

LHC-ATLAS 実験の ミュオン検出器 アップグレード に対応した ハイレベルトリガーの開発

ICEPP Symposium 24

神戸大学
若宮光太郎



目次

- LHC-ATLAS実験
 - ミューオン検出器
 - トリガーシステム (ミューオントリガーシステム)
- New Small Wheel (NSW)
 - Micromegas検出器
- Micromegas検出器を用いた飛跡再構成アルゴリズム
- Micromegas検出器を用いた横運動量導出アルゴリズム
- 結論

目次

- LHC-ATLAS実験
 - ミューオン検出器
 - トリガーシステム (ミューオントリガーシステム)
- New Small Wheel (NSW)
 - Micromegas検出器
- Micromegas検出器を用いた飛跡再構成アルゴリズム
- Micromegas検出器を用いた横運動量導出アルゴリズム
- 結論

LHC-ATLAS実験

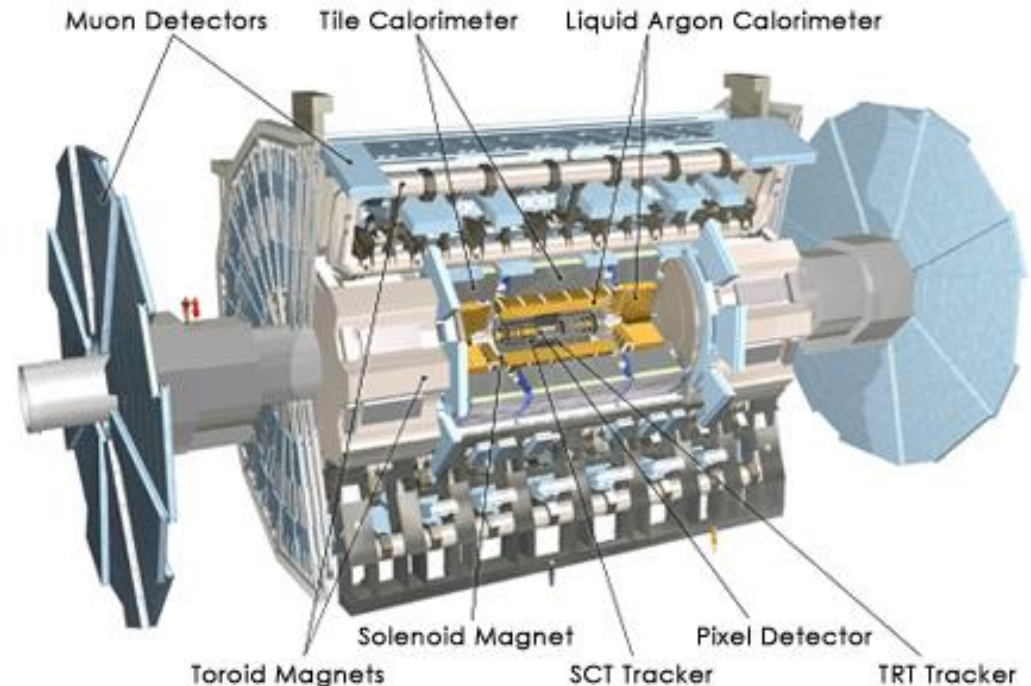
大型ハドロン衝突型加速器（LHC）による陽子・陽子衝突を用いて、**新粒子探索**や**標準理論の精密測定**を行う実験

Large Hadron Collider

- ▶ 周長27km, 重心系エネルギー13TeV

A Toroidal LHC Apparatus

- ▶ 内部飛跡検出器、カロリメータ、ミューオン検出器



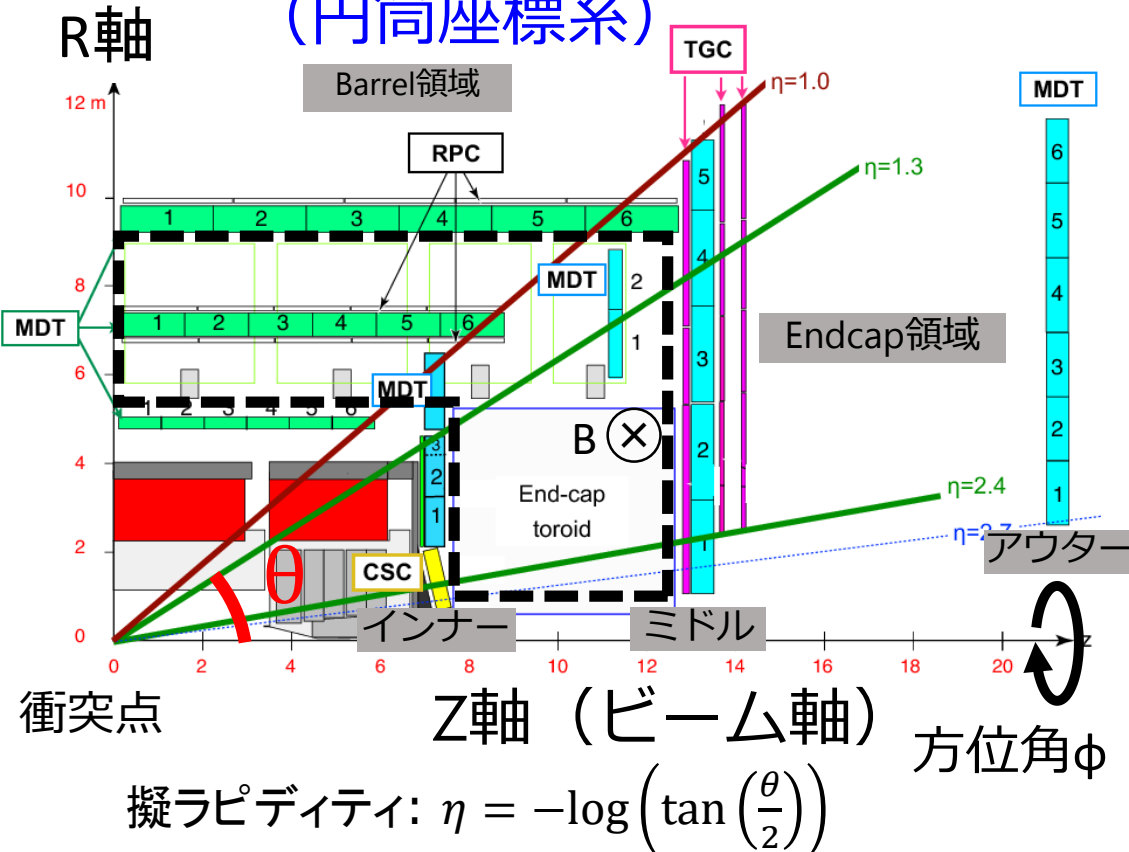
ミュオン検出器

ミュオンの飛跡を検出し磁場による曲率から運動量を測定。

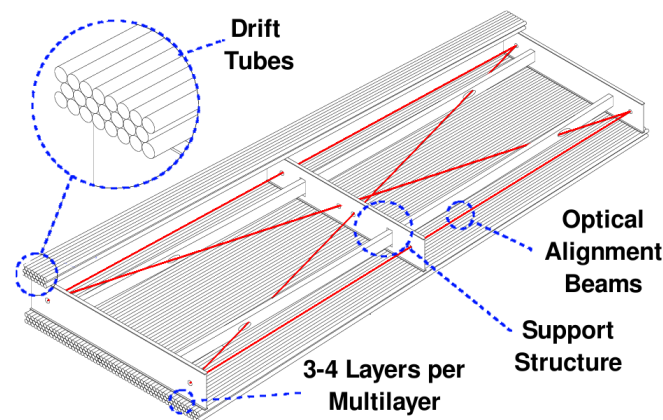
- トロイド磁石
- トリガー用検出器 (RPC, TGC) 、精密測定用検出器 (MDT, CSC)

ミュオン検出器概略図

(円筒座標系)



MDT概略図

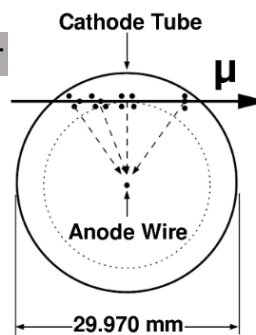


構造

6層 (Innerは8層)

η方向位置分解能: 80μm
(複数使うことで~35μm)

η方向のみ位置測定

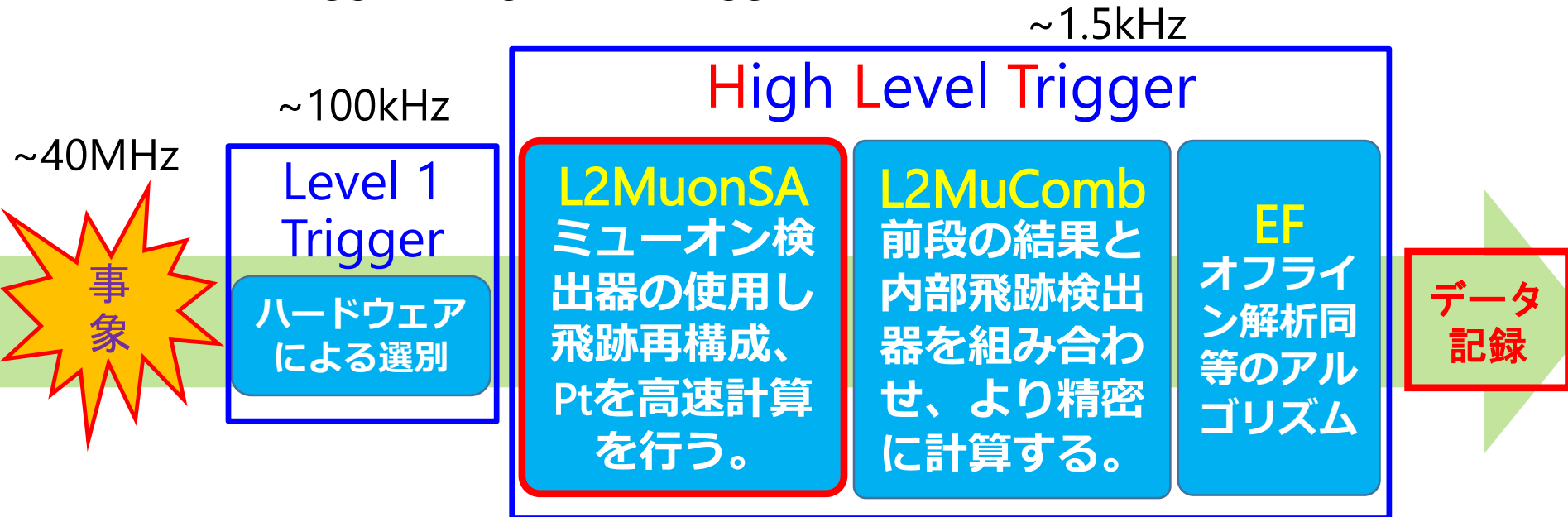


トリガーシステム

LHCでは事象頻度が高く、全データを保存できない。
ATLAS実験では段階的なトリガーシステムにより事象を選別する。

• ミューオントリガーシステム

- Z,Wボゾンや未発見の超対称性粒子などは横運動量 (P_t) の高いミューオンに崩壊する (期待される) ため、**重要な役割**を持つ。
- Level 1 TriggerとHigh Level Triggerで構成



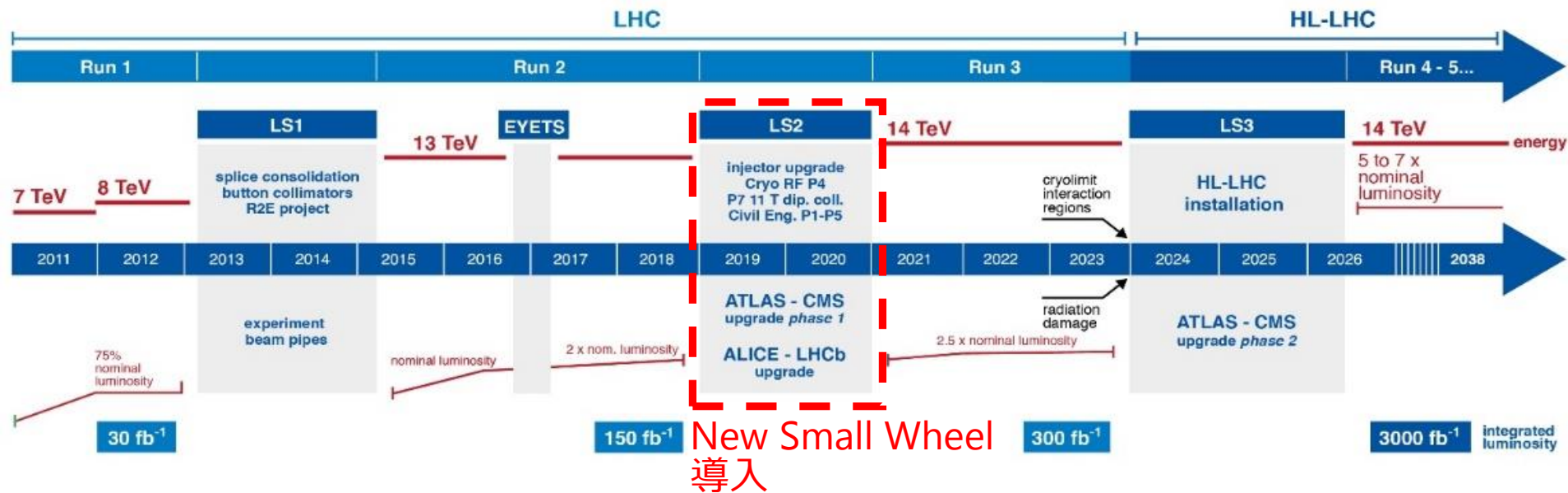
本発表ではL2MuonSAについて報告する

目次

- LHC-ATLAS実験
 - ミューオン検出器
 - トリガーシステム (ミューオントリガーシステム)
- New Small Wheel (NSW)
 - Micromegas検出器
- Micromegas検出器を用いた飛跡再構成アルゴリズム
- Micromegas検出器を用いた横運動量導出アルゴリズム
- 結論

LHCアップグレード計画

LHC / HL-LHC Plan



Run2 : $\mathcal{L} \sim 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

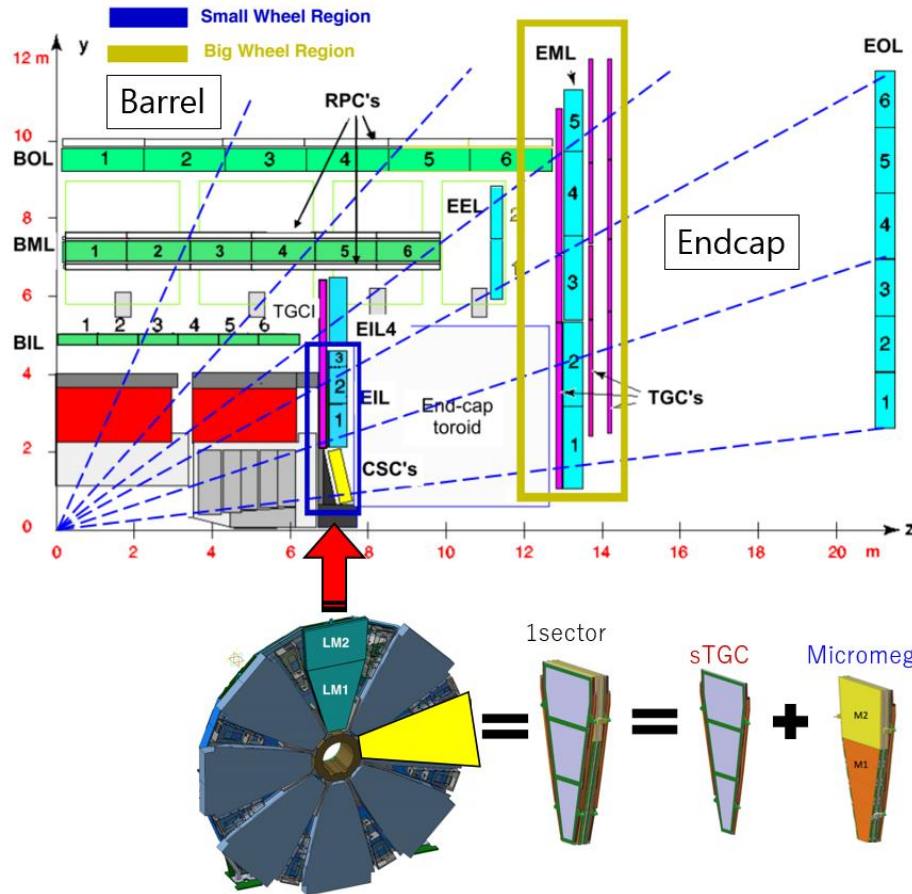
Run3 : $\mathcal{L} \sim 3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Run3以降では、瞬間ルミノシティが2倍以上に

- ➡ 高ヒットレート環境下でも動く検出器が必要に
- ➡ New Small Wheel (NSW) 計画

New Small Wheel (NSW)計画

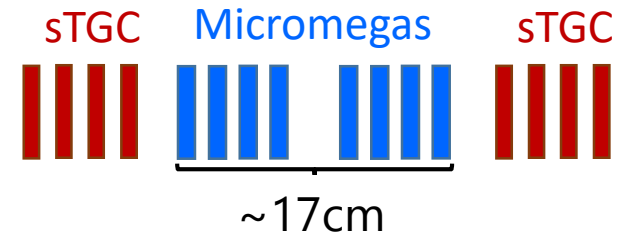
2019年にミュオン検出器のSmall Wheelを取り替える予定



New Small Wheel (NSW)

- sTGCとMicromegas検出器の2つで構成
- 飛跡再構成の機能を持つ
- フェイクヒットに強い

NSWのレイアウト



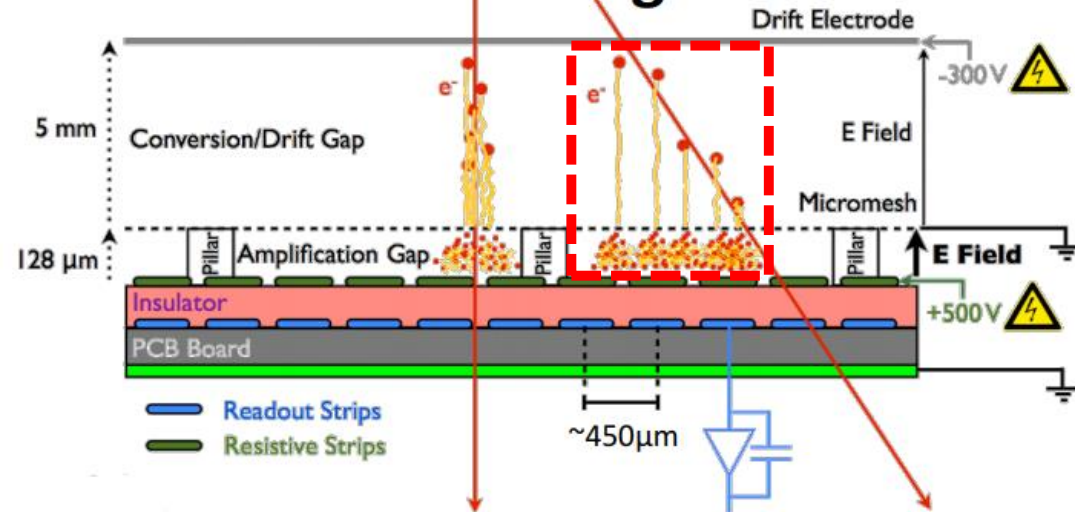
【本研究の目的】

Micromegas検出器を用いた飛跡再構成アルゴリズムとその飛跡を用いた横運動量導出アルゴリズムの開発

Micromegas検出器

ドリフト領域と増幅領域がメッシュで分けられたガスチェンバー

Micromegas



クラスター (赤枠)

1 粒子に対して反応した
複数のストリップの塊

Gas	Ar 93% + CO2 7%
Strip pitch	~450μm
Gain	$O(10^4)$
Drift velocity	5 cm/μsec

ポイント

- クラスタ中の各ヒットの位置、時間、電荷量を測定できる
 - 入射粒子の角度がわかる。
- ドリフト領域が狭い
 - ドリフトタイムが短いので、余分なヒットを分けることができる。

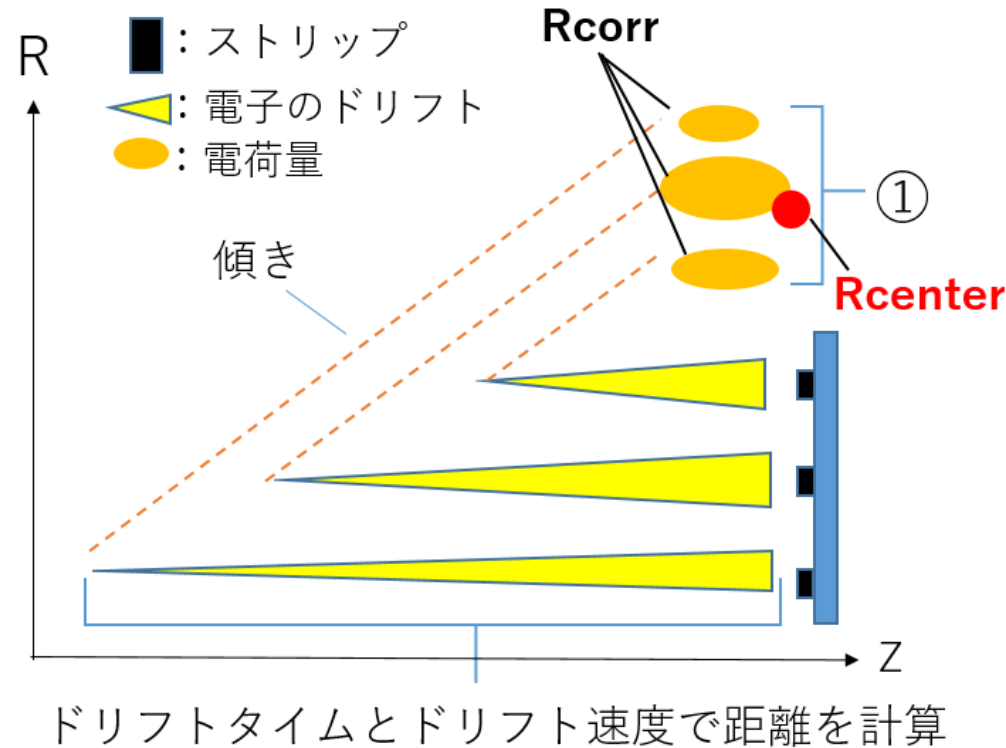
目次

- LHC-ATLAS実験
 - ミューオン検出器
 - トリガーシステム (ミューオントリガーシステム)
- New Small Wheel (NSW)
 - Micromegas検出器
- Micromegas検出器を用いた飛跡再構成アルゴリズム
- Micromegas検出器を用いた横運動量導出アルゴリズム
- 結論

クラスター再構成

クラスター再構成の手順

1. ドリフト距離を計算する。
2. 斜め入射の傾きを用いて、ヒットの位置 (R_{corr}) を計算する。
3. ①の式で電荷量を用いて位置 (R_{center}) を計算する。
4. R_{center} と R_{corr} が 0.4mm 以上離れている R_{corr} を除き、再度 R_{center} を計算する。

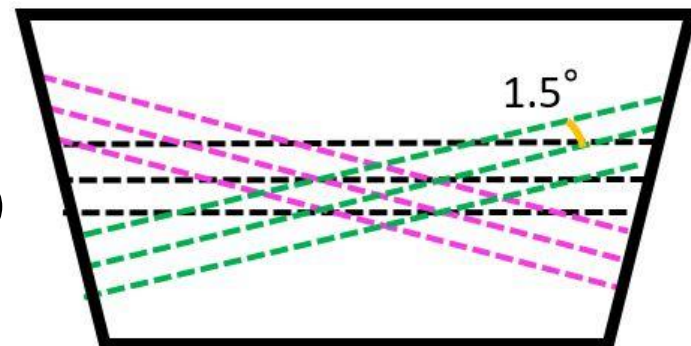


$$\textcircled{1}. \text{位置計算} : R_{\text{center}} = \frac{\sum_{i=0}^n \text{charge} * R_{\text{corr}}}{\sum_{i=0}^n \text{charge}}$$

飛跡再構成アルゴリズム

8層のMicromegas検出器

- ▶ 4層が θ 方向（水平）にストリップ（X）
- ▶ 4層が ± 1.5 度傾いてストリップが並ぶ（UV）

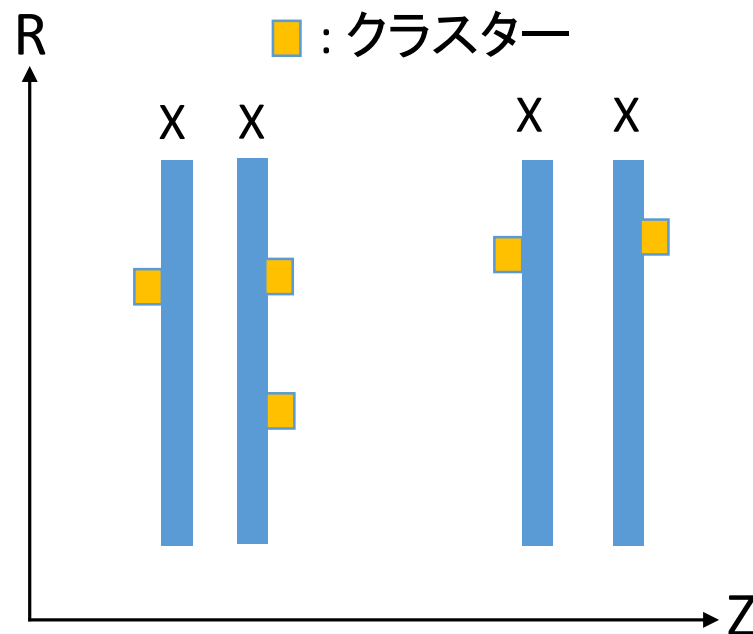


X : horizontal strips

UV : stereo strips

再構成アルゴリズムの手順

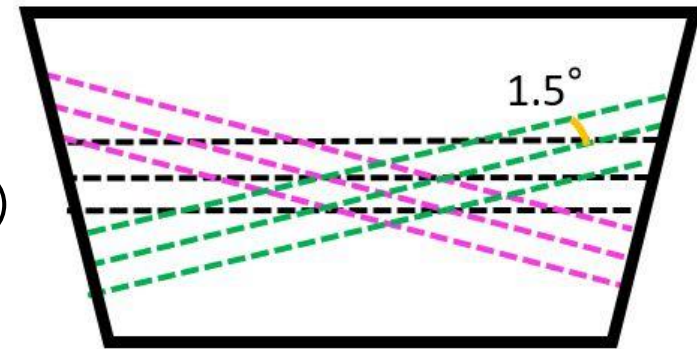
1. XUV層それぞれでクラスター再構成を行う。
2. X層で順列組合せで一次関数フィットを行う。全ての組合せをセグメント候補をする。
3. UV層で ϕ を計算する。
4. 複数のセグメント候補それぞれで χ^2/ndf を計算する。そして χ^2/ndf が一番小さいセグメントを選択する。



飛跡再構成アルゴリズム

8層のMicromegas検出器

- ▶ 4層が θ 方向 (水平) にストリップ (X)
- ▶ 4層が ± 1.5 度傾いてストリップが並ぶ (UV)

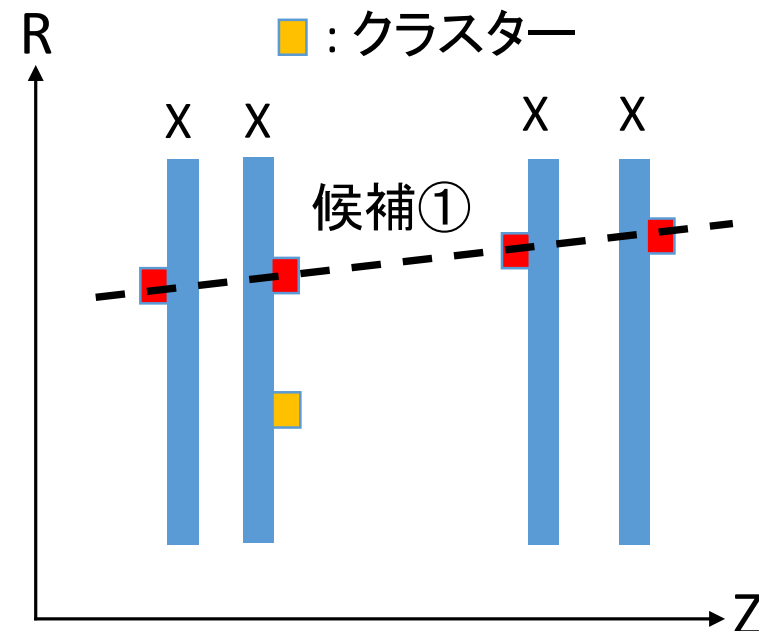


X : horizontal strips

UV : stereo strips

再構成アルゴリズムの手順

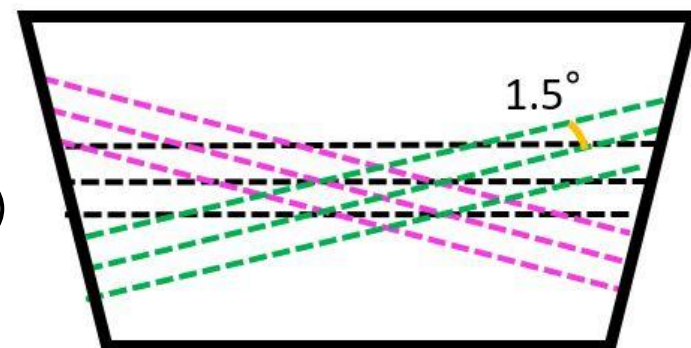
1. XUV層それぞれでクラスター再構成を行う。
2. X層で順列組合せで一次関数フィットを行う。全ての組合せをセグメント候補をする。
3. UV層で ϕ を計算する。
4. 複数のセグメント候補それぞれで χ^2/ndf を計算する。そして χ^2/ndf が一番小さいセグメントを選択する。



飛跡再構成アルゴリズム

- 8層のMicromegas検出器

- ▶ 4層が θ 方向（水平）にストリップ（X）
- ▶ 4層が ± 1.5 度傾いてストリップが並ぶ（UV）

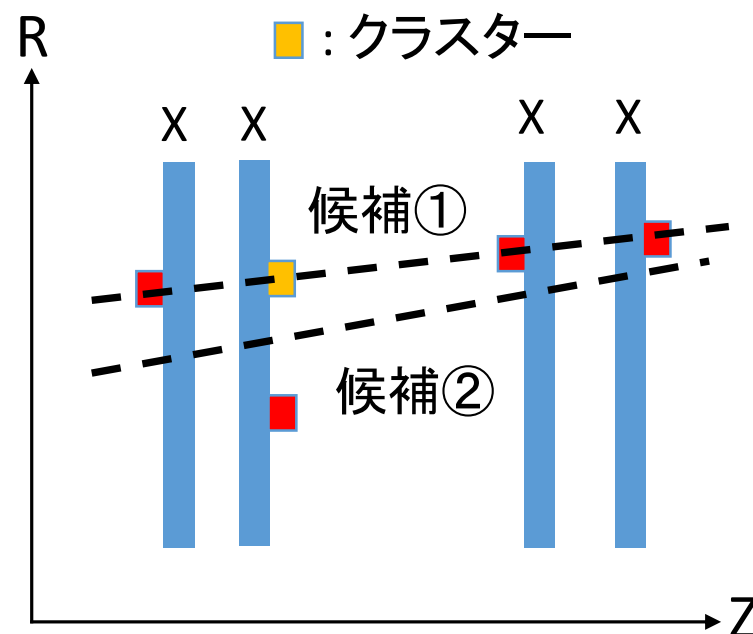


X : horizontal strips

UV : stereo strips

再構成アルゴリズムの手順

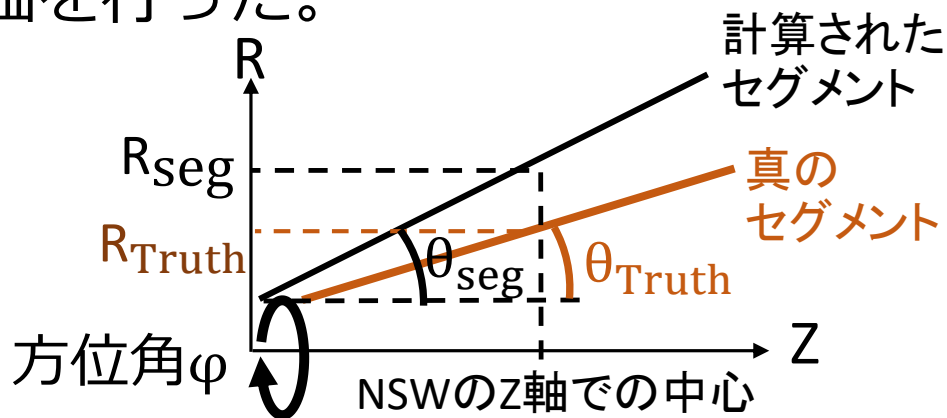
1. XUV層それぞれでクラスター再構成を行う。
2. X層で順列組合せで一次関数フィットを行う。全ての組合せをセグメント候補をする。
3. UV層で ϕ を計算する。
4. 複数のセグメント候補それぞれで χ^2/ndf を計算する。そして χ^2/ndf が一番小さいセグメントを選択する。



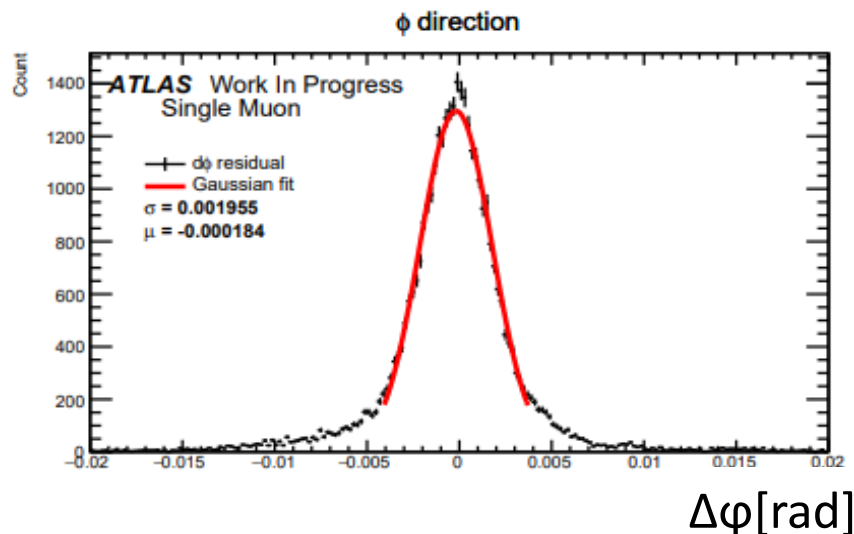
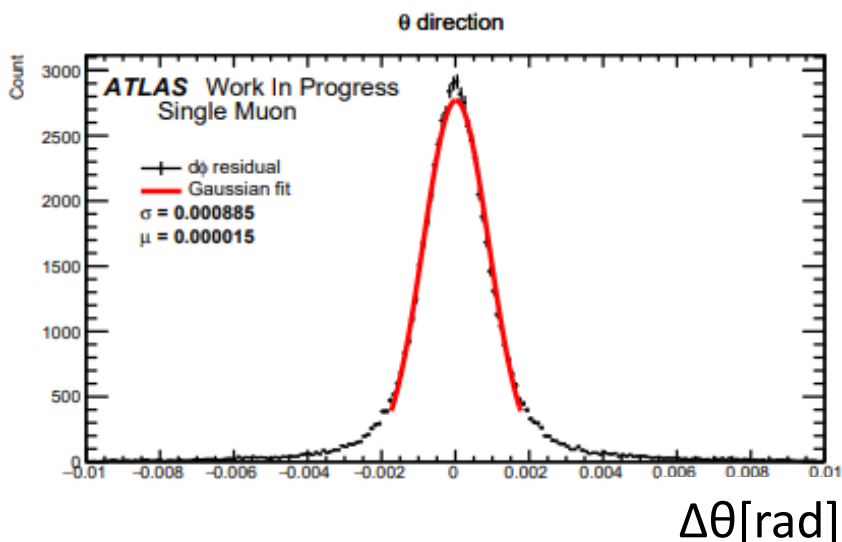
飛跡再構成アルゴリズムの評価

飛跡再構成アルゴリズムの評価を行った。

- 位置分解能 $\Delta R = R_{\text{seg}} - R_{\text{Truth}}$
- ϕ 分解能 $\Delta\phi = \phi_{\text{seg}} - \phi_{\text{Truth}}$
- θ 分解能 $\Delta\theta = \theta_{\text{seg}} - \theta_{\text{Truth}}$



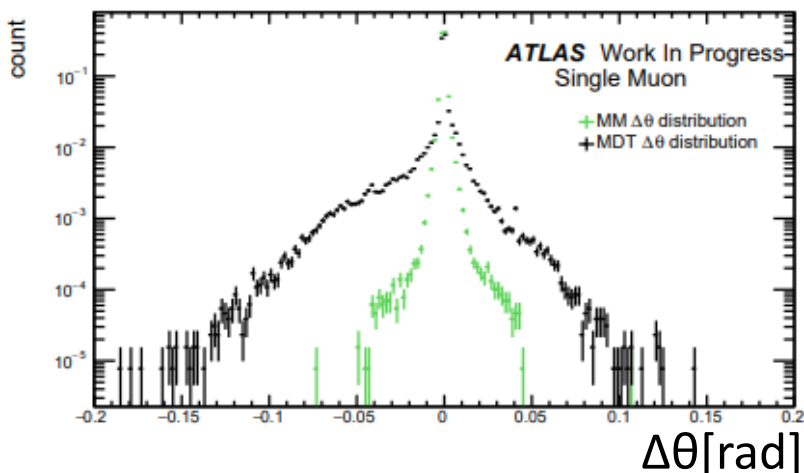
Single Muon Pt = 30GeV



分解能	θ [mrad]	ϕ [mrad]	R [μm]
Pt = 30GeV	0.893	1.98	68

飛跡再構成アルゴリズムの評価

MDTと θ (角度) 分解能を比較

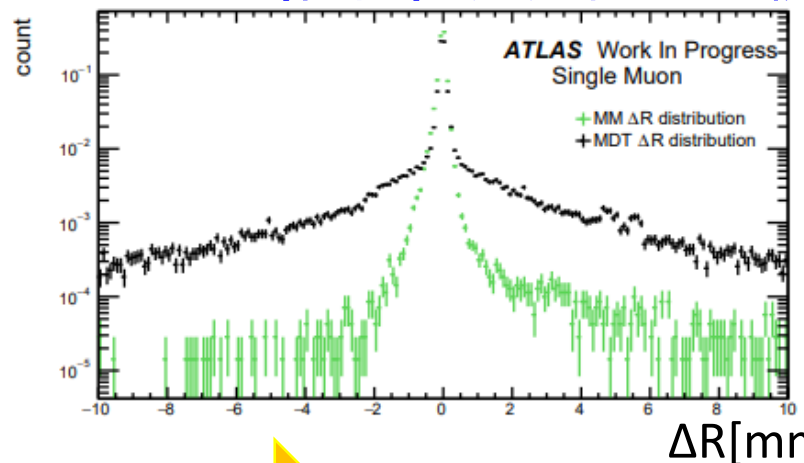


[mrad]	角度分解能
本研究	0.893
MDT	0.139

Micromegas	緑色
MDT	黒色

- 角度分解能はMDTより劣っている。
- MDTよりTailが少ない。

MDTとR (位置) 分解能を比較



[mm]	位置分解能
本研究	0.0687
MDT	0.0764

- 位置分解能はMDTより優れている。
- MDTよりTailが少ない。

➡ 分解能は現行のMDTより劣る部分があるが大きく間違える割合が少ない。

目次

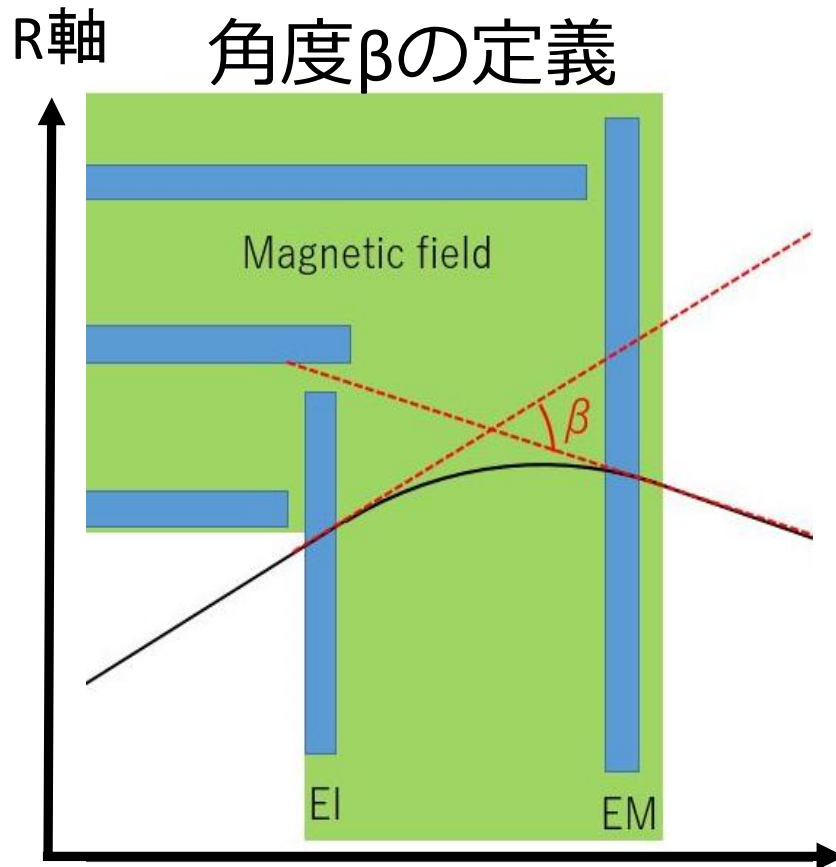
- LHC-ATLAS実験
 - ミューオン検出器
 - トリガーシステム (ミューオントリガーシステム)
- New Small Wheel (NSW)
 - Micromegas検出器
- Micromegas検出器を用いた飛跡再構成アルゴリズム
- Micromegas検出器を用いた横運動量導出アルゴリズム
- 結論

横運動量導出アルゴリズム

角度 β を用いて横運動量 (P_t) を計算する。

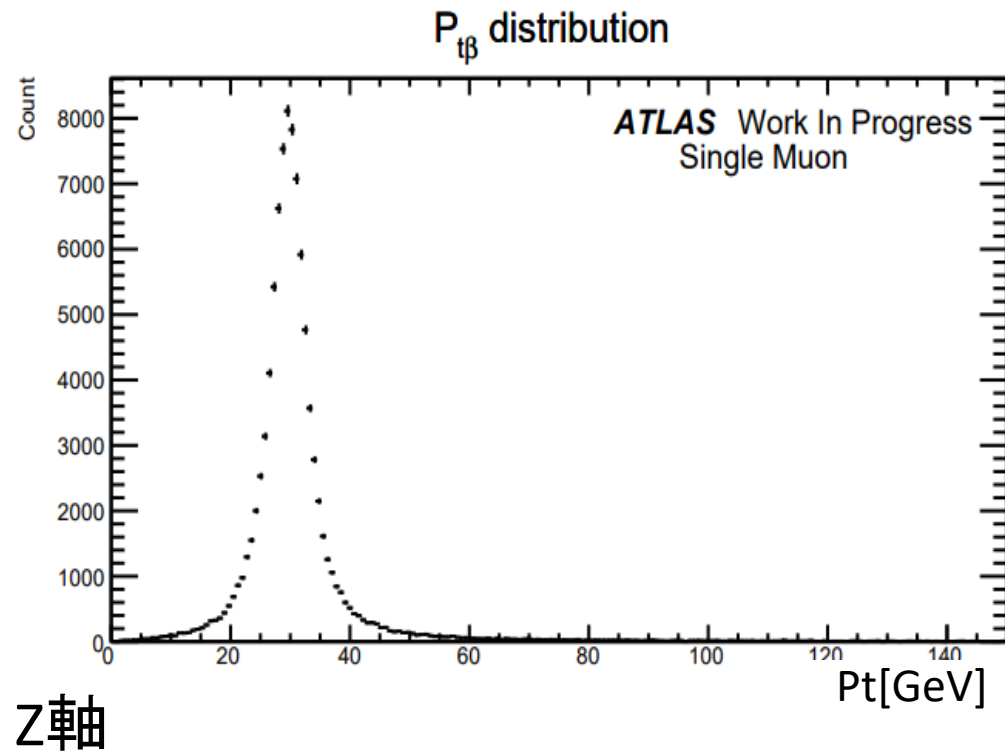
- 角度 β の定義

- ▶ インナーとミドルステーションの傾きから計算 (下図)



- β を用いて P_t を計算

- ▶ Single Muon $P_t=30\text{GeV}$ を使用



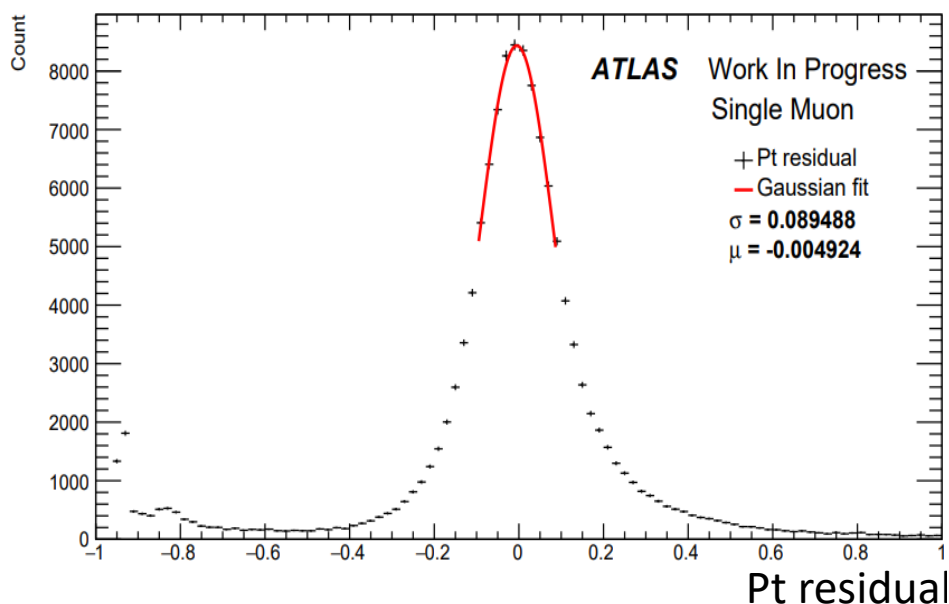
導出された横運動量の評価

導出された p_T の評価を行う

- $$p_T \text{ residual} = \frac{1/p_{T,SA} - 1/p_{T,truth}}{1/p_{T,truth}}$$
- Single Muon Pt = 30, 100 GeVのサンプル

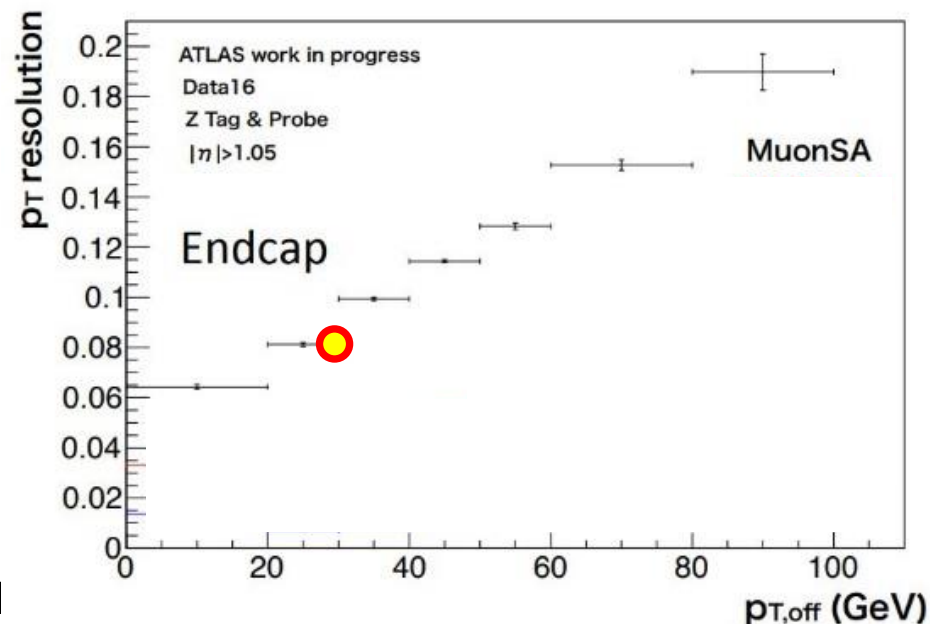
各Ptのresidual 分布

Pt residual



Pt分解能	30GeV	100GeV
本研究	0.0894	0.242

2016年Run2の結果



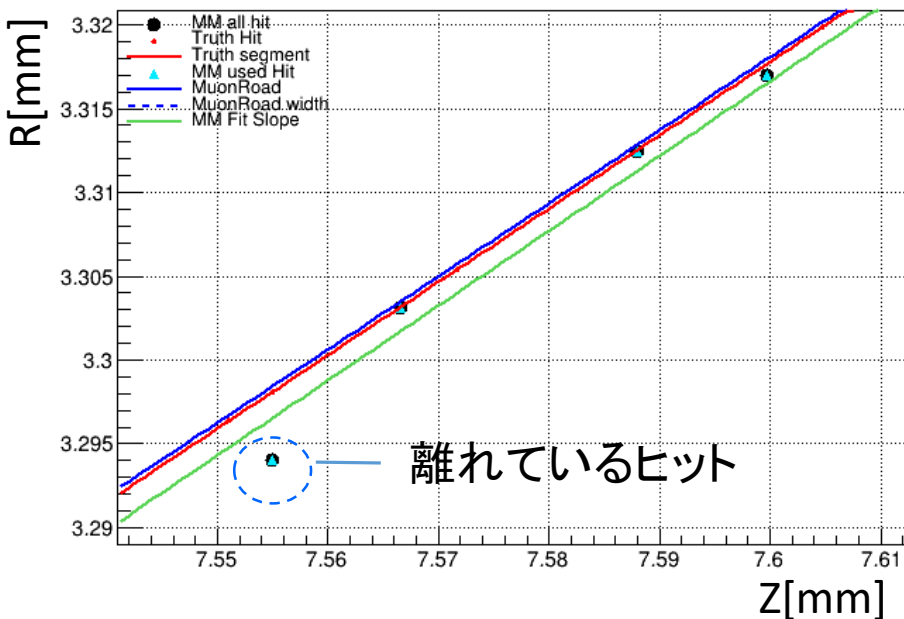
- Run2の結果と同程度の精度。

Pt β の概算を誤っている例

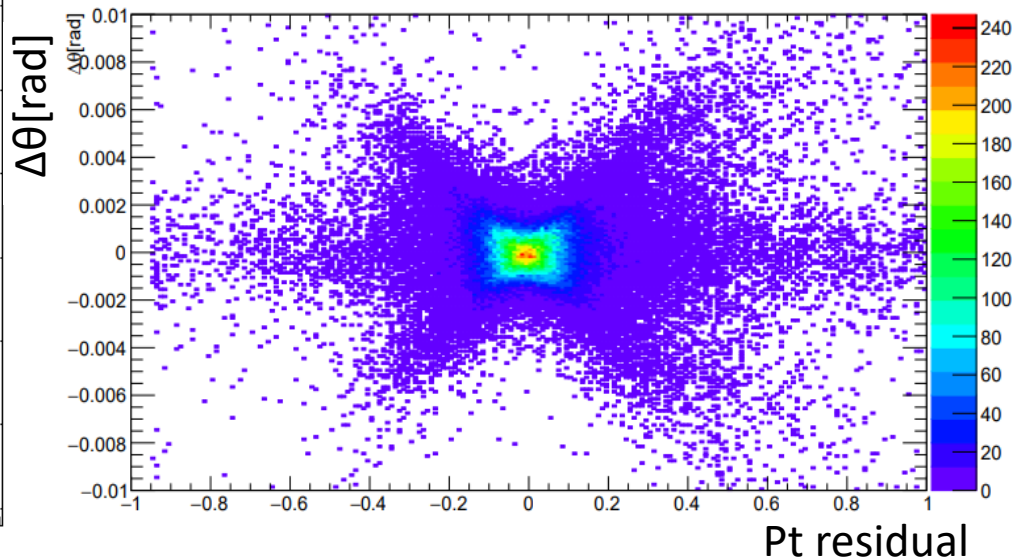
再構成が誤っている例

インナーの $\Delta\theta$ とPt β の相関

Eventdisplay(ZR) EventNumber : 58515



ATLAS Work in Progress
Single Muon Pt residual (Only $p_{T,\beta}$): $\Delta\theta$



- インナーでの角度が誤っているためPt β の概算を誤っている。
- ➡ イベントディスプレイのように、明らかに離れているヒットがあり、これを除くようなプロセスが必要。
- ➡ 今後の課題

目次

- LHC-ATLAS実験
 - ミューオン検出器
 - トリガーシステム (ミューオントリガーシステム)
- New Small Wheel (NSW)
 - Micromegas検出器
- Micromegas検出器を用いた飛跡再構成アルゴリズム
- Micromegas検出器を用いた横運動量導出アルゴリズム
- 結論

結論

- Micromegas検出器を用いたトリガーアルゴリズムを開発した。
- Micromegas検出器を用いた飛跡再構成
 - 角度分解能は現行のMDTより劣っているが、Tailが少ない。
 - 位置分解能は現行のMDTより優れて、かつTailが少ない。
- 横運動量の概算
 - $P_t = 30\text{GeV}$ で8.9%の精度で導出。
- 今後の課題
 - 角度分解能の向上
 - より実験に近いMCを用いてフェイクヒットの対策

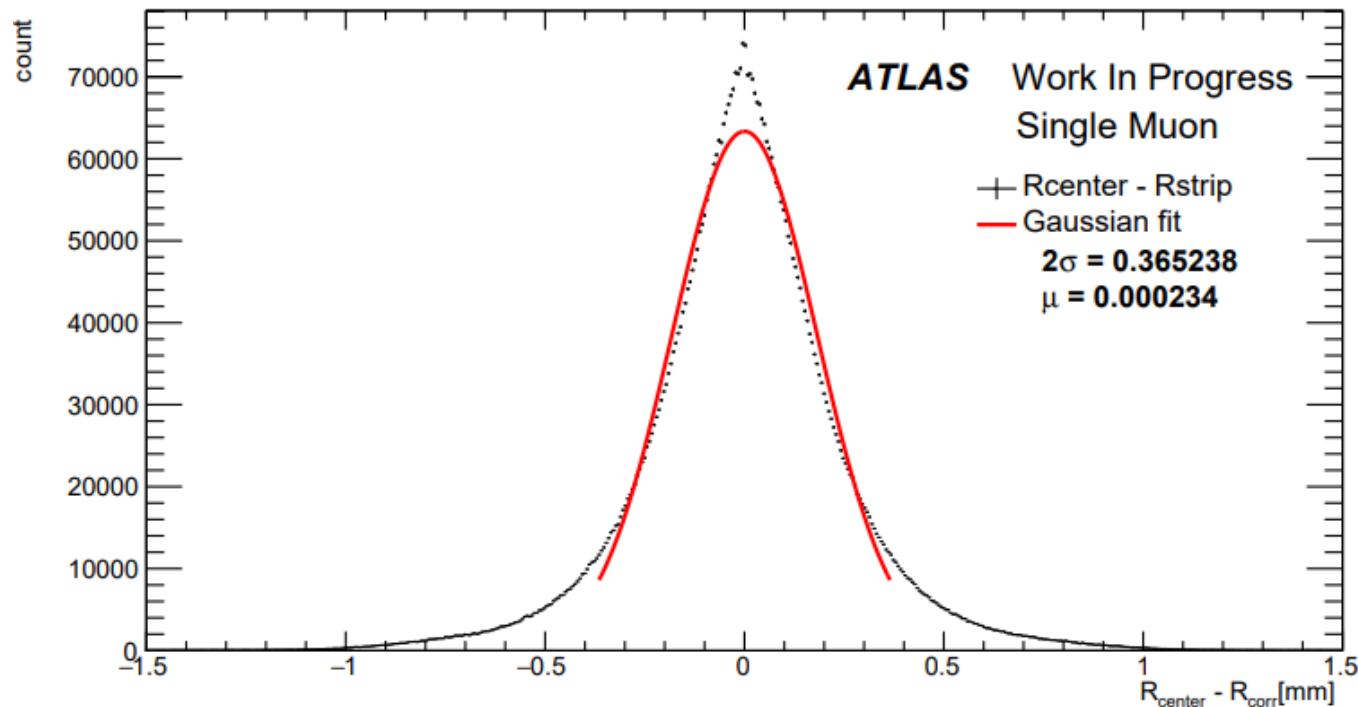


Back Up

ATLAS

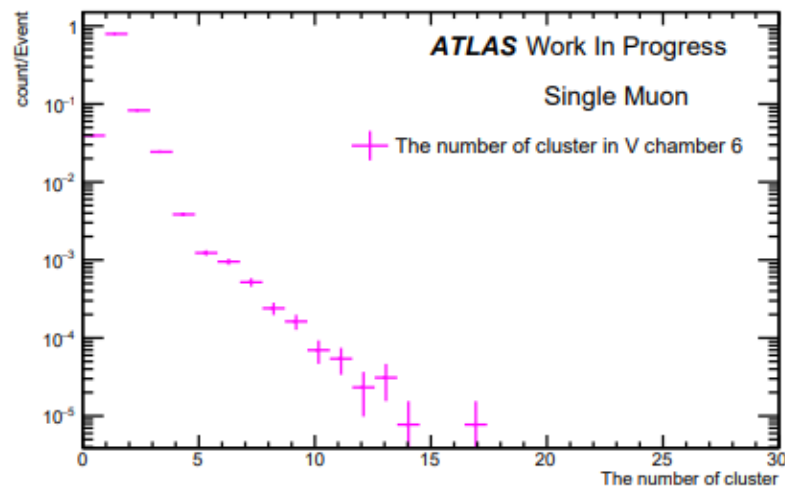
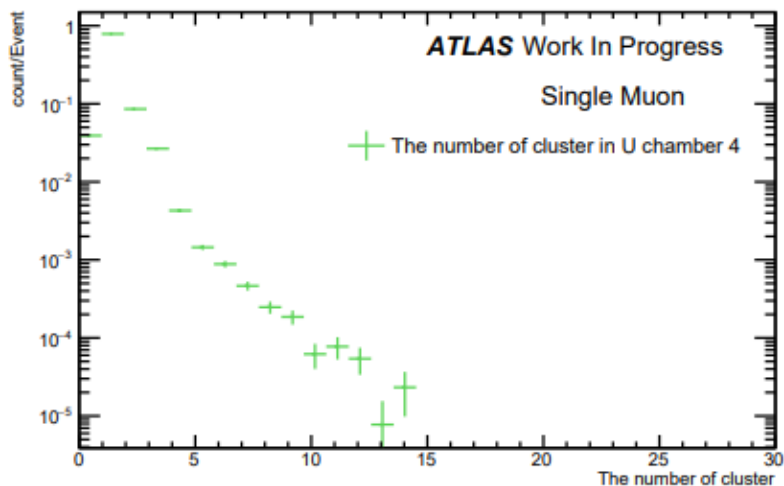
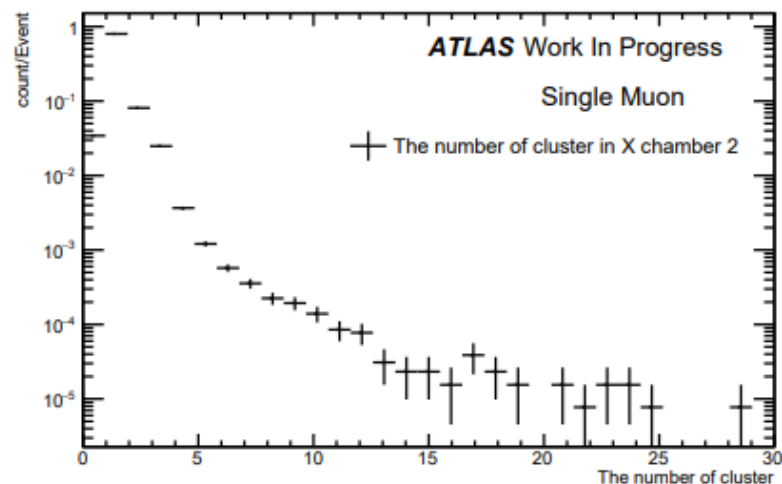
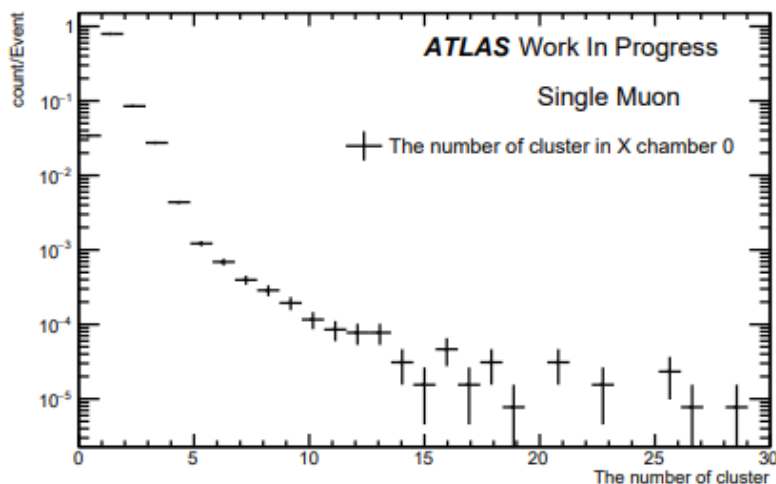
EXPERIMENT

RcenterとRcorrとの差の分布



- $R_{\text{center}} - R_{\text{corr}}$ の分布
- $2\sigma = 0.365$ であるので、0.4mmで十分と判断した。

各クラスターの数分布



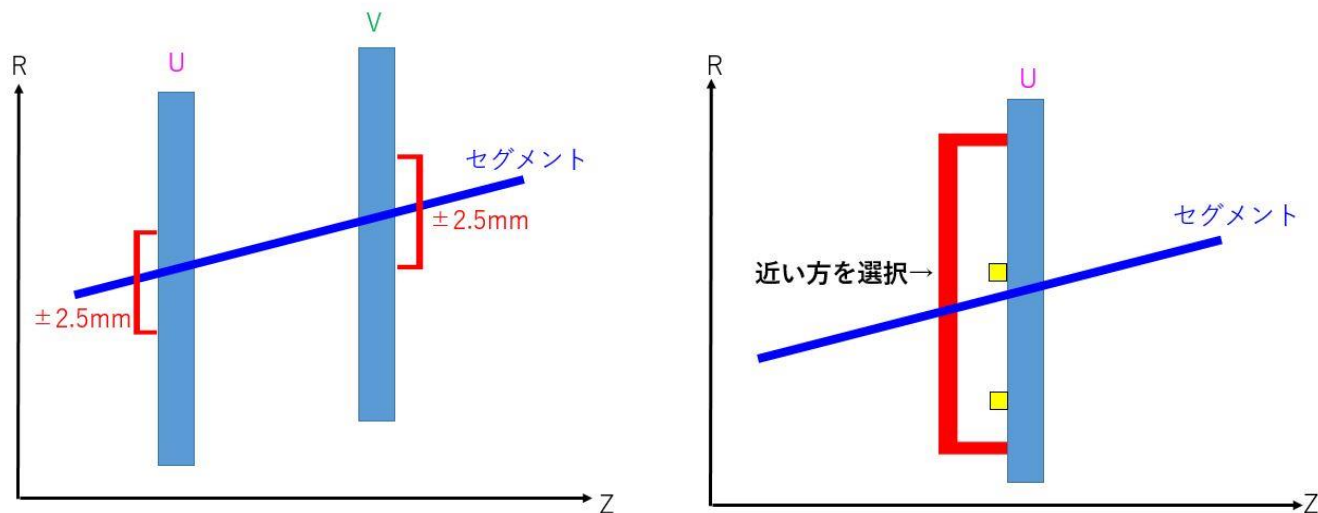
- イベント数で規格化している。

UV層のクラスタの選択

X層でセグメント候補を計算後、それぞれの候補でUV層のどのクラスタを使用するか決める。

手順

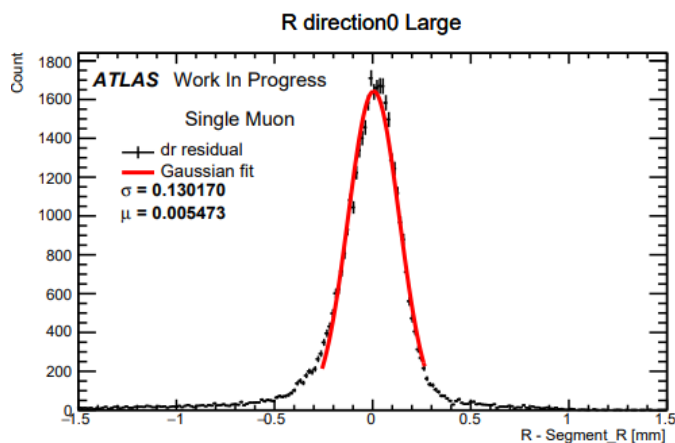
1. X層のクラスタで求めた各セグメント候補から R 方向に $\pm 2.5\text{mm}$ (= ウィンドウ) 内のヒットを選択する。
2. 複数のヒット候補がある場合、セグメントに近い方を選択する。



Micromegas検出器のR方向の誤差

R方向測定誤差を求める

- ΔR_{seg} の分布をガウシアンフィットし、 1σ を測定誤差とした
 - $\Delta R_{seg} = R - R_{segment}$ (各層のZ座標で考える)

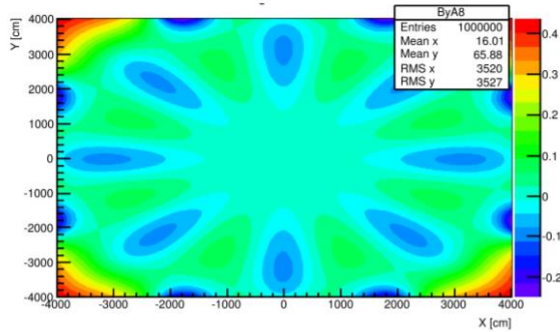


1σ	Large [μm]	Small [μm]
X層	130	140~160
UV層	130	140

- これらを用いて χ^2 / ndf を計算した。

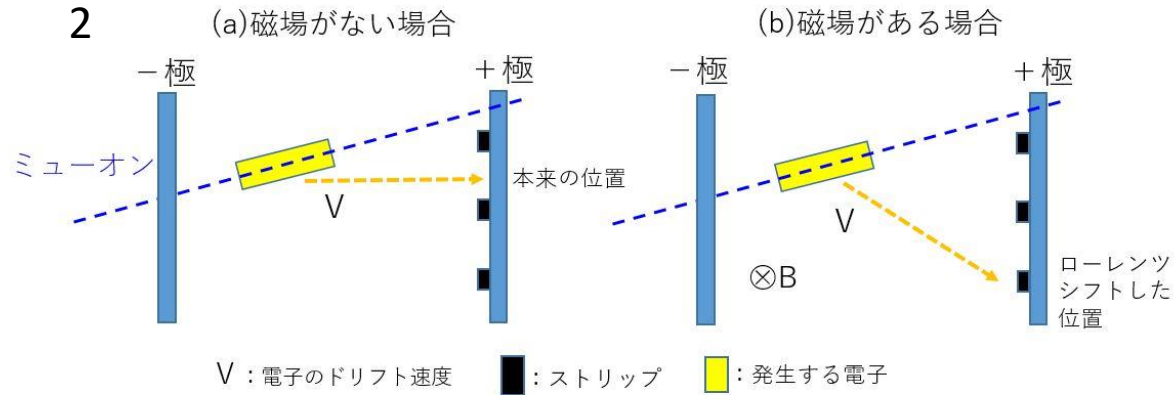
トロイド磁石による磁場の影響

1



(a) ϕ component of the magnetic field at 1st layer of MM large sector obtained from the ATHENA Magnetic field service

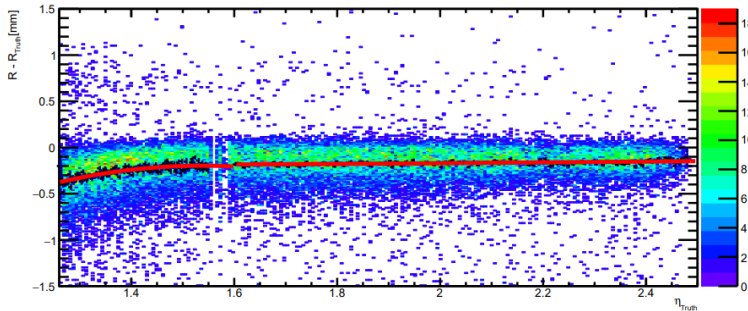
2



- 図1のようにトロイド磁石による磁場の漏れによって、ローレンツシフト (図2) することが予想される。

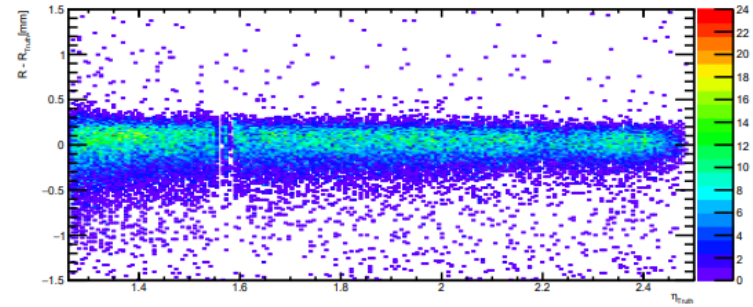
真の値と比較して η の関数として補正を行った。

ATLAS Work in Progress
Single Muon R correction X Large Sector0



補正後

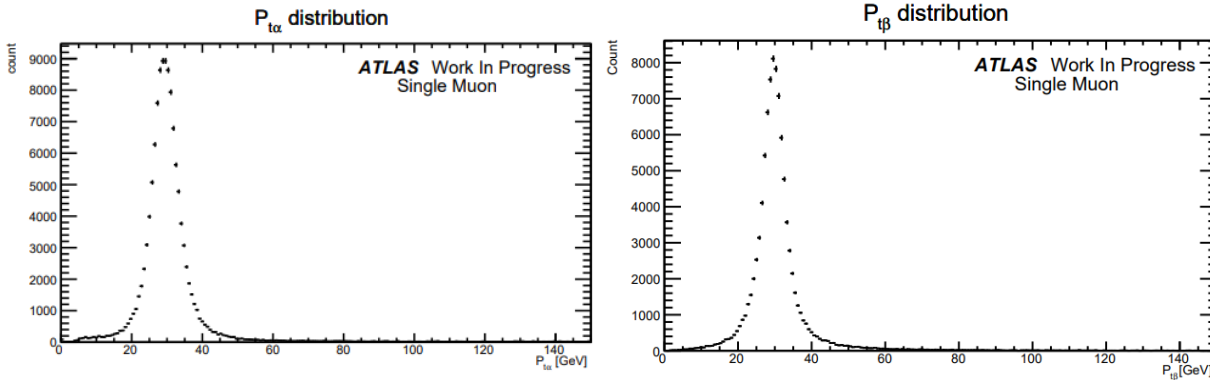
ATLAS Work in Progress
Single Muon R correction X Large Sector0



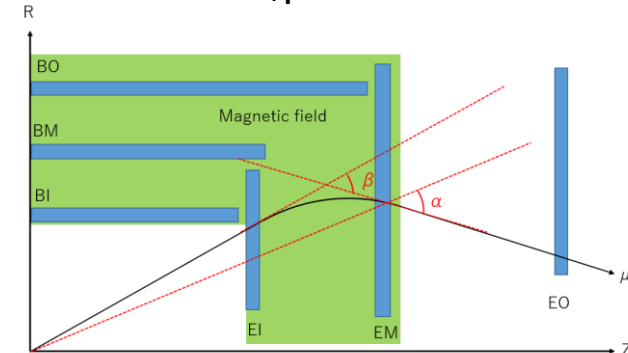
α, β による横運動量の導出

α, β を用いてPtを導出した

- Single Muon Pt=30GeV



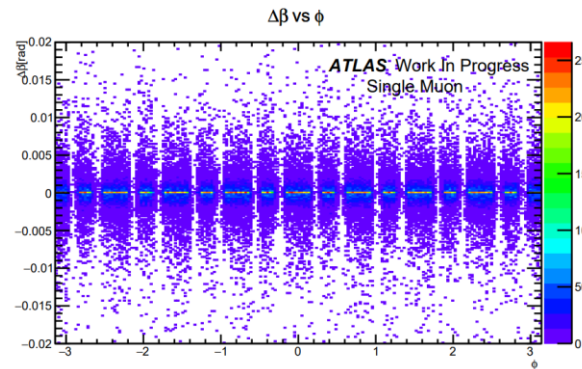
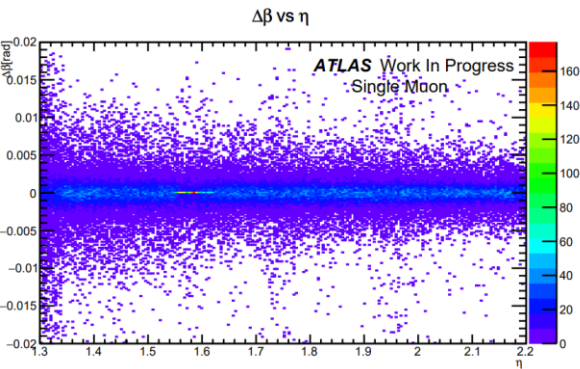
角度 α, β の定義



- β について真の β と比較

$\Delta\beta = \beta - \beta_{\text{Truth}}$

※ Overlap Regionは除いている



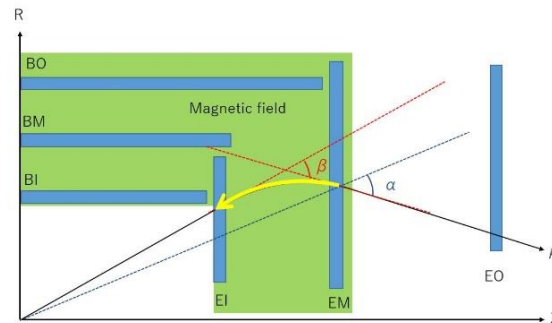
- β は η, ϕ に依存せず計算されている。

Back-Extrapolationによるロードの幅

Innerにおいて飛跡再構成するためのロードの幅を設けた

- **Back-Extrapolation (Ext)**

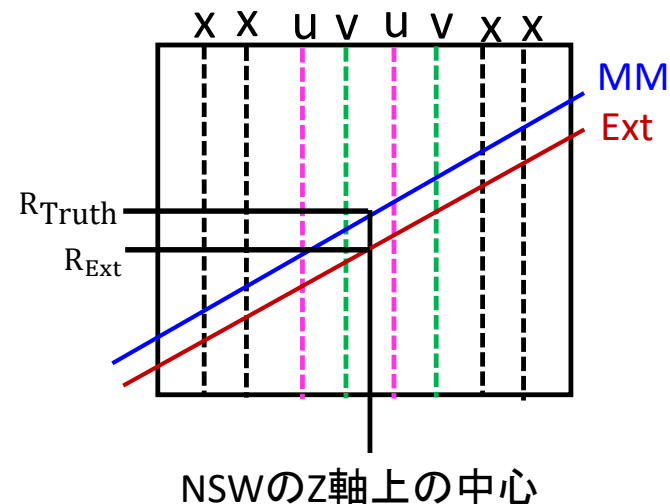
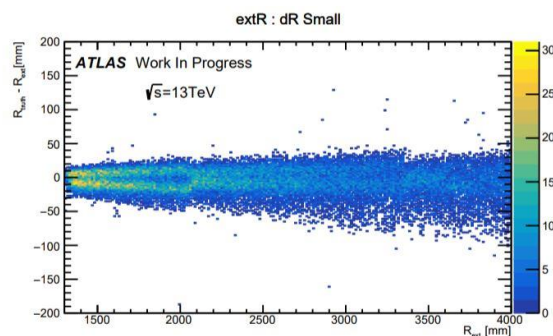
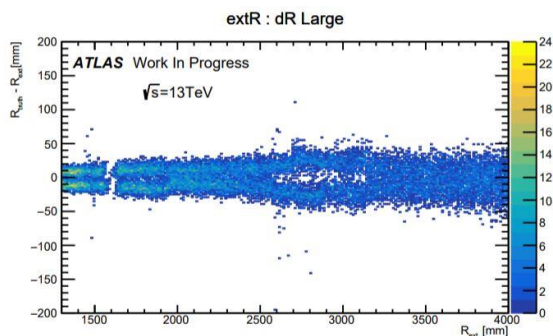
- Pt α を用いてMiddleから外挿する方法



- **評価方法**

- Extで得られた η とMMの真のセグメントのR差 (下図のように定義)

- $\Delta R = R_{\text{Ext}} - R_{\text{Truth}}$

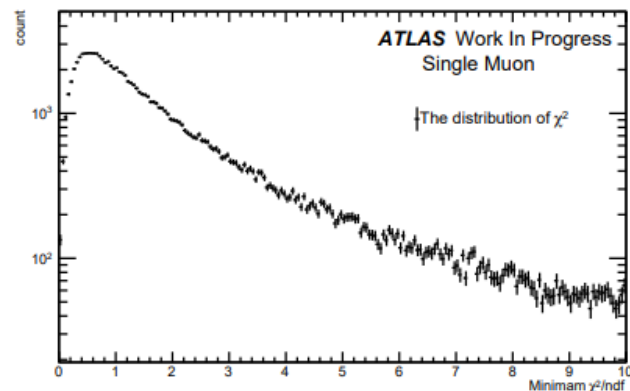


ロードの幅を150mmとした

χ^2 / ndf を用いた定量的評価

複数のセグメント候補の中で χ^2 / ndf が一番小さいものを調べた

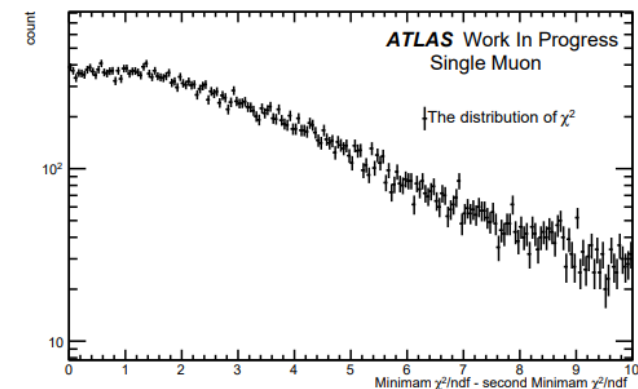
The distribution of χ^2 / ndf



- 分布のピークが0.5付近
- ➡ 検出器の誤差を粗く見積もっている

次に一番小さいものと2番目に小さいものとの差を調べた

χ^2 / ndf



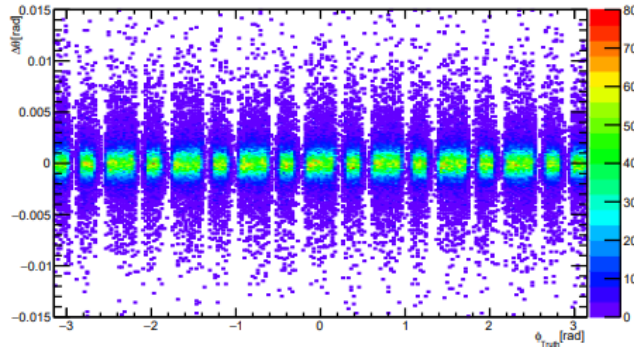
- 一番目と2番目に差が小さいイベント多い。
- ➡ 隣接するクラスターが近い距離にある
- ➡ 本アルゴリズムではクラスターを分けられていない可能性がある。

$\Delta\theta$ の η, ϕ 依存性

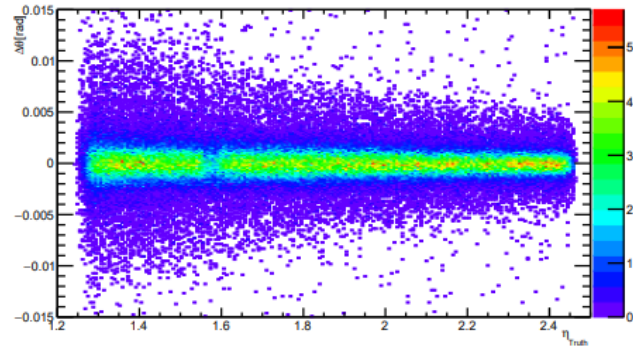
$\Delta\theta$ の η, ϕ 依存性

※ Overlap Regionは除いている

ATLAS Work in Progress
Single Muon The distribution $\Delta\theta$ vs ϕ_{Truth}

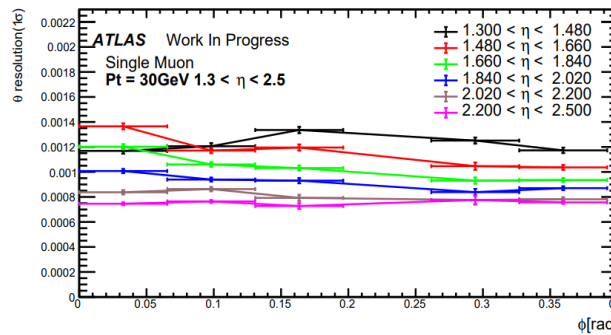
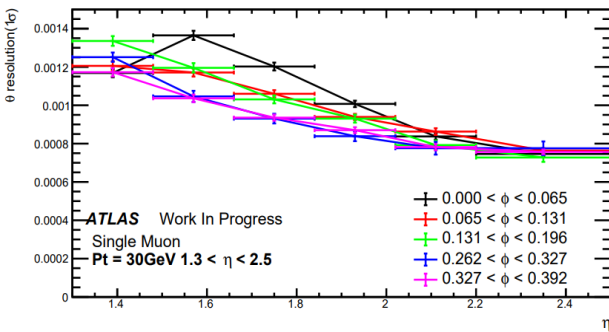


ATLAS Work in Progress
Single Muon The distribution $\Delta\theta$ vs η_{Truth}



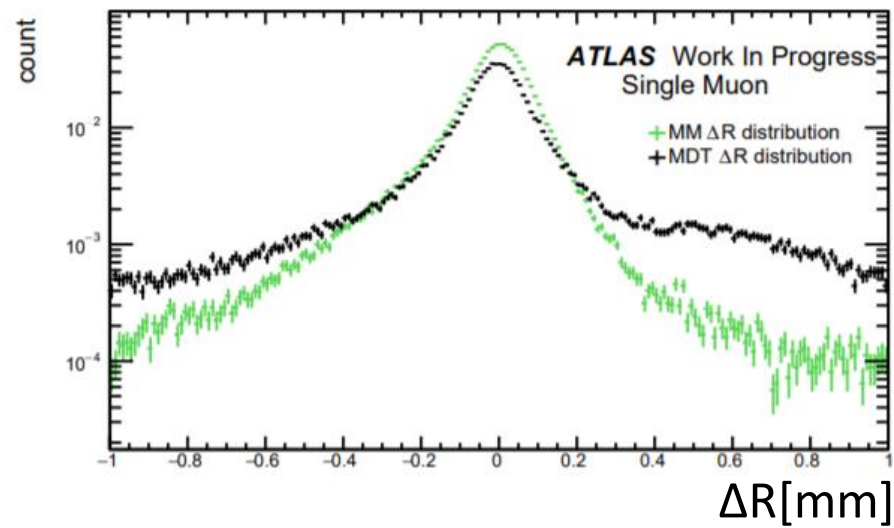
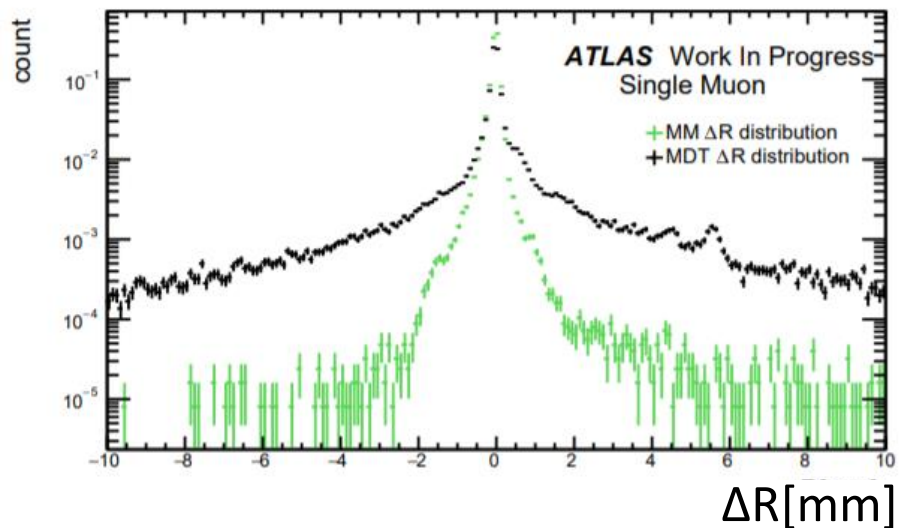
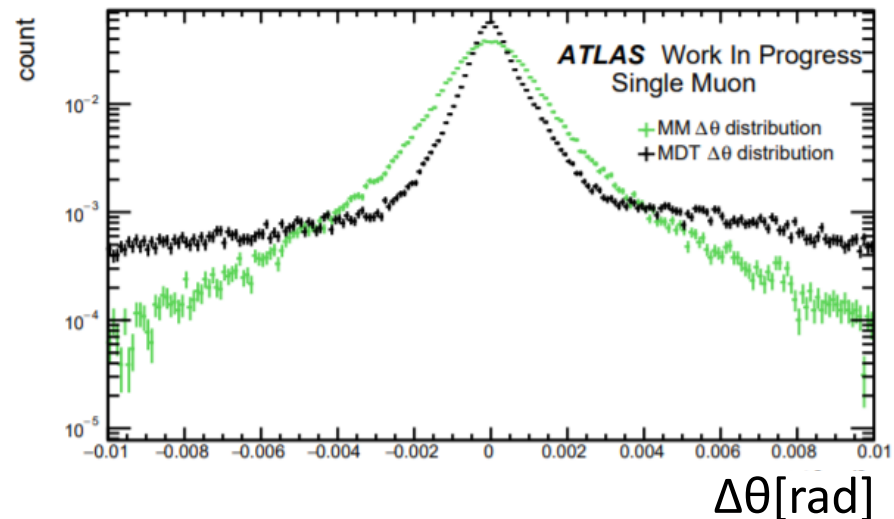
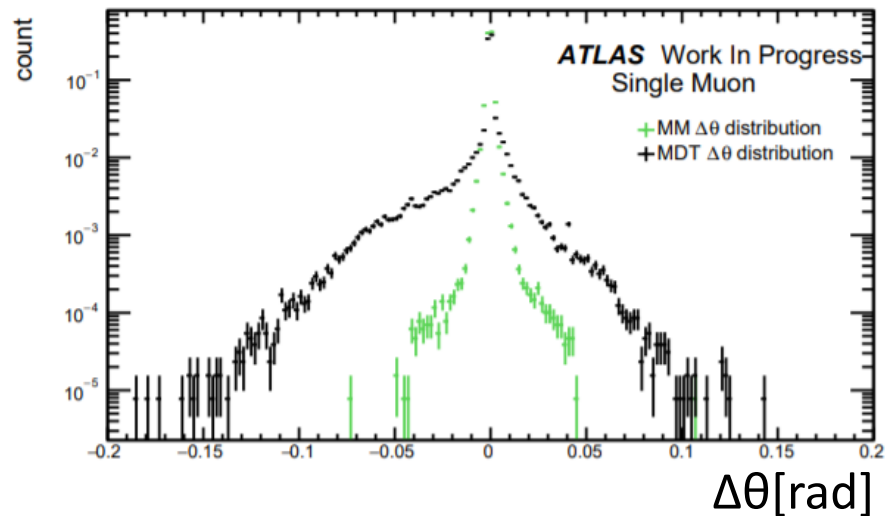
- η が小さい範囲で分布が広がる
- 一層当たりのR方向の分布が広がることが要因。

θ 分解能の η, ϕ 依存性



- η が大きくなるほど分解能がよくなる。
- ϕ に対する依存性も確認できた。

$\Delta\theta$ 、 ΔR の比較



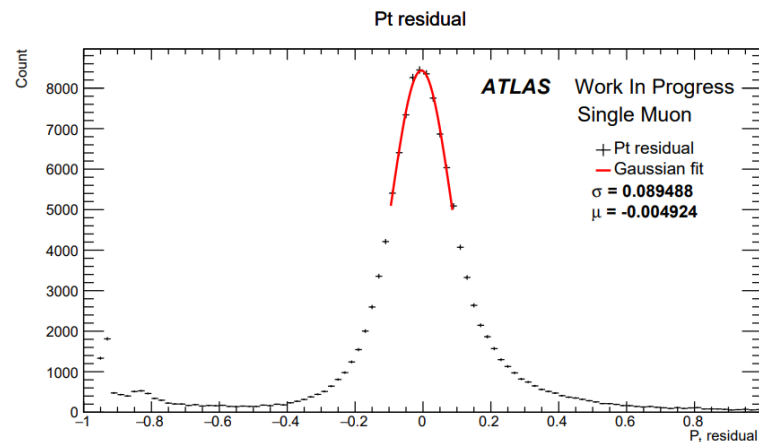
横運動量導出アルゴリズム

導出された p_T の評価を行う

- $$p_T \text{ residual} = \frac{1/p_{T,SA} - 1/p_{T,truth}}{1/p_{T,truth}}$$

- Single Muon Pt = 30,100GeVのサンプルを使用

各Ptのresidual 分布



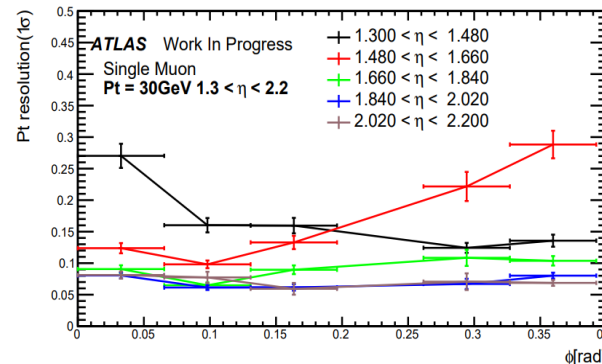
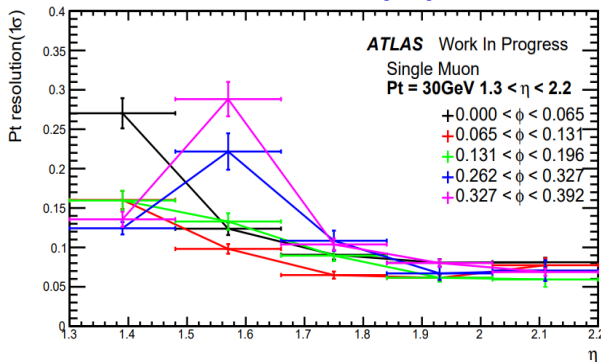
Pt分解能	30GeV	100GeV
本研究	0.0894	0.242

Pt分解能	20~30GeV	80~100GeV
Run2	~0.082	~0.195

Pt分解能	30~40GeV	100~110GeV
Run2	~0.11	—

- Run2の結果と同程度の精度。

Pt分解能の η, ϕ 依存性

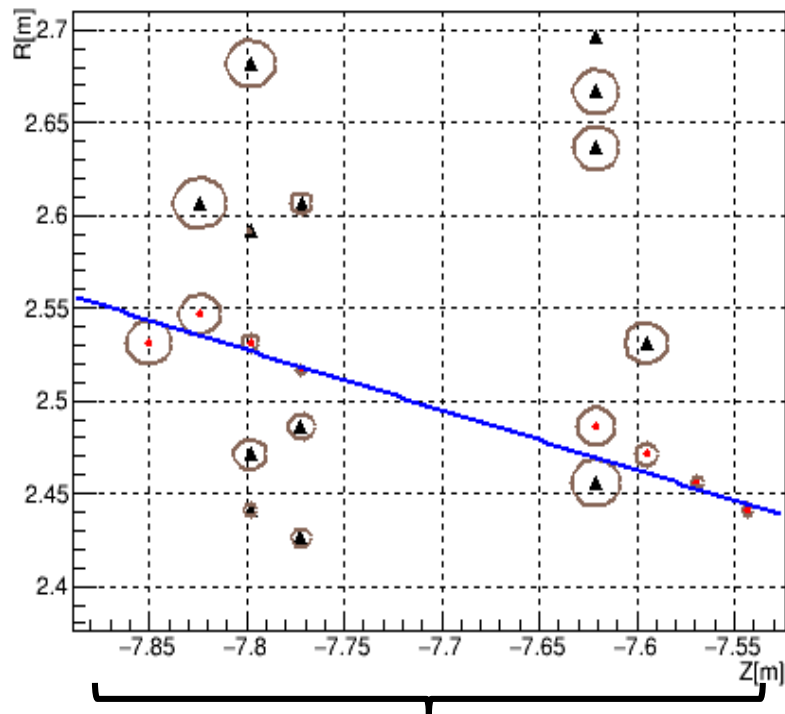


- η が大きくなるほど分解能がよくなる。

- ϕ に対する依存性

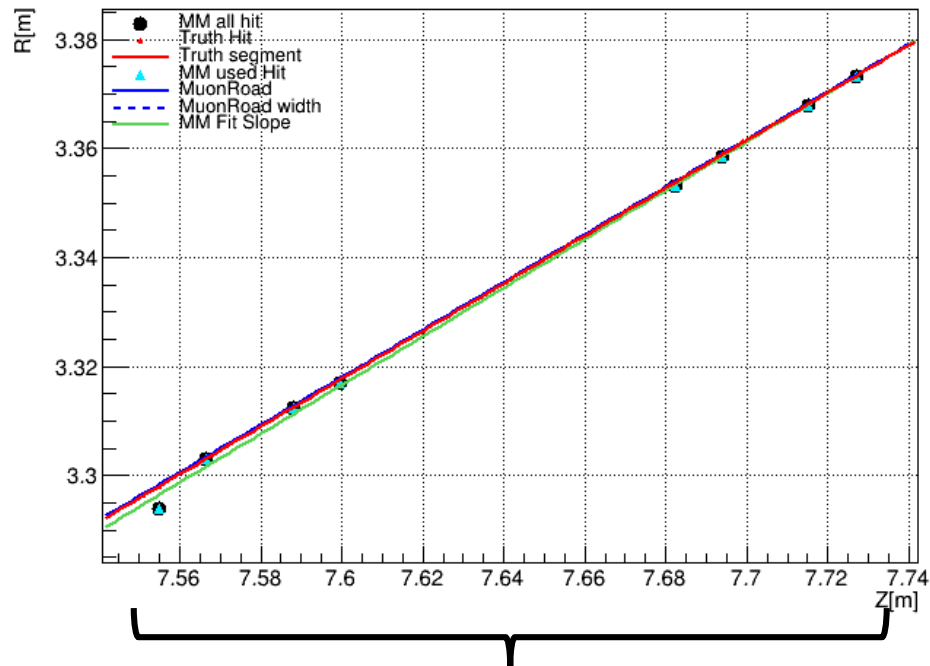
MDTとMicromegasの厚さ比較

Endcap Inner



~30cm

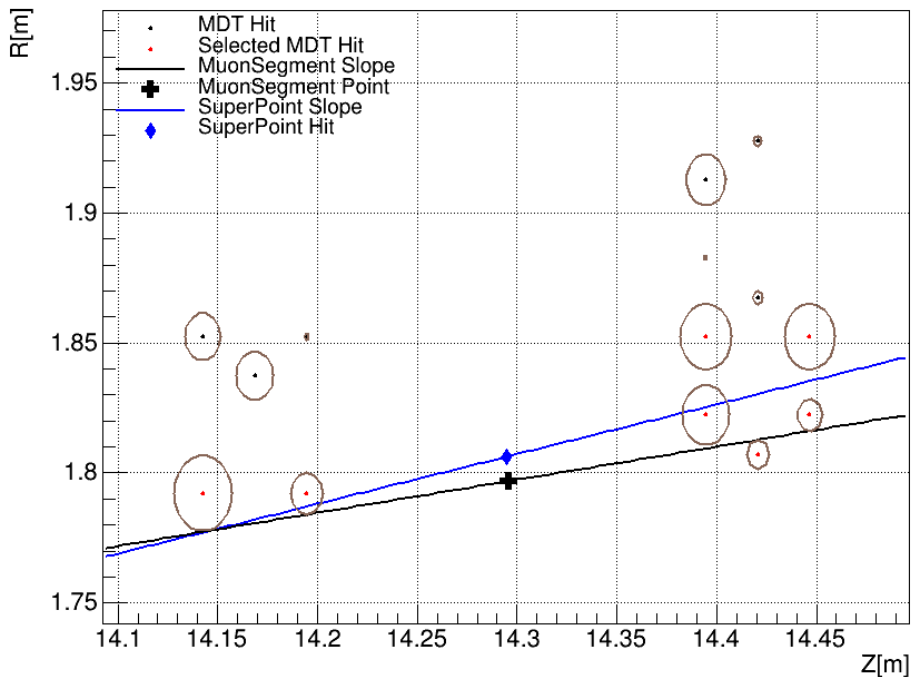
Eventdisplay(ZR) EventNumber : 58515



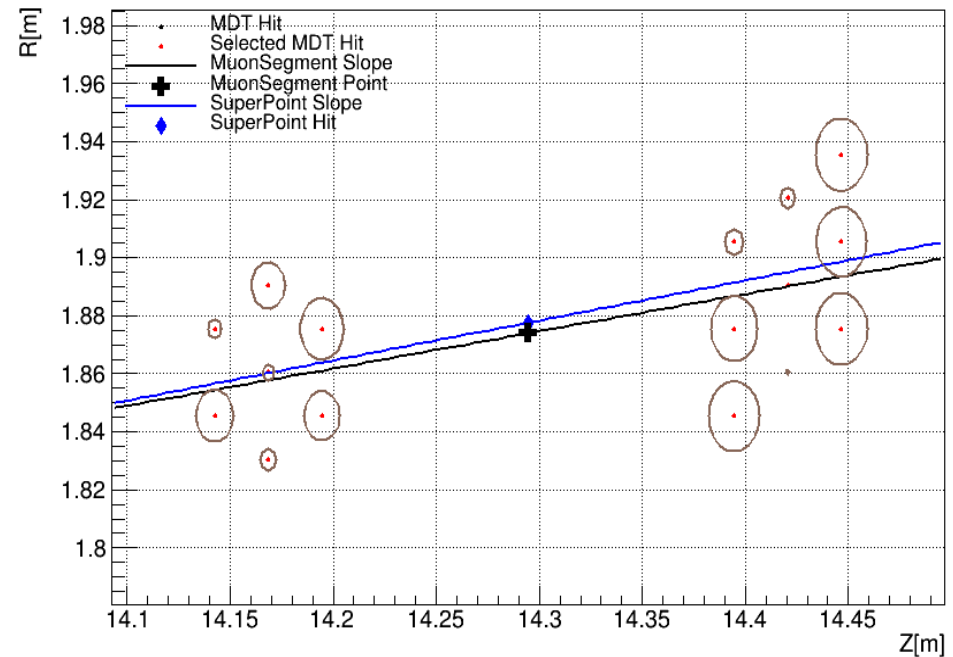
~17cm

MDTが角度を大きく間違える例

Endcap Middle

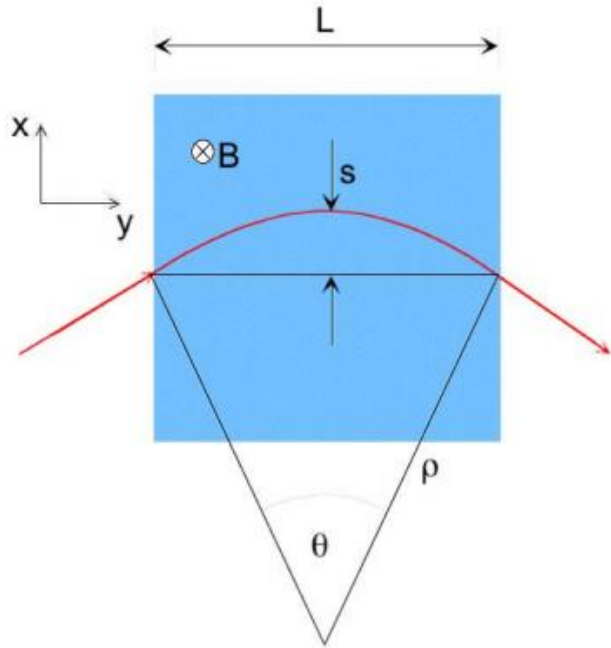


Endcap Middle



- ミューオンの飛跡付近にサークルが多く存在する場合、間違えやすい。

Ptとサジッタの関係

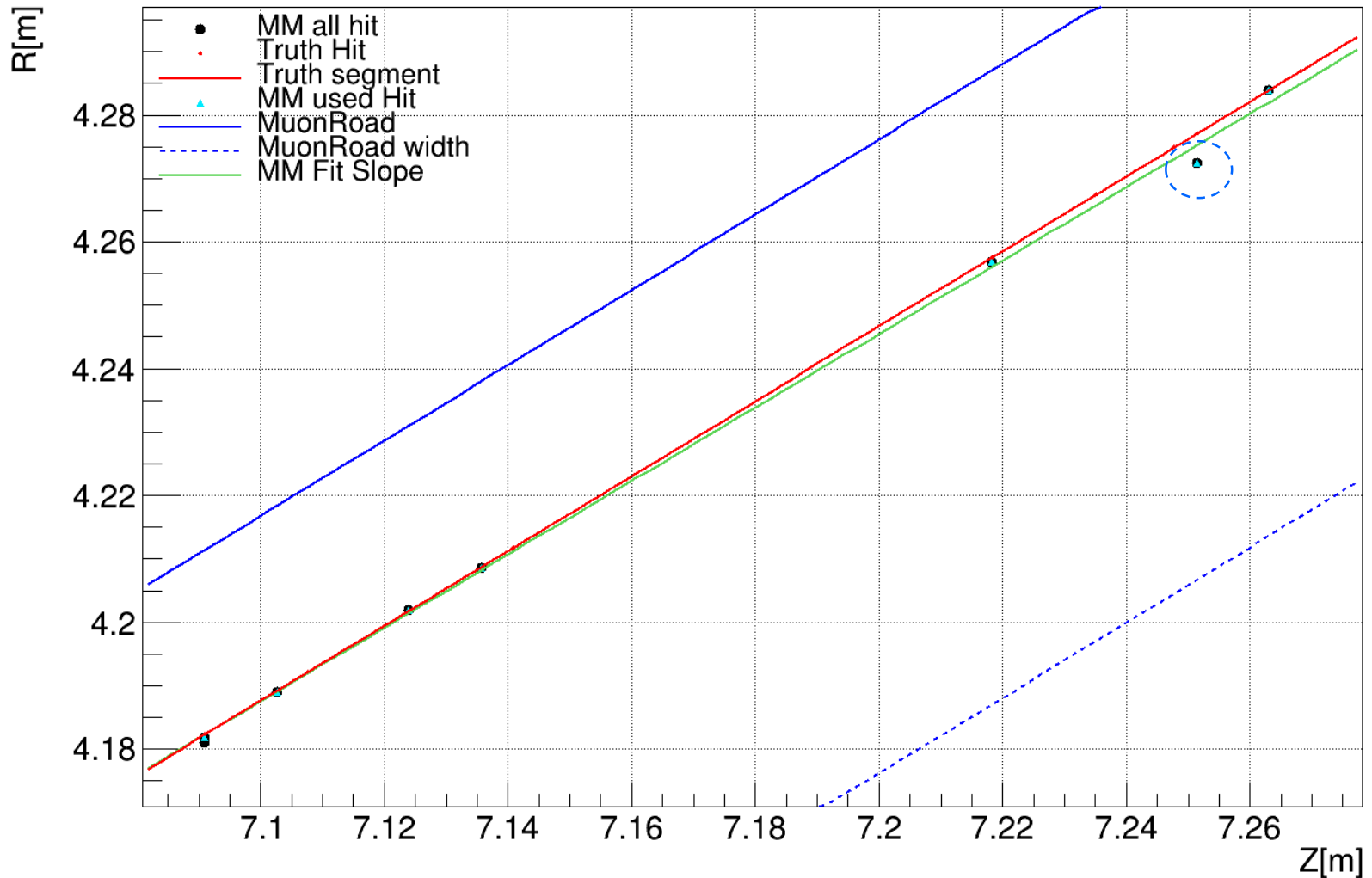


$$\begin{aligned} p_T [\text{GeV}/c] &= 0.3 B \rho [T \cdot m] \\ \frac{L}{2\rho} &= \sin \frac{\theta}{2} \sim \frac{\theta}{2} \\ \Delta p_T &= p_T \sin \theta \sim 0.3 L B \\ s &= \rho (1 - \cos \frac{\theta}{2}) \sim \rho \frac{\theta^2}{8} \\ &= \frac{0.3 L^2 B}{8 p_T} \end{aligned}$$

- サジッタはガウス分布するので、 $1/p_T$ をガウス分布する。

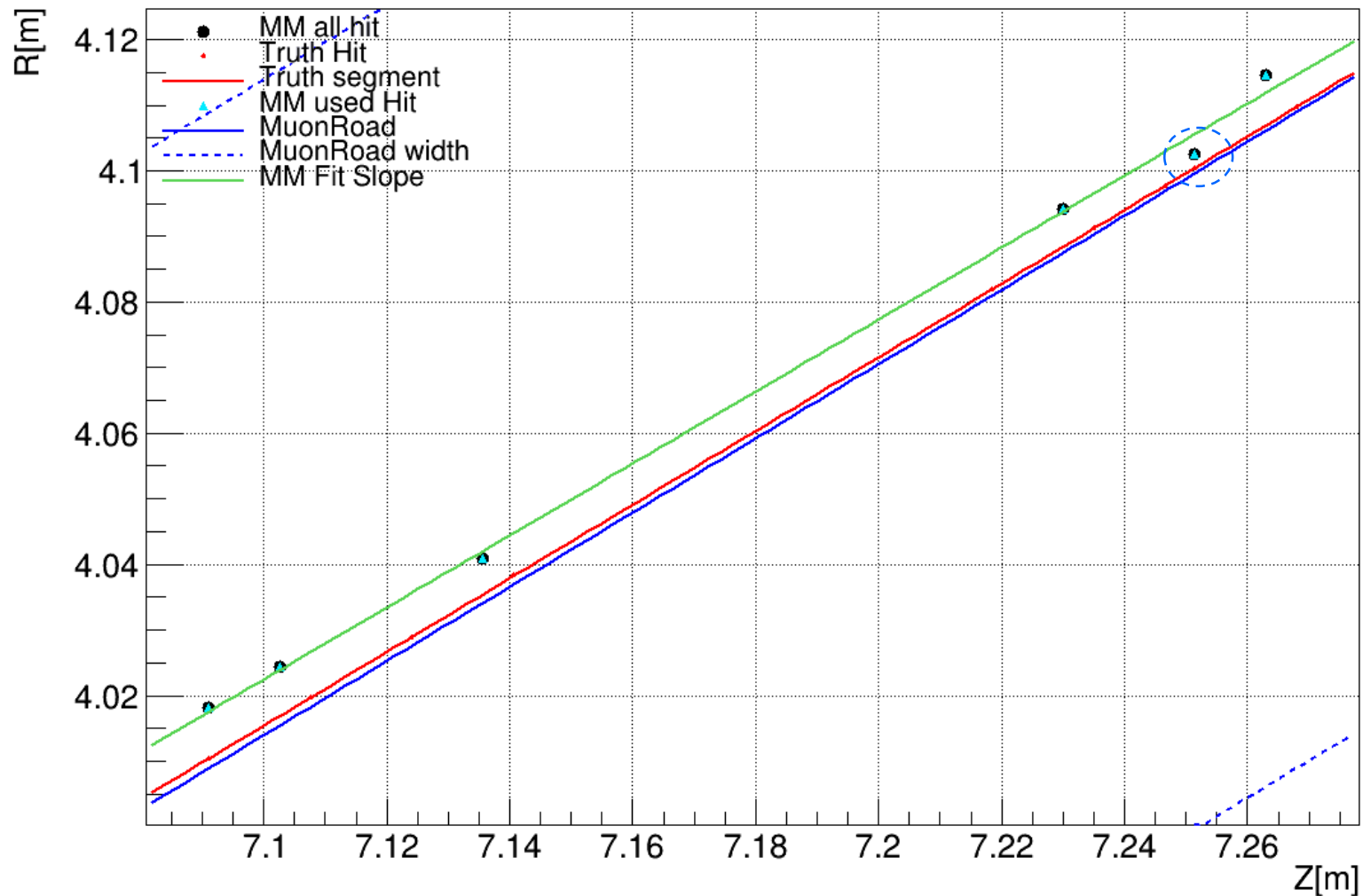
Event Display①

Eventdisplay(ZR) EventNumber : 15490



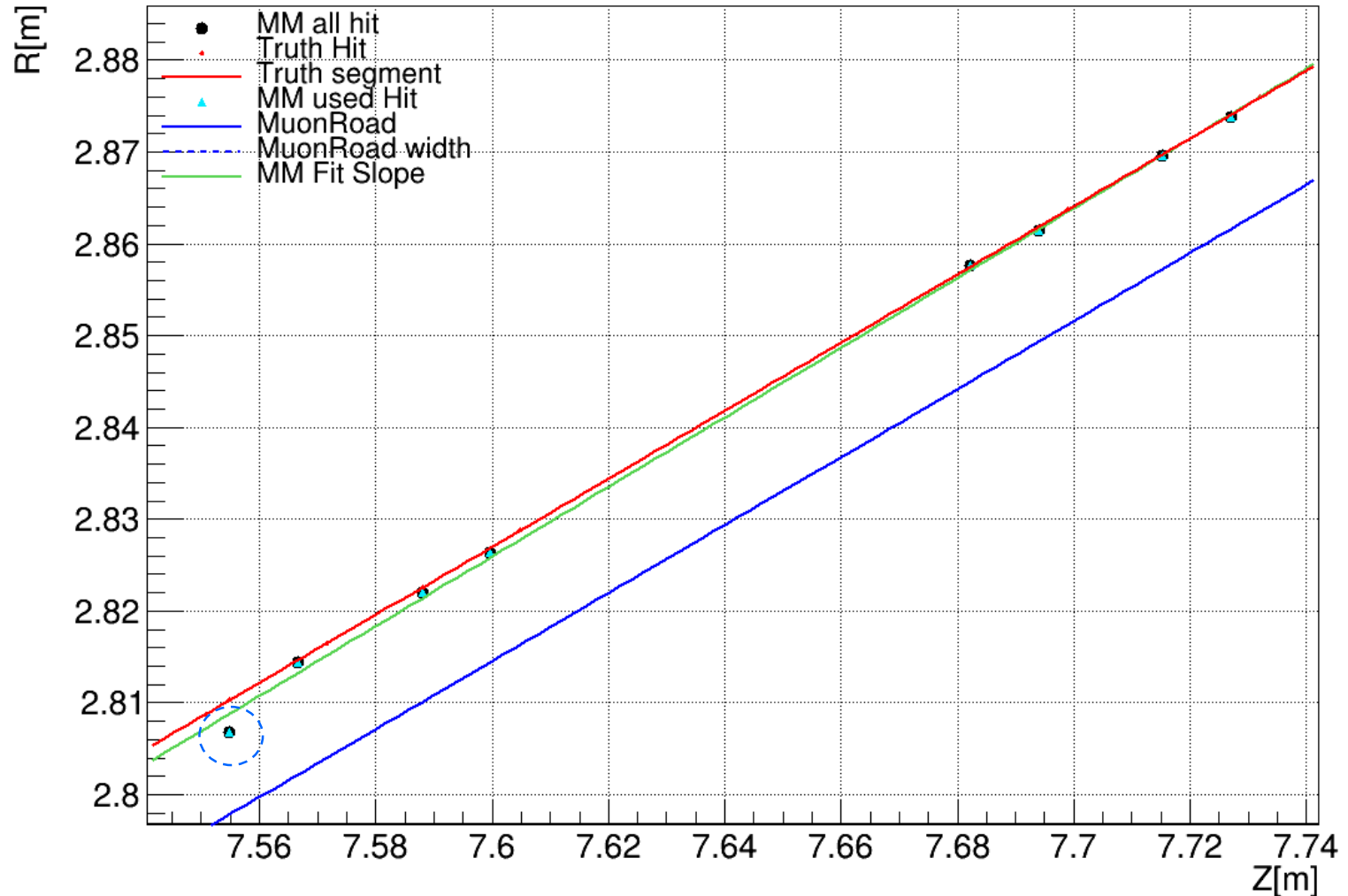
Event Display②

Eventdisplay(ZR) EventNumber : 220508



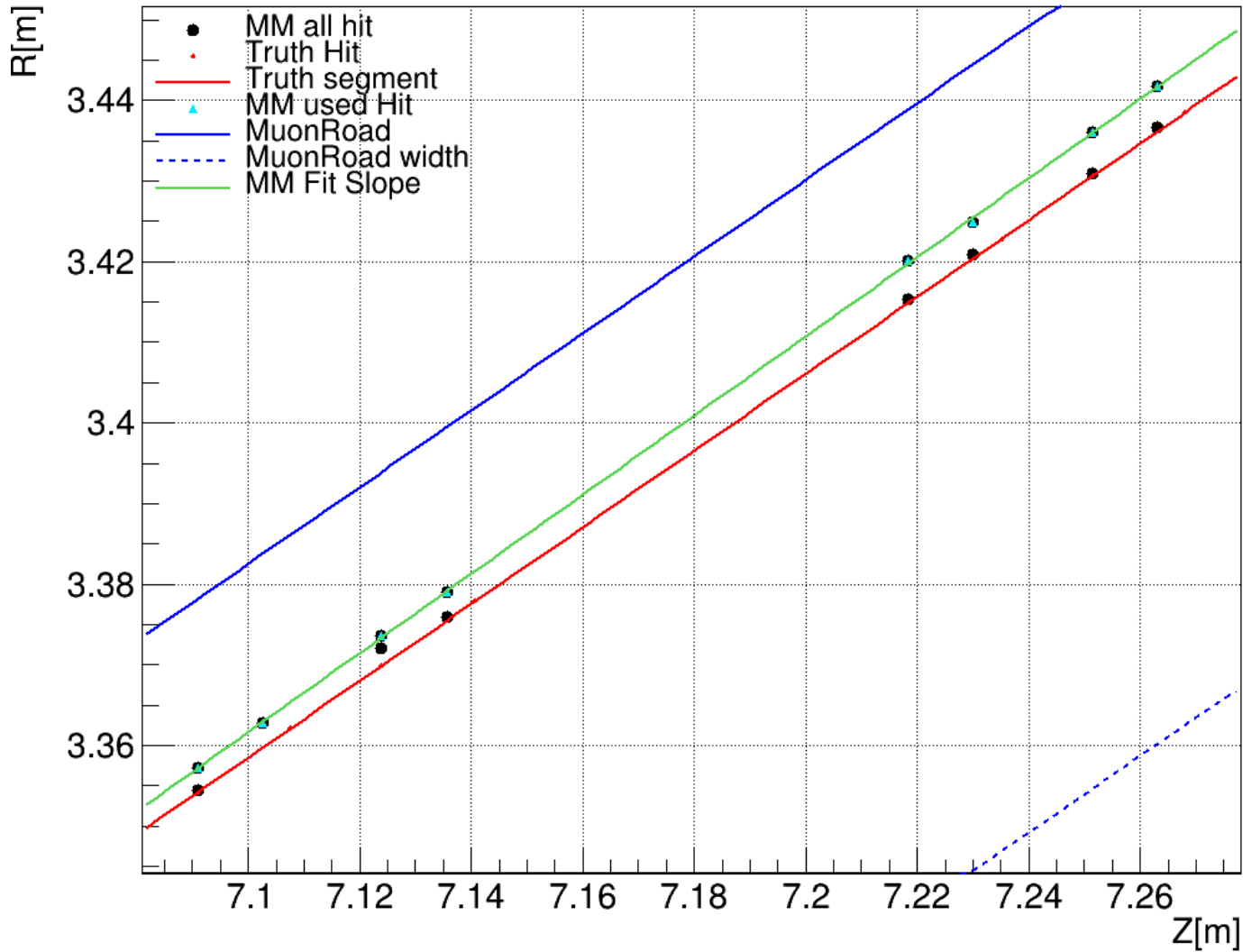
Event Display③

Eventdisplay(ZR) EventNumber : 296363



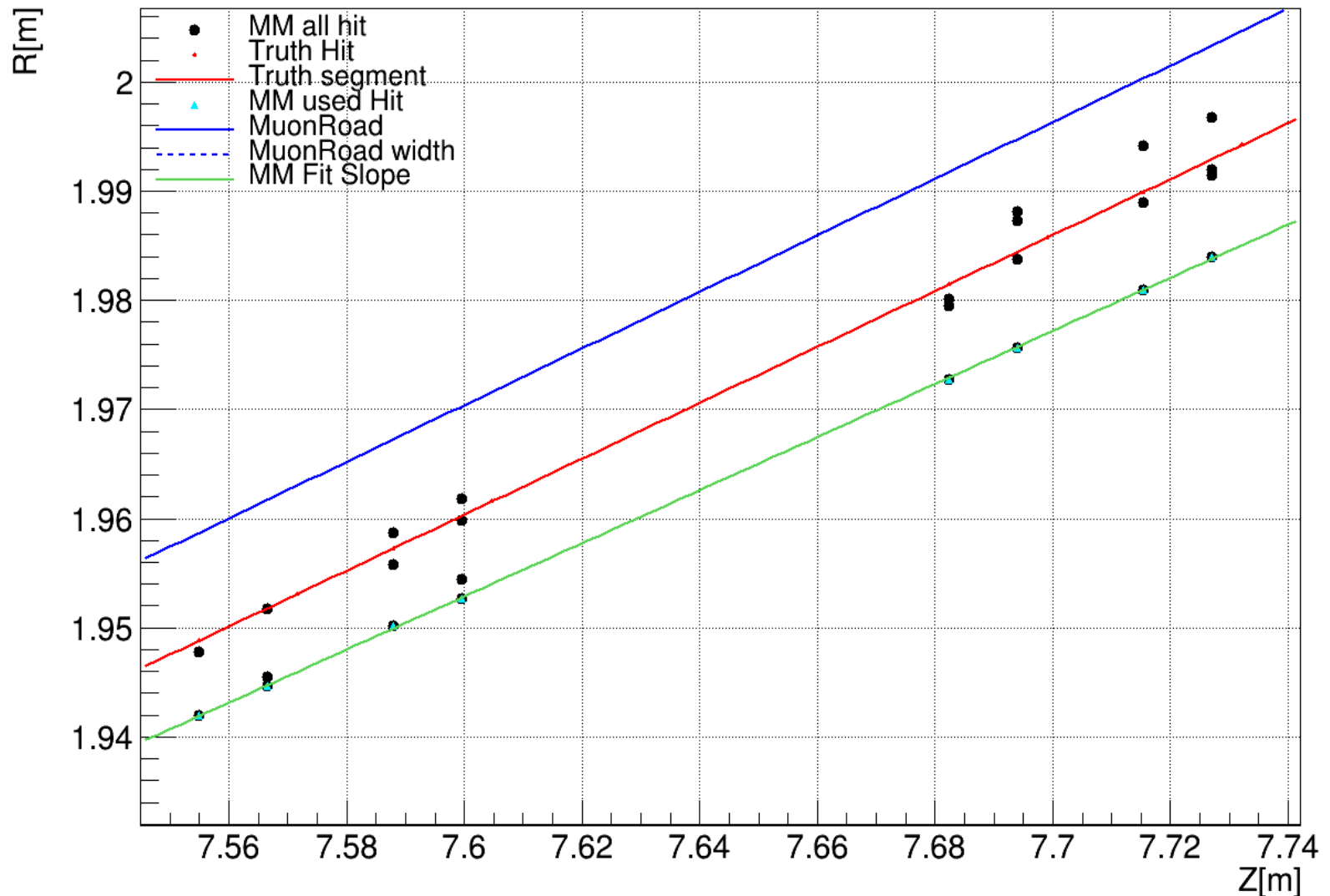
Event Display④

Eventdisplay(ZR) EventNumber : 9282



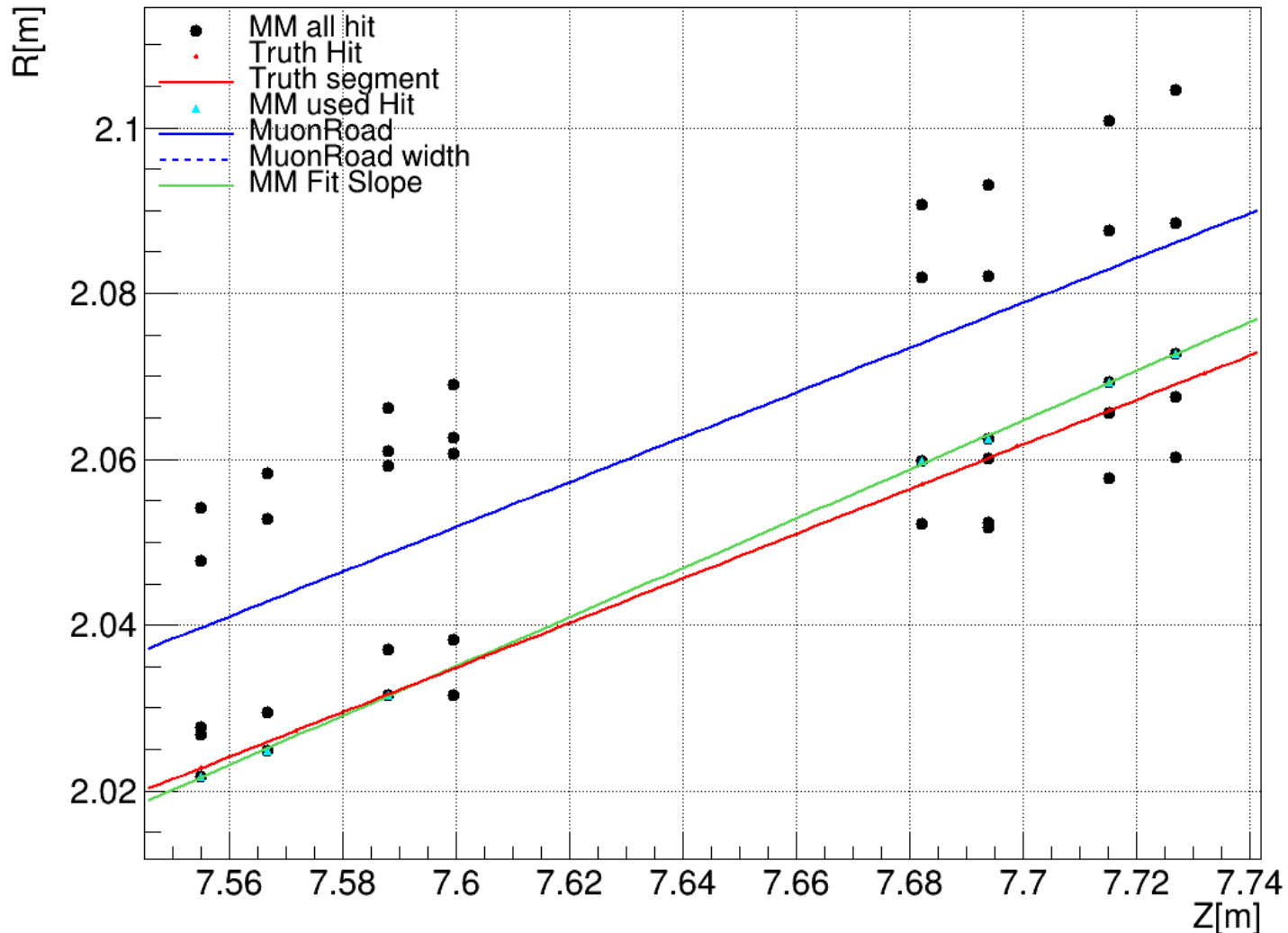
Event Display⑤

Eventdisplay(ZR) EventNumber : 105615

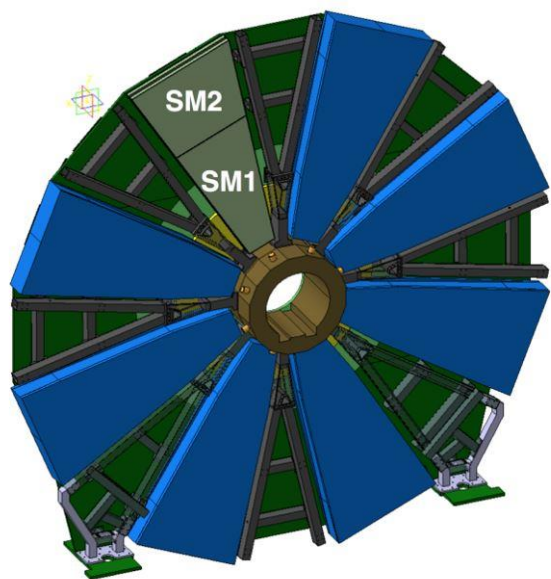


Event Display⑥

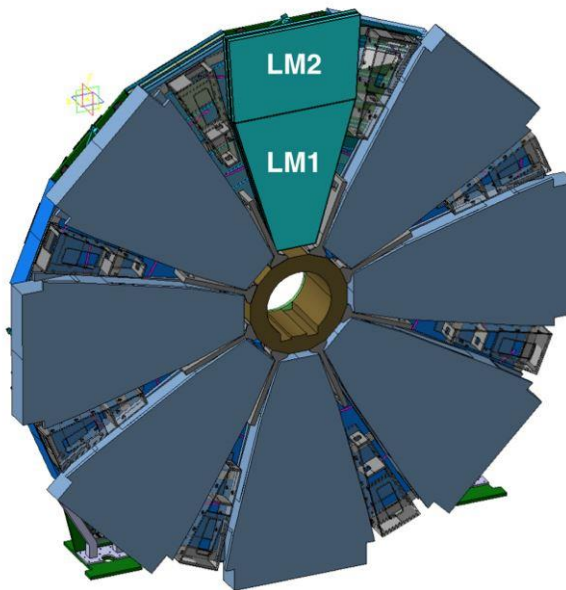
Eventdisplay(ZR) EventNumber : 284678



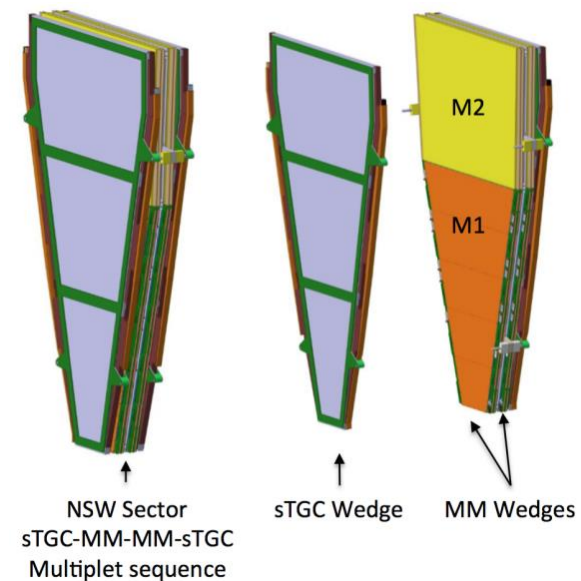
NSWのイメージ図



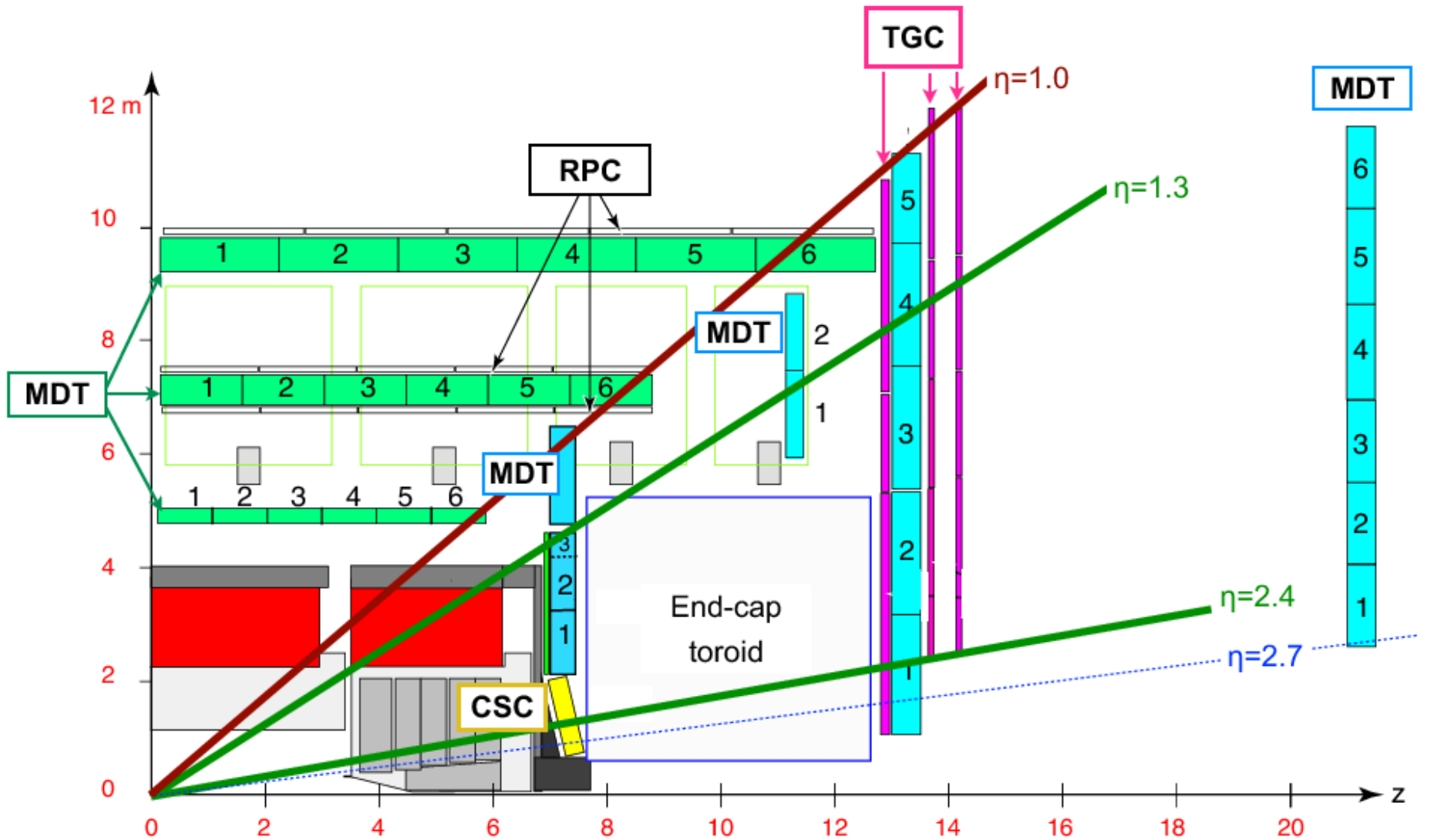
(a) NSWのSmall部



(b) NSWのLarge部



MuonSpectrometer



Large and Small

