vis}$ ) を測定
- チェレンコフ検出器でpp非弾性散乱を計数、基準断面積と比較

$$L = \frac{\mu^{meas} n_b f_r}{\sigma_{vis}}$$

計測数      ビームパラメータ

基準断面積

## 1. Van der Meer Scan (x - y 2次元)

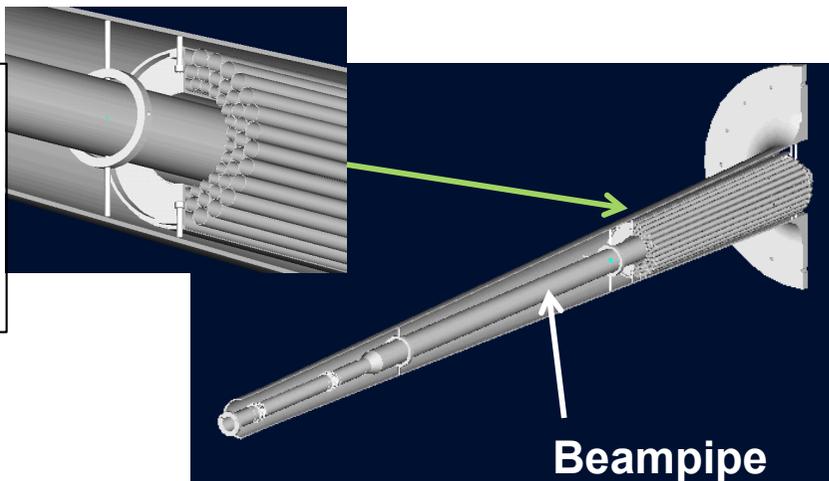


$$\sigma_{vis} = 40.2 \pm 0.1 \text{ (stat)} \pm 4.4 \text{ (= 11\%, syst)}$$

## 2. pp非弾性散乱計数

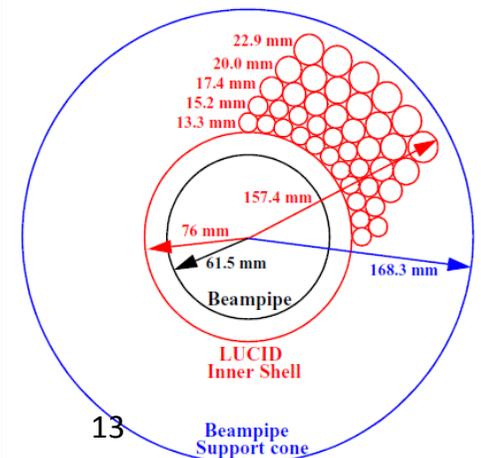
LUCID:

Al. tubes filled with  $C_4F_{10}$   
 $5.5 < |\eta| < 6.0, |z| = 17 \text{ m}$   
 カウンティング系統誤差: 5%



Front view (Z = 16976 mm)

5 layers with 40 tubes each



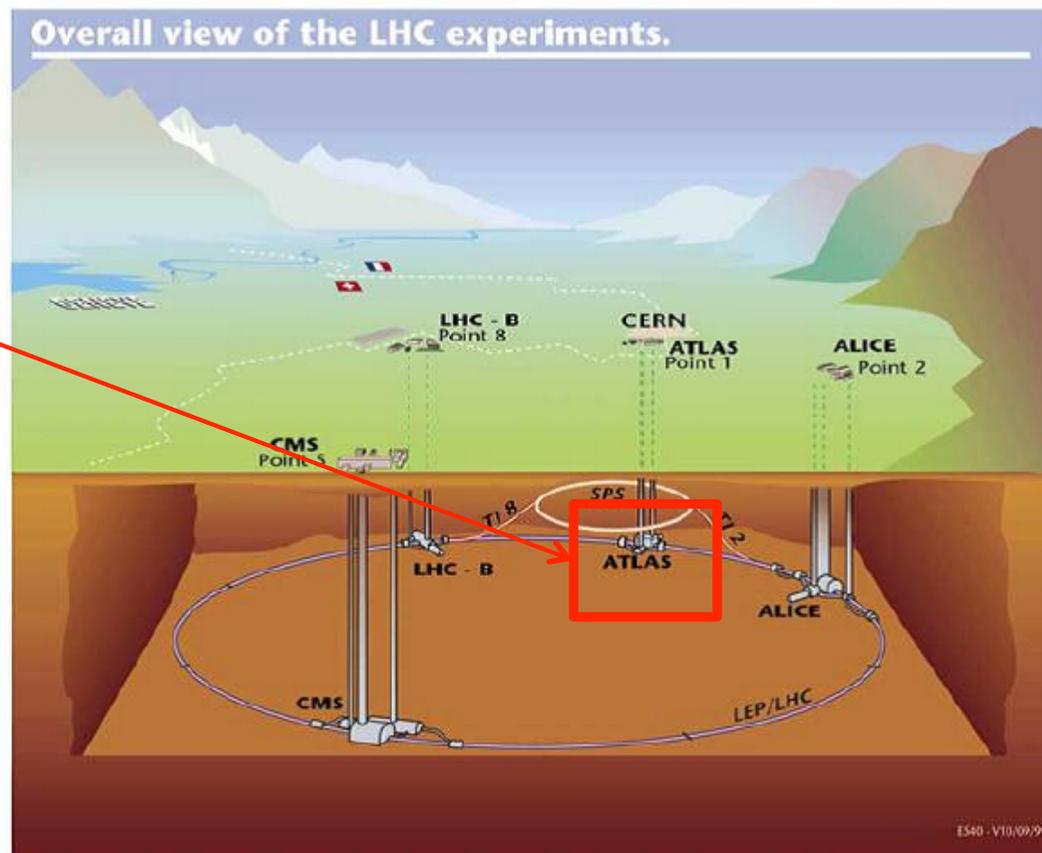
---

# 実験装置、解析用データセット

# Large Hadron Collider (LHC)

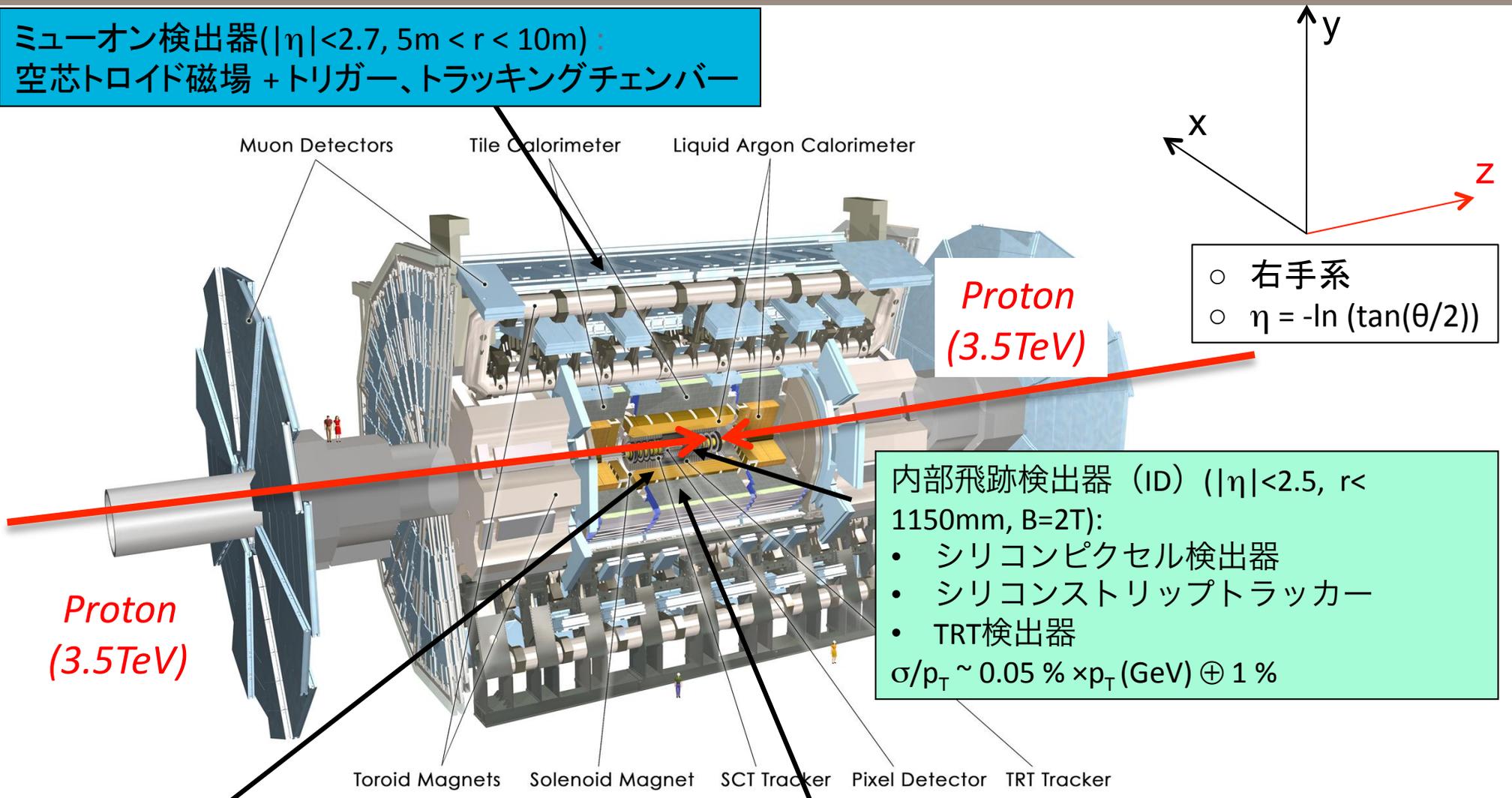
- 世界最高エネルギー $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ の陽子陽子衝突型加速器  
(デザイン値: 14 TeV)
- ルミノシティ: $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成(2010年10月13日)  
(デザイン値:  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
- 4つの大型検出器

○ ATLAS、CMS、LHCb、ALICE



# ATLAS検出器

ミューオン検出器 ( $|\eta| < 2.7, 5\text{m} < r < 10\text{m}$ ):  
空芯トロイド磁場 + トリガー、トラッキングチェンバー



内部飛跡検出器 (ID) ( $|\eta| < 2.5, r < 1150\text{mm}, B=2\text{T}$ ):

- 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

$\sigma/p_T \sim 0.05\% \times p_T(\text{GeV}) \oplus 1\%$

電磁カロリメータ ( $|\eta| < 3.2, 1500\text{mm} < r < 1970\text{mm}$ ):  
Pb-LAr アコーディオン  
エネルギー分解能:  $\sigma/E \sim 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$

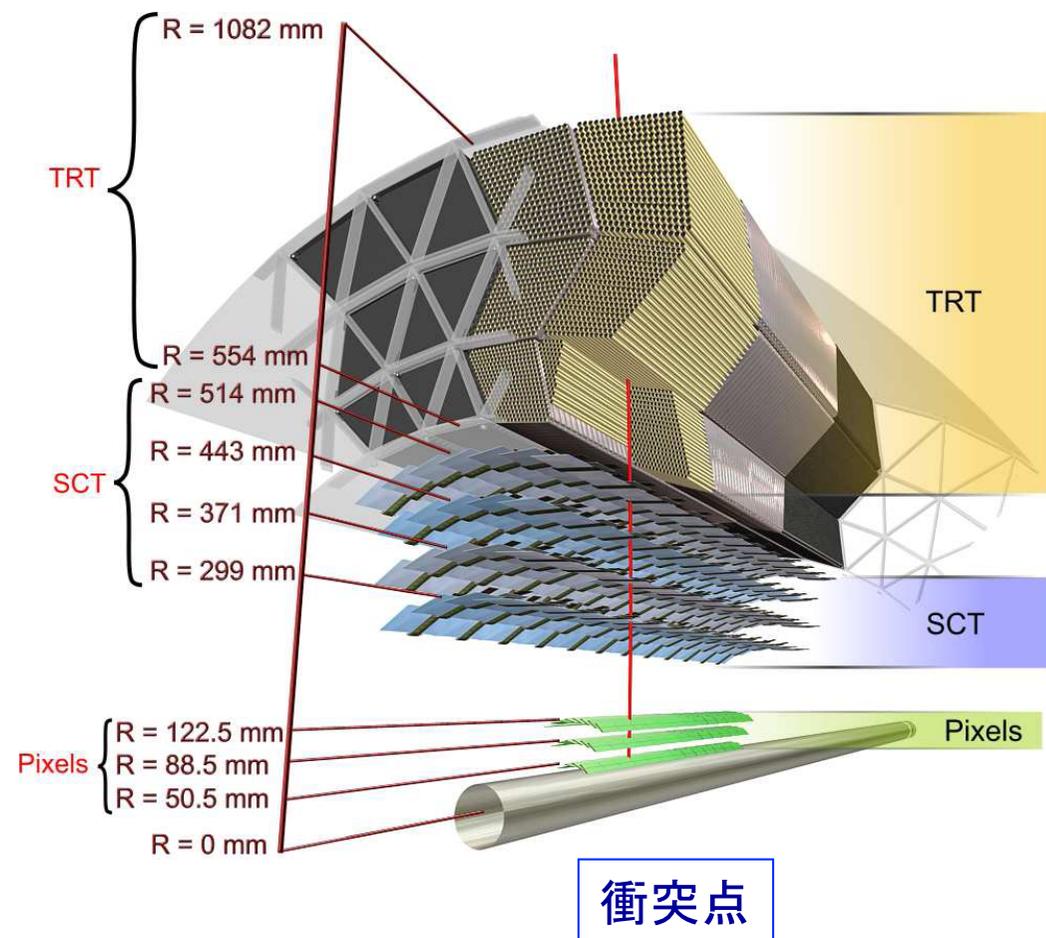
ハドロンカロリメータ ( $|\eta| < 4.9, 2280\text{mm} < r < 4250\text{mm}$ ):

- 鉄・シンチレータースライス ( $|\eta| < 1.7$ )
- Cu / W-LAr ( $|\eta| > 1.7$ )

エネルギー分解能:  $\sigma/E \sim 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$

# 内部飛跡検出器 (Inner Detector: ID)

- ソレノイド磁場 (2.0 T)
- 3種類の飛跡検出器
  - Pixel Detectors (Pixel)
    - $|\eta| < 2.5$
    - 3 ヒット / track
    - チャンネル分解能:  
10 $\mu\text{m}$  ( $R\phi$ ), 115 $\mu\text{m}$  (z)
  - Semiconductor Trackers (SCT)
    - $|\eta| < 2.5$
    - 8 ヒット / track
    - チャンネル分解能:  
17 $\mu\text{m}$  ( $R\phi$ ), 580 $\mu\text{m}$  (z)
  - Transition Radiation Tubes (TRT)
    - $|\eta| < 2.0$
    - 36 ヒット / track
    - チャンネル分解能: 130 $\mu\text{m}$



# ミューオン検出器 (Muon Spectrometer:MS)

- トロイド磁場
- 三層構造 (Inner + Middle + Outer)
- 飛跡検出器 ( $|\eta| < 2.7$ )

- Monitored Drift Tubes (MDT)

- $|\eta| < 2.7$
- チャンネル分解能:  $80\mu\text{m}$

- Cathode Strip Chambers (CSC)

- $2.0 < |\eta| < 2.7$  for inner only
- チャンネル分解能:  $60\mu\text{m}$

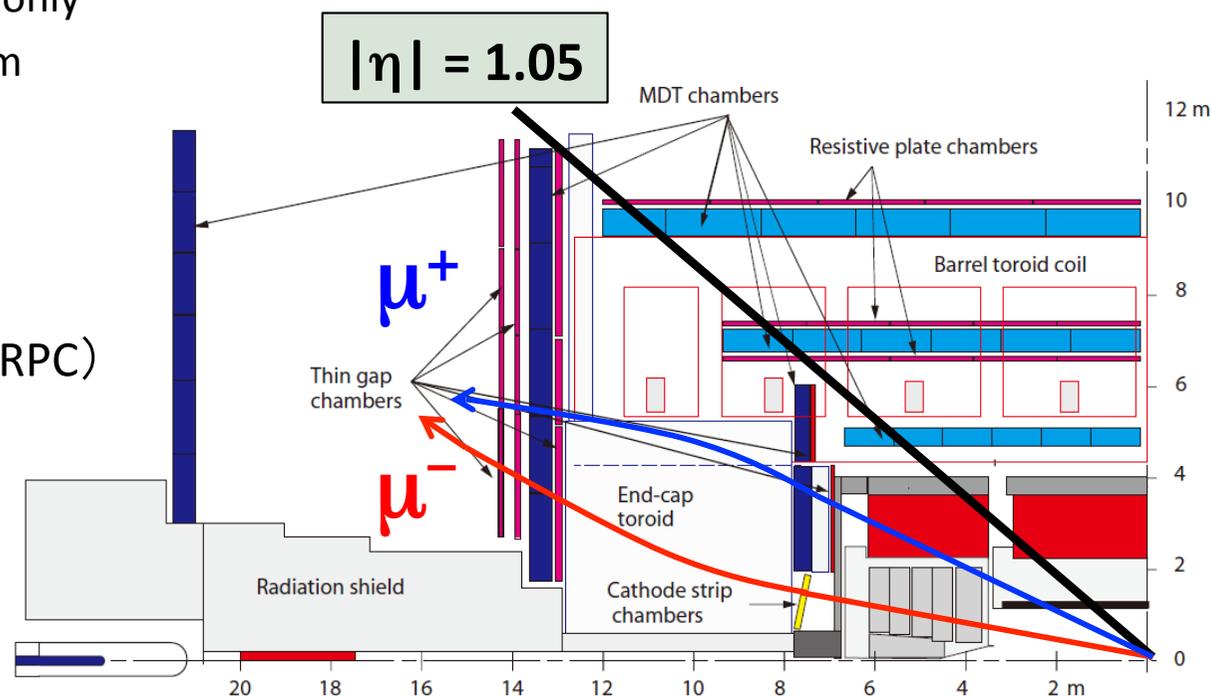
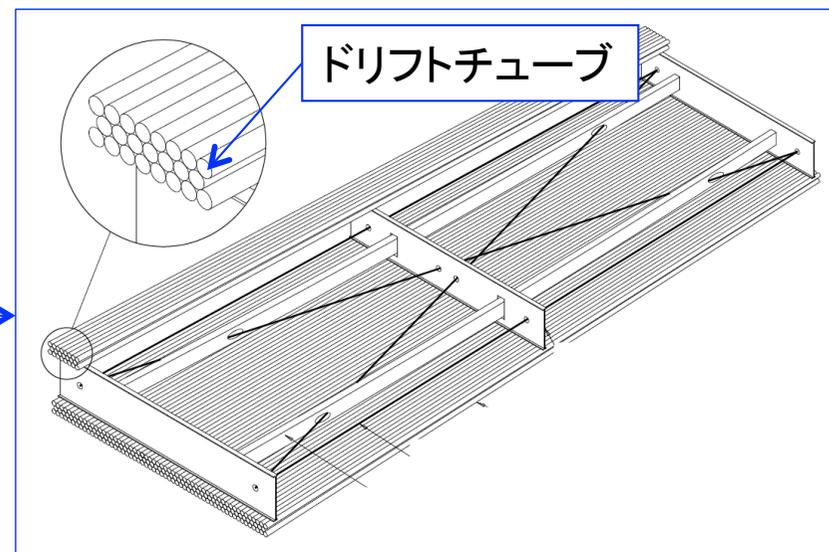
- トリガー検出器 ( $|\eta| < 2.4$ )

- Thin Gap Chamber (TGC)

- $1.05 < |\eta| < 2.4$

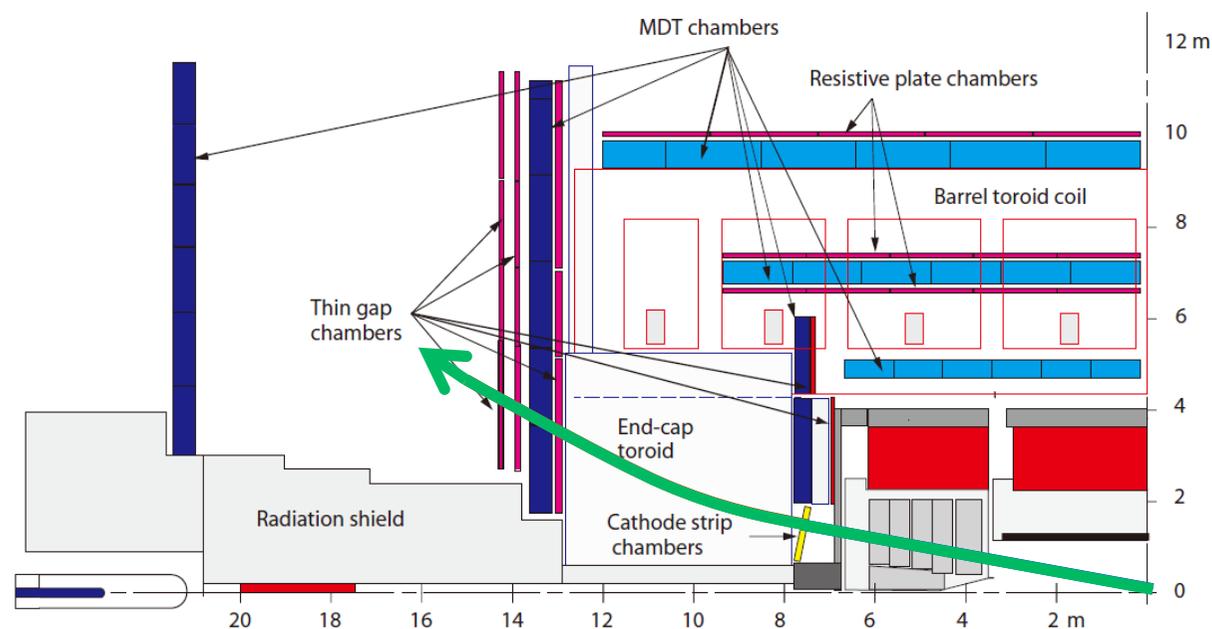
- Resistive Plate Chamber (RPC)

- $|\eta| < 1.05$



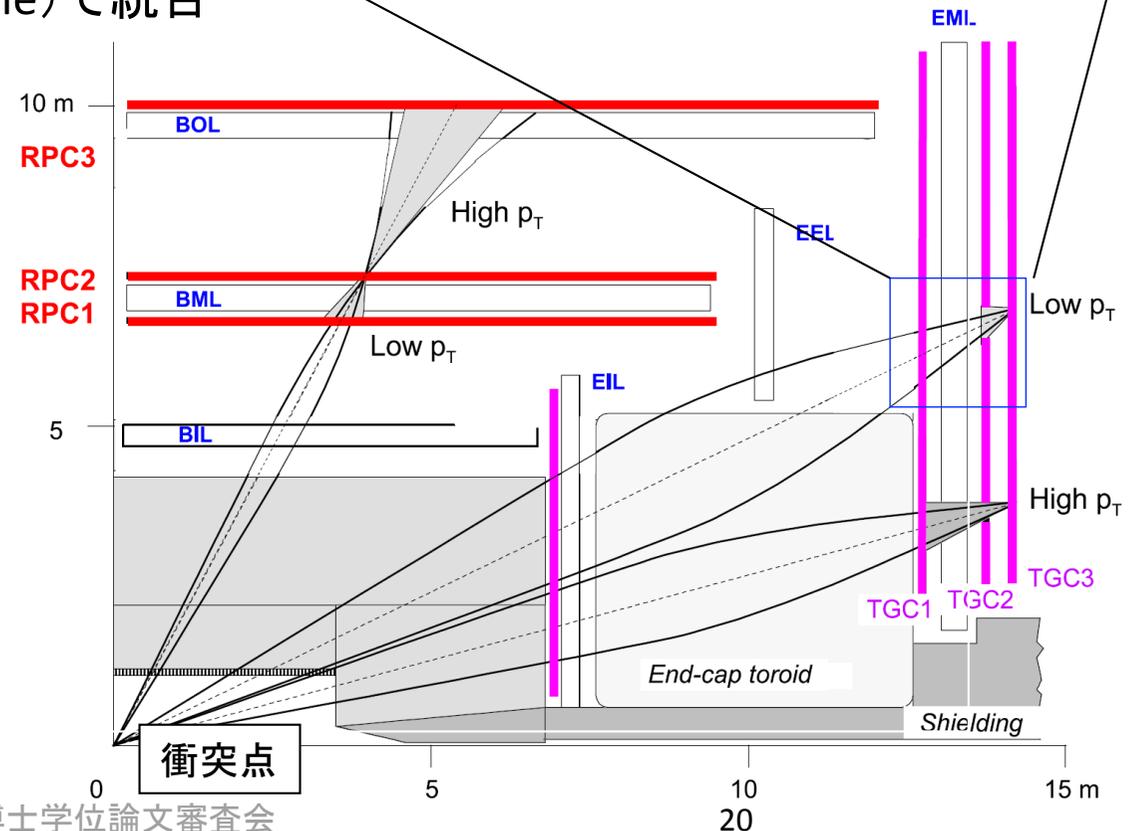
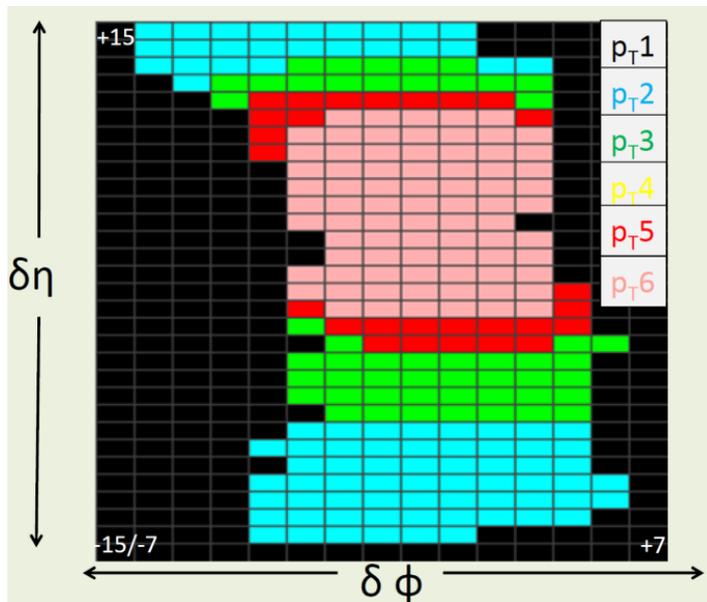
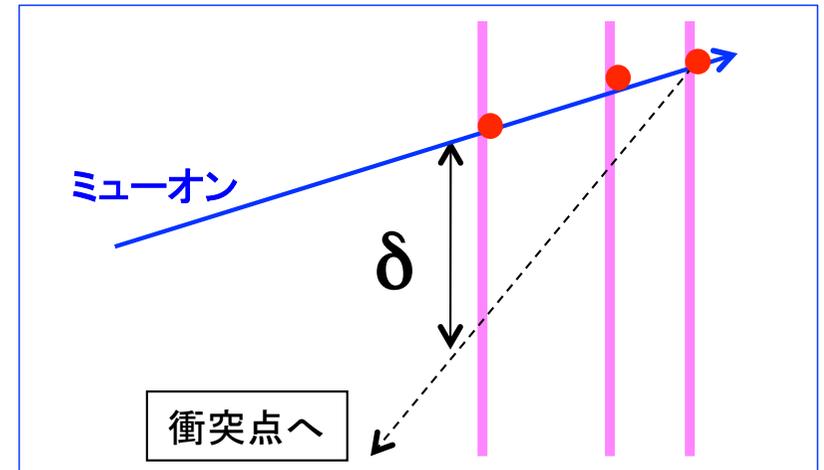
# ミューオン飛跡再構成

- 内部検出器 (ID) トラック
  - < 数10 GeVまではミューオン検出器よりも運動量分解能が良い
  - ハドロンのバックグラウンドが周囲に多い
- ミューオン検出器 (MS) トラック
  - ミューオン検出器でミューオンと識別されている
- コンバインドトラック
  - 同じミューオンで作られてIDとMSのトラックをつなぐ
  - 運動量分解能の良いミューオン



# ミュオントリガー

- ヒットコインシデンス
  - 3層 (R1, 2, 3 or TGC1, 2, 3)
  - 2次元座標 ( $\eta - \phi$ )
- 曲率の見積り ( $\delta\eta - \delta\phi$ )
  - $\delta$ : 仮想無限大運動量トラックとのズレ
- $p_T$  閾値レベルの算出
  - $\delta\eta - \delta\phi$  情報を LUT (look up table) で統合 (コインシデンスマトリックス)
  - $p_T$  閾値レベルの決定 (6段階)



$$E_T^{miss} = - \left( \sum_{\text{cluster}} \vec{E}_T + \sum_{\text{muon}} \vec{p}_T \right)$$

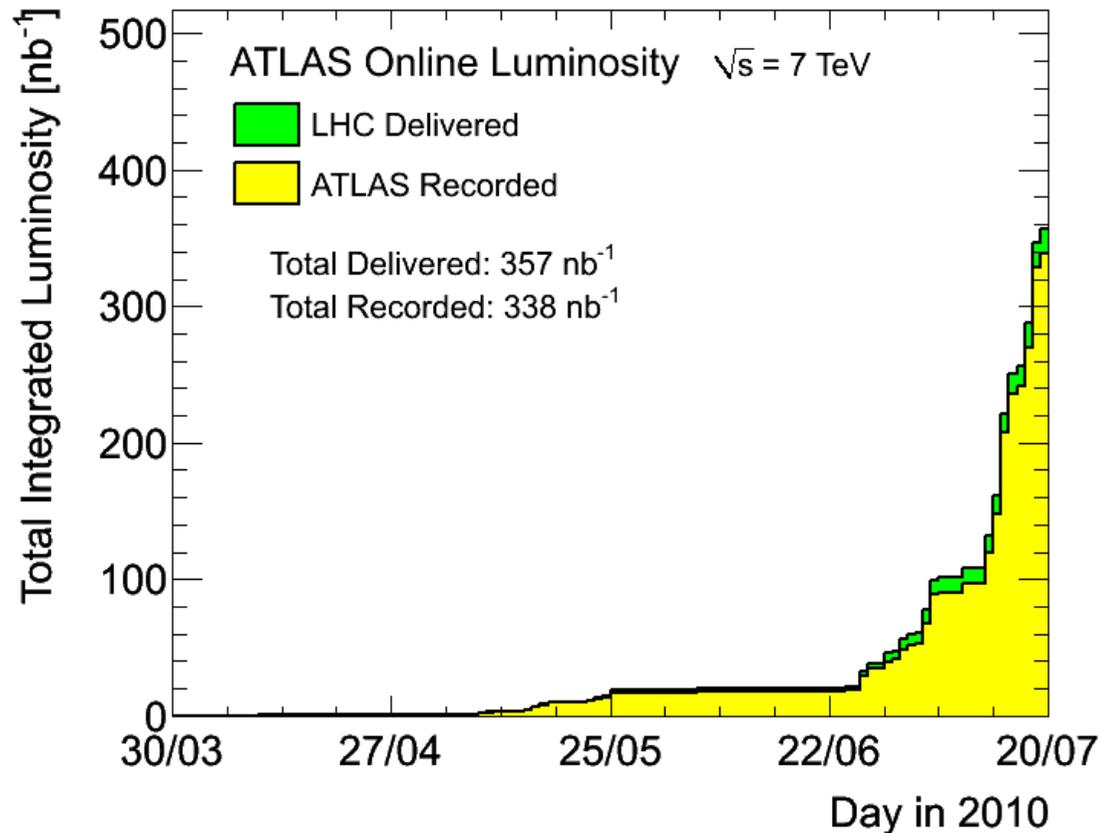
- (第一項): カロリーメータクラスターの横エネルギーのベクトル和
  - $(|E_{\text{cell}}|/\sigma_{\text{noise}}) > 4$  のセルをシードに3次元クラスタリング(電磁、ハドロン両方)
  - シャワー形状からhadron-like / em-likeを分類
  - 分類に依存したエネルギー補正
- (第二項): ミューオンの $p_T$ のベクトル和
  - ミューオンのカロリーメータでのエネルギー損失は第一項から引く

# 解析用データサンプル

- 実験データ

- 2010年4月～7月に取得されたデータを使用
- 解析に適した検出器状況を要求  
(LHC安定、磁石安定、トリガーOK、ID OK、ミューオンOK、カロリメータOK)
- W / Z 解析:  $p_T$  閾値 = 6 GeVの(検出器)シングルミューオントリガー

W→ $\mu\nu$ 解析のみ



積分ルミノシティ:  
W→ $\mu\nu$  : 310 nb<sup>-1</sup>  
Z→ $\mu\mu$  : 331 nb<sup>-1</sup>

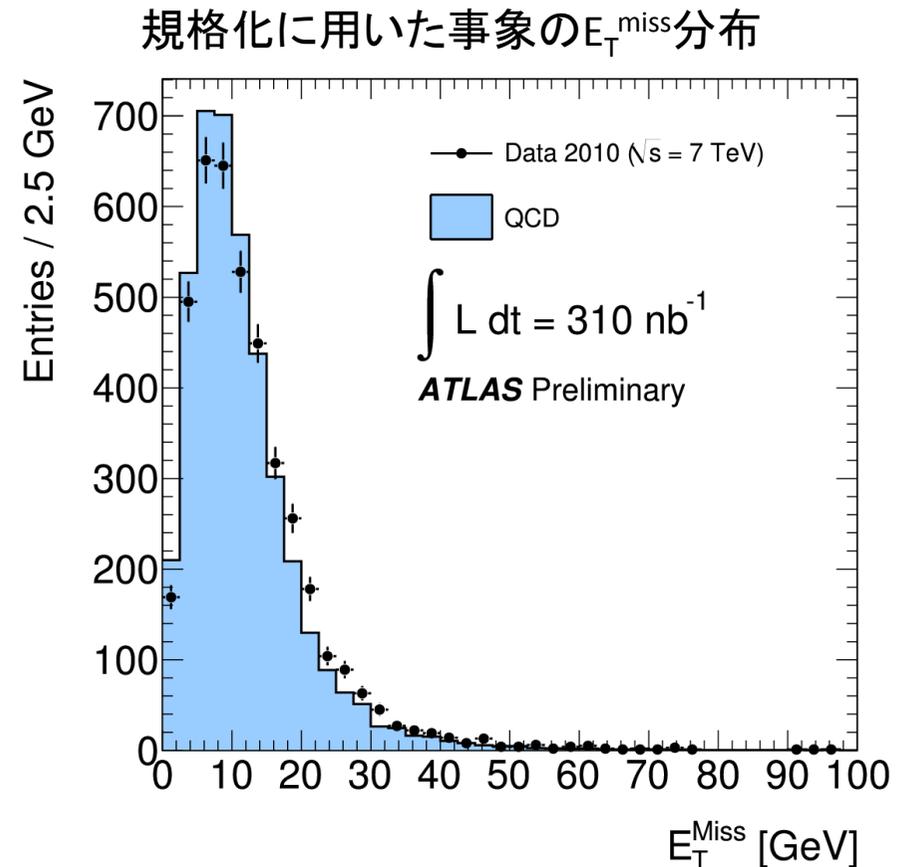
# 解析用データサンプル (MC)

- MCシミュレーションデータ
  - PYTHIA (POWHEG for tt) + MRST LO\* の組で生成
  - Geant4 + 検出器シミュレーション + 事象再構成アルゴリズム
  - NNLO計算の断面積で規格化
  - QCD di-jetサンプルのみ、実データで規格化定数を求める
  - $Z \rightarrow \mu\mu$ 、 $W \rightarrow \mu\nu$ にはpile-up (~2 minimum bias反応を追加)

Process	Generator	S x BR (nb.)
$Z \rightarrow \mu\mu$ ( $m_{\ell\ell} > 66$ GeV)	PYTHIA	$0.99 \pm 0.05$
$W \rightarrow \mu\nu$	PYTHIA	$10.46 \pm 0.52$
$Z \rightarrow \tau\tau$ ( $m_{\ell\ell} > 66$ GeV)	PYTHIA	$0.99 \pm 0.05$
$W \rightarrow \tau\nu \rightarrow \mu\nu\nu$	PYTHIA	$3.68 \pm 0.18$
tt	POWEG	$0.16 \pm 0.01$
QCD di-jet (1 muon with $p_T > 8$ GeV)	PYTHIA	$10.6 \times 10^6$

# QCD規格化定数

- $p_T > 20$  GeVのアイソレートしていないミュオンを持つ事象の数をデータとMCで比較
- QCD規格化定数:  $0.61 \pm 0.01$  (stat.)  $\pm 0.23$  (syst)
  - 系統誤差:
    - $E_{T,miss} > 25$  GeVカットを加えた時との中央値の差: 0.21
    - アイソレーションの定義の変更 (トラック or カロリーメータ): 0.04
    - ピークの左右での中央値の差: 0.08

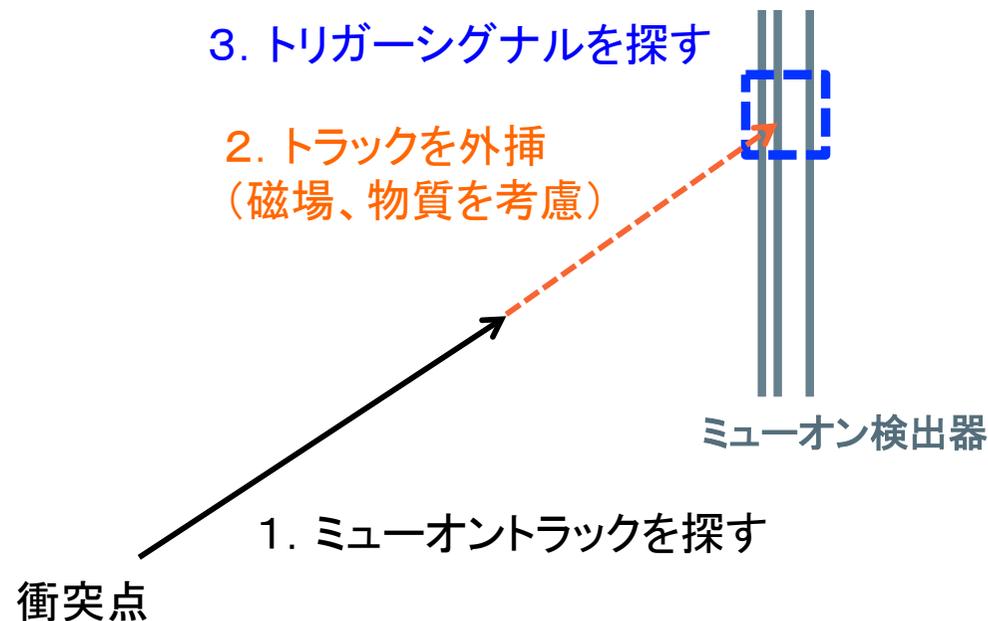


---

# ミューオントリガー効率の評価

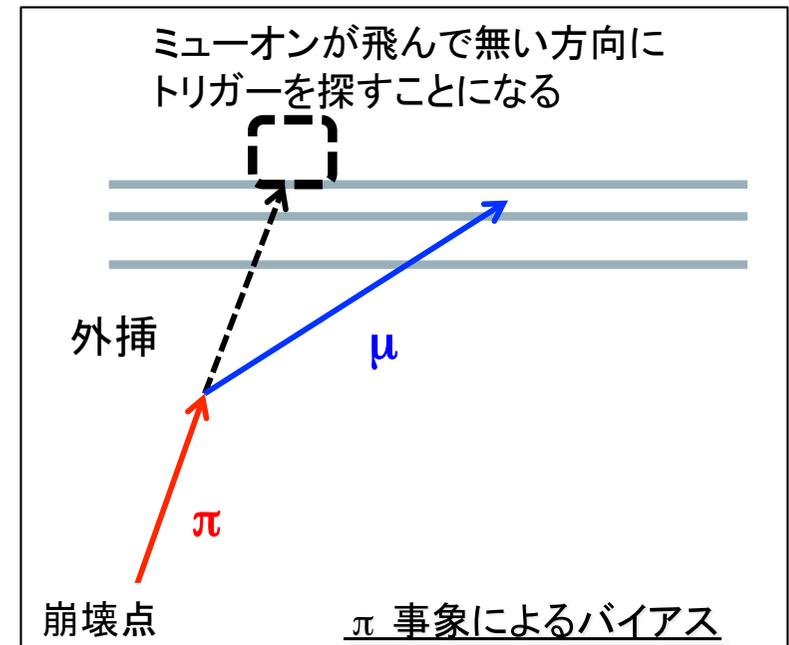
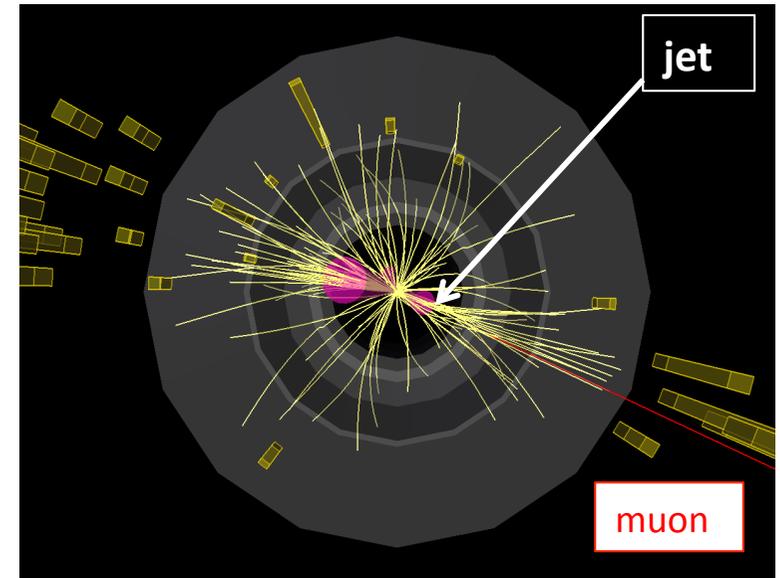
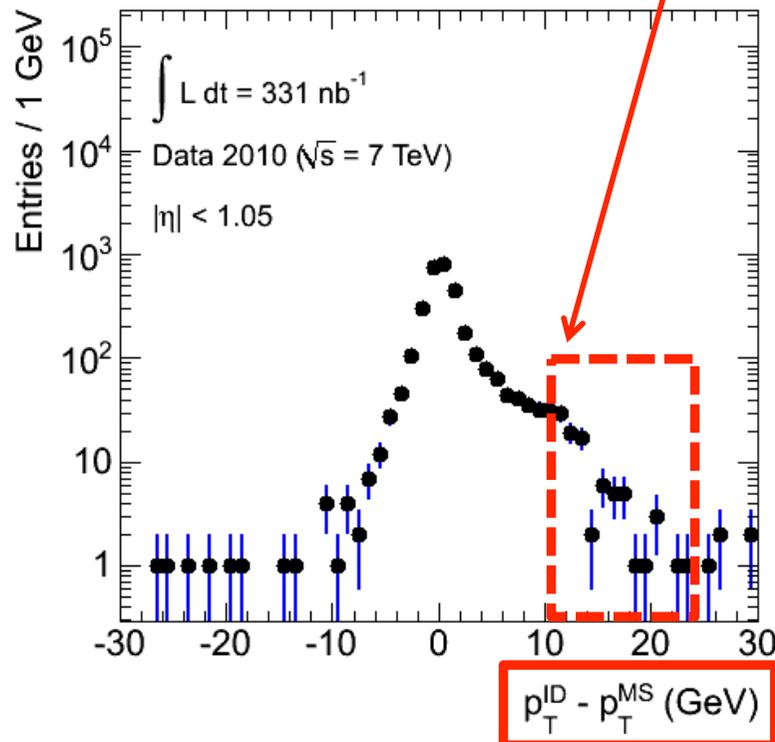
# ミュオントリガー効率の評価

- (評価対象)  $p_T$  閾値 = 6 GeV の (検出器) シングルミュオントリガー
- (検出器) TGC と RPC の 2 つを別々に評価
- トリガーバイアスを避ける
  - A. ジェットトリガー事象を用いる
  - B.  $Z \rightarrow \mu\mu$  事象のタグ&プローブ法



# A. ジェットトリガー事象を用いた評価

- ジェット中のミュオンを用いた評価
  - Heavy flavorメソン、 $\pi$ 粒子崩壊のミュオン
- $\pi$  粒子バックグラウンドの除去
  - $c\tau = 7.8$  m、検出器中で折れ曲がるトラック
  - IDとミュオン検出器の $p_T$ の差 ( $p_T^{\text{ID}} - p_T^{\text{MS}}$ ) で排除



# ミューオン選別

---

## ミューオン選別:

- コンバインドトラック
- $|\eta| < 2.4$
- $p_T > 20 \text{ GeV}$
- $p_T^{\text{MS}} > 10 \text{ GeV}$
- $|p_T^{\text{ID}} - p_T^{\text{MS}}| < 15 \text{ GeV}$
- $|z_0| < 10 \text{ mm}$

$\pi$  粒子除去

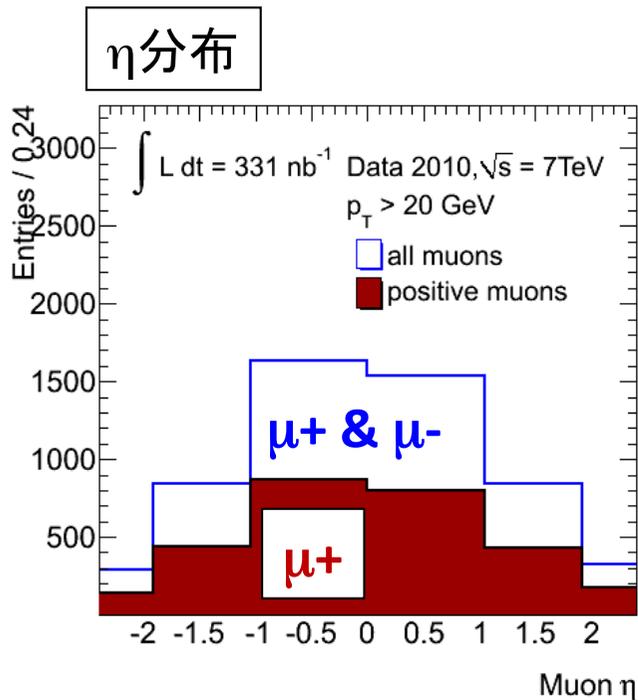
宇宙線除去

$p_T^{\text{MS}}$ : ミューオン検出器で測定された $p_T$

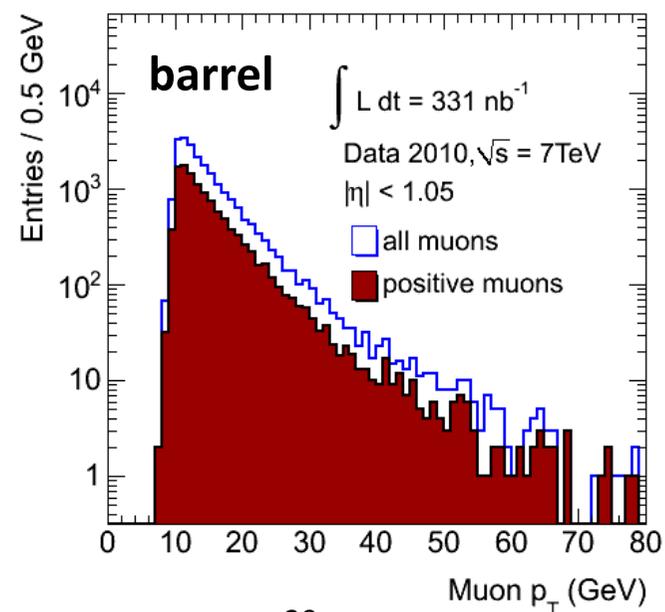
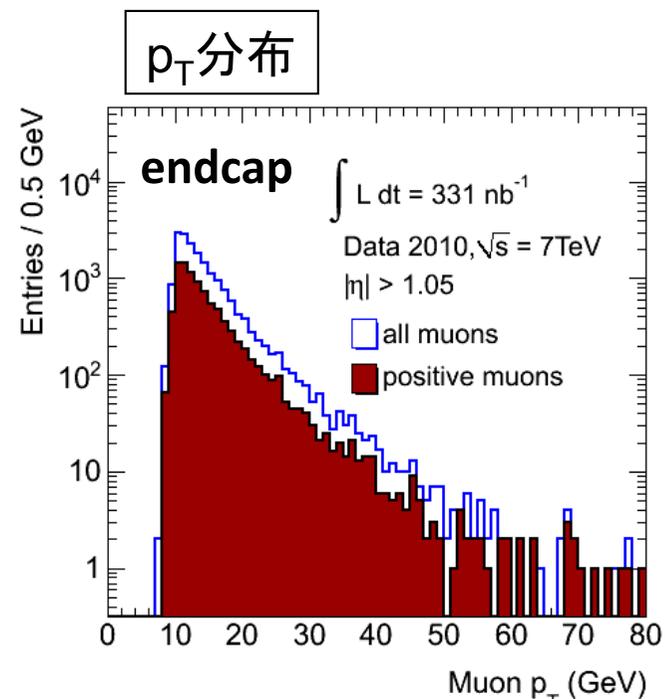
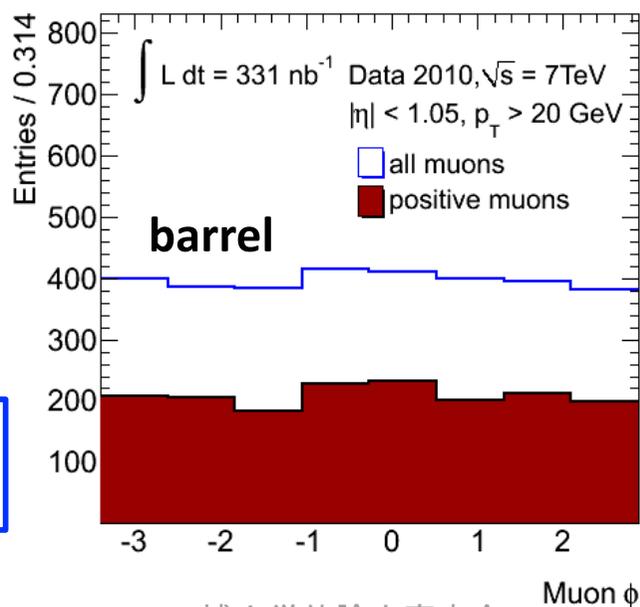
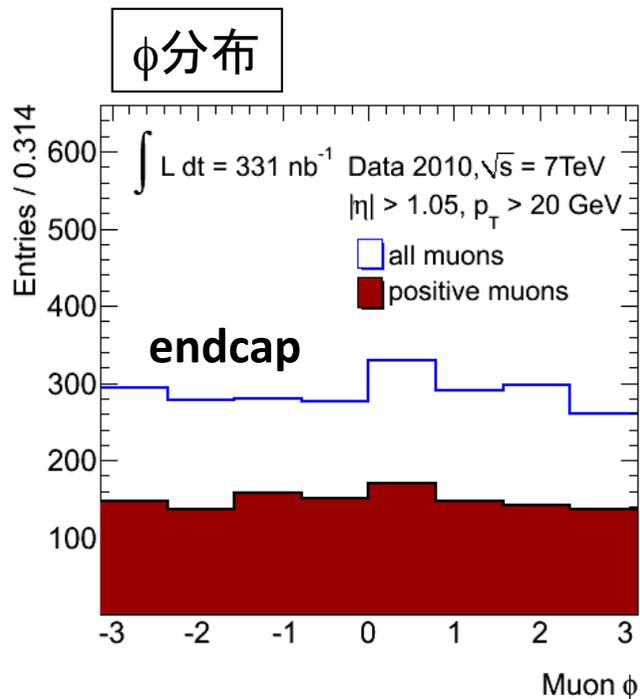
$p_T^{\text{ID}}$ : IDで測定された $p_T$

$z_0$ : 崩壊点とのz方向インパクトパラメータ

# ミューオンの分布

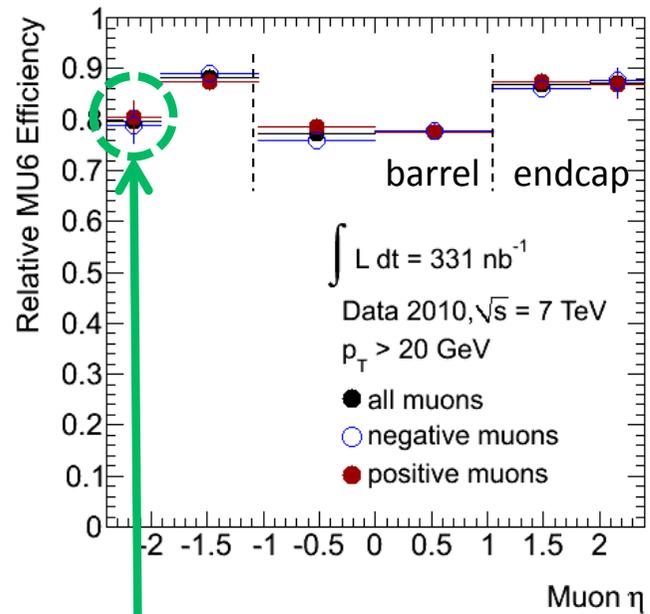


Endcap - 2307 (+: 1187, -: 1120)  
 Barrel - 3173 (+: 1670, -: 1503)

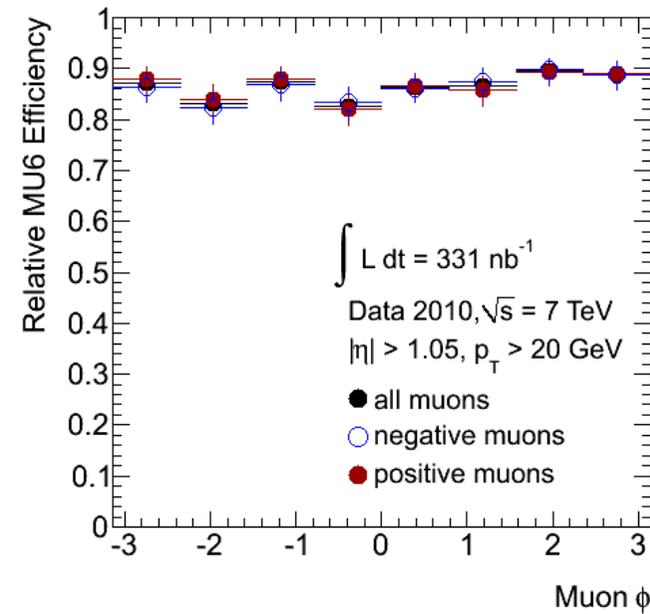


# ミューオントリガー効率分布

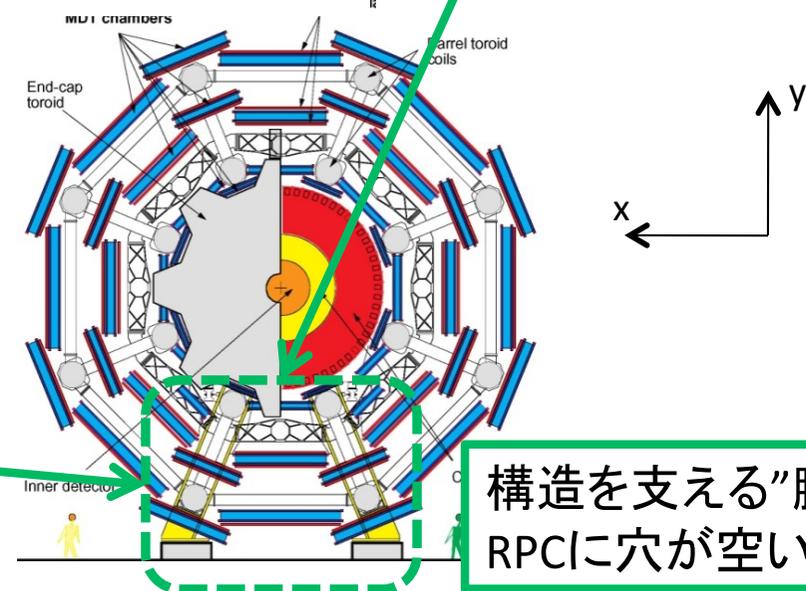
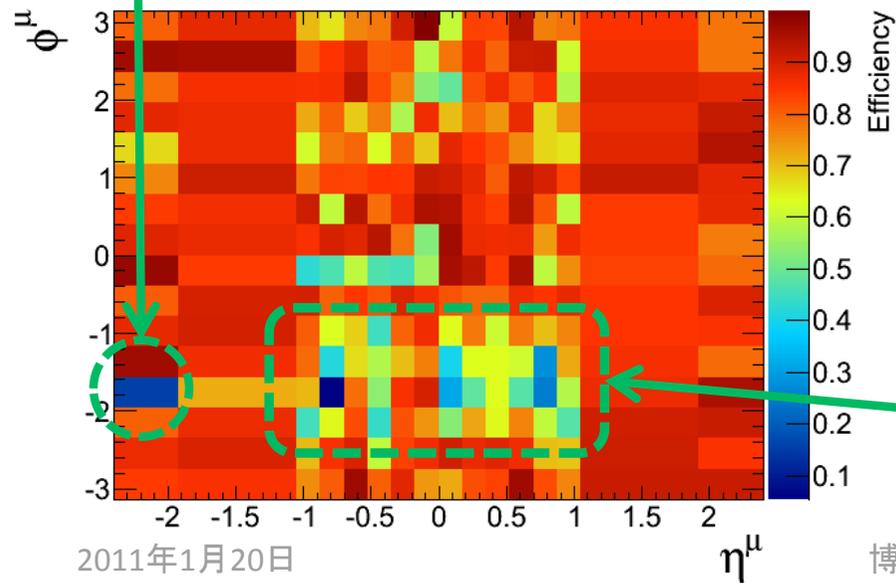
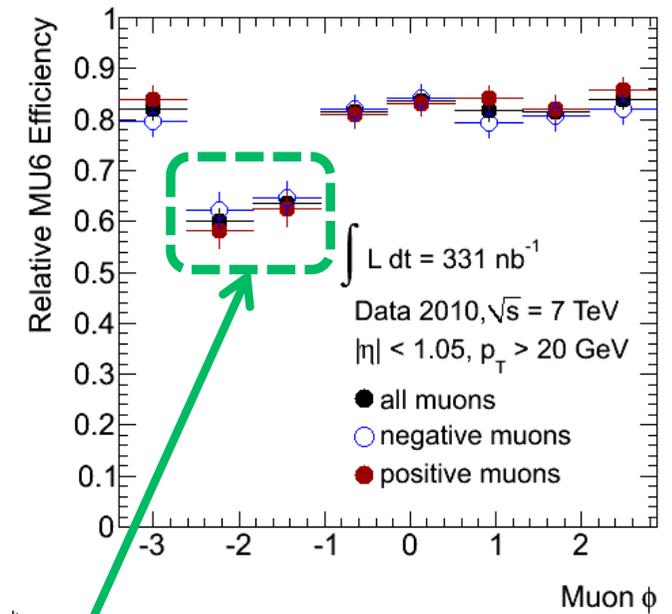
η分布



φ分布 (endcap)



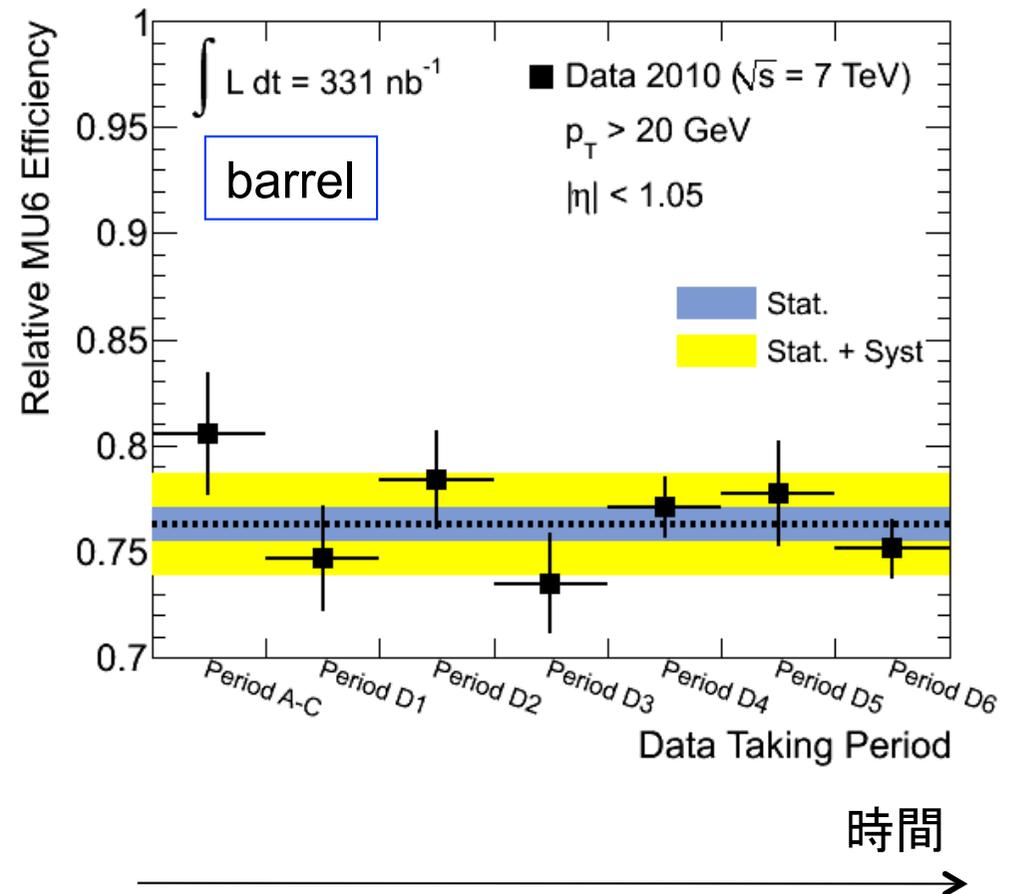
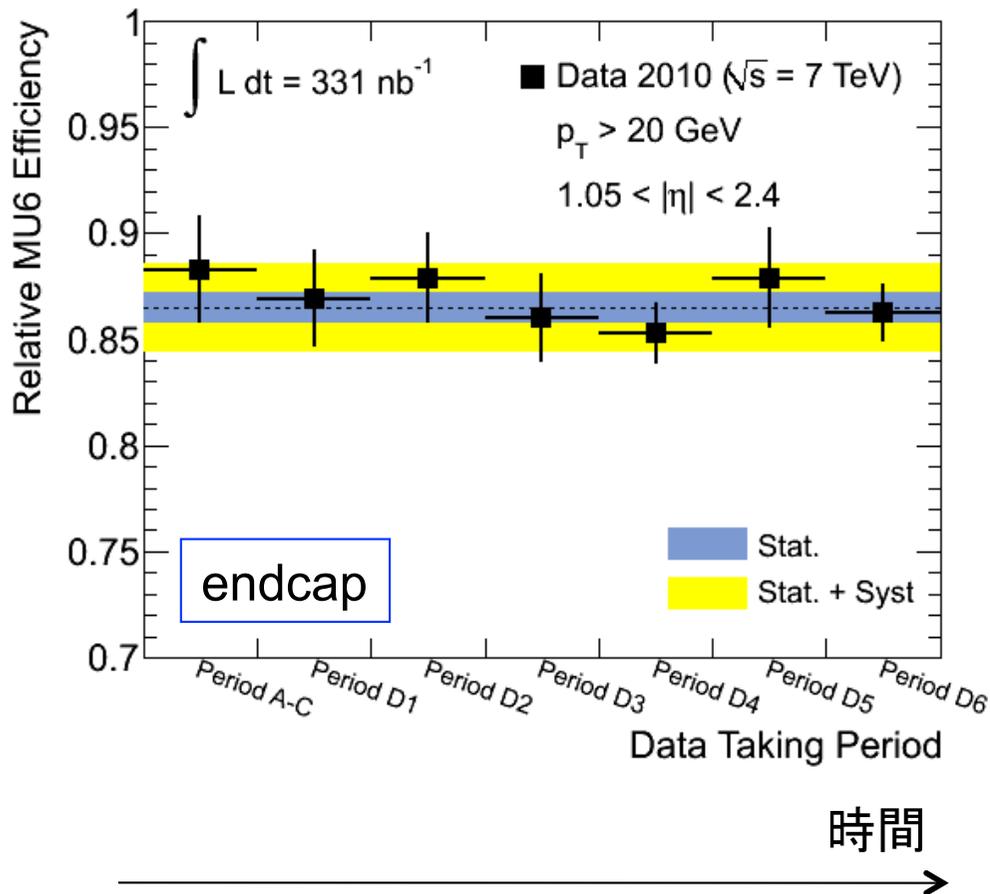
φ分布 (barrel)



構造を支える”脚”:  
RPCに穴が空いてる

# トリガー効率長期安定性

- 2010年4月11日～2010年7月18日

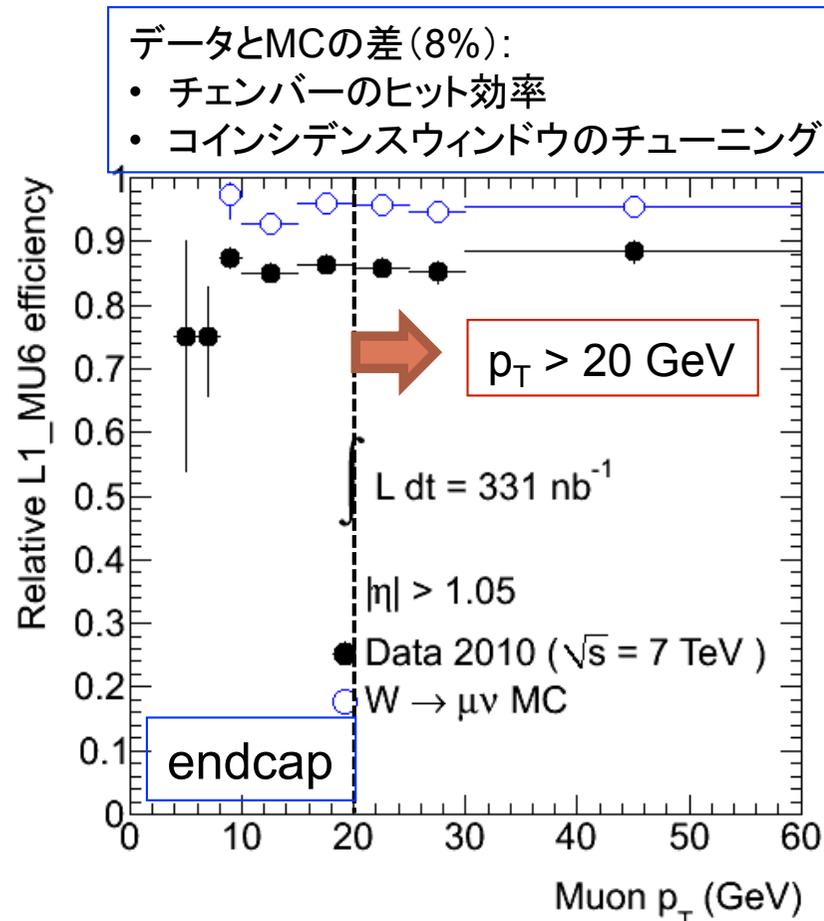


# MCへの補正

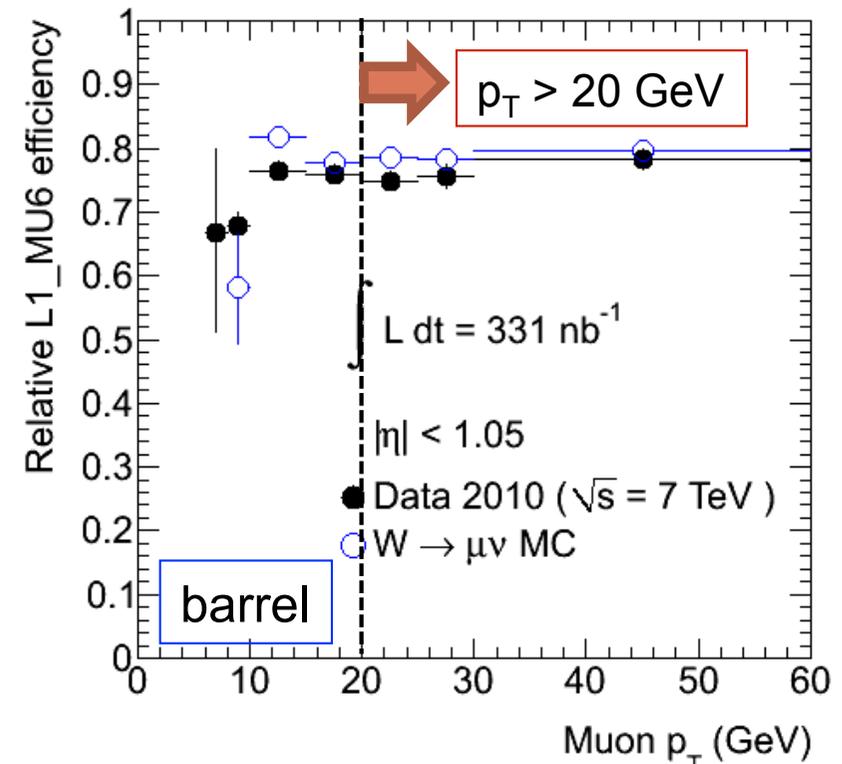
- ミューオントリガー効率のMCへの補正
- モンテカルロ:  $W \rightarrow \mu\nu$

$$C_{corrected} = C \times \frac{\varepsilon_{data}}{\varepsilon_{MC}}$$

scale factor



Data:  $0.865 \pm 0.007$  (stat)  $\pm 0.017$  (syst)  
 MC :  $0.950 \pm 0.001$  (stat)  $\pm 0.006$  (syst)  
 SF :  $0.911 \pm 0.008$  (stat)  $\pm 0.017$  (syst)



Data:  $0.763 \pm 0.008$  (stat)  $\pm 0.015$  (syst)  
 MC :  $0.793 \pm 0.002$  (stat)  $\pm 0.010$  (syst)  
 SF :  $0.961 \pm 0.010$  (stat)  $\pm 0.018$  (syst)

# トリガー効率評価における系統誤差の導出

- スケールファクターの系統誤差

$$C_{corrected} = C \times \frac{\varepsilon_{data}}{\varepsilon_{MC}}$$

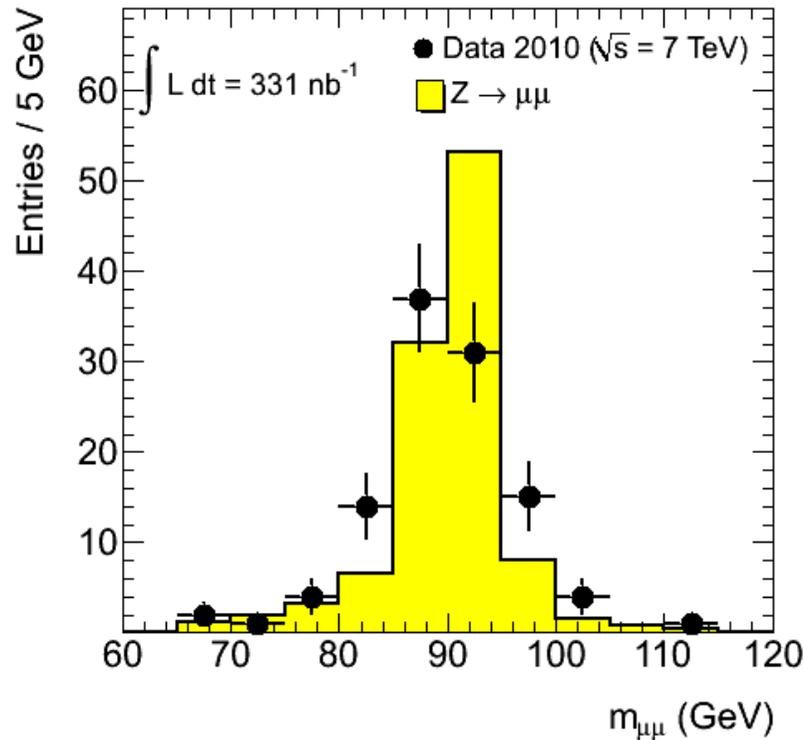
scale factor

	Endcap (%)	Barrel (%)
飛跡再構成アルゴリズム中のトリガーバイアスの不定性	0.5	1.5
$p_T = 20$ GeVカットに対する安定性	0.8	1.0
$\pi$ 粒子バックグラウンドの効果 <sup>(*1)</sup>	0.4	0.1
トラックの外挿方法	1.0	0.4
トラックに2つ以上のトリガーがマッチした時の優先順位の付け方 <sup>(*2)</sup>	1.2	0.1
トラックの先にトリガーを探す領域の大きさ <sup>(*3)</sup>	0.2	0.1
W/Z事象とのミュオンの $\eta$ 分布の違いの効果	0.3	0.5
合計	1.9	1.9

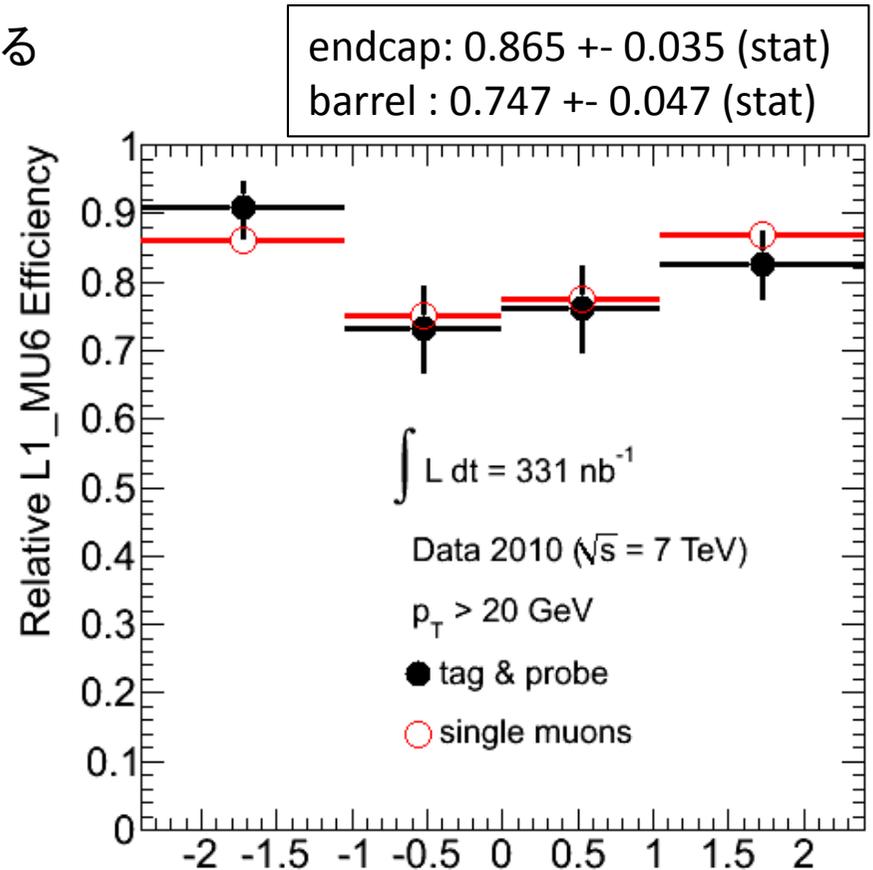
- $|p_T^{ID} - p_T^{MS}|$ カット値 ( $20 \pm 5$  GeV)
- 最も近いトリガー or 最も $p_T$ 閾値の高いトリガー
- $\Delta R = 3\sigma \pm 1\sigma$

## B. タグ & プローブ法による評価

- $Z \rightarrow \mu\mu$  事象の2本のミュオン(タグ&プローブ)
  - 不変質量のカットでバックグラウンドを排除
- タグミュオンがイベントトリガーを鳴らしたことを要求
  - プローブミュオンのトリガーバイアスがなくなる
- プローブミュオンでトリガー効率を測定



- 109の $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象 = 218ミュオン
- $Z \rightarrow \mu\mu$ 断面積測定と同じ事象



- **ジェットトリガー事象での評価との比較**  $\eta^\mu$  (実データ)
- **統計誤差内で一致**

---

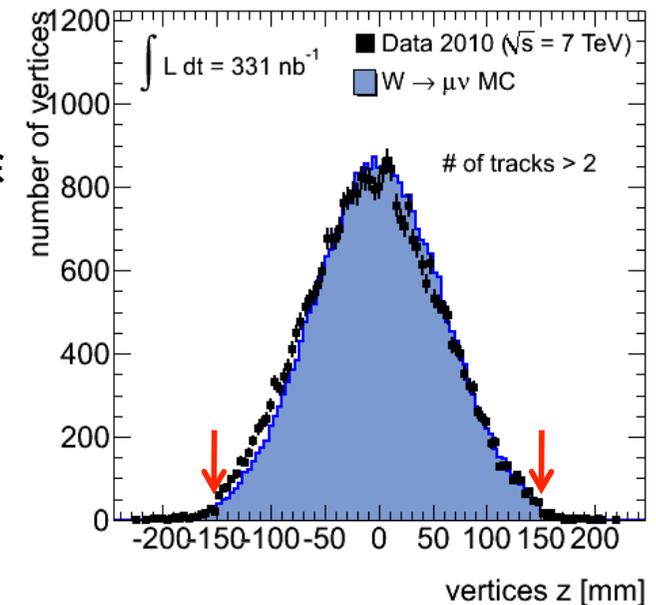
# W / Z 断面積測定

# W/Zプリセレクション

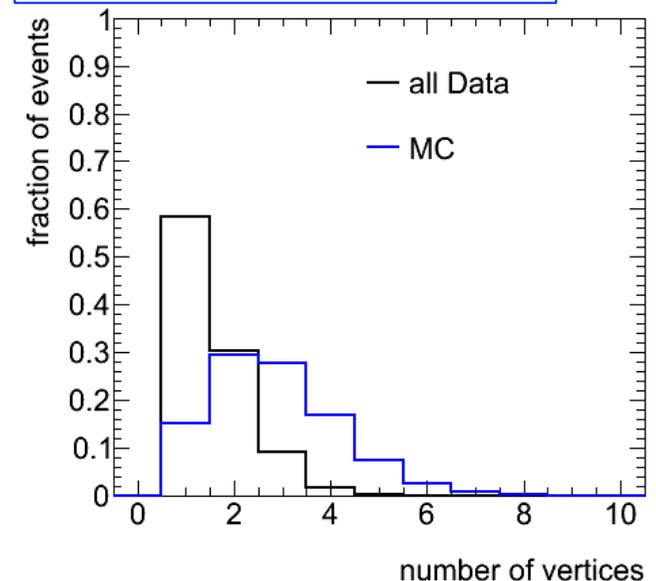
- 宇宙線、検出器ノイズのイベントを排除するセレクション
  - 1つ以上のバーテックスを要求し、宇宙線事象を排除
    - 再構成に用いられたトラック数 > 2
    - 原点からの距離 (z座標) < 150 mm
  - $E_T^{\text{miss}}$ を用いる $W \rightarrow \mu\nu$ 測定では、上記起源と疑わしいジェットを排除  
イベントロス < 0.01 %
- high- $p_T$ のミュオン(コンバインド)を要求
  - $p_T > 15$  GeV
  - $|\eta| < 2.4$
  - $p_T^{\text{MS}} > 10$  GeV
  - $|p_T^{\text{ID}} - p_T^{\text{MS}}| < 15$  GeV
  - $|z_0| < 10$  mm
- $W \rightarrow \mu\nu$ 、 $Z \rightarrow \mu\mu$  MCはバーテックスの数(パイルアップ)を事象毎にウェイトアクセプタンスへの影響  $\sim 0.2$  %

トリガー効率測定と同一

バーテックスのz位置



イベント毎のバーテックスの数



---

# $W \rightarrow \mu\nu$ 事象の断面積測定

# W → μν : カットフロー

$$\frac{N_{sig} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot L_{int}}$$

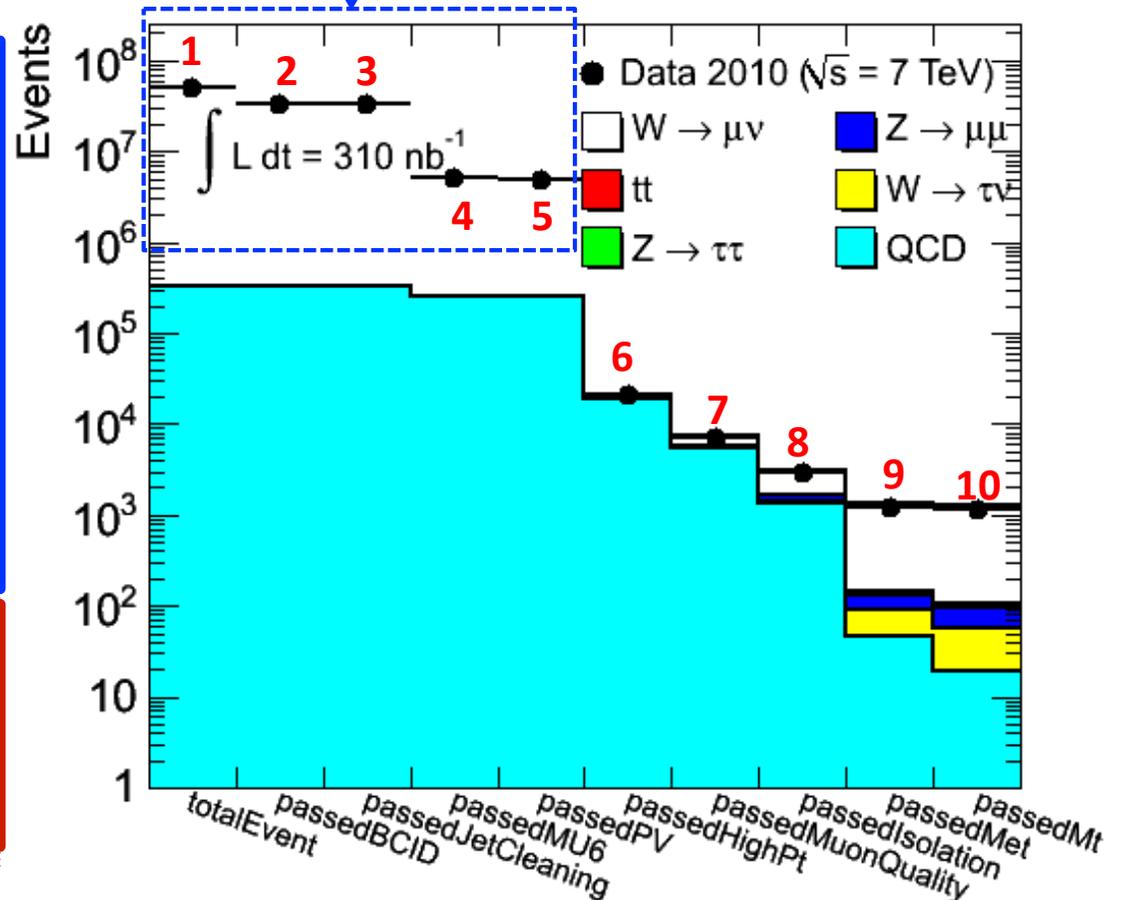
## プリセレクション

	selection	number of events
1	All	50204964
2	Good Run List	33613684
3	Jet cleaning	33611292
4	L1MU6	5133936
5	Vertex	4789670
6	Combined μ,  η  < 2.4, p <sub>T</sub> > 15 GeV, p <sub>T</sub> <sup>MS</sup> > 10 GeV,  p <sub>T</sub> <sup>MS</sup> - p <sub>T</sub> <sup>ID</sup>   < 15 GeV,  z <sub>0</sub> - z <sub>svx</sub>   < 10 mm,	20721
7	p <sub>T</sub> > 20 GeV,	7052
8	isolation	2921
9	E <sub>T</sub> <sup>miss</sup> > 25 GeV	1220
10	M <sub>T</sub> > 40 GeV	1181
		(W <sup>+</sup> :709, W <sup>-</sup> :472)

## W → μν 事象選別

7. ミューオン p<sub>T</sub> > 20 GeV
8. Isolated
9. E<sub>T</sub><sup>miss</sup> > 25 GeV
10. M<sub>T</sub> > 40 GeV

ミューオンの p<sub>T</sub> > 8 GeV  
@ QCD MC

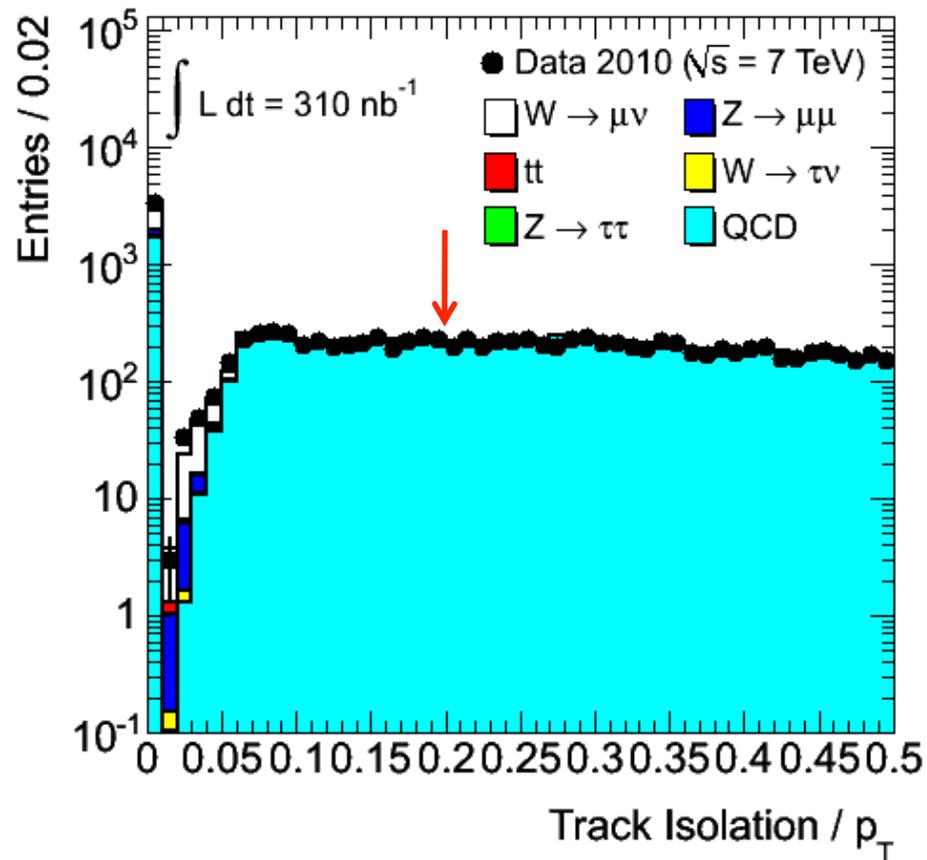


• W → μν 事象数 = 1181 (W<sup>+</sup>: 709, W<sup>-</sup>: 472)

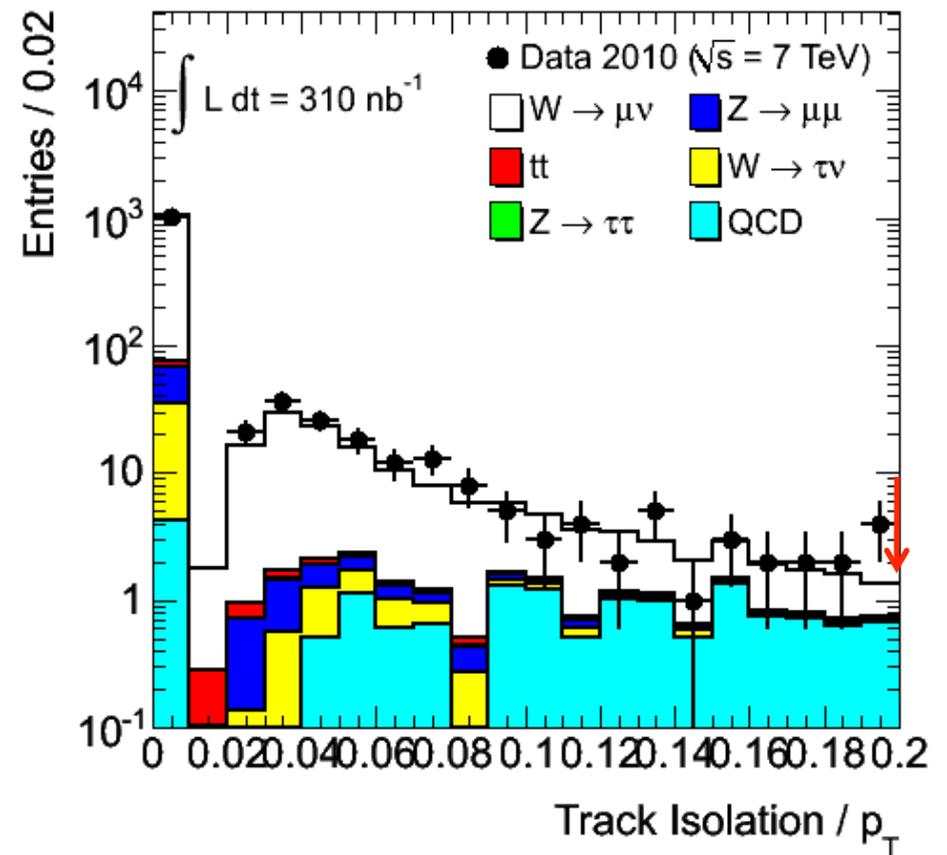
# ミューオンアイソレーション

- ミューオンから $\Delta R < 0.4$ の中でのIDトラックの $p_T$ の和をミューオンの $p_T$ で割った値が0.2以下

- プリセレクション後



- $W \rightarrow \mu\nu$  全事象選別後



# W → μν : 背景事象

$$\frac{N_{sig} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot L_{int}}$$

- QCD事象: QCD、non-QCD事象のIsolationカットへの効率を評価し、シグナル領域に残る事象数を推定

$$N_{loose} = N_{nonQCD} + N_{QCD}$$

$$N_{isol} = \epsilon_{nonQCD} N_{nonQCD} + \epsilon_{QCD} N_{QCD}$$

$$N_{QCD} = \frac{N_{loose} \epsilon_{nonQCD} - N_{isol}}{\epsilon_{nonQCD} - \epsilon_{QCD}}$$

- $N_{loose}$ : Isolation 以外のカットをかけた事象数 (1272)
- $N_{isol}$ : W → μν 事象数 (1181)
- $\epsilon_{nonQCD}$ : W / Z事象のミュオンがisolatedな確率
  - Z → μμ事象で見積り: 0.984 ± 0.10 (syst)
- $\epsilon_{QCD}$ : QCD由来のミュオンがisolatedな確率
  - プリセレクション後、15 < pT < 20 GeVのミュオンをコントロールサンプルとして見積り: 0.226 ± 0.006 (stat)

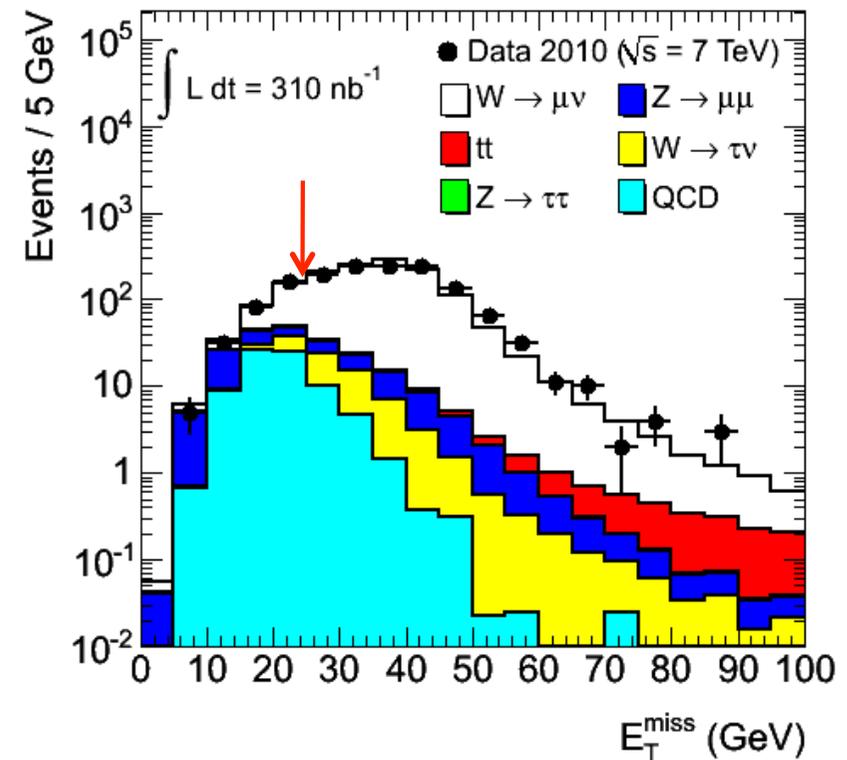
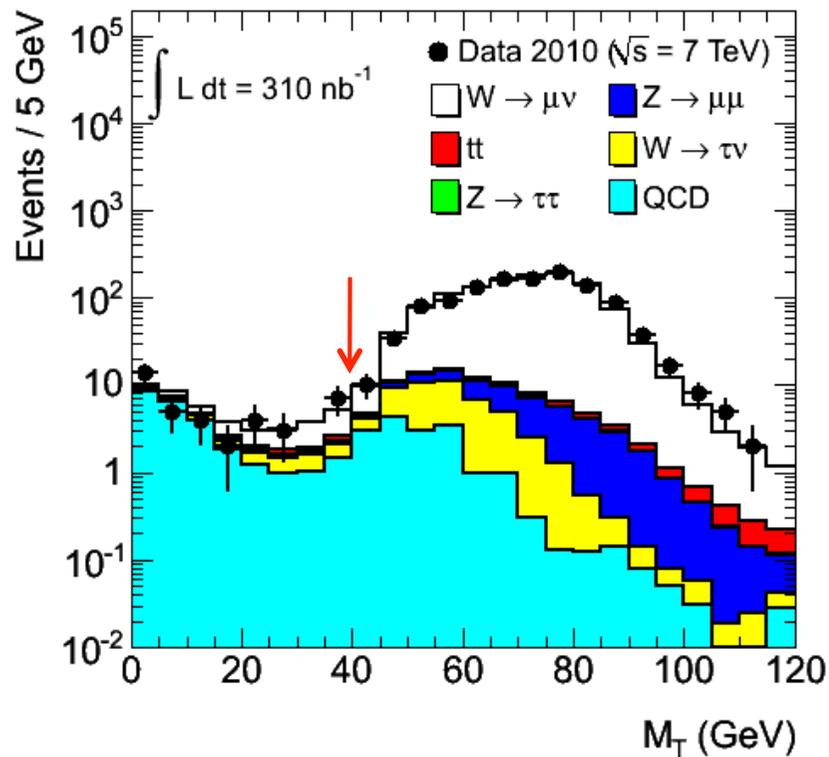
## 宇宙線:

- 宇宙線がイベントセレクションを通過する確率 (non-colliding bunch):  $\epsilon = (1.1 \pm 0.2 \text{ (stat)}) \times 10^{-10}$
- ミニマムバイアスの断面積: 50 ± 10 (stat) mb
- オーバーラップ:  $1.1 \times 10^{-10} \times 50 \text{ mb} \times 310 \text{ nb}^{-1} = 1.7 \pm 0.8 \text{ (stat)}$

Sample	Predicted Events
<b>MC</b> Z → μμ	34.9 ± 0.2 (stat) ± 2.2 (syst)
Z → ττ	1.4 ± 0.0 (stat) ± 0.1 (syst)
W → τν	38.3 ± 0.2 (stat) ± 2.5 (syst)
t $\bar{t}$	4.3 ± 0.0 (stat) ± 0.3 (syst)
QCD	21.1 ± 4.5 (stat) ± 8.7 (syst)
Cosmic	1.7 ± 0.8
<b>Total</b>	<b>103.3 ± 10.9</b>

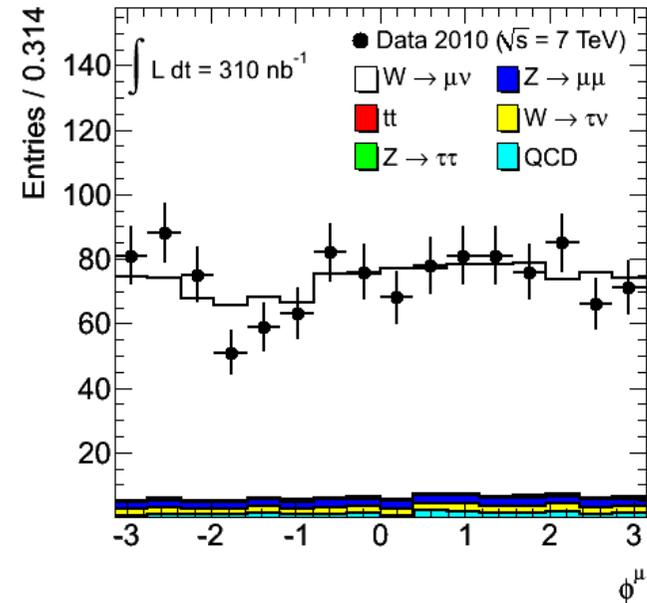
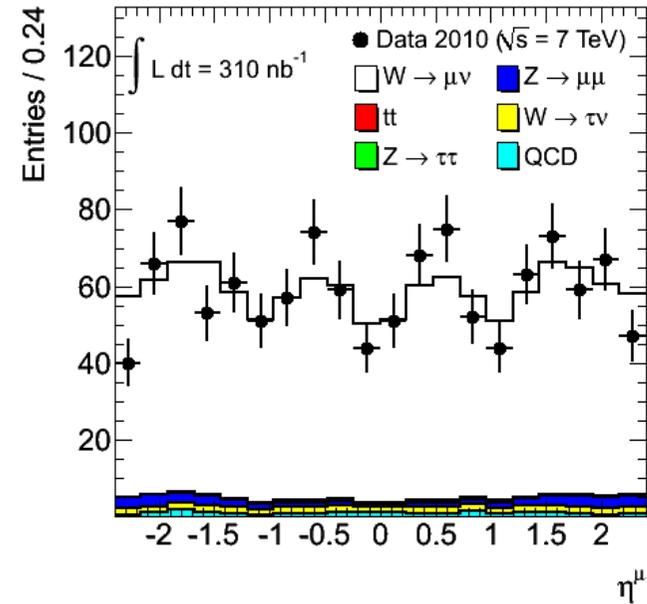
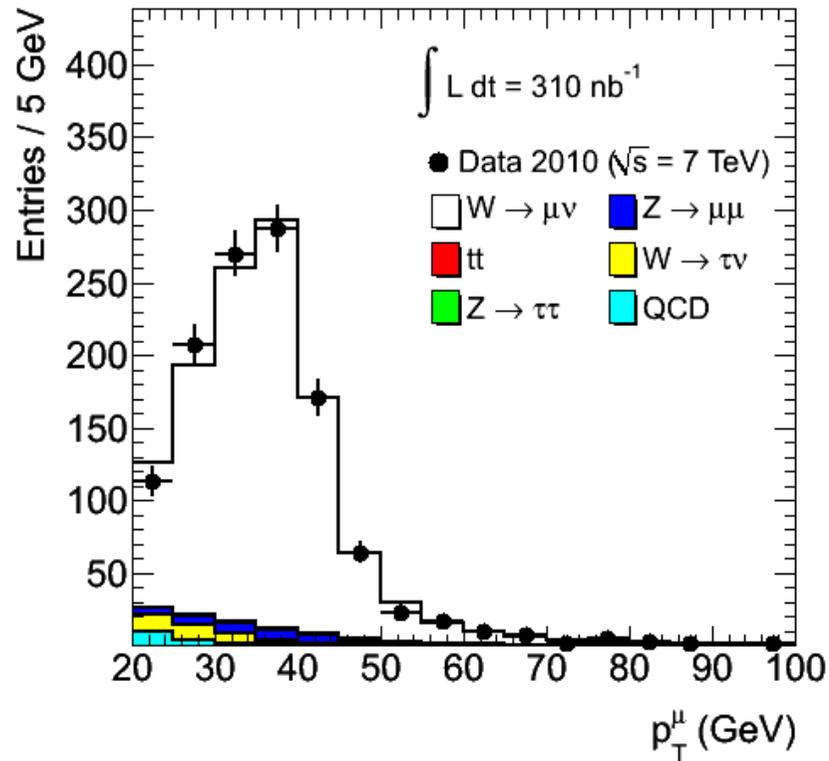
# $W \rightarrow \mu\nu : E_T^{\text{miss}}, M_T$

- (自分以外の)全事象選別後の $E_T^{\text{miss}}$ 、横質量
  - アクセプタンス、QCDスケール補正後
  - イベント数で規格化
  - エラーは統計のみ



# $W \rightarrow \mu\nu$ : ミューオン分布

- 全事象選別後のミューオン分布
  - アクセプタンス、QCDスケール補正後
  - ミューオン数で規格化
  - エラーは統計誤差のみ



# $W \rightarrow \mu\nu$ : アクセプトランス

$$\frac{N_{sig} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot L_{int}}$$

- **A**:  $0.480 \pm 0.014$  (W),  $0.484 \pm 0.015$  (W+),  $0.474 \pm 0.014$  (W-)
- **C**:  $0.758 \pm 0.031$  (W),  $0.765 \pm 0.031$  (W+),  $0.748 \pm 0.030$  (W-)
  - バーテックスの数の補正:  $0.998 \pm 0.002$
  - ミューオントリガー効率の補正:  $0.931 \pm 0.018$
  - ミューオン飛跡再構成効率の補正:  $1.000 \pm 0.024$
- **A×C**:  $0.364 \pm 0.018$  (W),  $0.370 \pm 0.019$  (W+),  $0.355 \pm 0.018$  (W-)

- **系統誤差: 5 % (A×C)**

- PDF、パートン断面積の理論的不定性: 3 % (A), 0.4 % (C)
- パイルアップの影響の見積り: 0.2 %
- ミューオントリガー効率: 1.9 %
- ミューオン飛跡再構成効率: 2.4 %

**$Z \rightarrow \mu\mu$  事象のミュオン**

- ミューオン対の質量ピーク位置 (スケール: 1.2 %)
- ミューオン対の質量ピーク幅 (分解能: 0.2 %)
- ミューオンのアイソレーション (1.0 %)

- ミューオン  $p_T$  に関するカットの不定性: 1.6 %  
( $p_T$ , isolation,  $E_T^{miss}$ ,  $M_T$ )

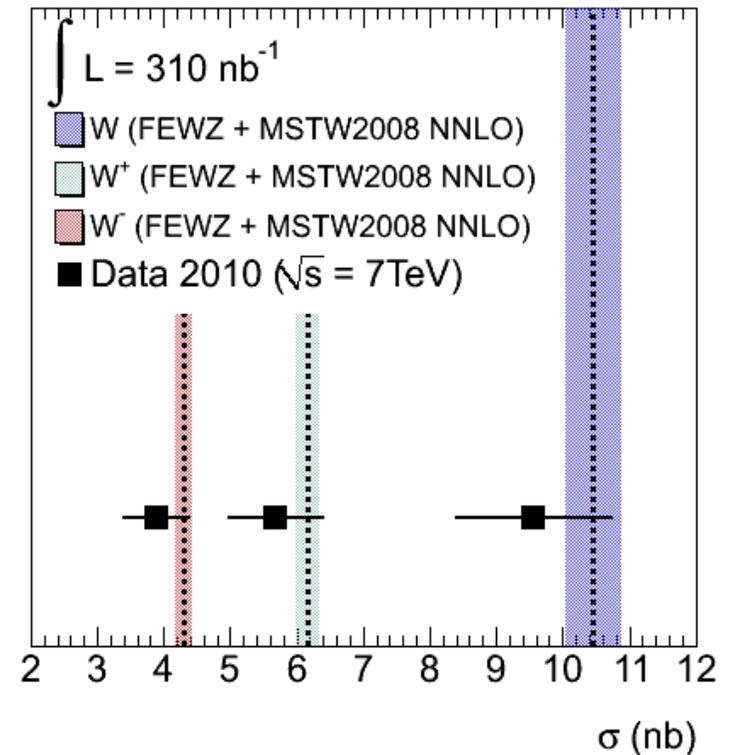
- カロリーメータエネルギーに対する  
カットの不定性 ( $E_T^{miss}$ ): 2.0 %

- クラスターのエネルギースケール: 1.5 %
- クラスターのキャリブレーション: 1.0 %

# $W \rightarrow \mu\nu$ : 生成断面積×崩壊分岐比

- 信号事象数: 1181
  - $W^+$ : 709
  - $W^-$ : 412
- バックグラウンド事象数:  $103.3 \pm 10.9$  (syst)
  - $W^+$ :  $56.4 \pm 6.5$  (syst)
  - $W^-$ :  $47.1 \pm 4.6$  (syst)
- アクセプタンス ( $A \times C$ ):  $0.364 \pm 0.018$  (syst)
  - $W^+$ :  $0.370 \pm 0.019$  (syst)
  - $W^-$ :  $0.355 \pm 0.018$  (syst)
- 積分ルミノシティ:  $310 \pm 34$  (syst) nb<sup>-1</sup>

$$\sigma_{W/Z} \times \text{Br}(W/Z) = \frac{N_{\text{sig}} - N_{\text{bg}}}{A \cdot C \cdot L_{\text{int}}}$$



---


$$\begin{aligned} \sigma_W \times BR(W \rightarrow \mu\nu) &= 9.57 \pm 0.31 \text{ (stat)} \pm 0.48 \text{ (syst)} \pm 1.05 \text{ (lumi) nb.} \\ \sigma_W \times BR(W^+ \rightarrow \mu^+\nu) &= 5.69 \pm 0.23 \text{ (stat)} \pm 0.29 \text{ (syst)} \pm 0.63 \text{ (lumi) nb.} \\ \sigma_W \times BR(W^- \rightarrow \mu^-\nu) &= 3.87 \pm 0.20 \text{ (stat)} \pm 0.20 \text{ (syst)} \pm 0.43 \text{ (lumi) nb.} \end{aligned}$$


---

---

# $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象の断面積測定

# Z → μμ : カットフロー

## プリセレクション

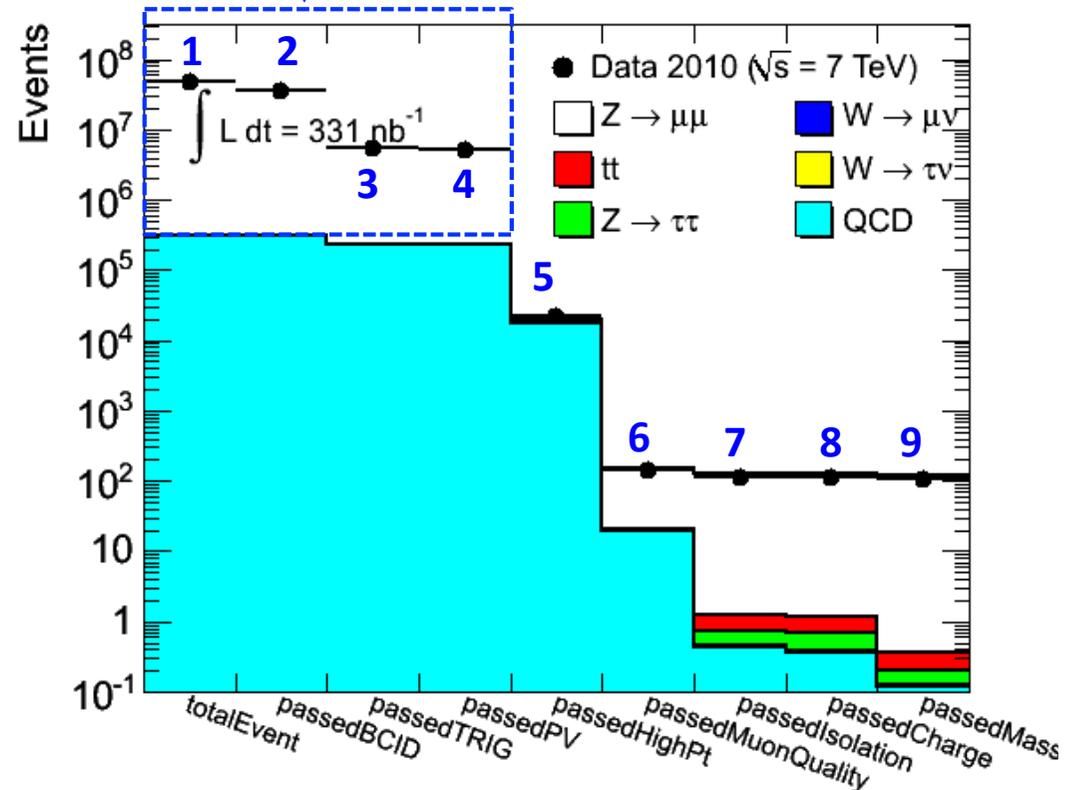
	selection	number of Events
1	All	49655492
2	Good run List	35883824
3	L1_MU6	5476542
4	Vertex	5113446
5	Combined μ,  η  < 2.4, p <sub>T</sub> > 15 GeV, p <sub>T</sub> <sup>MS</sup> > 10 GeV,  p <sub>T</sub> <sup>MS</sup> - p <sub>T</sub> <sup>ID</sup>   < 15 GeV,  z <sub>0</sub> - z <sub> vtx</sub>   < 10 mm,	22120
6	Tight Kinematics (μ × 2)	144
7	Isolation	117
8	Opposite Charge	117
9	Mass Window	109

## Z → μμ 事象選別

6. 2本のミュオン
7. 2本ともisolated
8. 電荷が反対
9. 66 < M<sub>μμ</sub> < 116 GeV

ミュオンの p<sub>T</sub> > 8 GeV  
@ QCD MC

$$\frac{N_{sig} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot L_{int}}$$



• Z → μμ 事象数 = 109

# Z → μμ : 背景事象

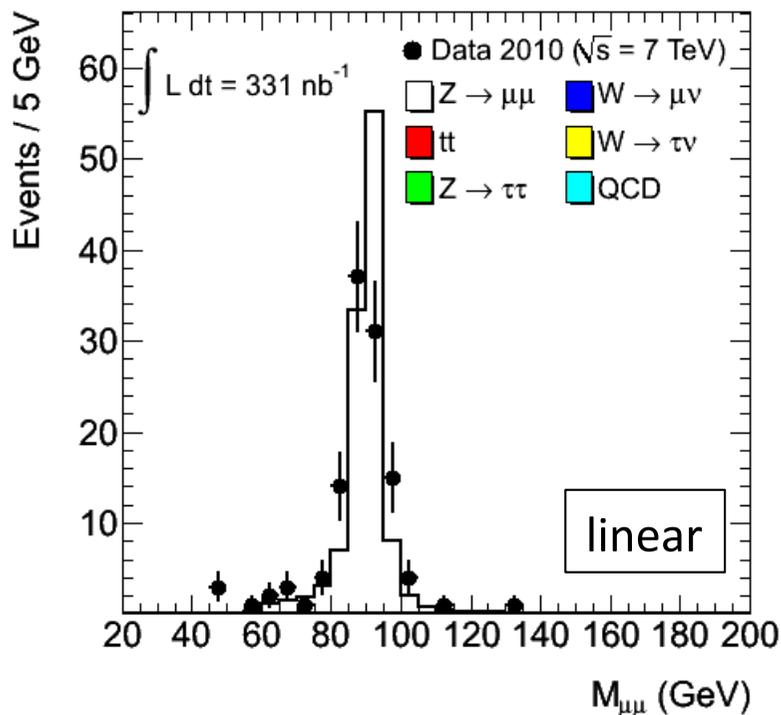
$$\frac{N_{sig} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot L_{int}}$$

- MCを信頼してバックグラウンド数を見積もる
- total: 0.364 ± 0.163
- 宇宙線の影響は無視できる

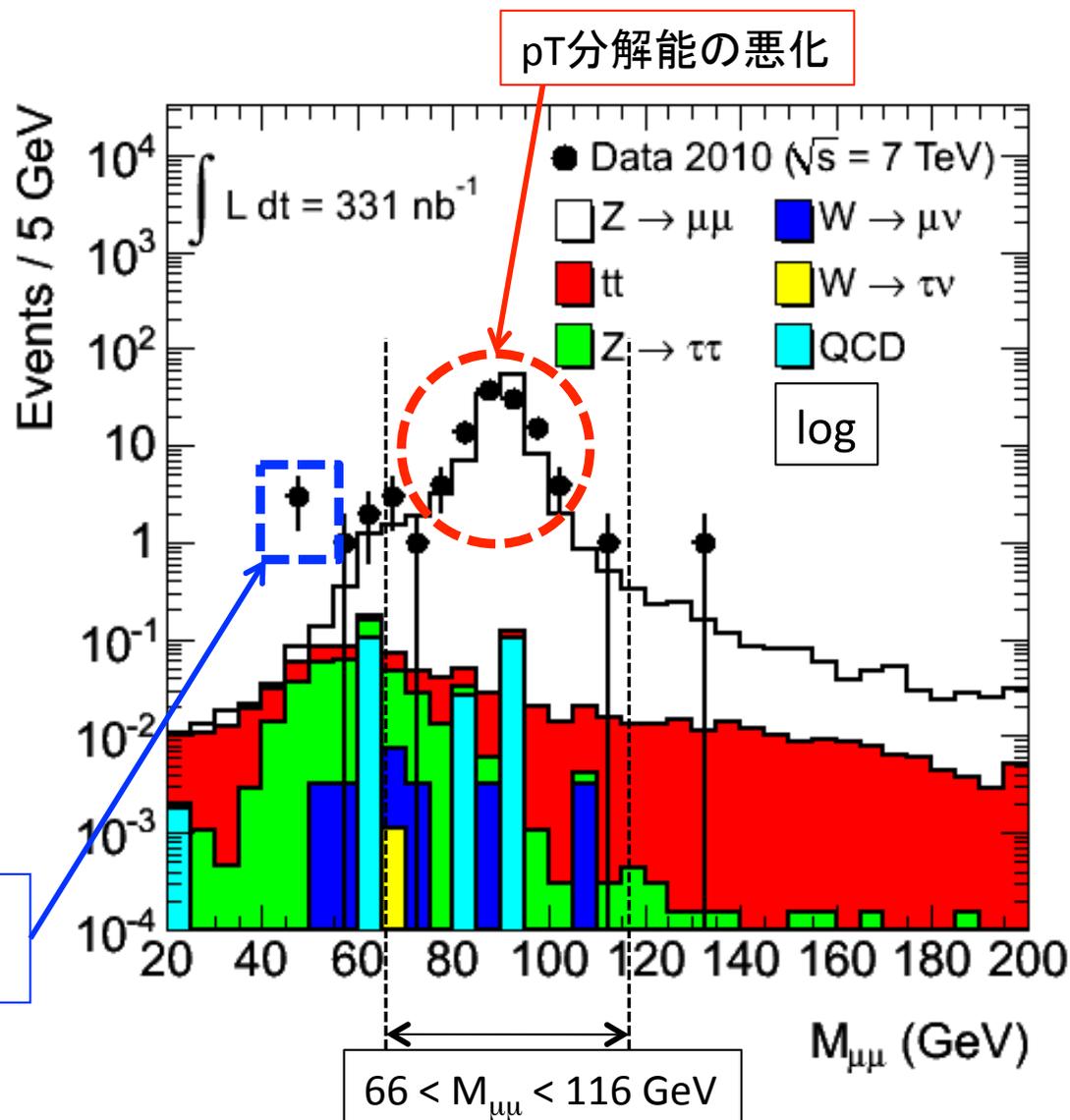
$W \rightarrow \mu\nu$	$0.030 \pm 0.010$
$W \rightarrow \tau\nu$	$0.001 \pm 0.001$
$Z \rightarrow \tau\tau$	$0.087 \pm 0.007$
$t\bar{t}$	$0.108 \pm 0.011$
EW Total	$0.226 \pm 0.018$
QCD	$0.138 \pm 0.162$
Total background	$0.364 \pm 0.163$

# Z → μμ: ミューオン対不変質量

- 全事象選別後のミューオン対の不変質量
  - アクセプタンス、QCDスケール補正後
  - イベント数で規格化



- コンビナトリアル
- $p_T$ カットのエッジに引っかかった



# Z → μμ : ミューオン運動量スケール、分解能

論文ではBreit – Wigner分布を仮定した手法

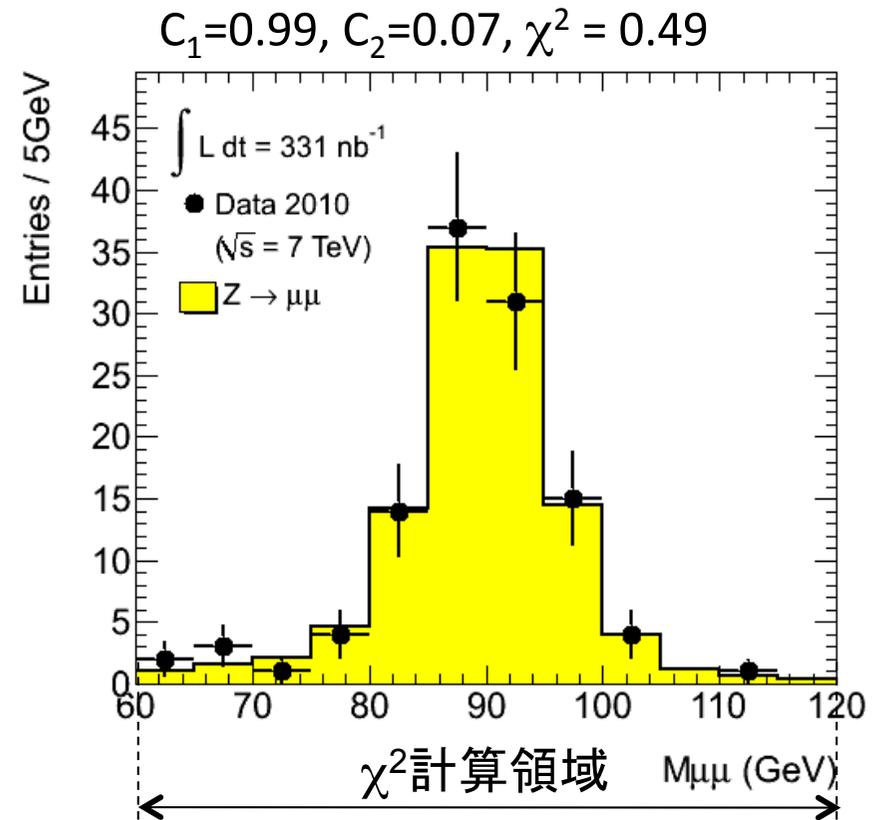
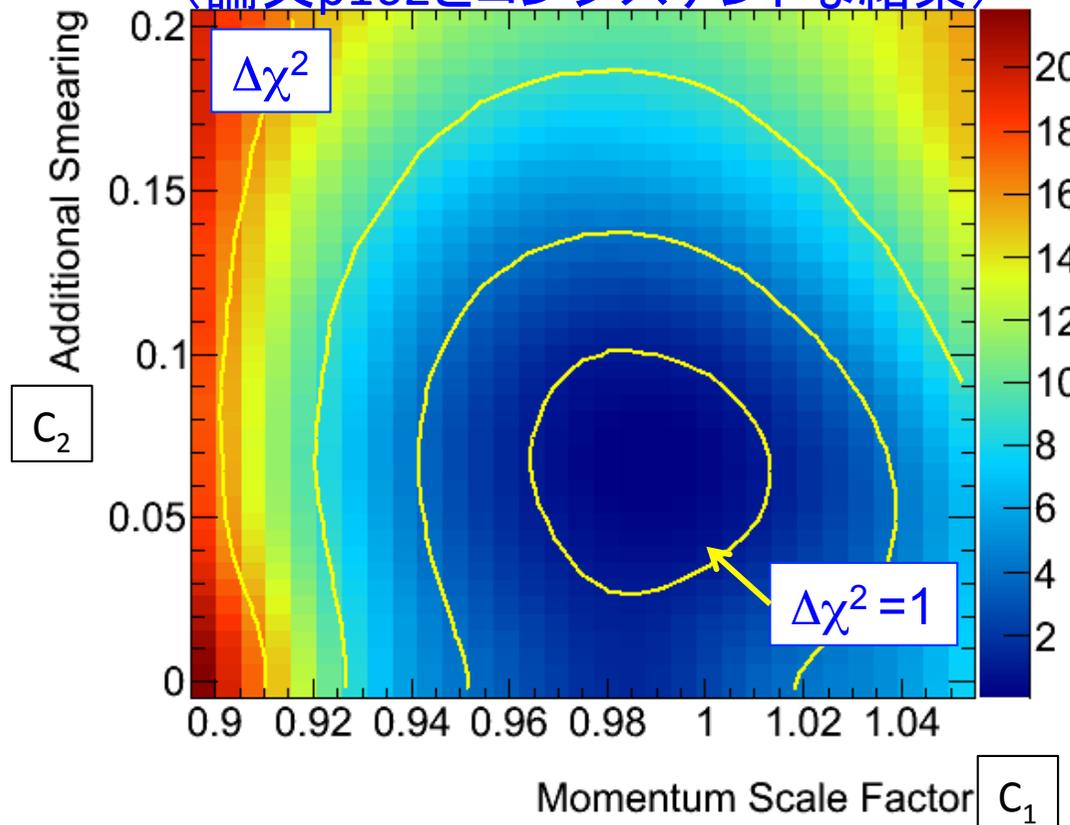
スケール

分解能

$$\left(\frac{1}{p_T}\right)_{\text{data}} = \frac{1}{C_1} \times \left(\frac{1}{p_T}\right)_{\text{MC}} \times (1 + \text{gauss} \times C_2)$$

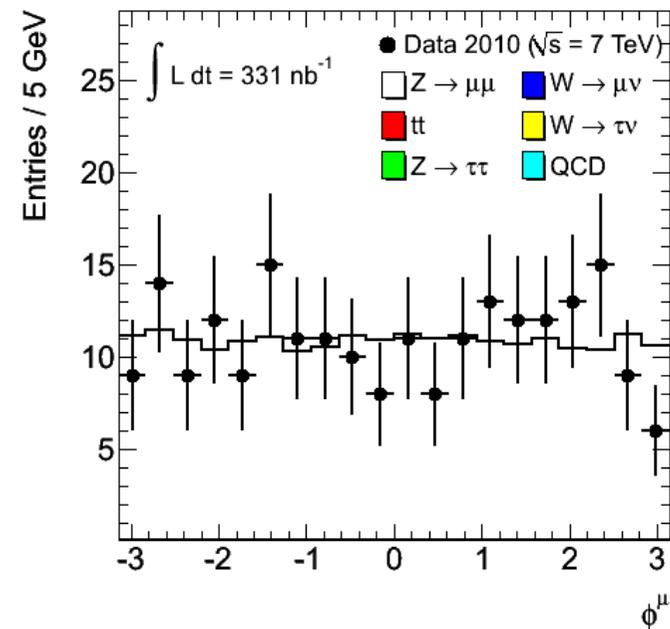
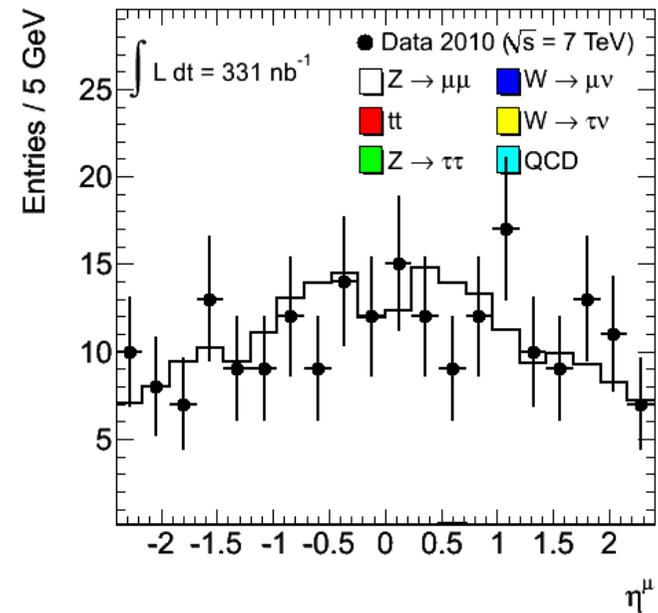
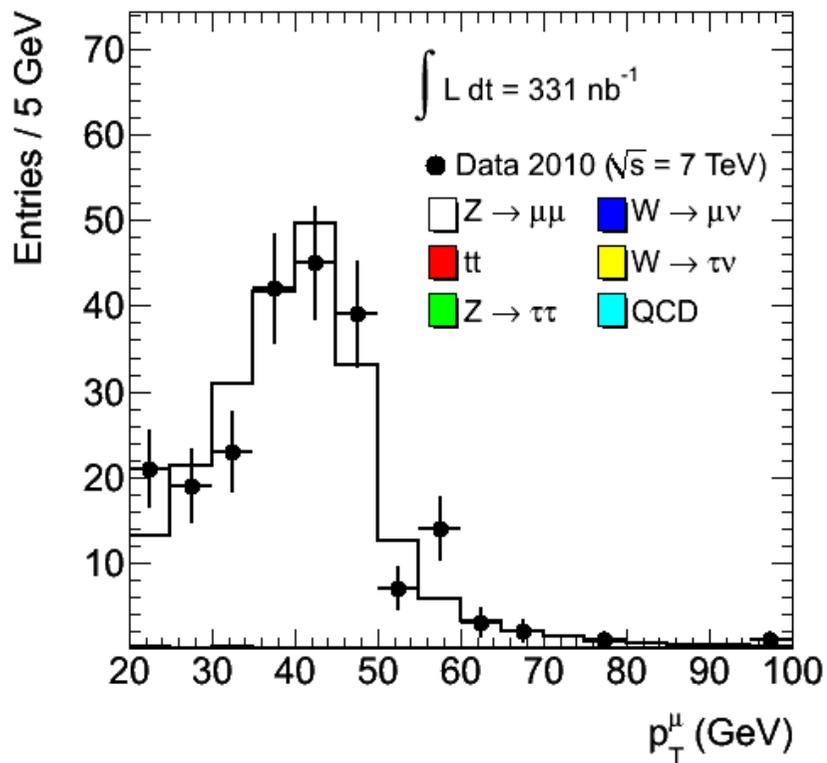
- 上記パラメータで $\chi^2$ 検定
- $C_1 = 0.97 - 1.01$ 、 $C_2 = 0.03 - 0.10$

(論文p162とコンシステントな結果)



# Z → μμ : ミューオンの分布

- 全事象選別後のミューオンの分布
  - アクセプタンス、QCDスケール補正後
  - ミューオン数で規格化
  - エラーは統計誤差のみ



# $Z \rightarrow \mu\mu$ : アクセプトランス

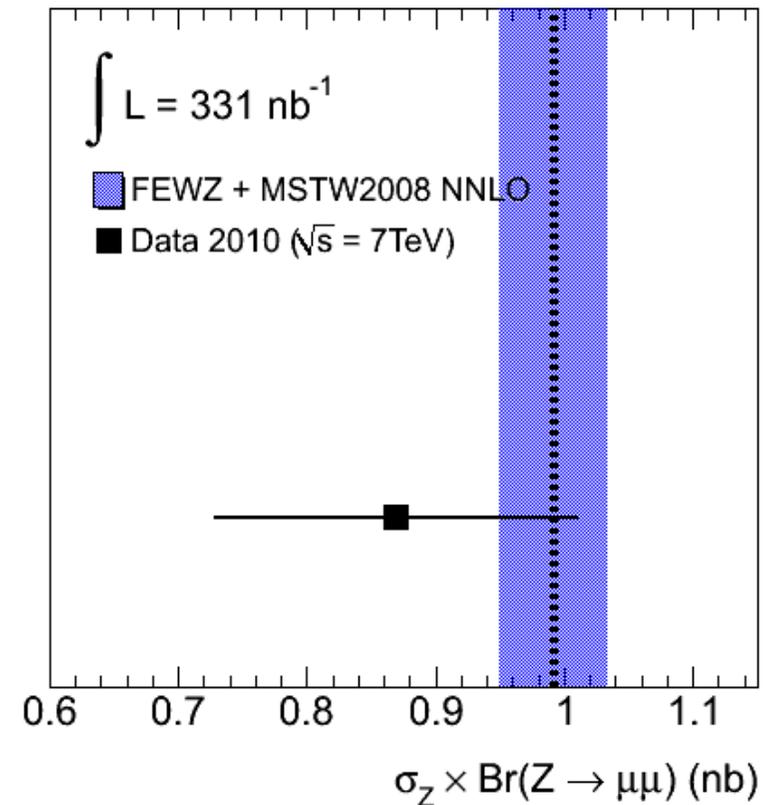
$$\frac{N_{sig} - N_{bg}}{A \cdot C \cdot L_{int}}$$

- **A**:  $0.486 \pm 0.015$
  - **C**:  $0.774 \pm 0.043$ 
    - バーテックスの数の補正:  $0.998 \pm 0.002$
    - ミューオントリガー効率の補正:  $0.982 \pm 0.006$ 
      - PYTHIAでミューオン対の生成方向を計算 ( 23.0 % (EE), 28.6 % (BB) 48.4 % (EB) )
      - Endcap、barrelの効率の違いを考慮して補正  $\varepsilon_Z = 1 - (1 - \varepsilon_{\mu 1})(1 - \varepsilon_{\mu 2})$
    - ミューオン飛跡再構成効率の補正:  $1.000 \pm 0.048$
  - **A×C**:  $0.369 \pm 0.023$
  - 系統誤差: 6.2 % (**A×C**)
    - PDF、パートン断面積の理論的不定性: 4 % (**A**), 0.4 % (**C**)
    - パイルアップの影響の見積り: 0.2 %
    - ミューオントリガー効率: 0.6 %
    - ミューオン飛跡再構成効率: 4.8 %
    - ミューオン $p_T$ に関するカットの不定性: 2.1 %  
( $p_T$ 、isolation、 $M_{\mu\mu}$ )
- $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象のミューオン**
- ミューオン対の質量ピーク位置 (スケール: 0.5 %)
  - ミューオン対の質量ピーク幅 (分解能: 0.5 %)
  - ミューオンのアイソレーション (2.0 %)

# Z → μμ : 生成断面積 × 崩壊分岐比

- 信号事象数 : 109
- バックグラウンド事象数 :  $0.364 \pm 0.163$
- アクセプタンス (A × C) :  $0.369 \pm 0.023$
- 積分ルミノシティ :  $331 \pm 36(\text{syst}) \text{ nb}^{-1}$

$$\sigma_{W/Z} \times \text{Br}(W/Z) = \frac{N_{\text{sig}} - N_{\text{bg}}}{A \cdot C \cdot L_{\text{int}}}$$



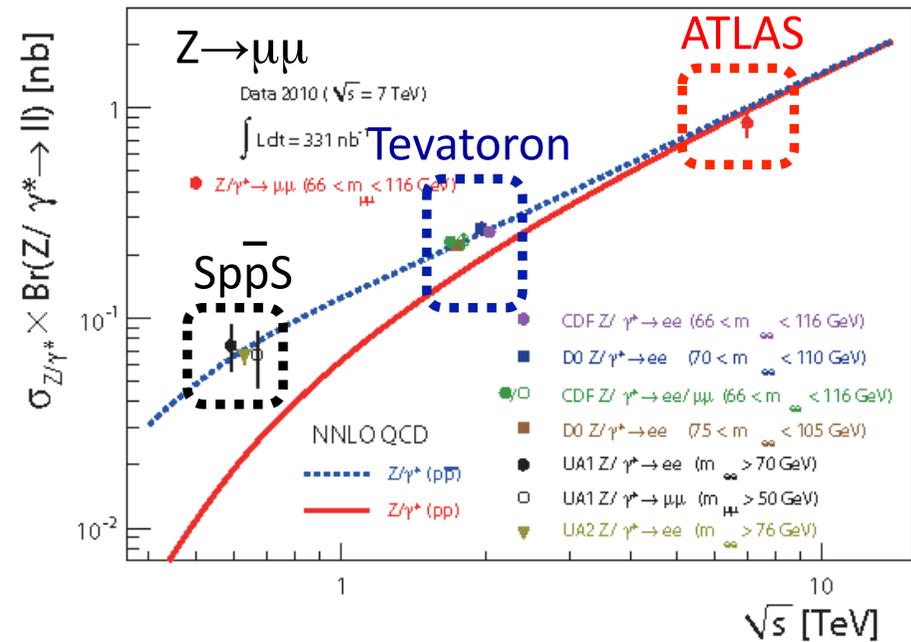
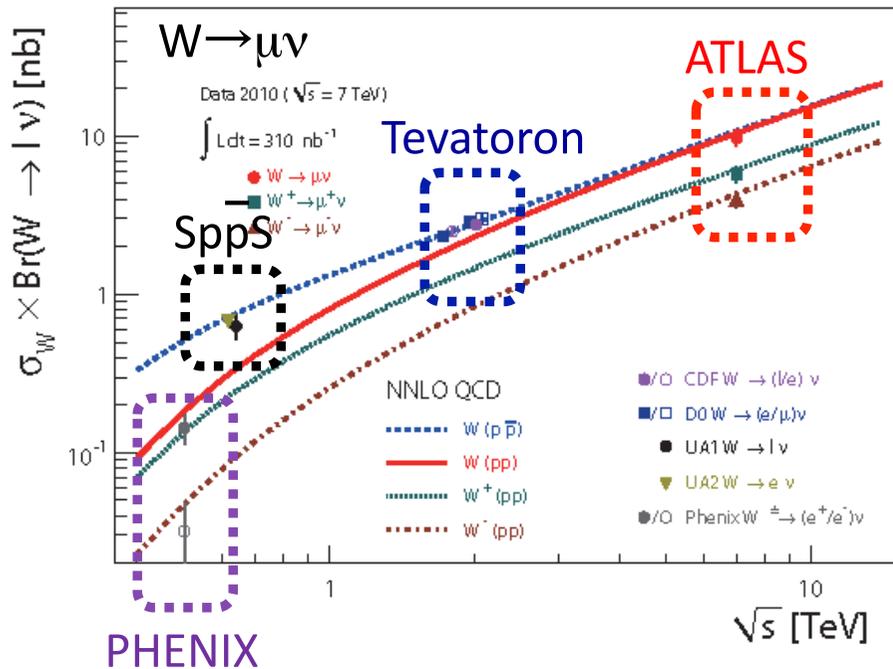
$$\sigma_{Z/\gamma^*} \times BR(Z/\gamma^* \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 0.87 \pm 0.08 (\text{stat}) \pm 0.06 (\text{syst}) \pm 0.10 (\text{lum}) \text{ nb.}$$

---

# 結論

# 生成断面積の $\sqrt{s}$ 依存性

- $W \rightarrow \mu\nu$ 、 $Z \rightarrow \mu\mu$ 共に理論予想と一致
- $W \rightarrow \mu\nu$ は電荷ごとの生成断面積も一致



# 展望

## 統計小

1 pb<sup>-1</sup>

- 全生成断面積の測定
  - $\sqrt{s} = 7$  TeVでのQCD計算の検証
  - $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象での検出器の性能評価、較正

100 pb<sup>-1</sup>

- 微分断面積の測定
  - PDFへの直接的な制限

1 fb<sup>-1</sup>

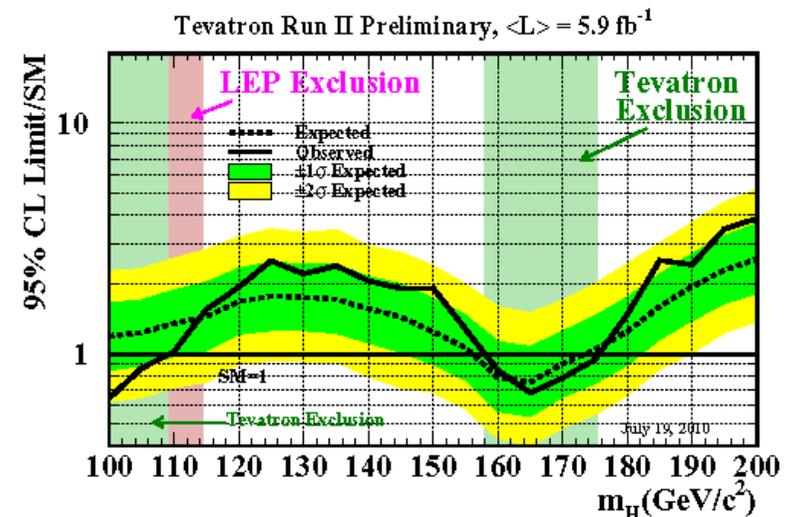
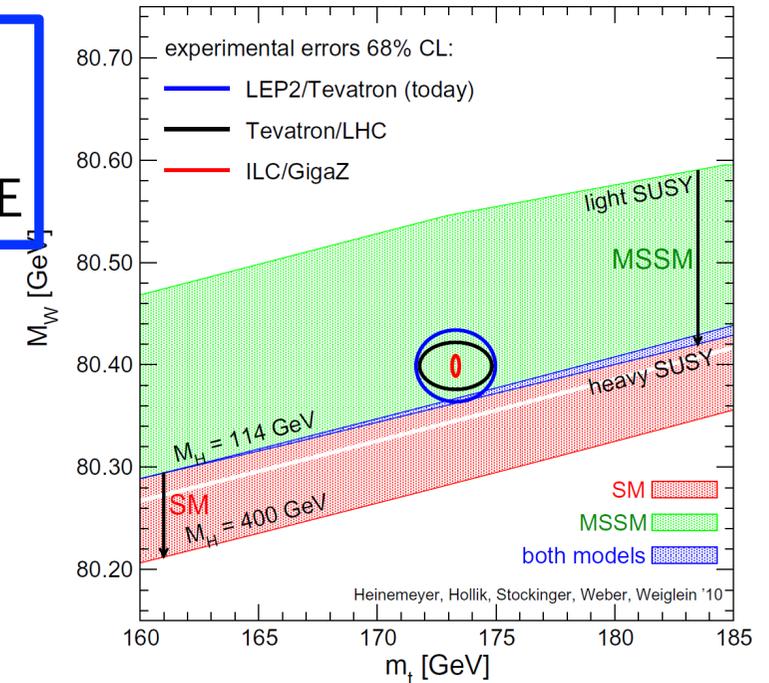
- ウィークボソン対の生成断面積測定
  - 新物理 (anomalous TGC)
  - ヒッグス粒子探索でのバックグラウンド

10 fb<sup>-1</sup>

- W粒子の質量の精密測定
  - ヒッグス質量への間接的制限

## 統計大

- ヒッグス粒子探索
  - $H \rightarrow WW, H \rightarrow ZZ$



# まとめ

---

- 世界最高エネルギー $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ の陽子陽子衝突で生成されるW / Z 粒子の生成断面積の測定
  - LHC加速器での最初期データを用いた最初のW / Z 解析
    - 衝突開始から4カ月分、約 $300 \text{ nb}^{-1}$ のデータを使用
    - 結果は誤差範囲内で理論予想と一致
  - ATLAS実験でのW / Z 生成断面積測定の手法を確立した
- 実データでのミューオンの検出効率評価
  - ジェットトリガー事象を用いたトリガー効率の評価
  - (ミューオン検出器のヒット情報を利用した飛跡再構成効率の評価)
  - ATLAS実験の公式な解析に採用
    - ATLAS実験で最初の $Z \rightarrow \mu\mu$ タグ&プローブ法を用いたミューオン検出効率の評価
  - 今後のATLAS実験での精密測定、新物理探索の重要な一歩

---

# バックアップスライド

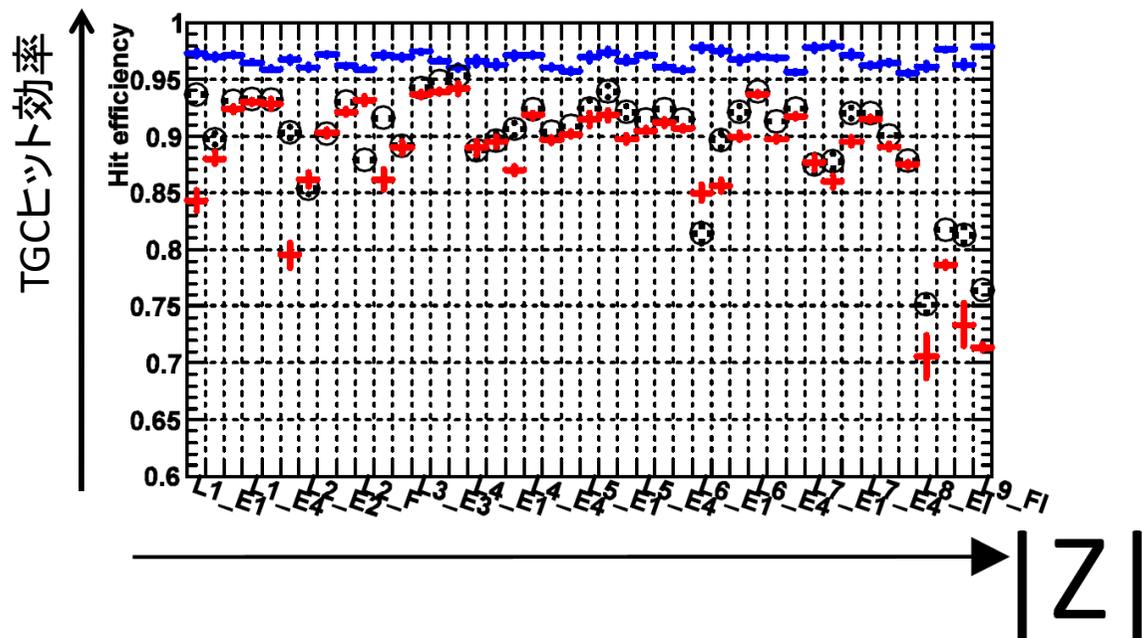
# TGCのヒット効率

- TGC L1\_MU6のデータとMCの差: **~8%**
  - MCではTGCヒット効率は100%と仮定
  - 実際の測定結果を反映したMCでテスト  
→ 差は**3%**に減少する

Red : 実データ

Blue : MC (シングルミュオン,  $p_T=15\text{GeV}$ )

Black : Tuned MC (シングルミュオン,  $p_T=15\text{GeV}$ )

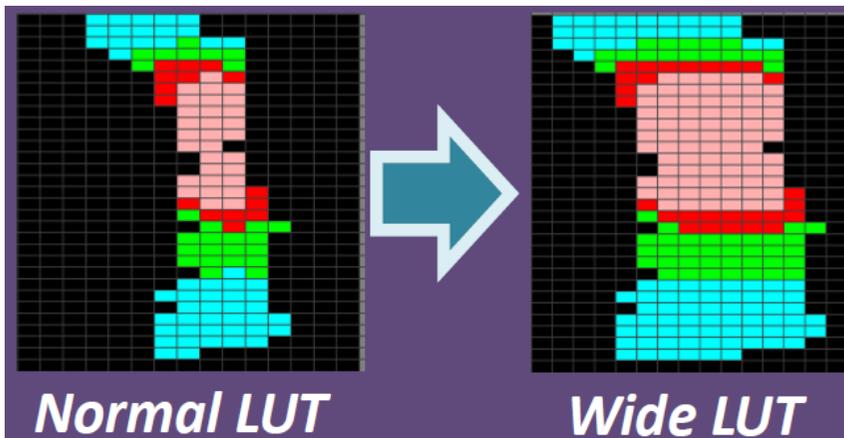
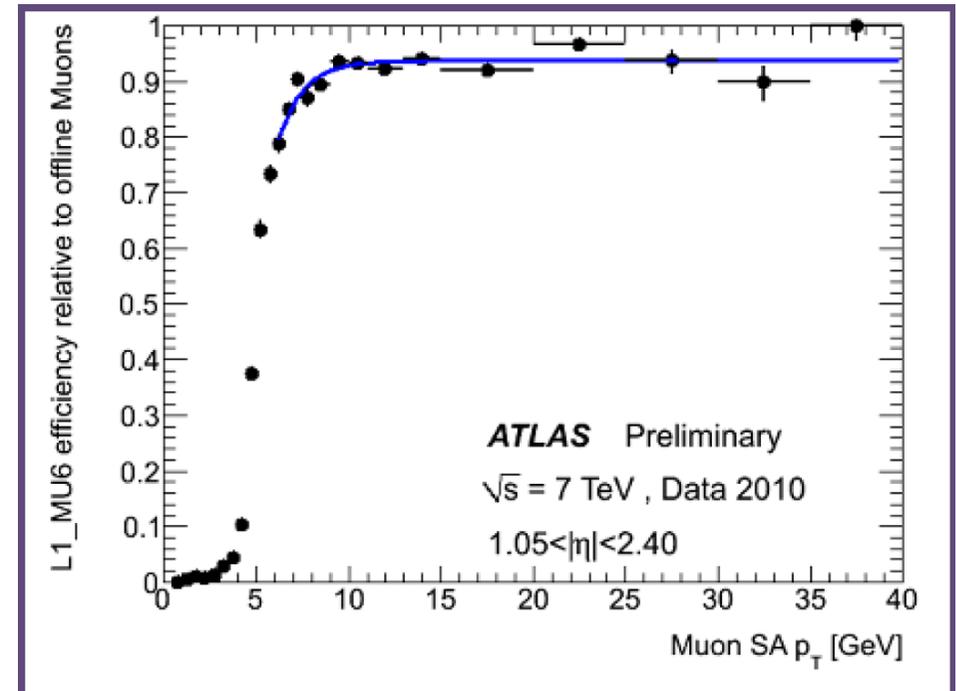
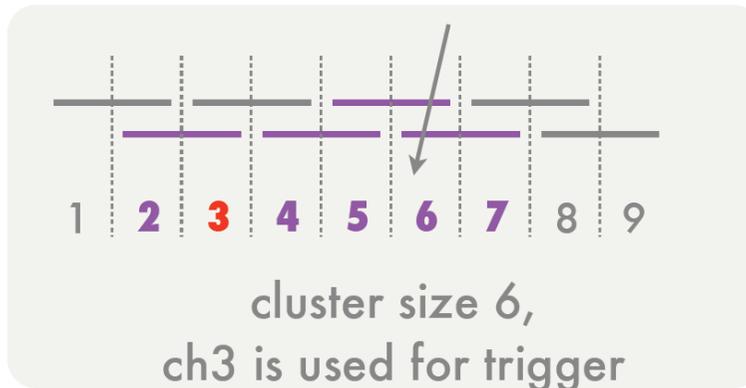


	MC	Tuned MC	データ
MU6	0.945 +/- 0.001	0.891 +/- 0.001	<b>0.863 +/- 0.015</b>

# クロストークの効果

- クロストーク等で隣り合うチャンネルが鳴る  
→ 一定のルールで1チャンネル選ぶ
- チャンネルがずれ、ヒットがコインシデンスウィンドウからこぼれ落ちる
- コインシデンスマトリックスの幅を広げて対処

ミュオン



Data	Simulation
93.6 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.6</sub> %	95.0 <sup>+0.2</sup> <sub>-0.2</sub> %

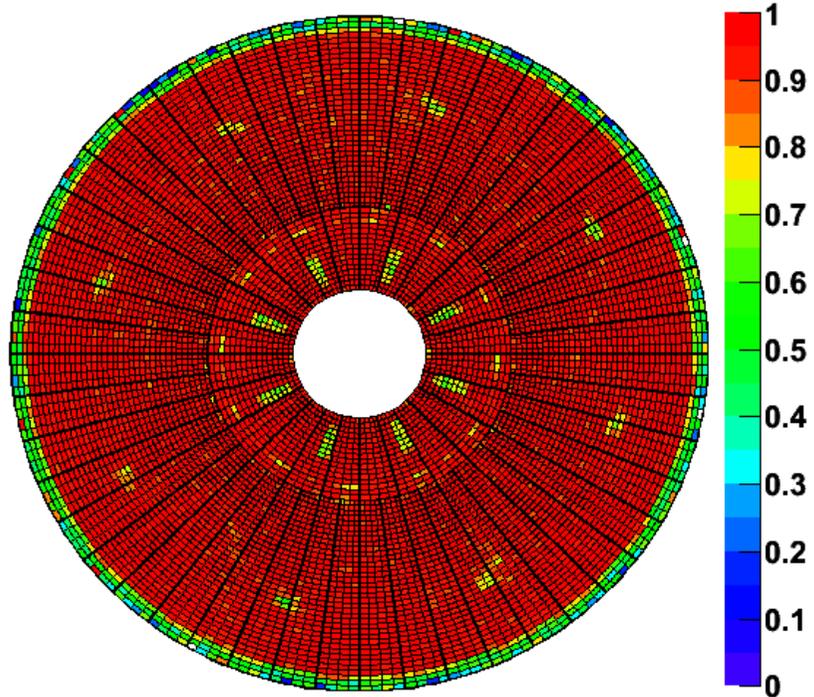
L1\_MU6 Efficiency at Plateau

# トリガーアクセプトランス

TGC

20GeV MU6-setD

Entries 514473

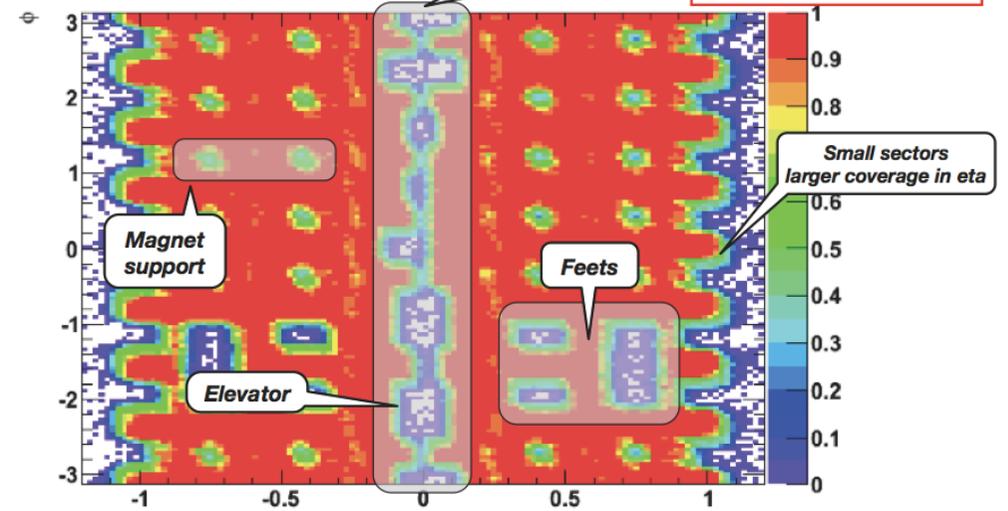


RPC

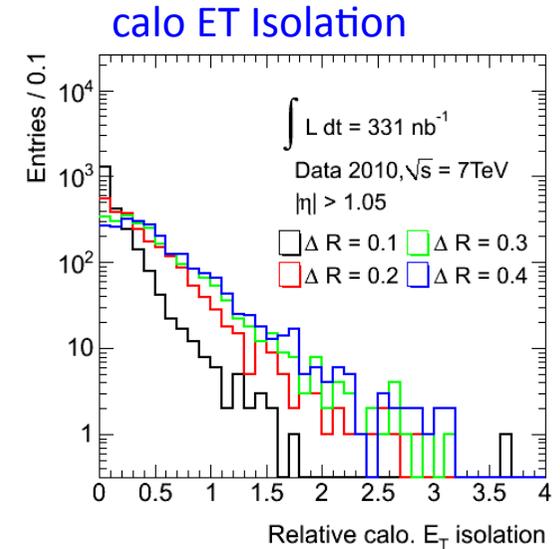
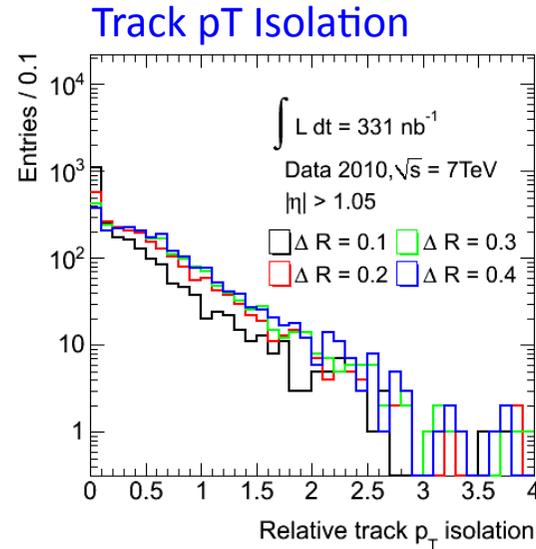
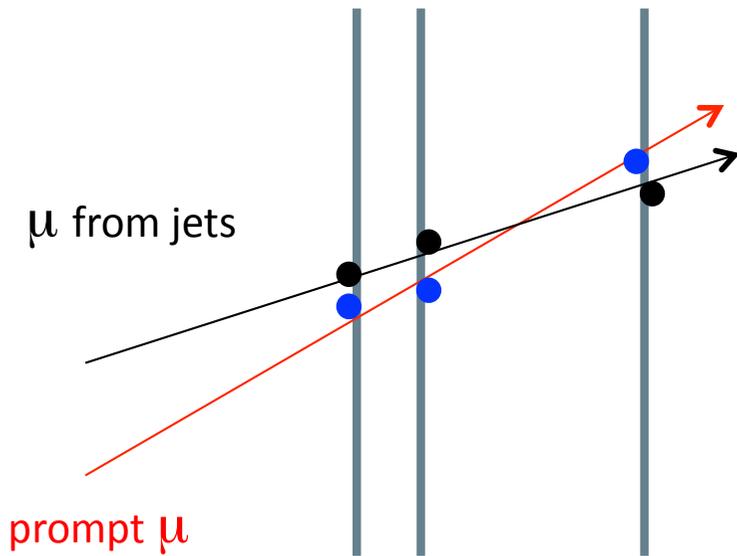
MU0 efficiency for 10 GeV muons

Services

Coverage ~80 %



# effect of surrounding jets (isolation effect)



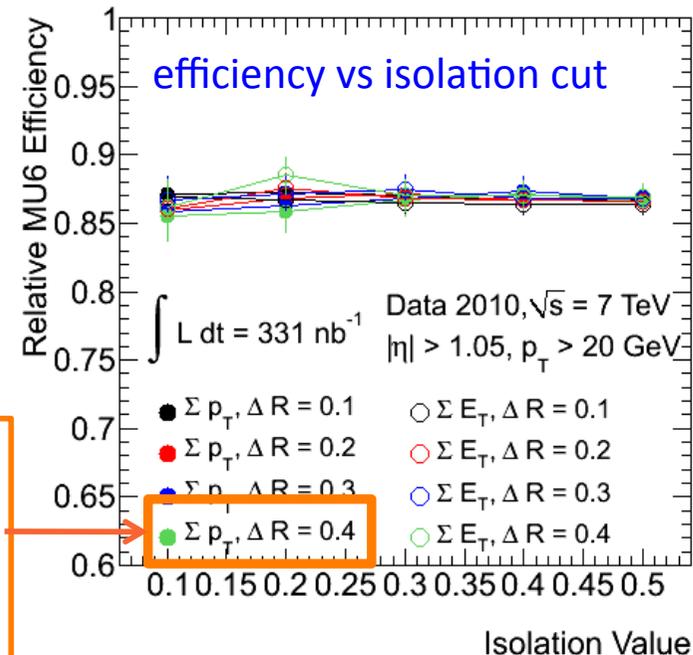
- TGC, RPC: hit coincidence based  
→ additional hits by muons from jets may deteriorate the efficiency

ptcone40/  $p_T$  (the one used in the W / Z analysis)

$$f(x) = a \cdot x + b$$

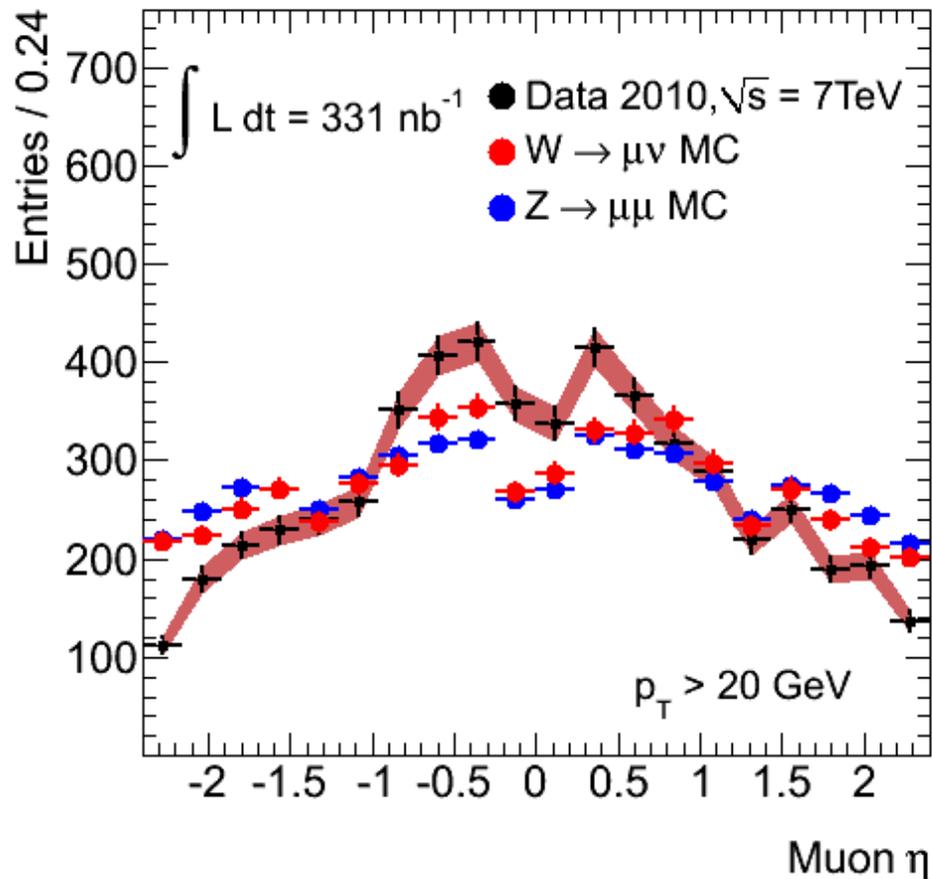
$$a = 0.023 \pm 0.040 \rightarrow \text{flat!}$$

$$b = 0.860 \pm 0.015$$



# ミューオンの $\eta$ 分布

- ミューオンの大部分はBメソンのセミレプトニック崩壊から
- $\eta$ 分布がW / Z由来のミューオンと異なる
- 現在のビンング (endcap / barrel) でこの効果は測定のバイアスとなる



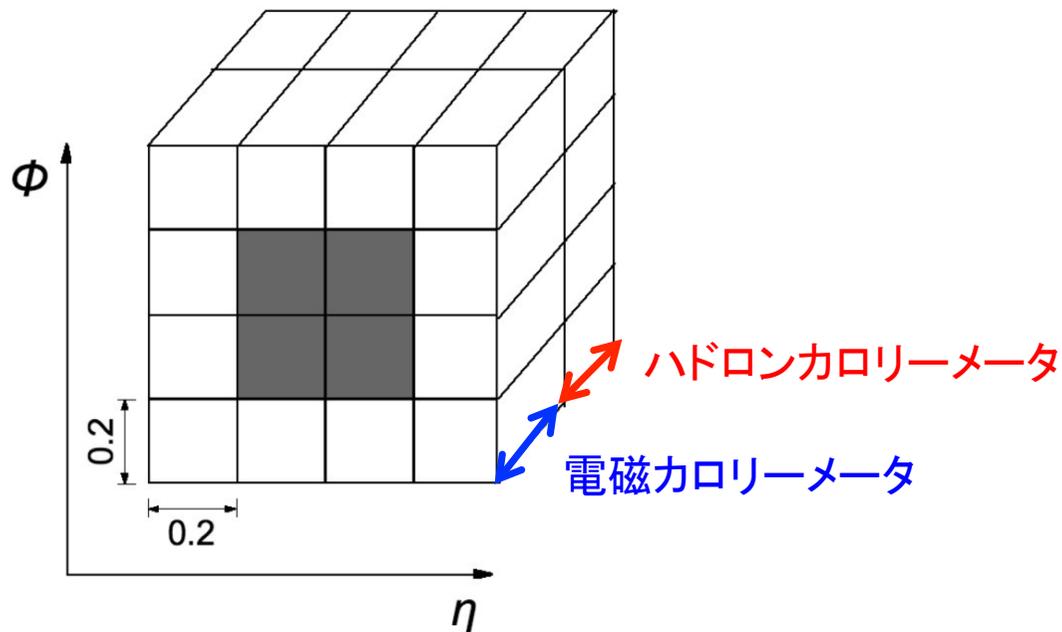
1. データでトリガー効率の $\eta$ 分布を作る
3. MCで求めたW / Z由来のミューオンの分布で重みをつけ、ビン内での平均値を算出

sample	derived eff. (20 bins)		derived eff. (40 bins)	
	endcap (%)	barrel (%)	endcap (%)	barrel (%)
data	$86.5 \pm 0.8$	$76.3 \pm 0.7$	$86.5 \pm 0.7$	$76.3 \pm 0.7$
$Z/\gamma^* \rightarrow \mu\mu$	$86.2 \pm 0.8$	$75.8 \pm 0.8$	$86.2 \pm 0.8$	$75.8 \pm 0.8$
$W \rightarrow \mu\nu$	$86.2 \pm 0.7$	$75.9 \pm 0.8$	$86.2 \pm 0.7$	$75.9 \pm 0.8$

トリガー効率評価への影響: **< 0.5 %**  
 → 系統誤差の一つ  
 ( $\phi$ については無視できるほど小さい)

# L1ジェットトリガーアルゴリズム

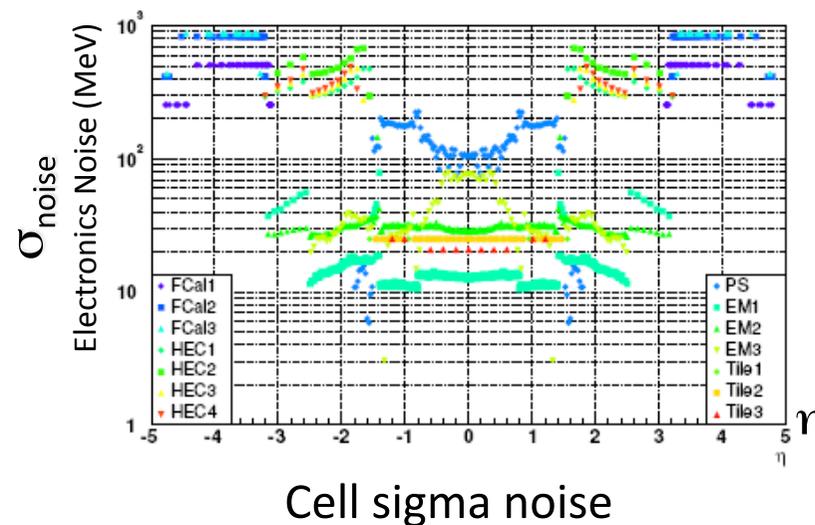
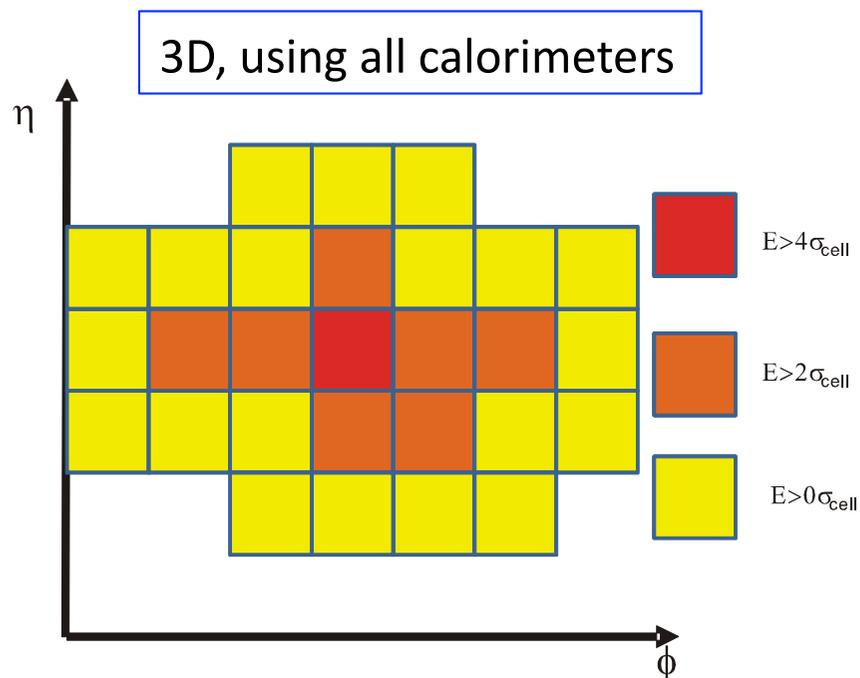
- $|\eta| < 3.2$ の範囲でジェットを探す
- 電磁 + ハドロンカロリメータの情報
- 定義された $(\eta \times \phi)$ ウィンドウ内部の $E_T$ の和が閾値を超えた時に鳴る
- ウィンドウサイズは可変
- $(\eta \times \phi) = \pm 0.4$ の範囲で極大点であることを要求



Trigger Item (L1_XX)	J5	J10	J15	J30	J55	J75	J95	J115
$E_T$ threshold (GeV)	5	10	15	30	55	75	95	115
Window size	$2 \times 2$	$4 \times 4$						

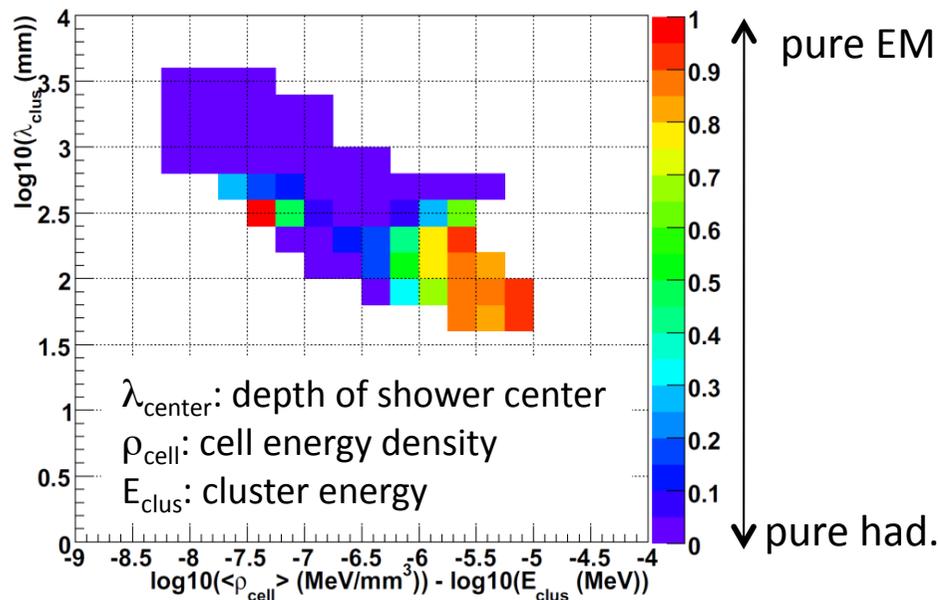
# Topological clustering

- 3D topological clustering
  - Grouping together neighbouring energy deposits based on their significance
    - $t_{seed}$ : cells are used as seed
    - $t_{neighbor}$ : cells can be used as additional seed
    - $t_{cell}$ : cells are added to neighbor cluster
  - find local maxima: ( $E_{cell} > 500 \text{ MeV}$ ,  $N_{neighbor} > 3$ )
  - Re-arrange (split): 1.6 particle in one cluster on average after splitting

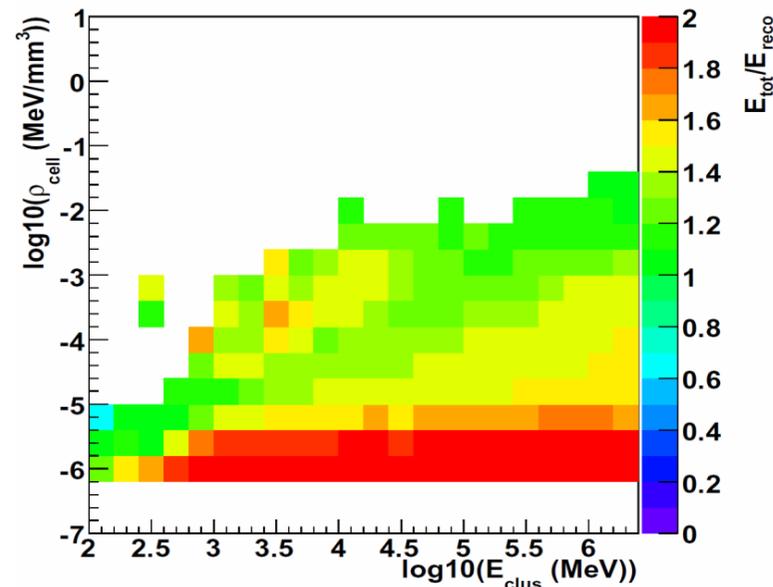


# Local hadronic calibration

- Classify hadron-like /em-like by shape variables
- Weighting step(W): for hadron-like clusters
  - Invisible: break-up of nuclear bindings
  - Escape: neutrino or muon
- Out-of-cluster step(OOC): for hadron-like clusters ( $E$ ,  $|\eta|$ ,  $\lambda$ )
  - energy discarded by the clustering alg. by noise thre.
- Dead Material (DM): for both - correction of energy outside the active calo
  - depending on region



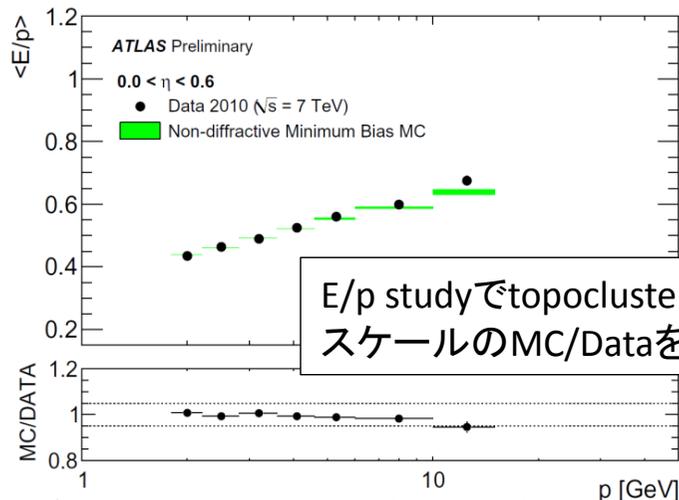
probability weight for  $\pi^0$  cluster  
for  $8 \text{ GeV} < E_{cluster} < 16 \text{ GeV}$



Hadronic cell weights for Tile barrel  
sampling 1 at  $0.2 < |\eta| < 0.4$

# $E_T^{\text{miss}}$ の系統誤差

- Topocluster energy scale (1.5 %)

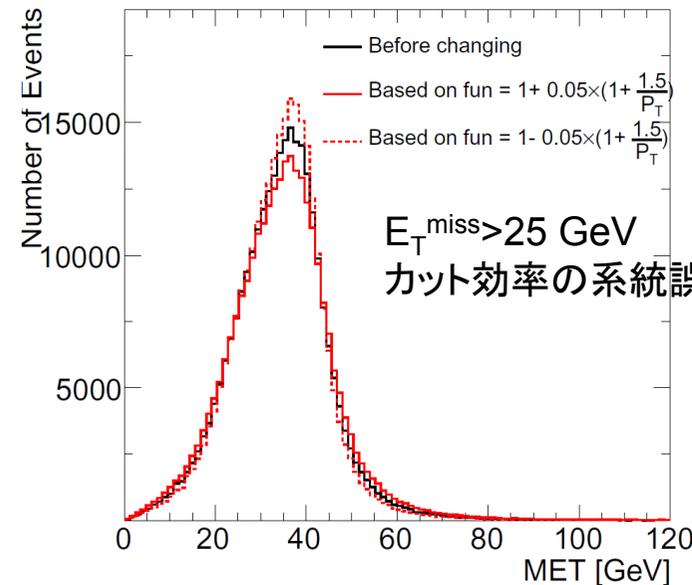


外挿

E/p studyでtopoclusterの  
スケールのMC/Dataを評価

E/p as a function of isolate tracks.

The energy is measured within a cone of  $\Delta R = 2$

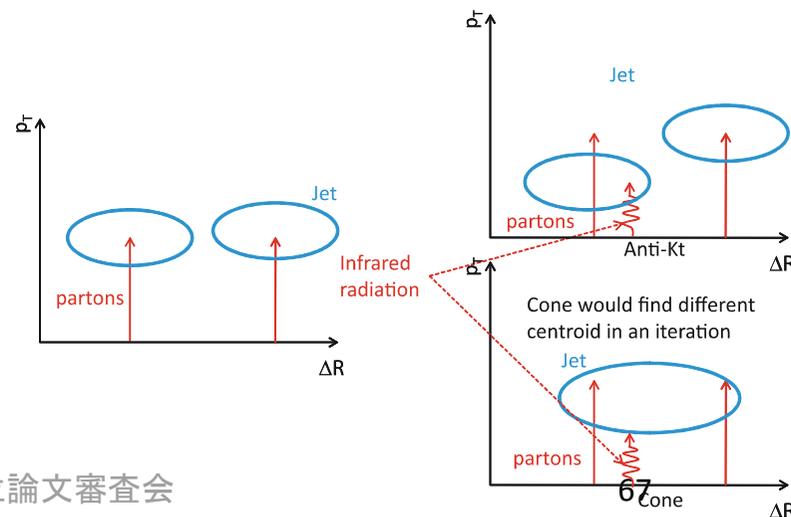
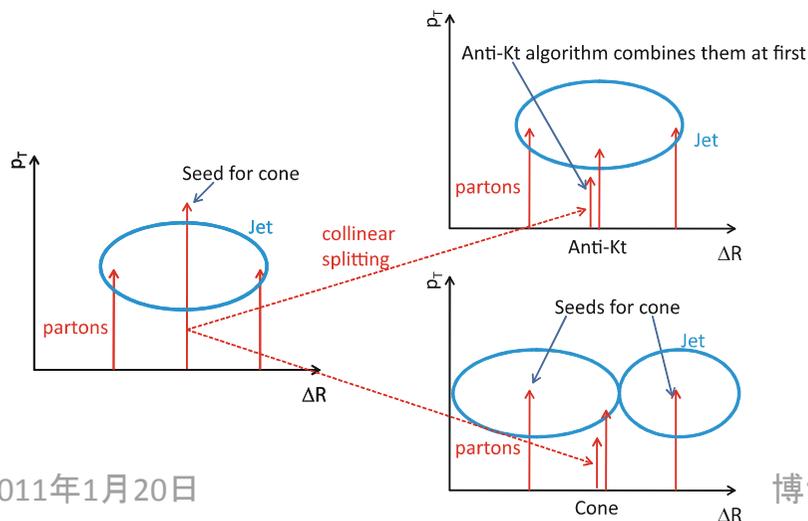
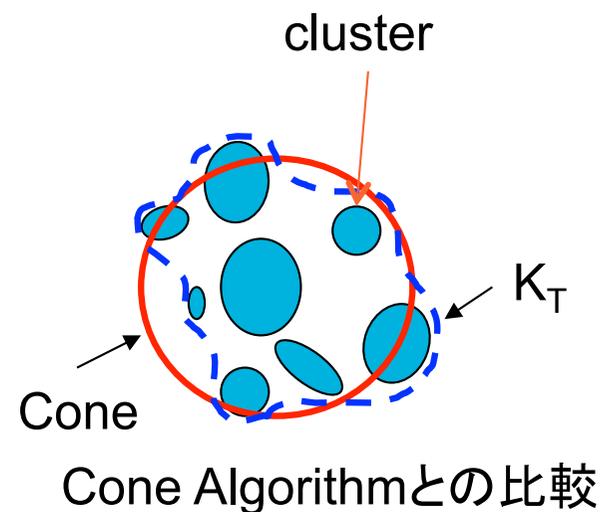


- $E_T$  detector response (1.0 %)

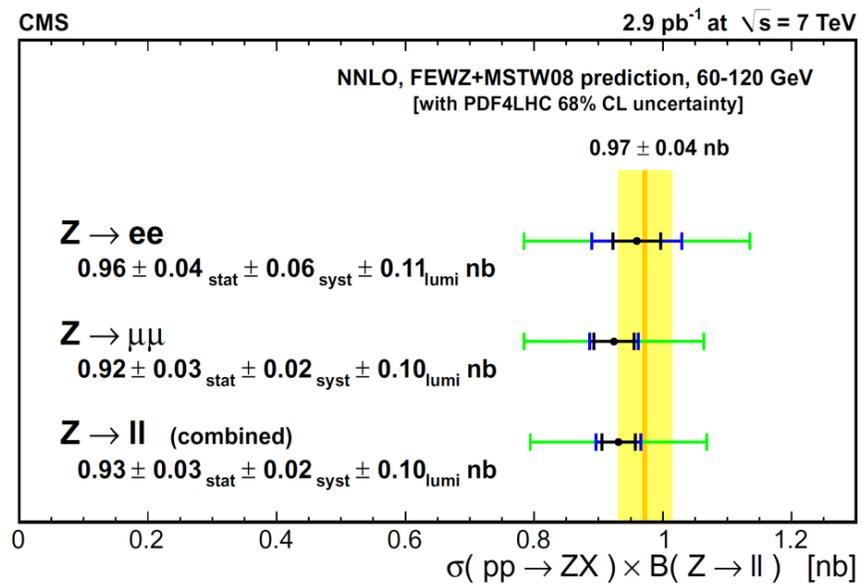
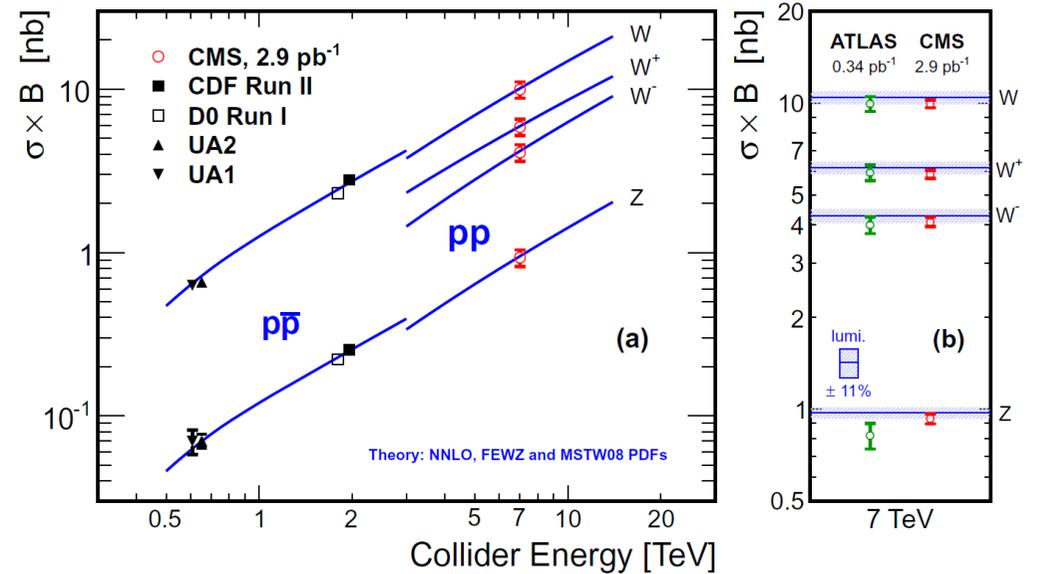
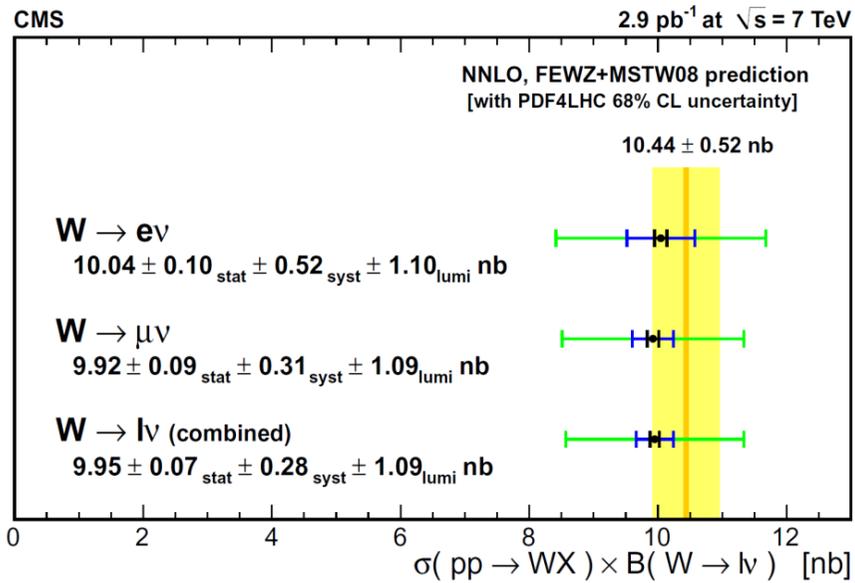
- Truthの $E_T$ カットとreconstruction(localhadtopo)レベルでのカットのアクセプタンスの差

# Anti-kt algorithm

- Topological Clusteringで作られたclusterをinputとして $p_T$ のもっとも大きなcluster (i)について次の値を求める:
  - $d_{ii}=p_{Ti}^{-2}$ ,
  - $d_{ij}=\min(p_{Ti}^{-2}, p_{Tj}^{-2}) \times \Delta R_{ij}^2/D^2$
  - jは他のcluster, D: jet size=0.4
- すべてのjについて $d_{\min} = \min(d_{ij}, d_{jj})$ を求め:
  - もし $d_{\min} = d_{ii} \rightarrow$  cluster (i)をjetとする
  - もし $d_{\min} = d_{ij} \rightarrow$  iとjをマージ
- D:parameter “Jet Size” = 0.4
- Jetの大きさは $\Delta R \sim 0.4$ , fixはされない
- Collinear/Infrared radiation safe

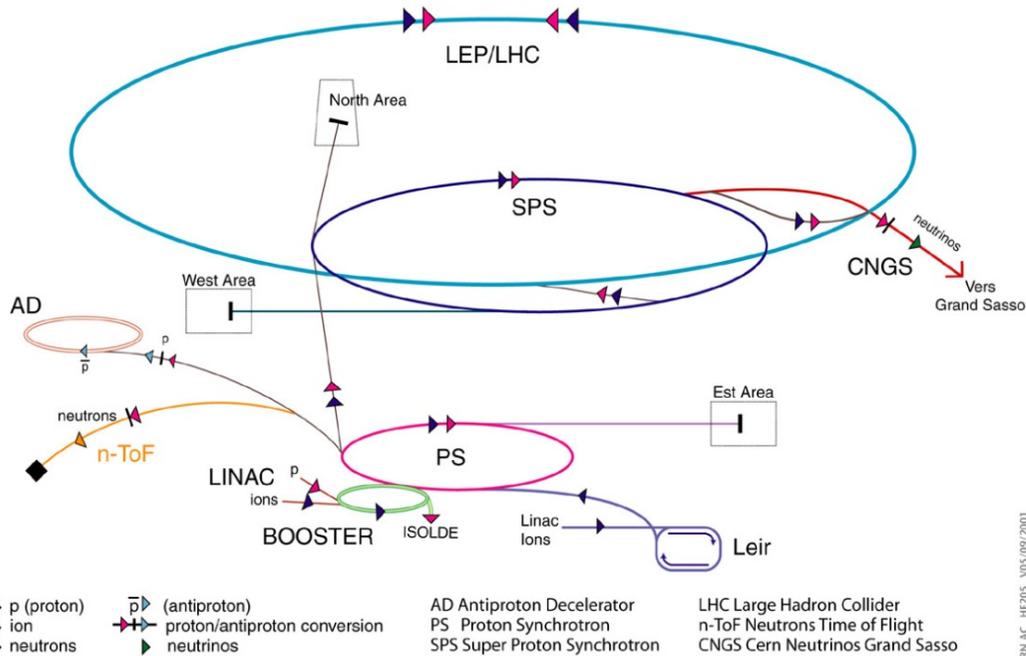


# CMSの結果



# LHC

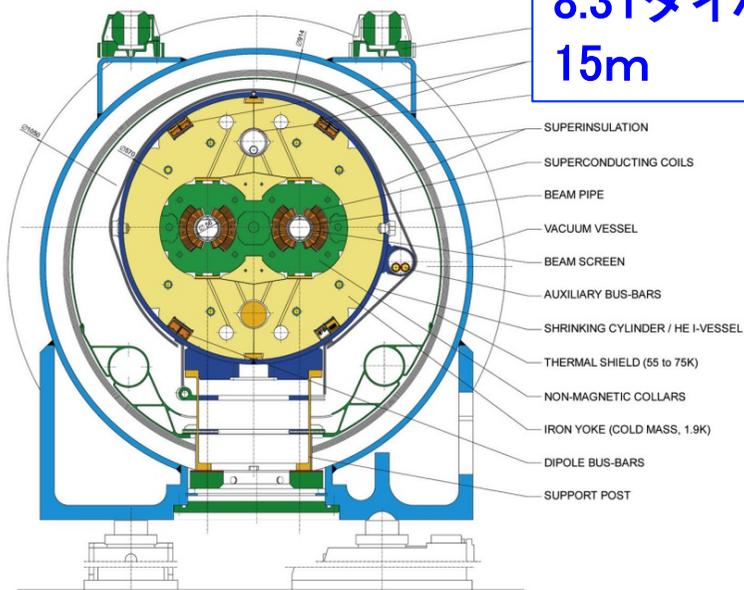
## Accelerator chain of CERN (operating or approved projects)



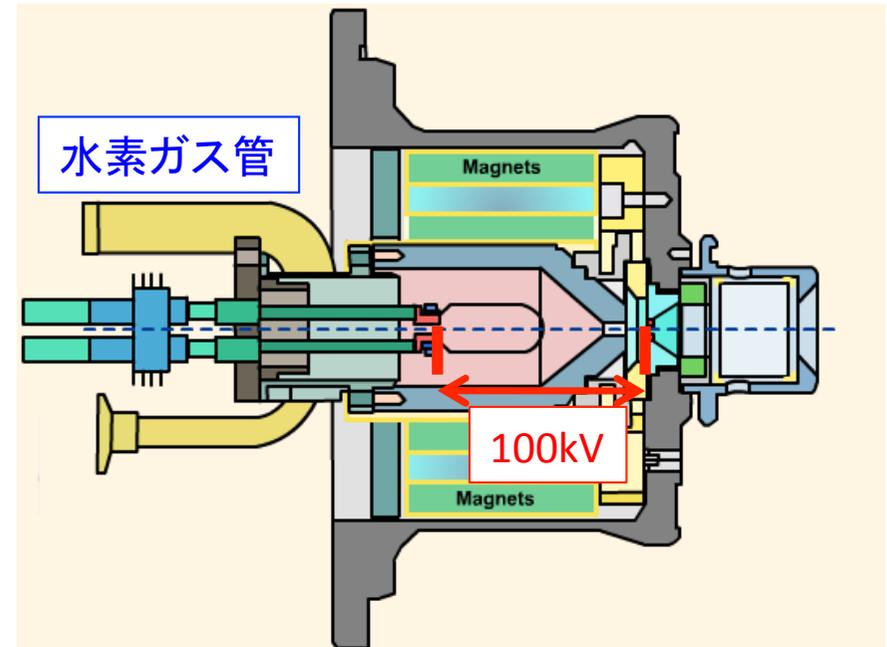
Duoplasmatron:  
水素を電場で分解して陽子を作る  
100kV

### LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN.AC/DI/MM - HE107 - 30.04.1999

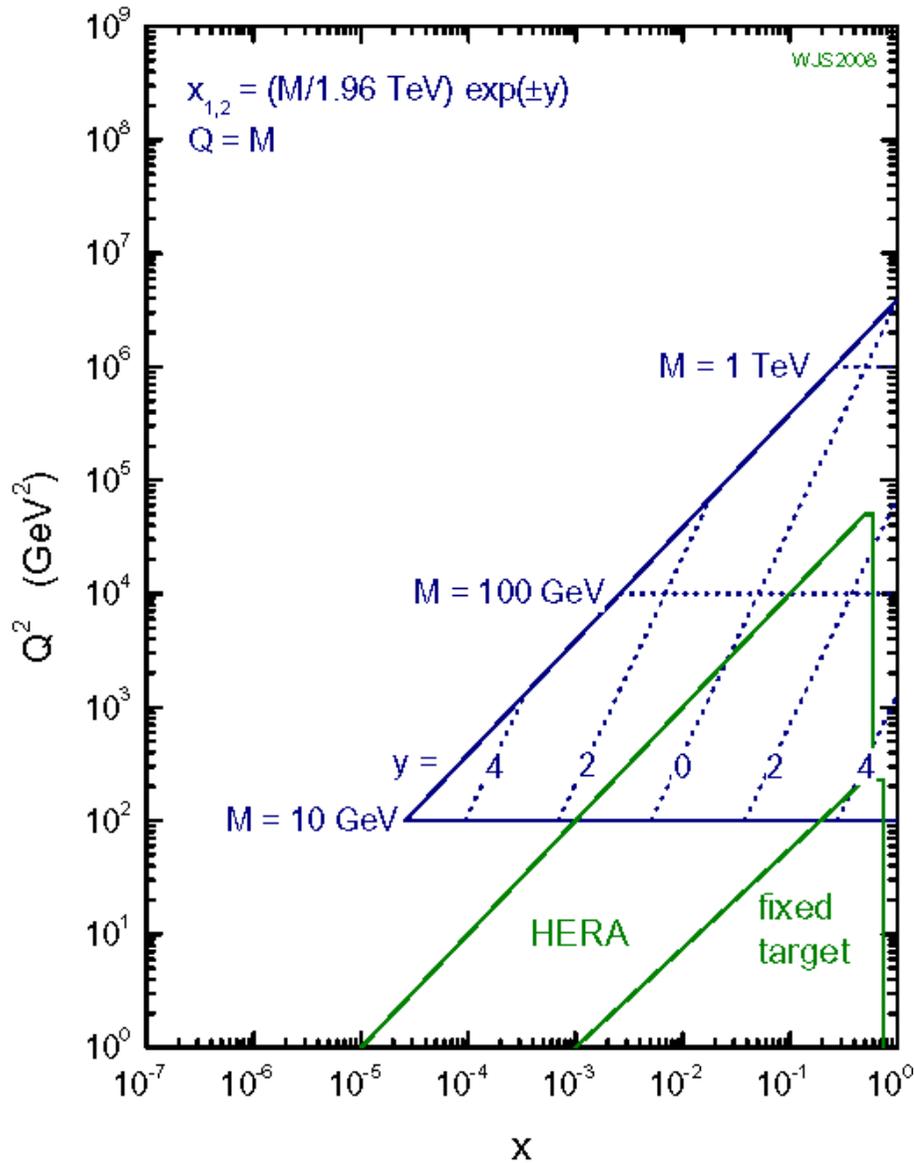


8.3Tダイポール  
15m

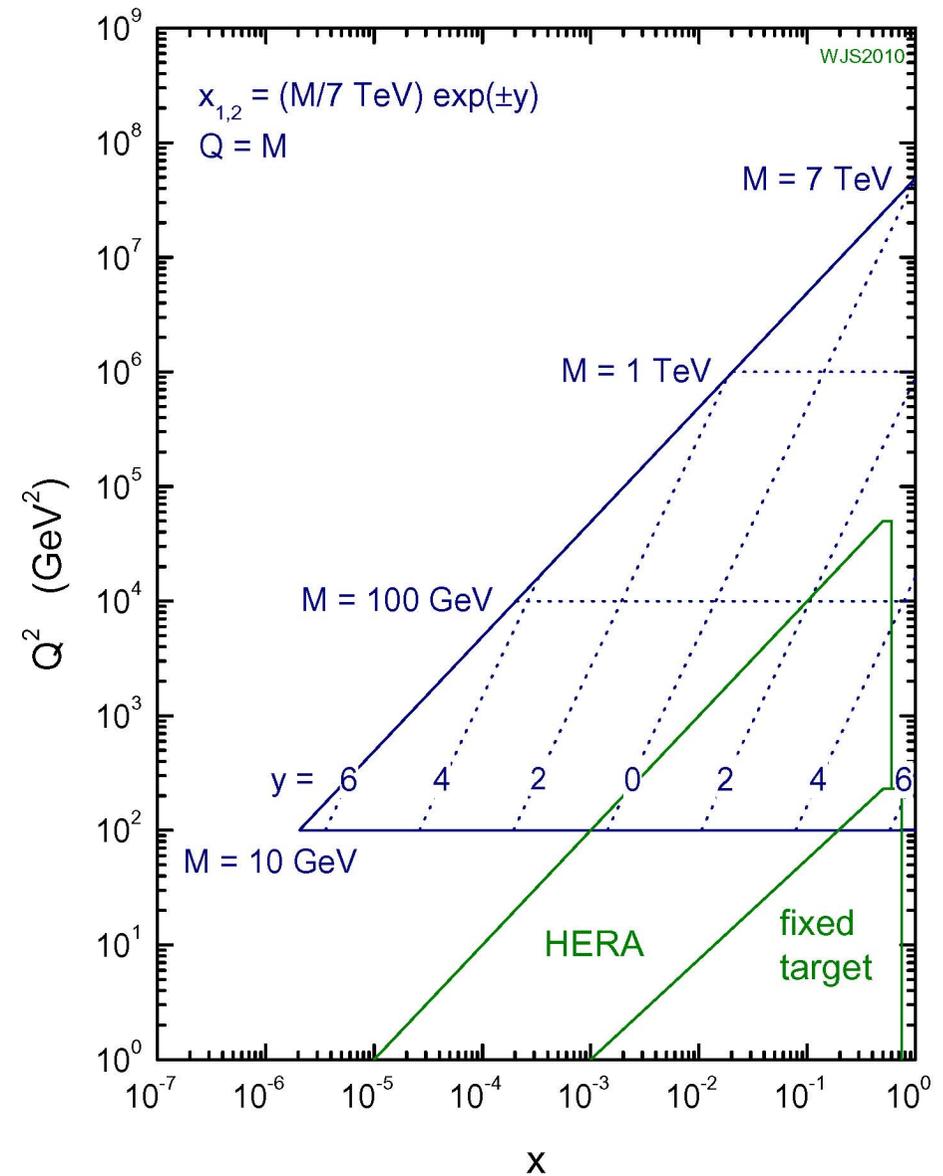


# パートン運動学領域

Tevatron parton kinematics



7 TeV LHC parton kinematics

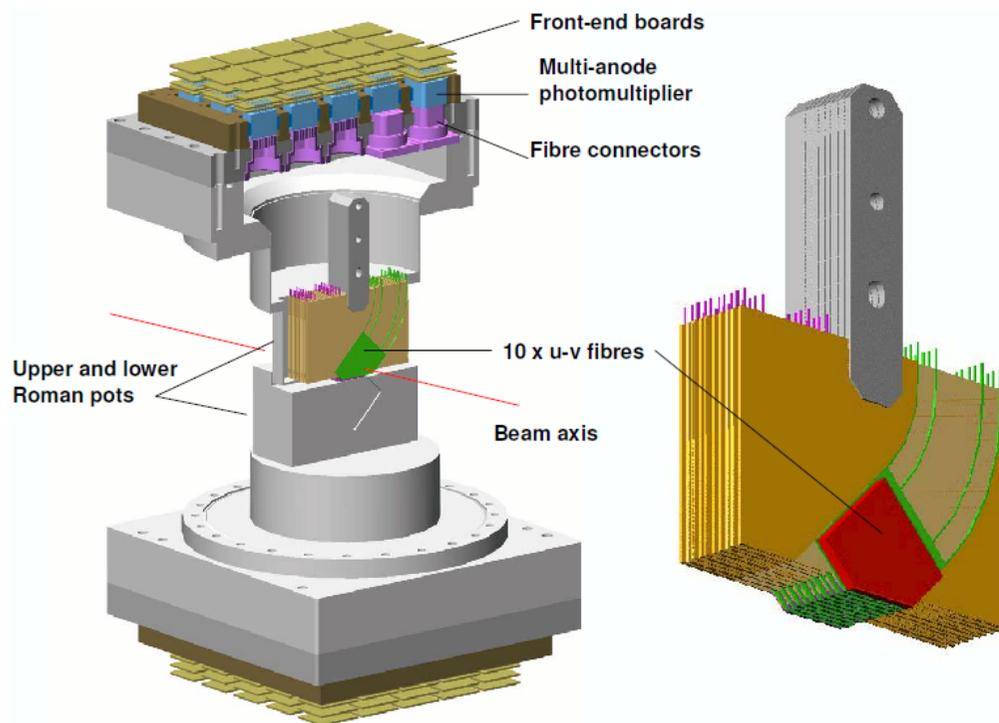


# 絶対ルミノシティ測定

- 弾性散乱の微分断面積をフィット

$$\frac{dN}{dt} \approx L \cdot \left( \underbrace{\frac{4\pi\alpha^2}{|t|^2}}_{CS} - \underbrace{\frac{\alpha \cdot \rho \cdot \sigma_{tot} \cdot e^{-\frac{B \cdot |t|}{2}}}{|t|}}_{CNI} + \underbrace{\frac{\sigma_{tot}^2 \cdot (1 + \rho^2) \cdot e^{-B \cdot |t|}}{16\pi}}_{NS} \right)$$

CS - Coulomb Scattering  
 CNI - Coulomb-Nuclei Interference  
 NS - Nuclear Scattering



衝突点から±240 m

