

# HL-LHCのATLAS実験に向けたAM-MDTミューオン トリガーのセグメント再構成と期待性能の研究

Yunjian He/賀 雲剣

Kuze Group, Tokyo Institute of Technology

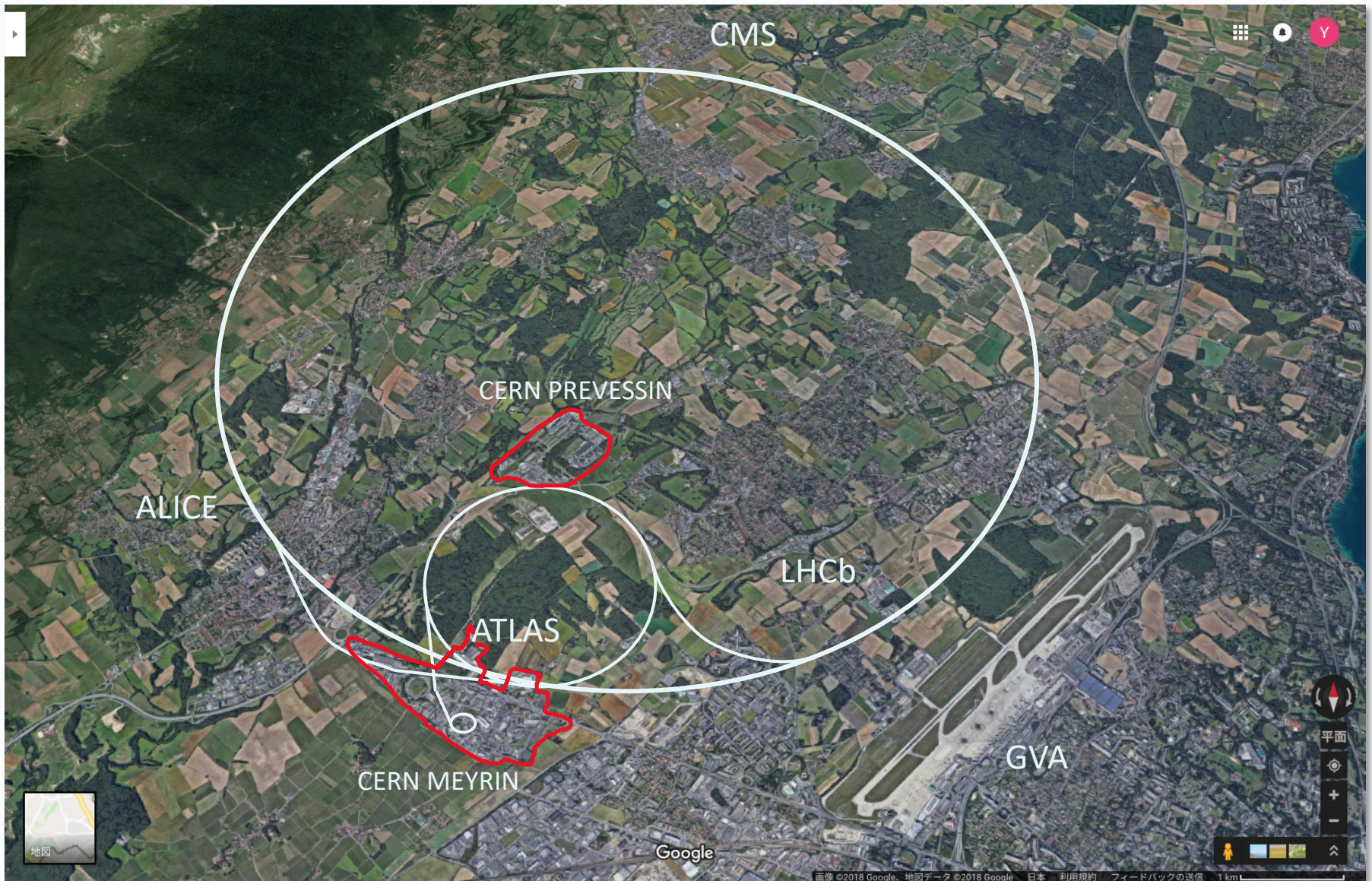
25<sup>th</sup> ICEPP Symposium

2019 Feb. 19th

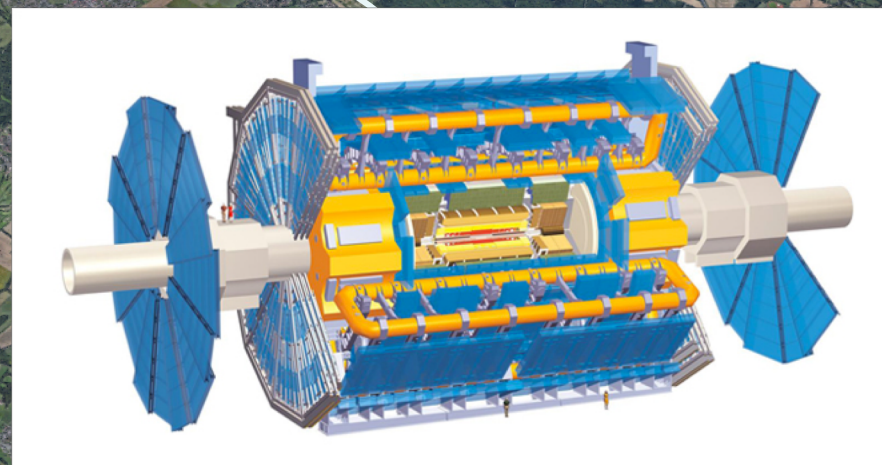


**AM**(Associative Memory)を用いた  
**MDT** (Monitored Drift Tube) ミューオントリガー  
を開発して

2026年から始まる  
**HL**(High-Lumi)-**LHC**の**ATLAS**実験に  
利用可能であることを示す



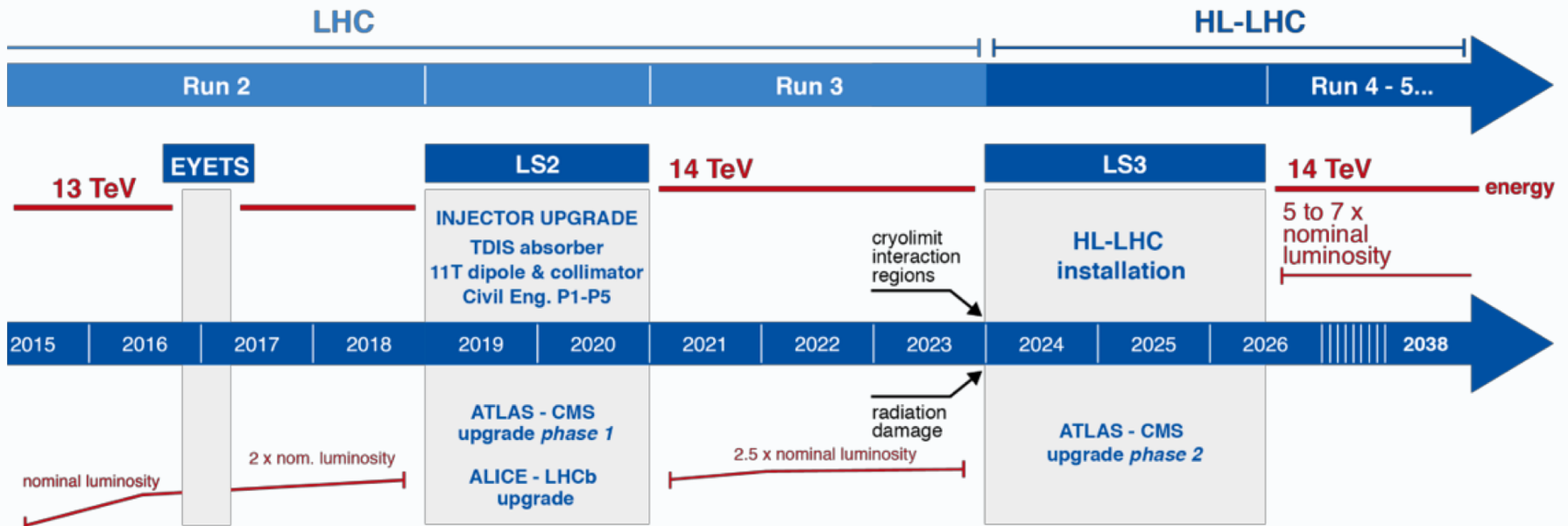
- 汎用型検出器  
標準模型の検証と新物理の探索を目的  
ヒッグス粒子の発見に貢献
- 中心に40MHzで陽子が衝突
  - 多段トリガーシステムで1kHzの頻度でデータを記録
  - 初段トリガーのレートは約100kHz



ATLAS

Google

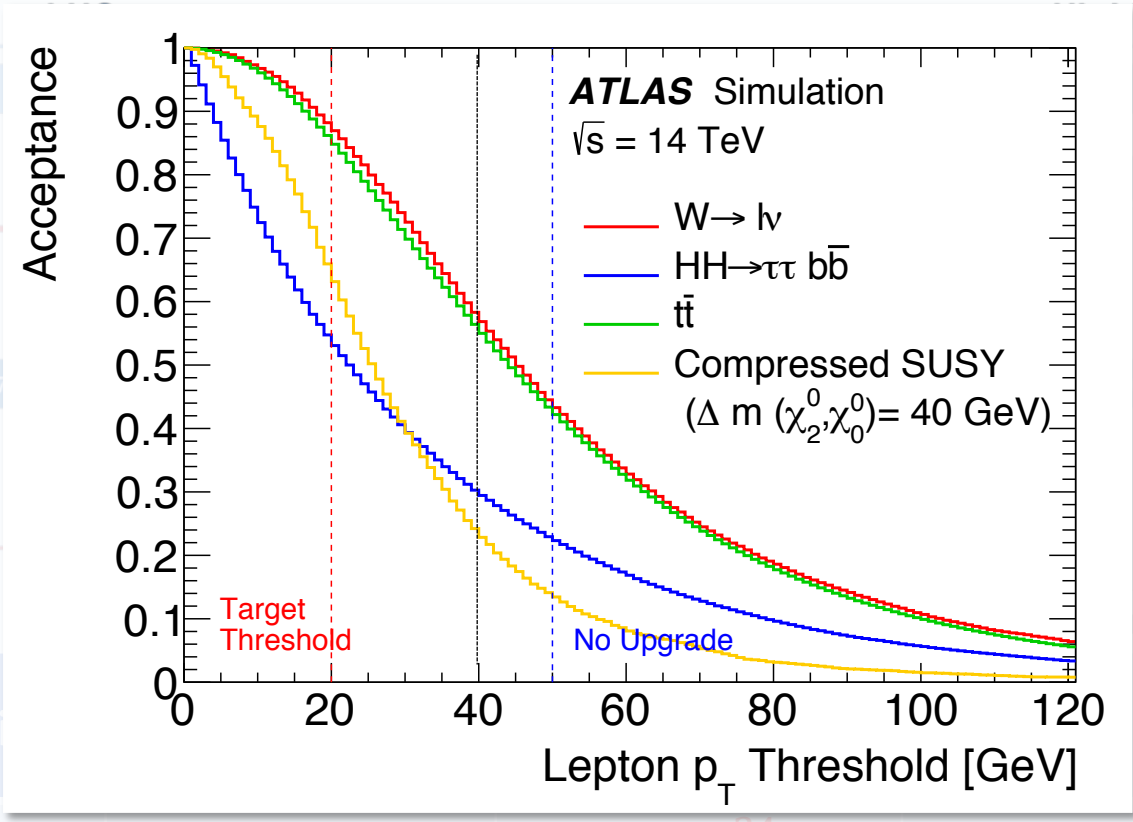
画像 ©2018 Google、地図データ ©2018 Google 日本 利用規約 フィードバックの送信 1 km



Luminosity: # of collisions produced in detector per  $\text{cm}^2$  per second

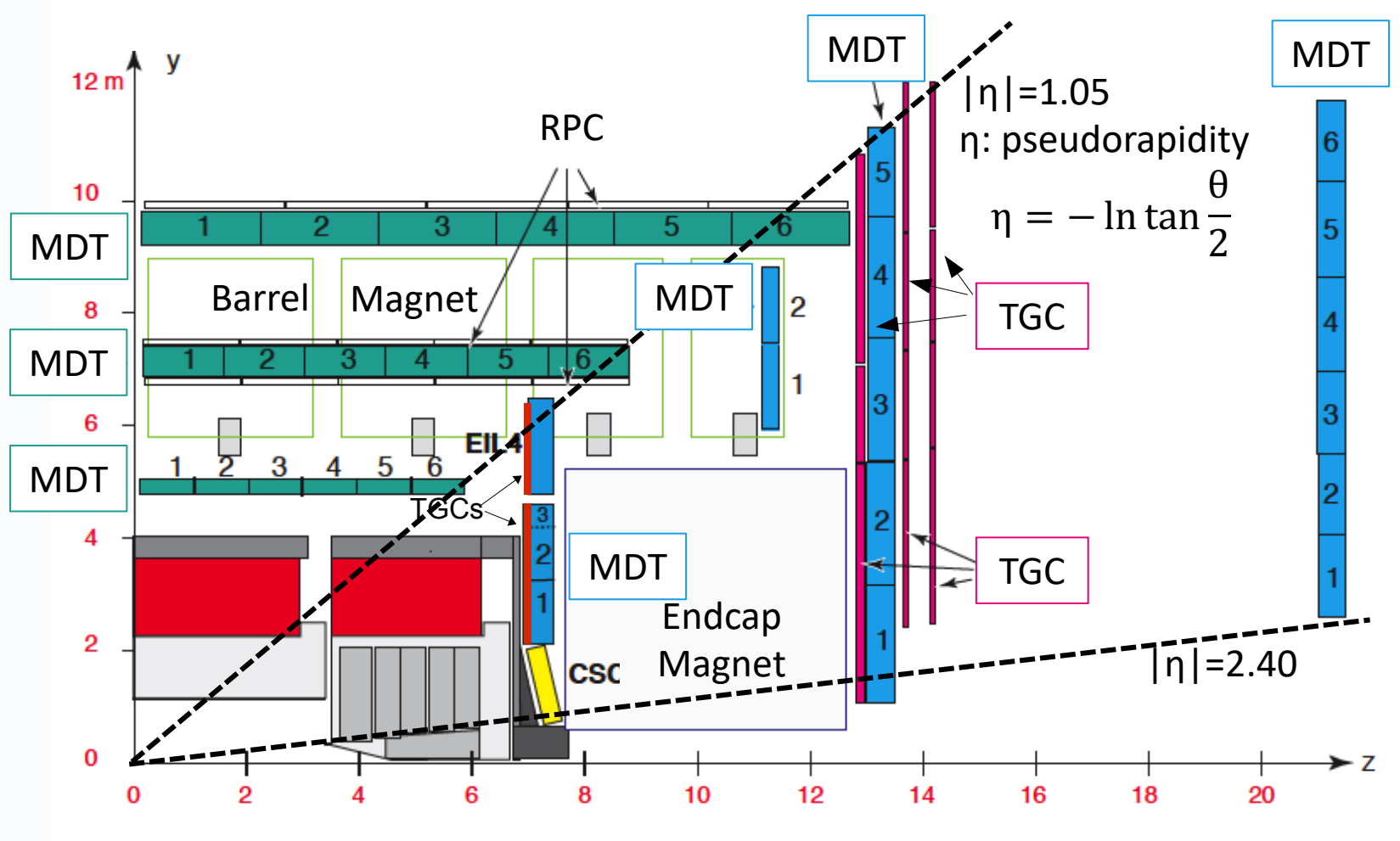
Collider	Collision Energy [TeV]	Luminosity [ $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ ]	Trigger Rate [kHz]
LHC	13 (Run 2)	$1 \times 10^{34}$	100
HL-LHC	14 (Design)	$7 \times 10^{34}$ (Design)	1000 (Design)

断面積の違いでバックグラウンド事象がより増加  
 現行システムの識別が困難(single- $\mu$  threshold: 20 GeV  $\rightarrow$  40 GeV)



何もしないと新物理探索に支障をきたす  
**トリガーシステムの改良が必要**

断面積の違いでバックグラウンドの増加は避けられない  
 現行システムによる識別がより困難(threshold: 20 GeV → 40 GeV)



- TGCとRPC: 高速応答(25 ns)ができ、今の初段トリガー発行に使用
- MDT: 空間分解能に優れるが、700 nsの読み出し時間が必要、精密測定

- 初段トリガー**全体**が使える時間:  
2.5  $\mu$ s  $\rightarrow$  10  $\mu$ s
- 改良したATLAS実験のMDTの読み出し所要時間:  
2.2  $\mu$ s



ATL-TDR-026

LHCC-2017-017

初段トリガーでMDTの情報を  
利用できるようになった！

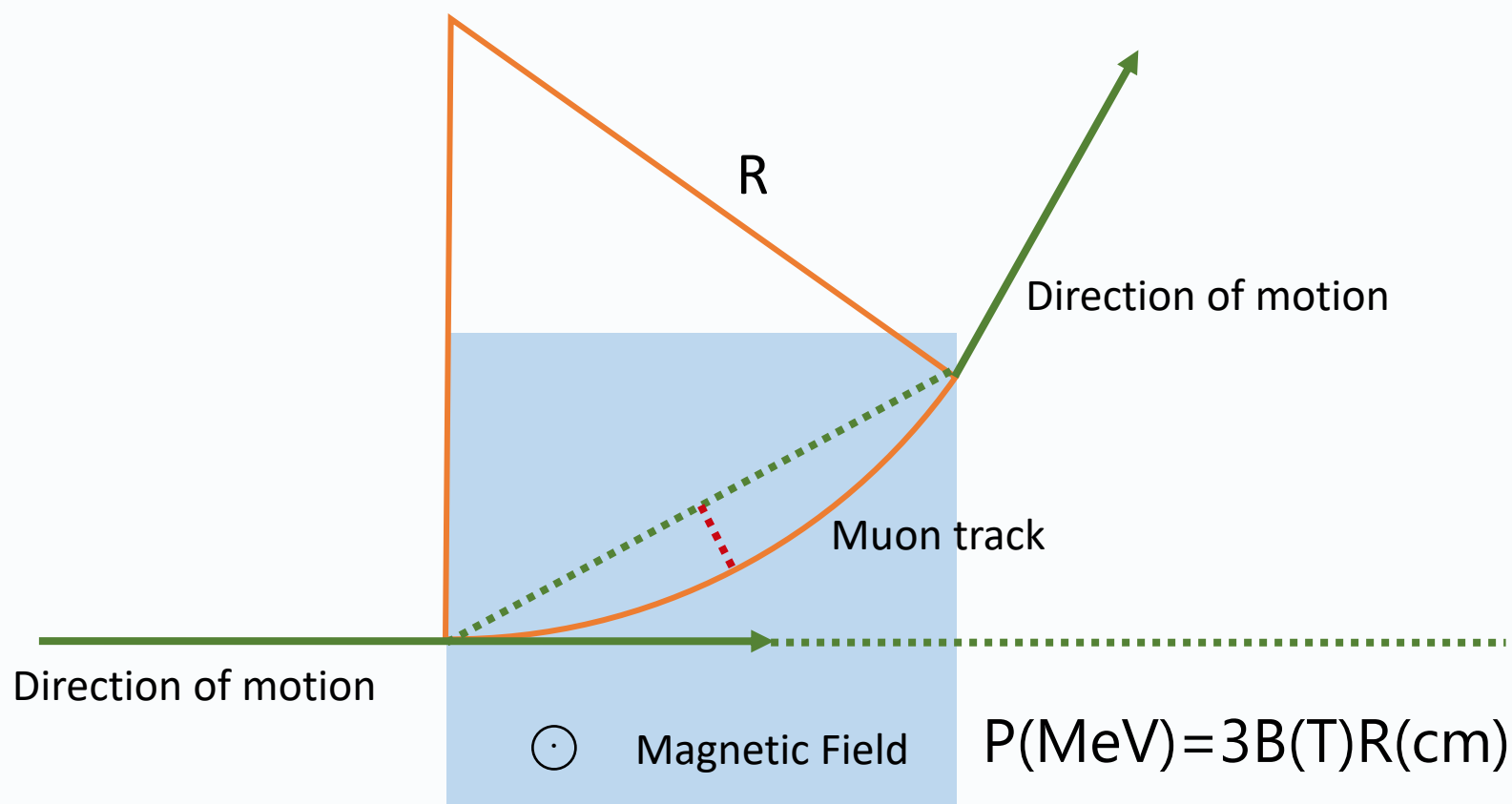


MDTミュオントリガーを  
導入して精度をあげよう

ATLAS日本でMDTトリガーをやっている人:  
奥村 恭幸(ICEPP staff) 小玉 昂史(東大M2) 自分

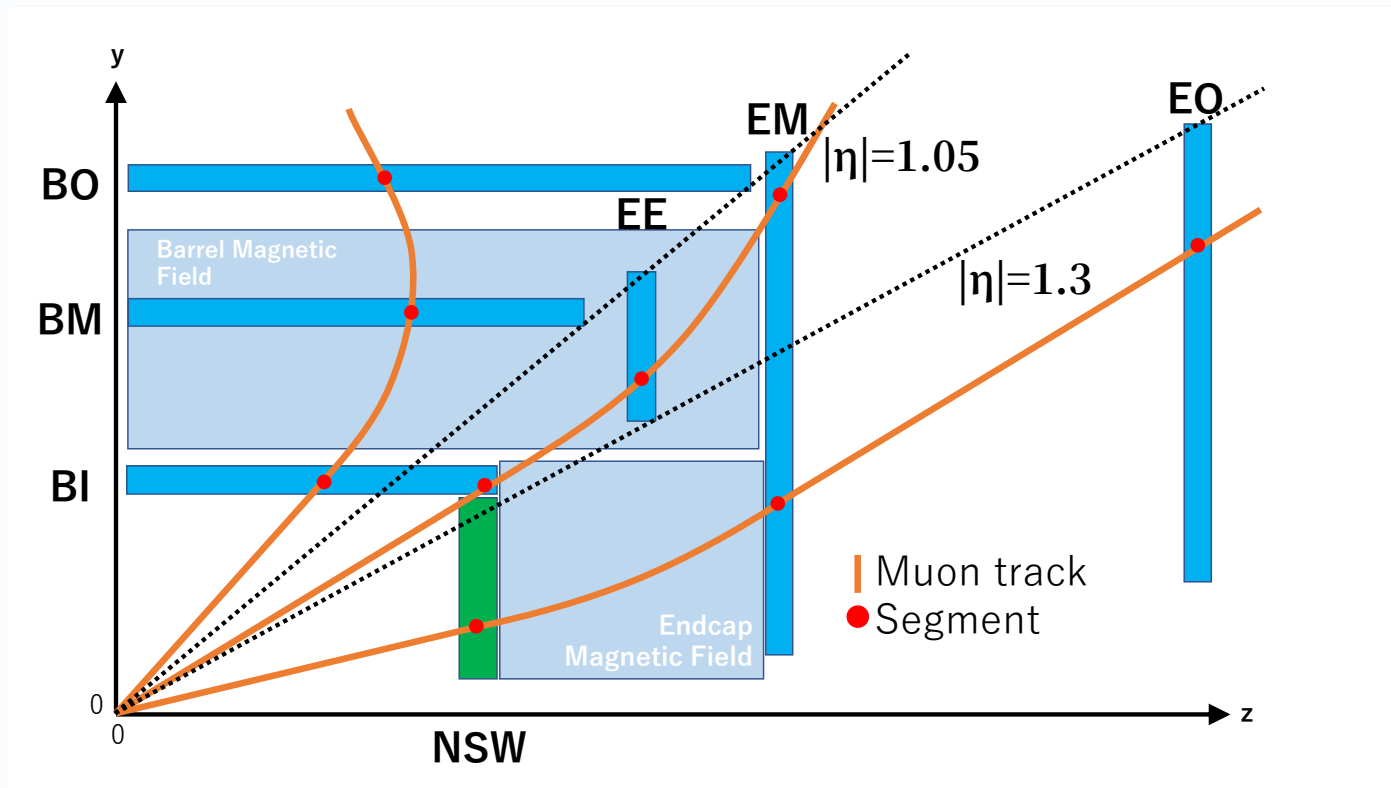


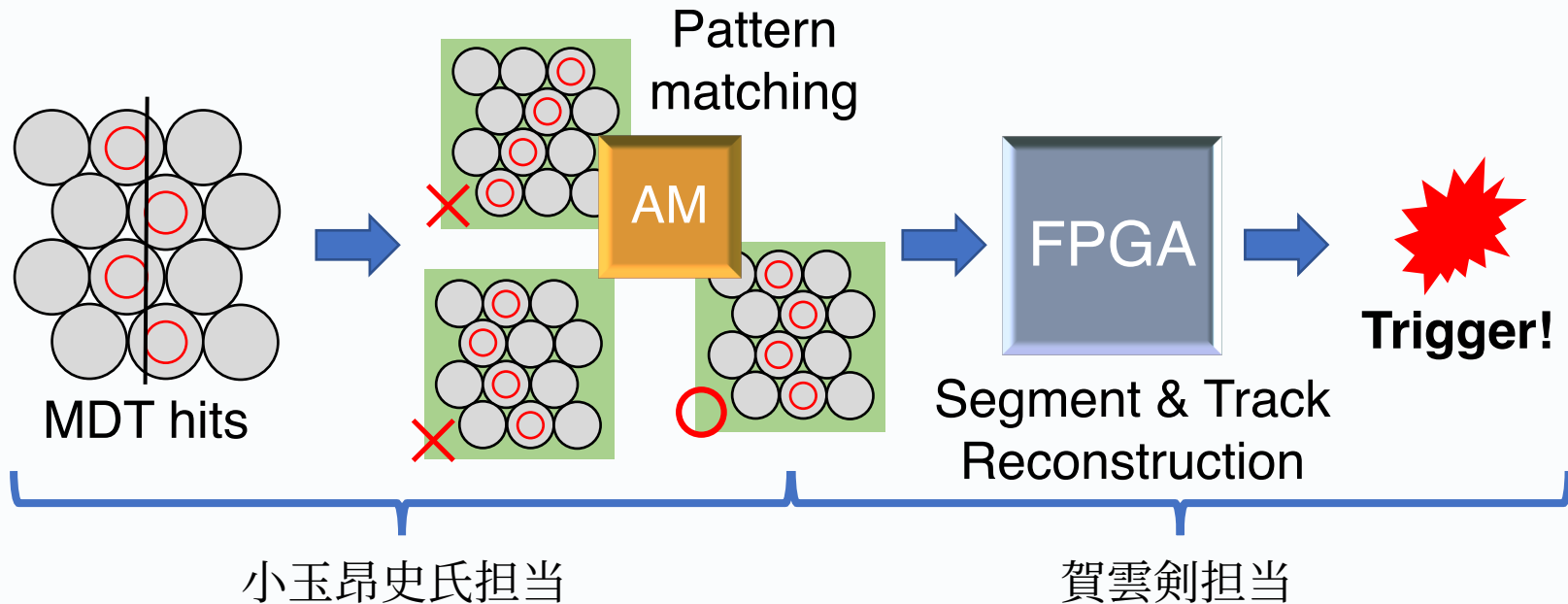
荷電粒子が磁場の中の軌道の曲がり具合を測り  
曲率半径を推定して運動量を判定



# 測れるのは各MDT stationでのセグメント

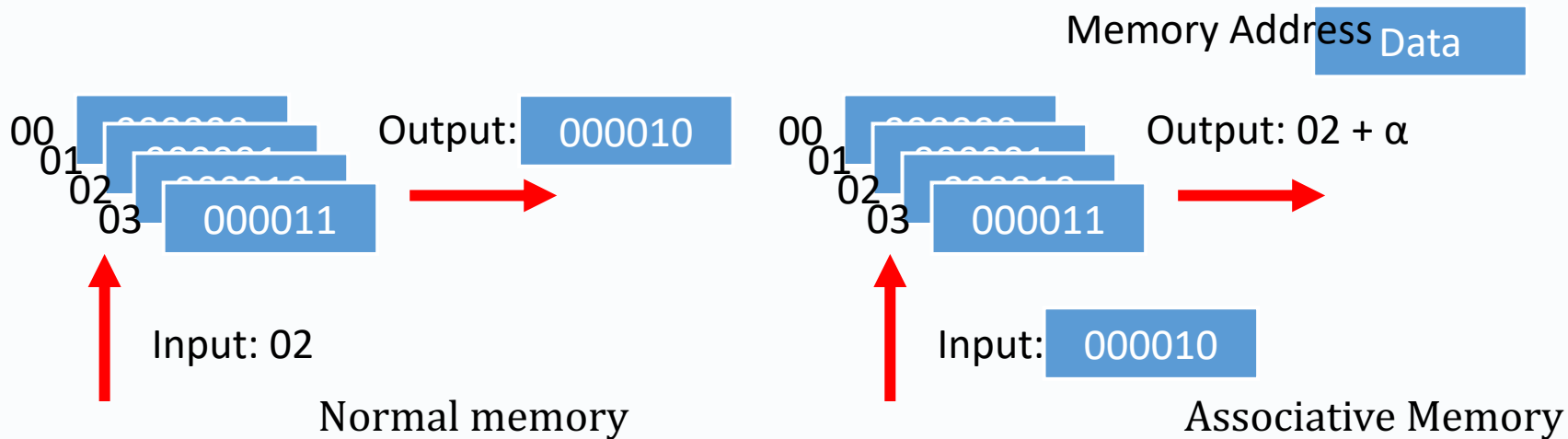
- 3つのMDT stationでセグメント(ミュオン部分飛跡)を検出できる
- セグメントの位置座標→ミュオンがどこを通ったのか
  - セグメントの向き→ミュオンがどの方向へ飛んだのか



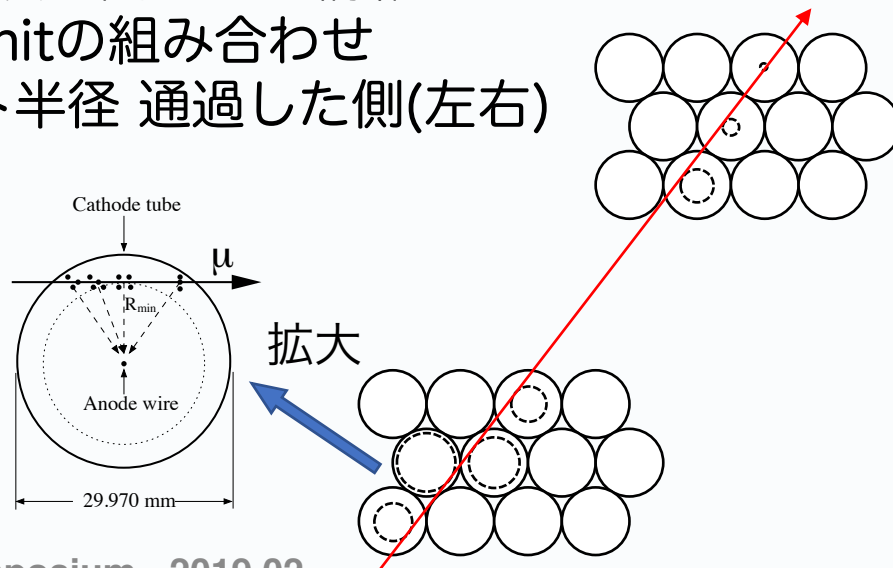


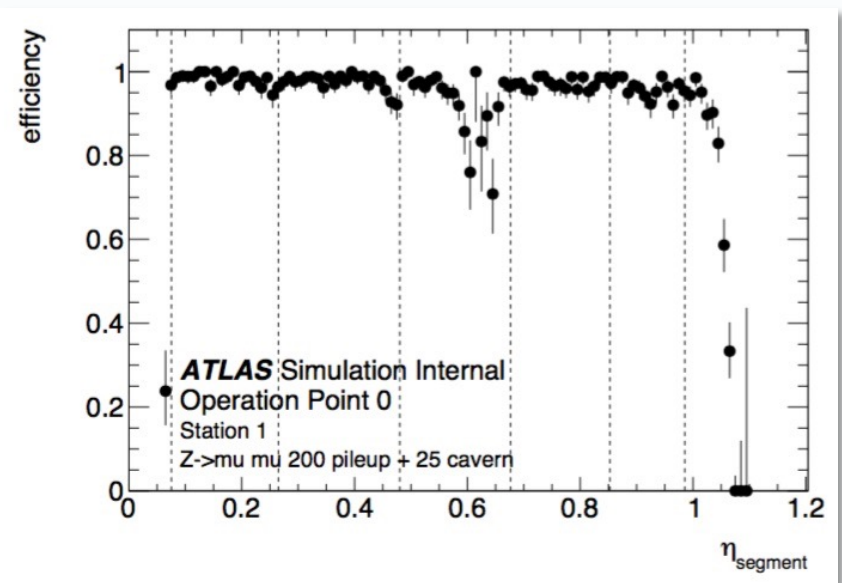
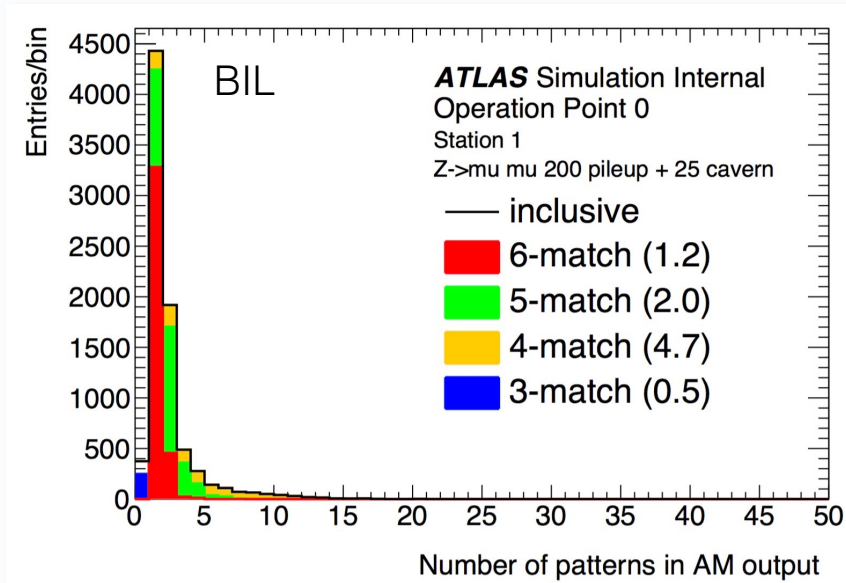
ソフトウェアベースのシミュレーションで

- パターンリスト作成
  - AMによるパターンマッチング
  - セグメントとトラックの再構成
  - MDTトリガーアルゴリズム
- の実装のテストを行った



- 入力データと**事前に保存した全データ**(パターンバンク)と照合一致した場合、そのアドレス及び関連した情報を出力
- AM-MDTのパターン: MDT hitの組み合わせ
- MDT hit: Tube番号 ドリフト半径 通過した側(左右)



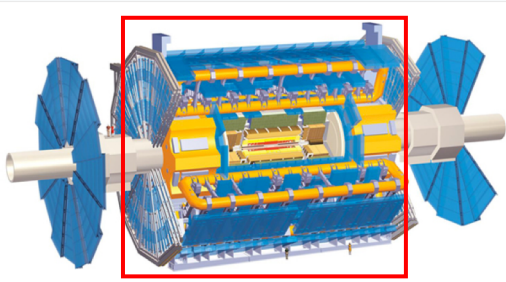


AMからの出力パターン数

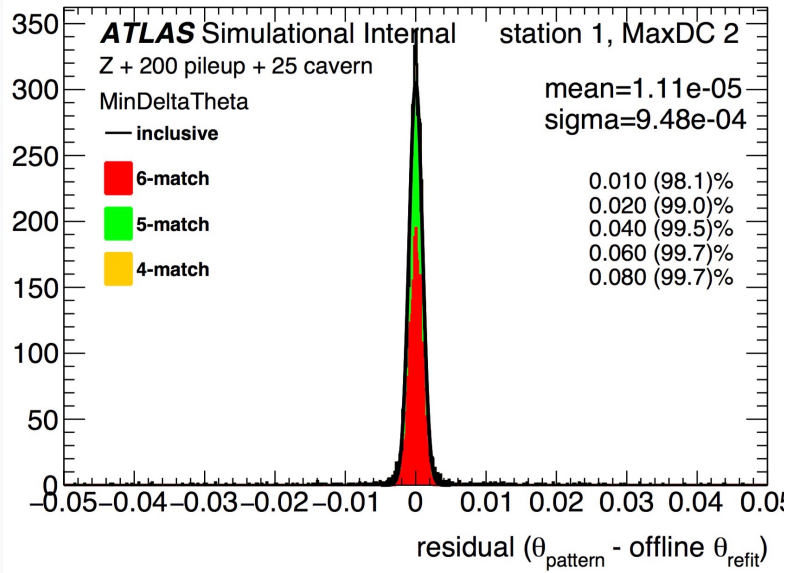
再構成効率

## ATLASのBarrel Inner Largeの部分のpattern findingの結果

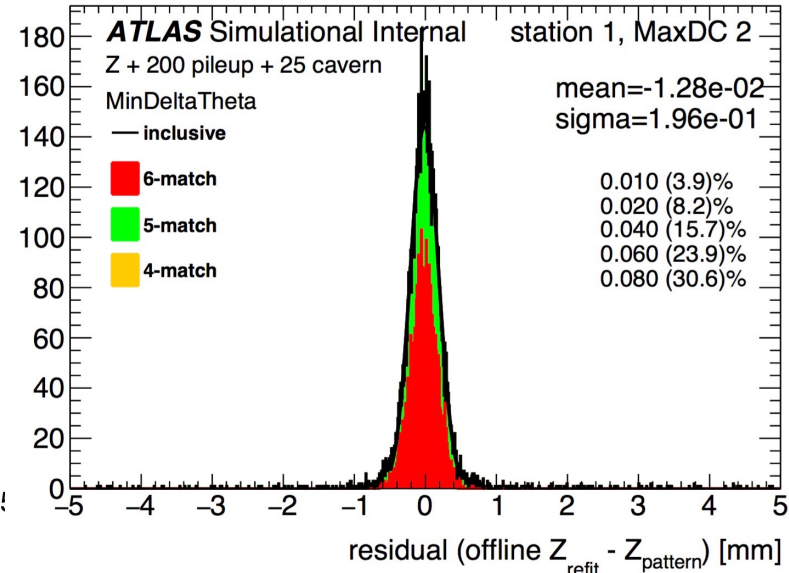
この円筒の側面の一部



- 1入力セグメント入力に対して1~2出力パターン
- ほとんどの領域で~98%の再構成効率

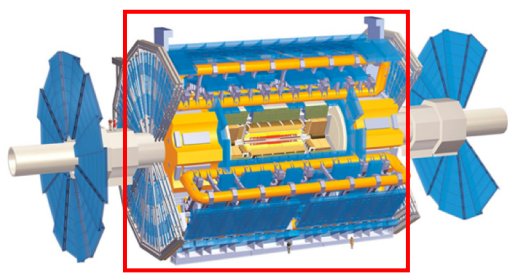


パターンが返す運動方向と  
真の方向の差(最良値)



パターンが返すセグメント位置と  
真の位置の差(最良値)

BILの部分の結果  
この円筒の側面の一部



セグメントと対応するパターンを  
正しく選んだ場合

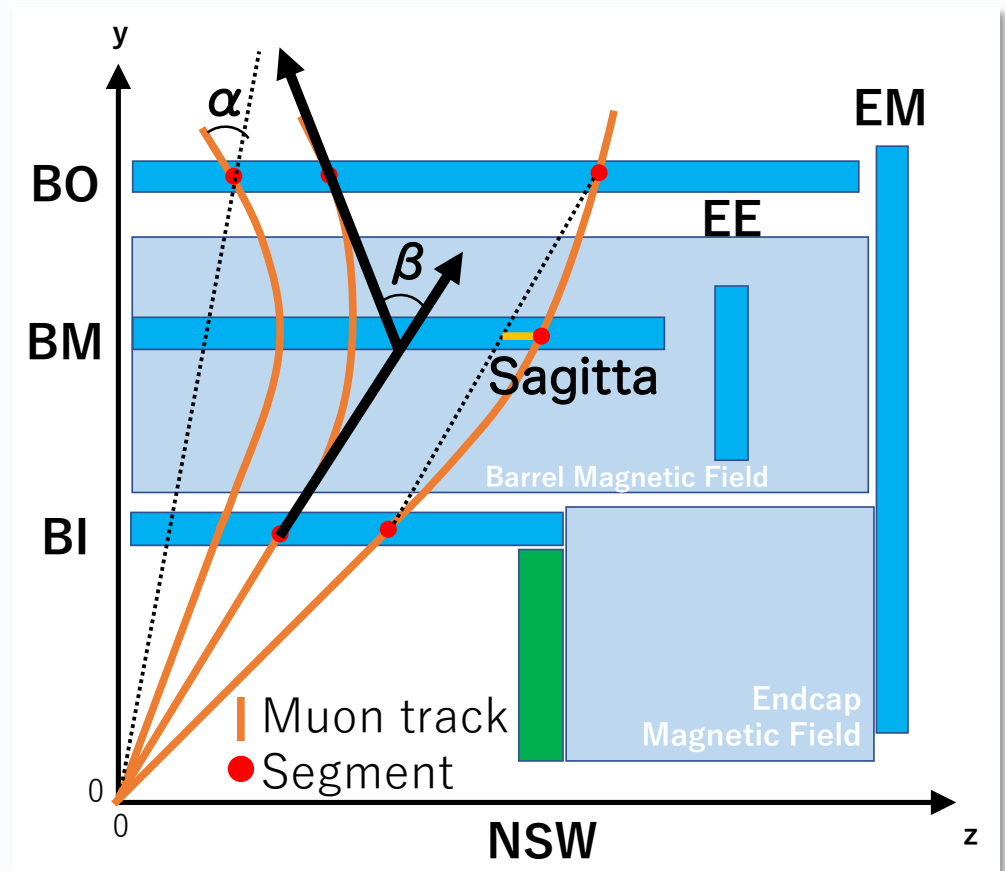
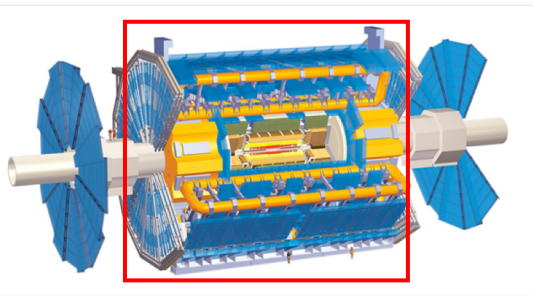
1 mradの角度分解能と2 mmの空間分解能  
を見込める

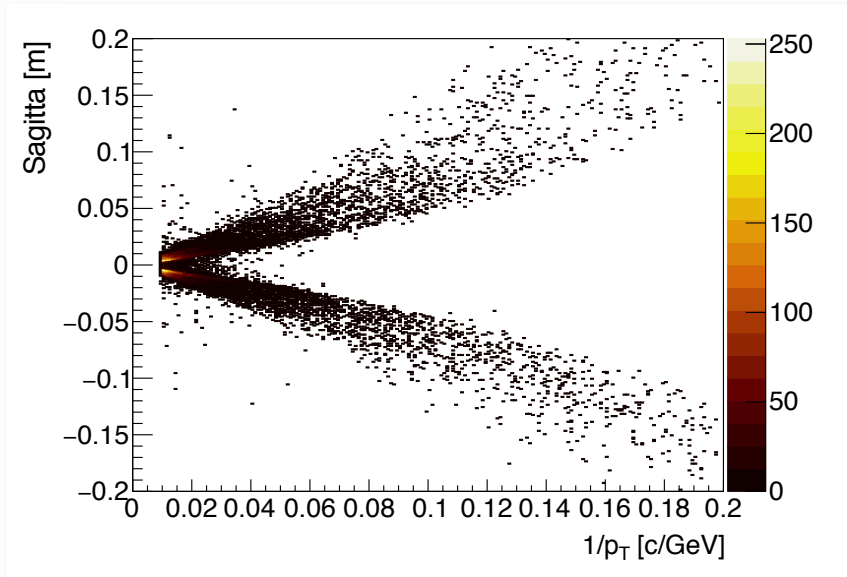
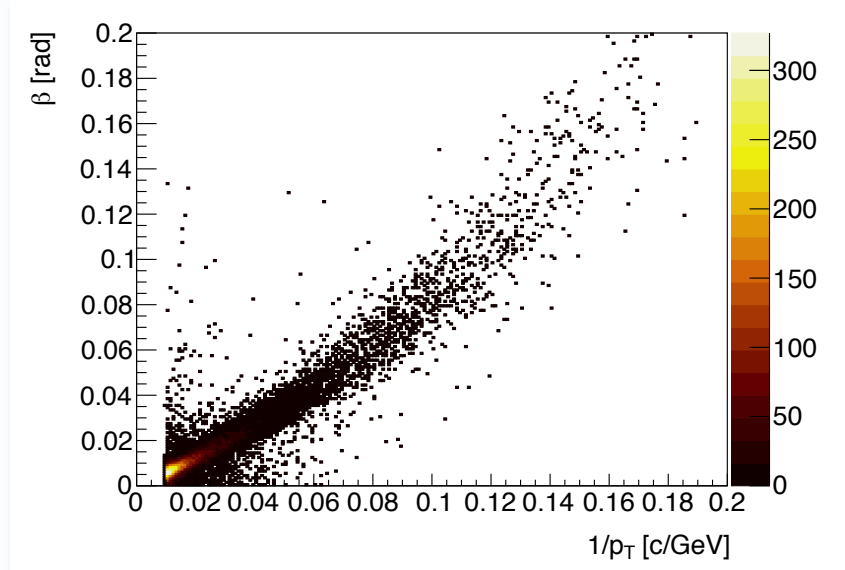
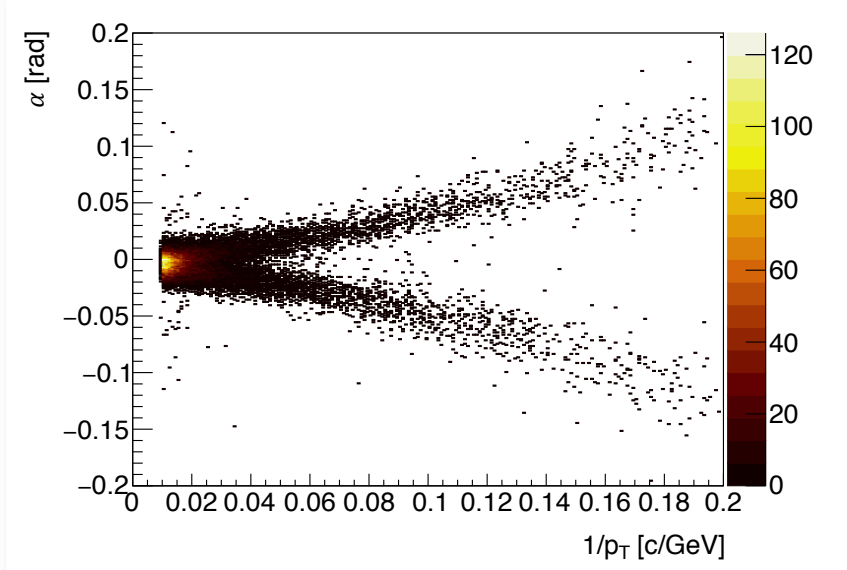
運動量( $p_T$ )と関連するパラメータを求めて  
パラメータが大きい/小さい $\rightarrow$ 運動量 ( $p_T$ )が小さい/大きい  
の関係で運動量 ( $p_T$ )を推定

1セグメントも検出すれば  
事象選別ができる

- 1 segment (inner以外):  $\alpha$
- 2 segments:  $\beta$
- 3 segments: sagitta/ $\beta$

この円筒の側面



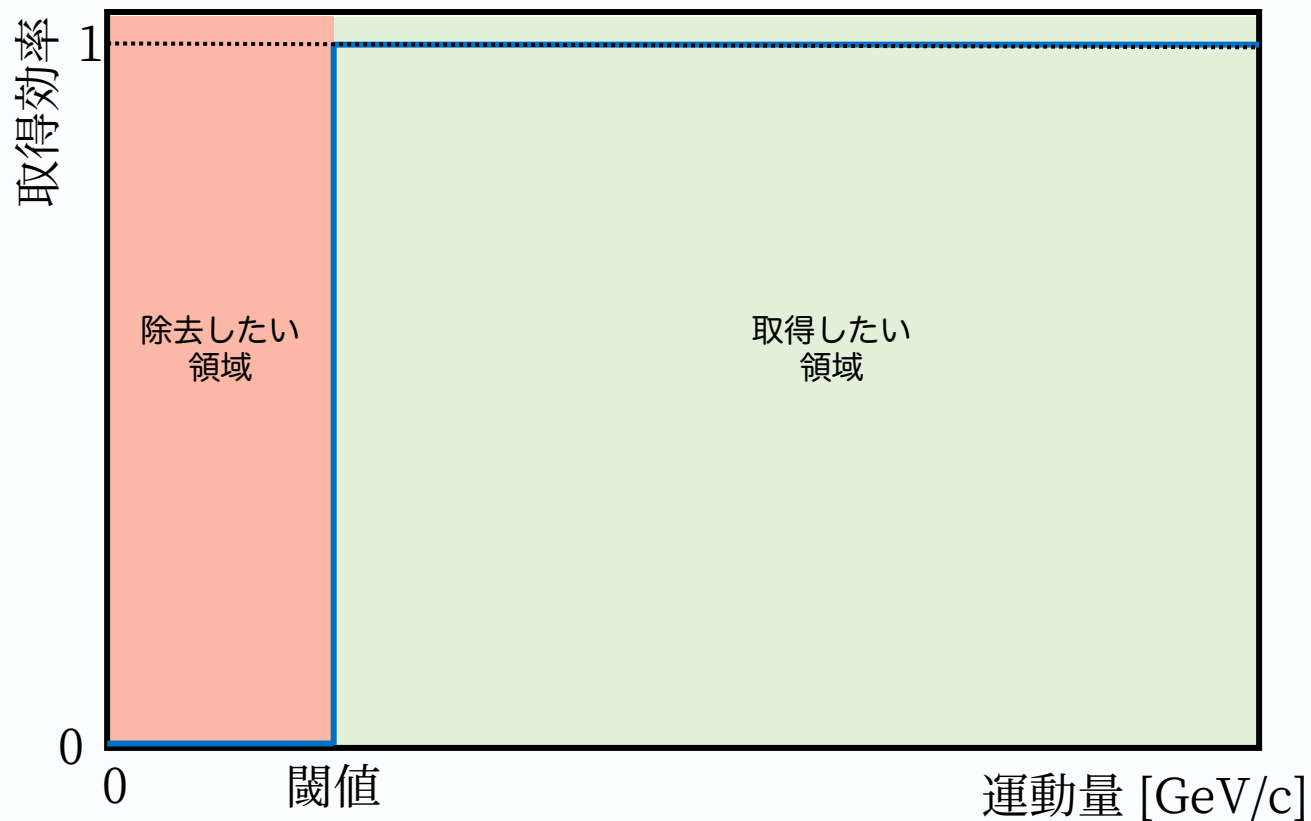


$\alpha - 1/p_T$	$\beta - 1/p_T$
Sagitta - $1/p_T$	

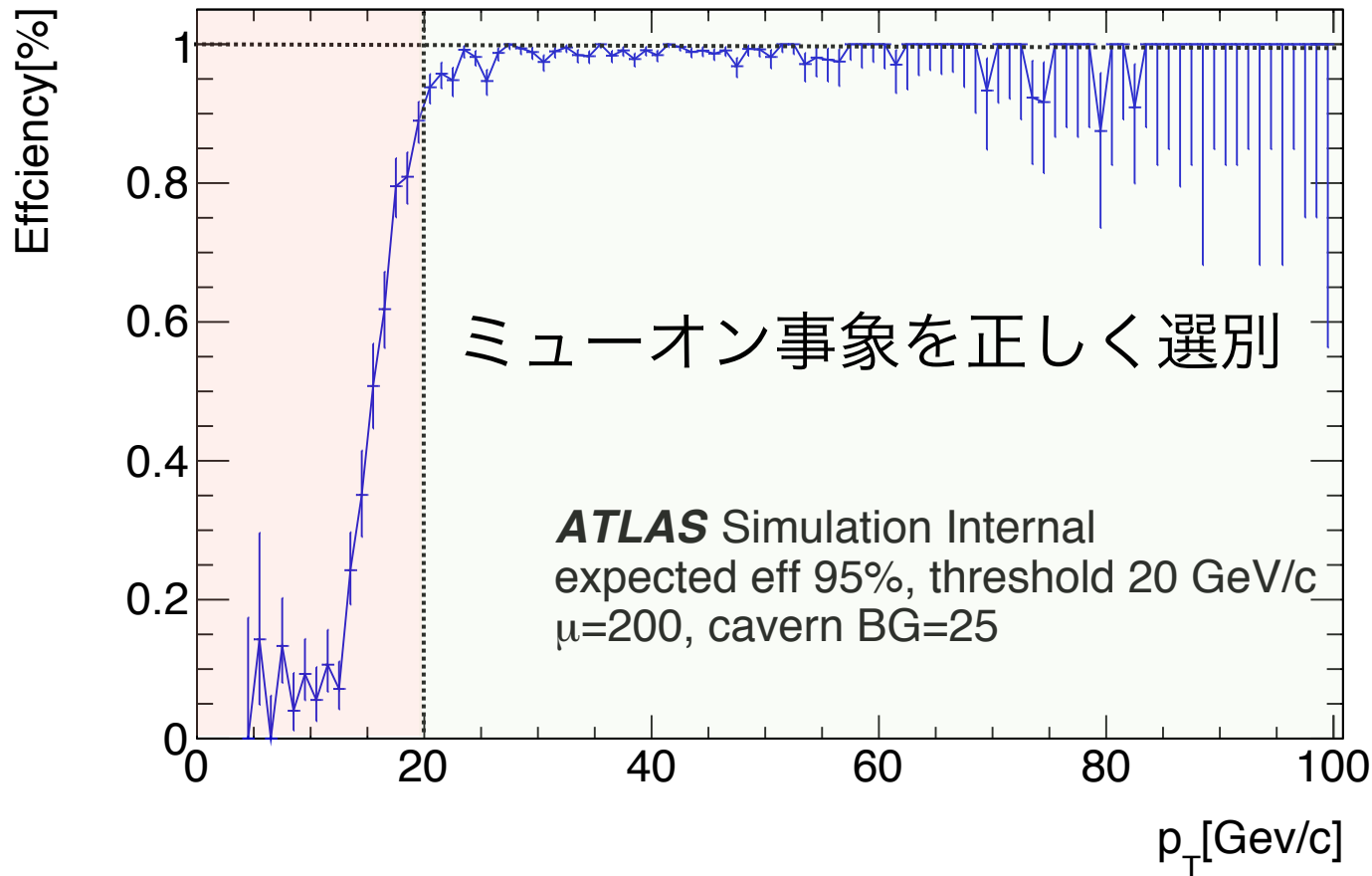
すべての場合で強い相関を確認  
AM-MDTによる事象選別が可能



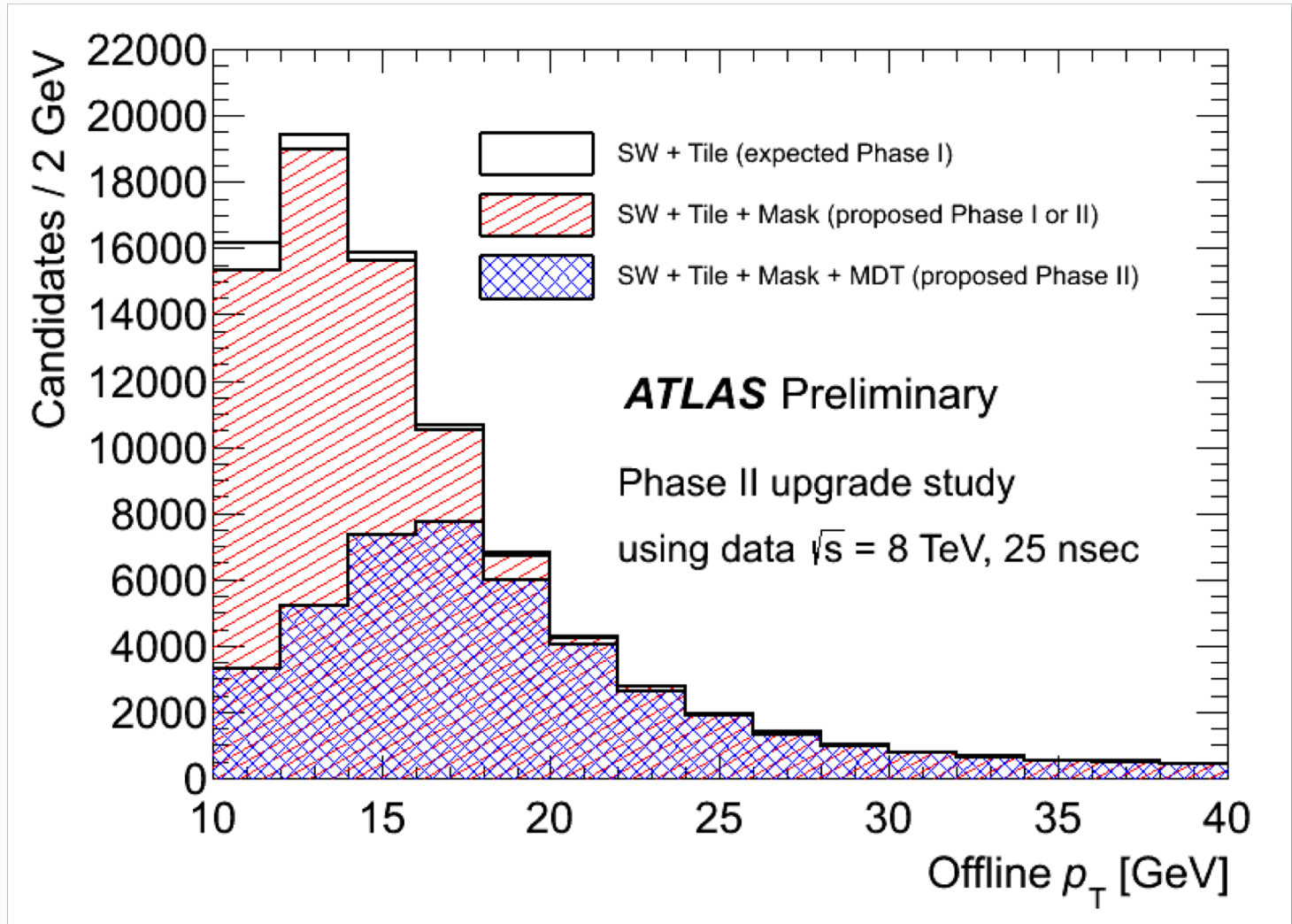
理想なトリガー:



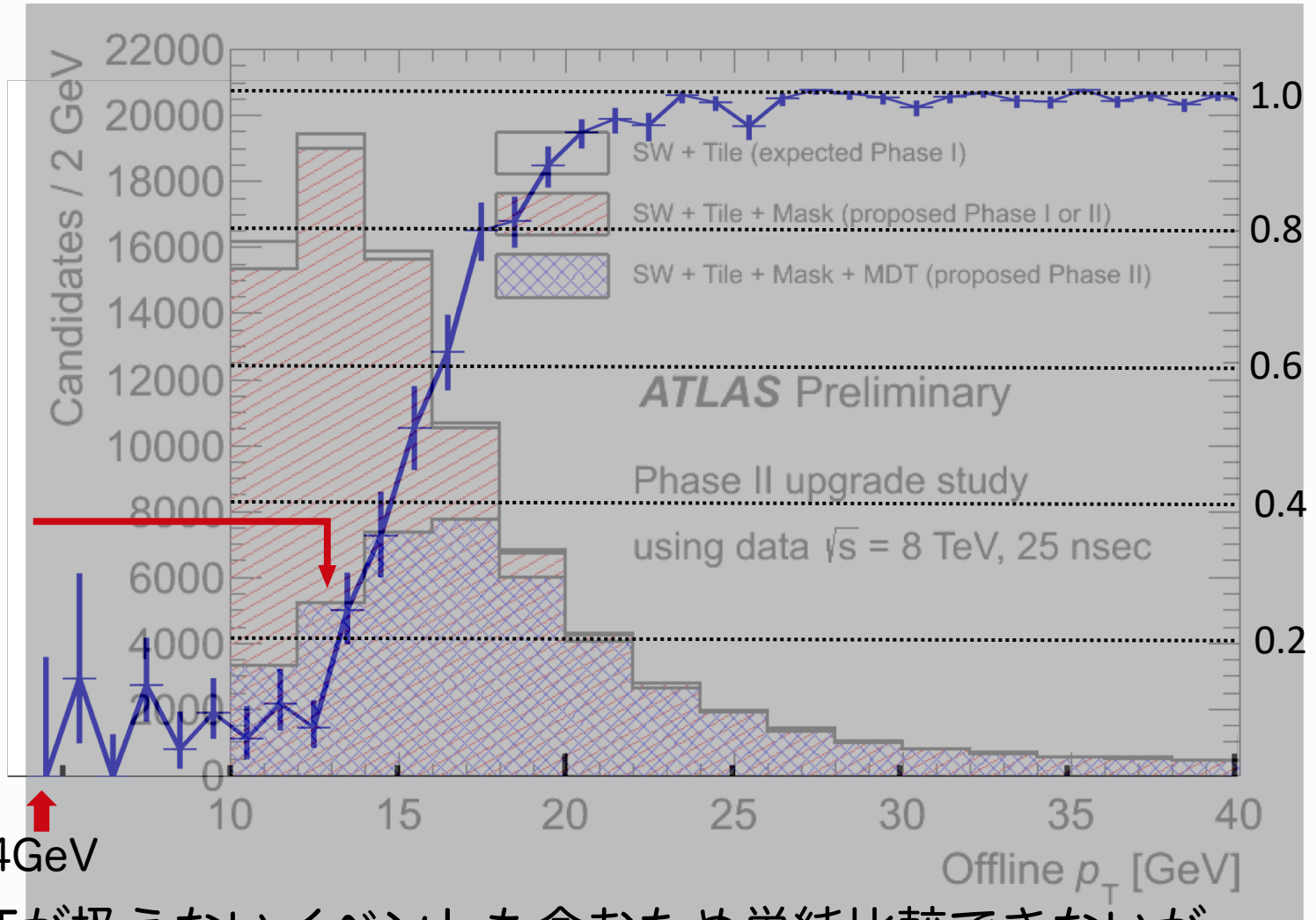
$Z \rightarrow \mu\mu$ , pile up 200, cavern BG 25のMC sampleで  
Z由来のミューオントラックのみを使い  
AM-MDTを適用できる事象でテスト



先行研究  
による結果  
By 堀井さん  
(名古屋 staff)



<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/L1MuonTriggerPublicResults>



平均して20%  
程度の効率  
 $19000 \times 0.2$   
 $= 3800 < 5000$

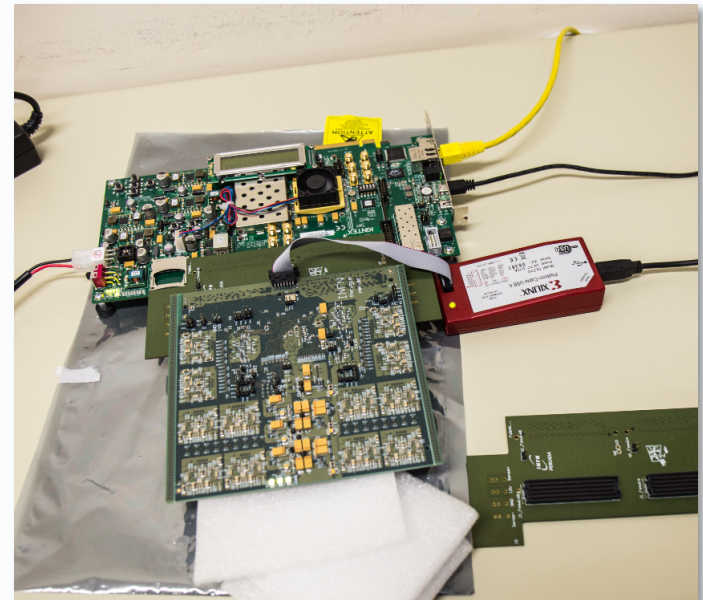
MDTが扱えないイベントも含むため単純比較できないが  
TDR予想よりも高い性能を期待できる

- HL-LHCのATLAS実験でトリガー精度維持のためにMDT ミューオントリガーを導入
- 素早くセグメントを検出するために Associative Memoryを使用
- AMで高い角度分解能と空間分解能の再構成が可能
- 再構成セグメントの数に応じた運動量推定法を採用
- ミューオン事象に対して高い運動量弁別能力を持つ

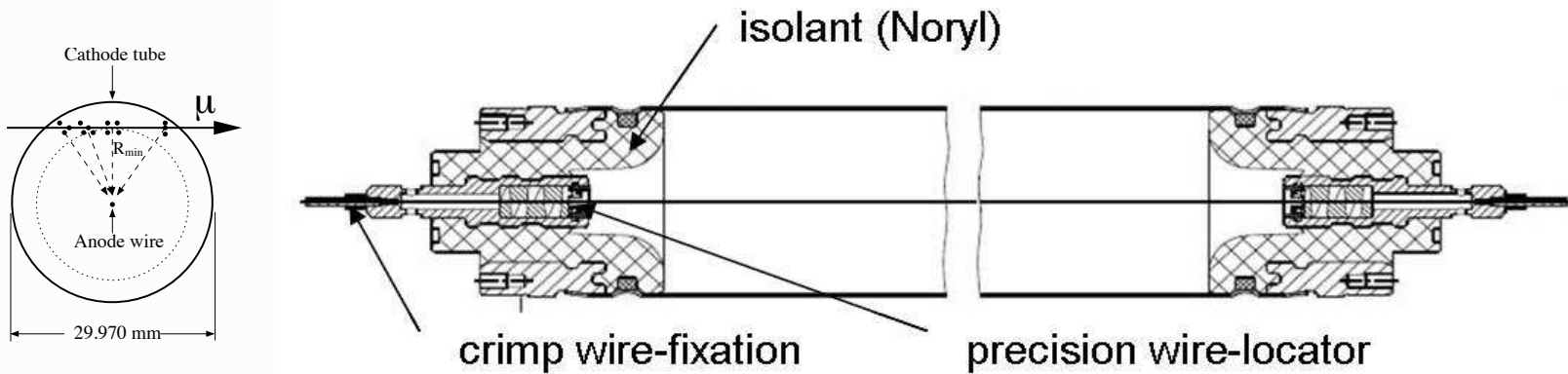
これから:

- 背景事象の除去性能の評価
- ハードウェアへの実装とテスト

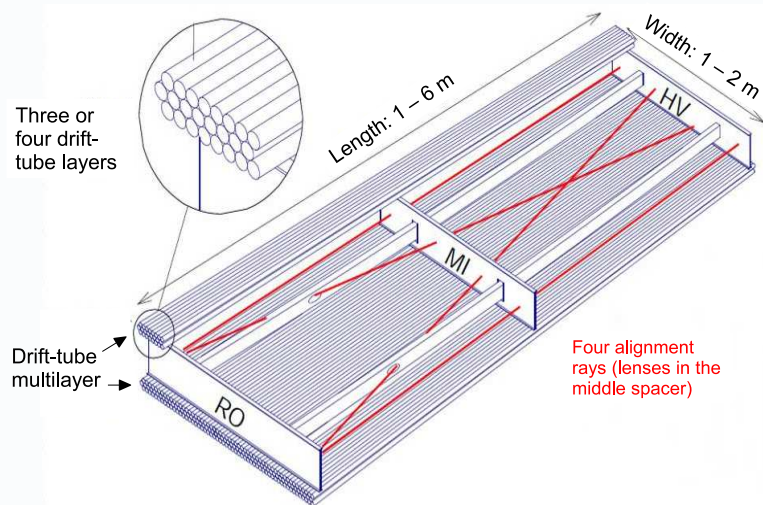
AM-MDTの  
テストボード →  
@CERN



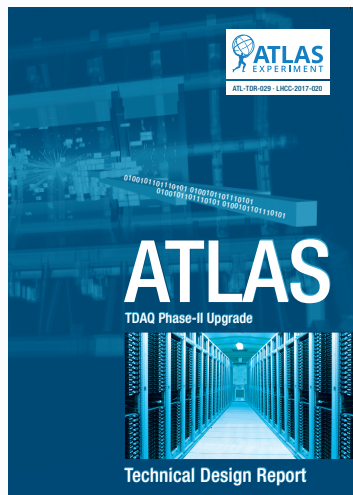
# BACKUP



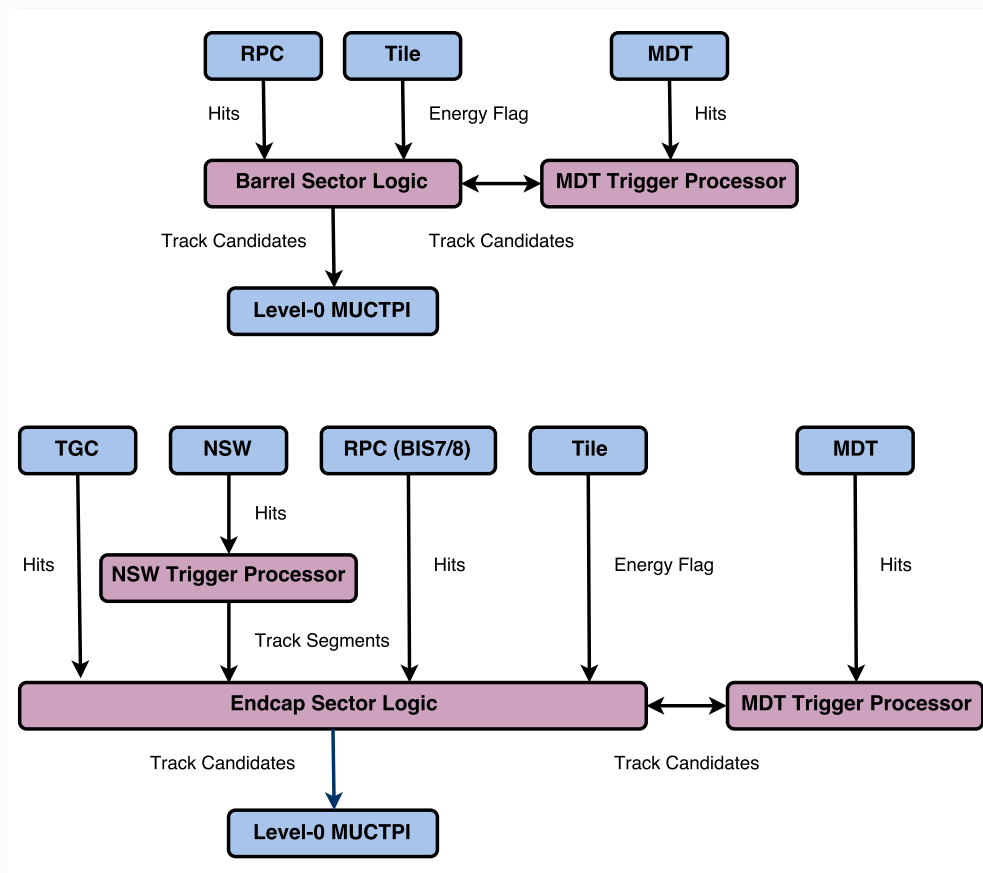
- 直径3 cm程度のガスチューブ
- 最大ドリフト時間700 ns、1 tube分解能80  $\mu\text{m}$



- 3/4層のtube→1 multi-layer
- 2 multi-layers→1 station
- セグメントの位置分解能35  $\mu\text{m}$
- $|\eta| < 2.4$ の領域をカバー



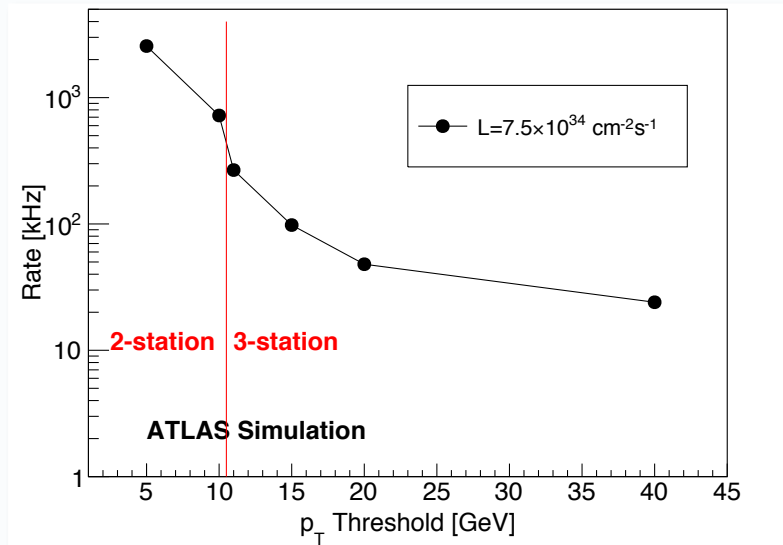
ATL-TDR-029  
LHCC-2017-020



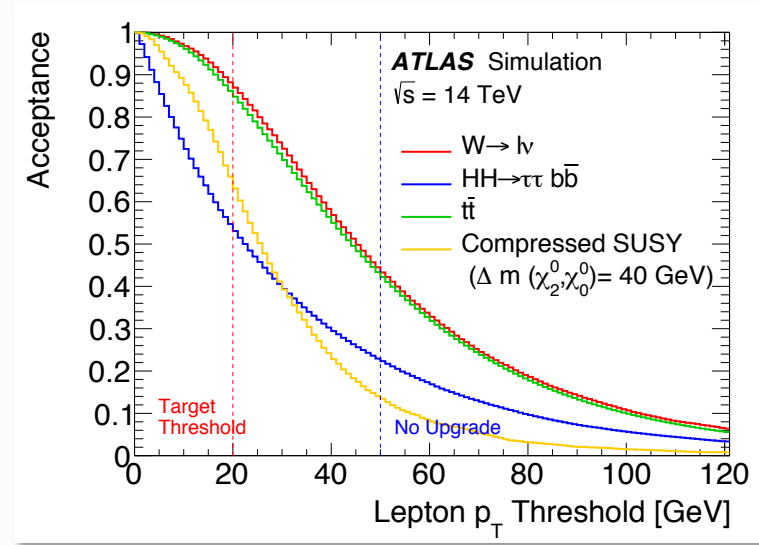
アップグレード後の Level-0 トリガーの基本設計



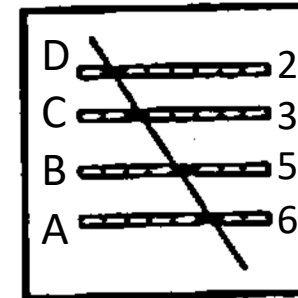
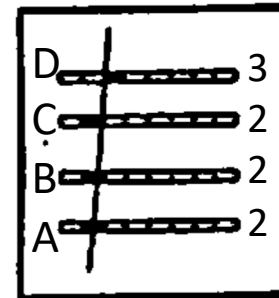
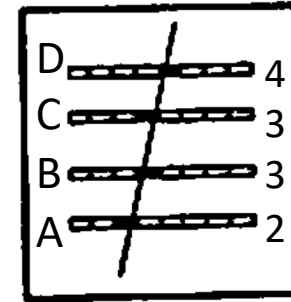
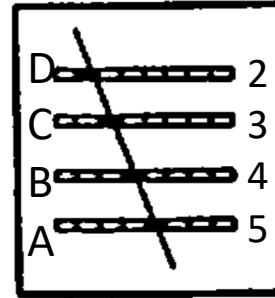
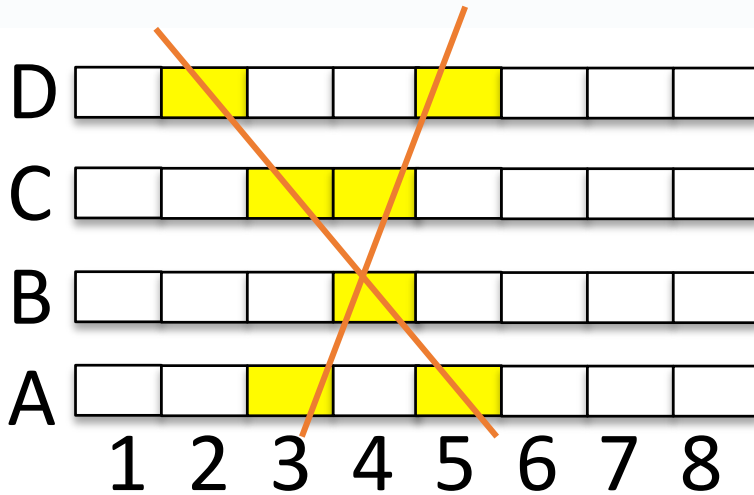
Trigger	Level-1 $p_T$ Threshold [GeV] at $\mathcal{L} = 3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Level-1 Rate [kHz]	Level-1 $p_T$ Threshold [GeV] at $\mathcal{L} = 7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
isolated single $e$	32	14	50
di- $e$	19	5	35
single $\mu$	25	15	40 (with low efficiency)



レート率と閾値の関係



物理効率と閾値の関係

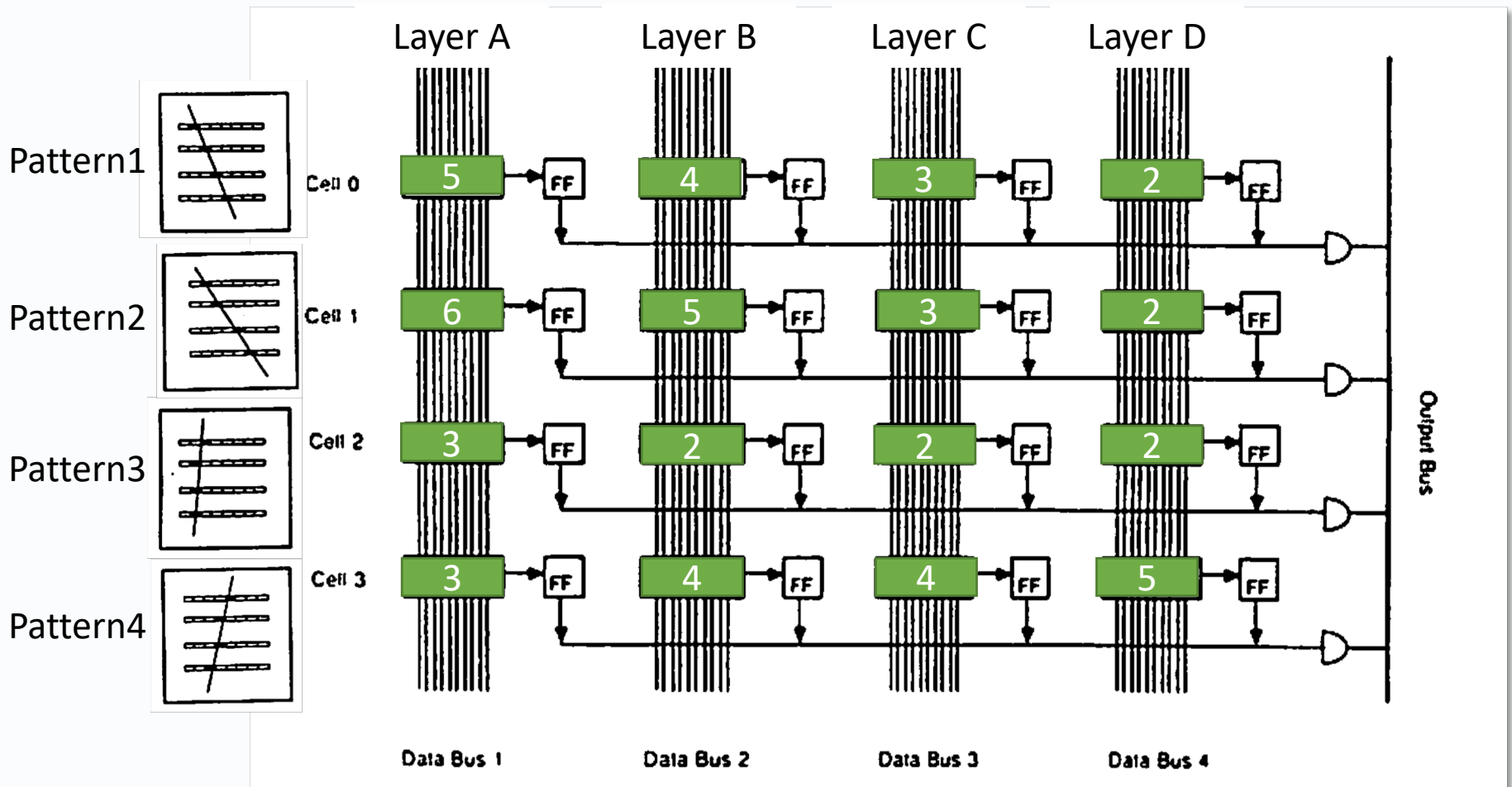


...

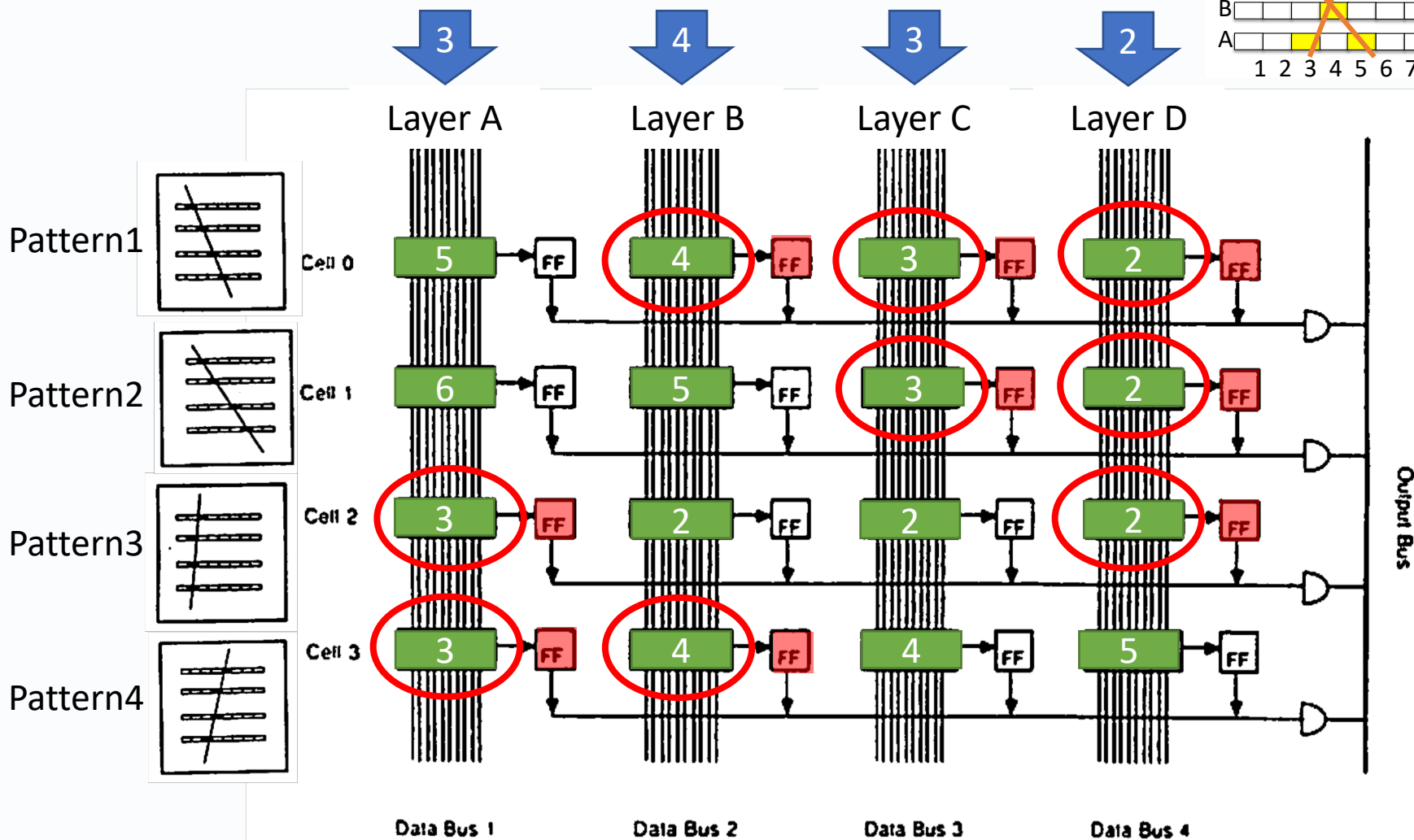
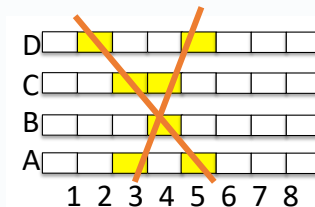
**The Pattern Bank**

左のような事象に対して、事前にAMの中に右のようなパターンを保存しておく、パターンは層と番号からなる

AMで各パターンを一緒に照合することができる  
dataを層ごとと並行に流して比較操作を行う

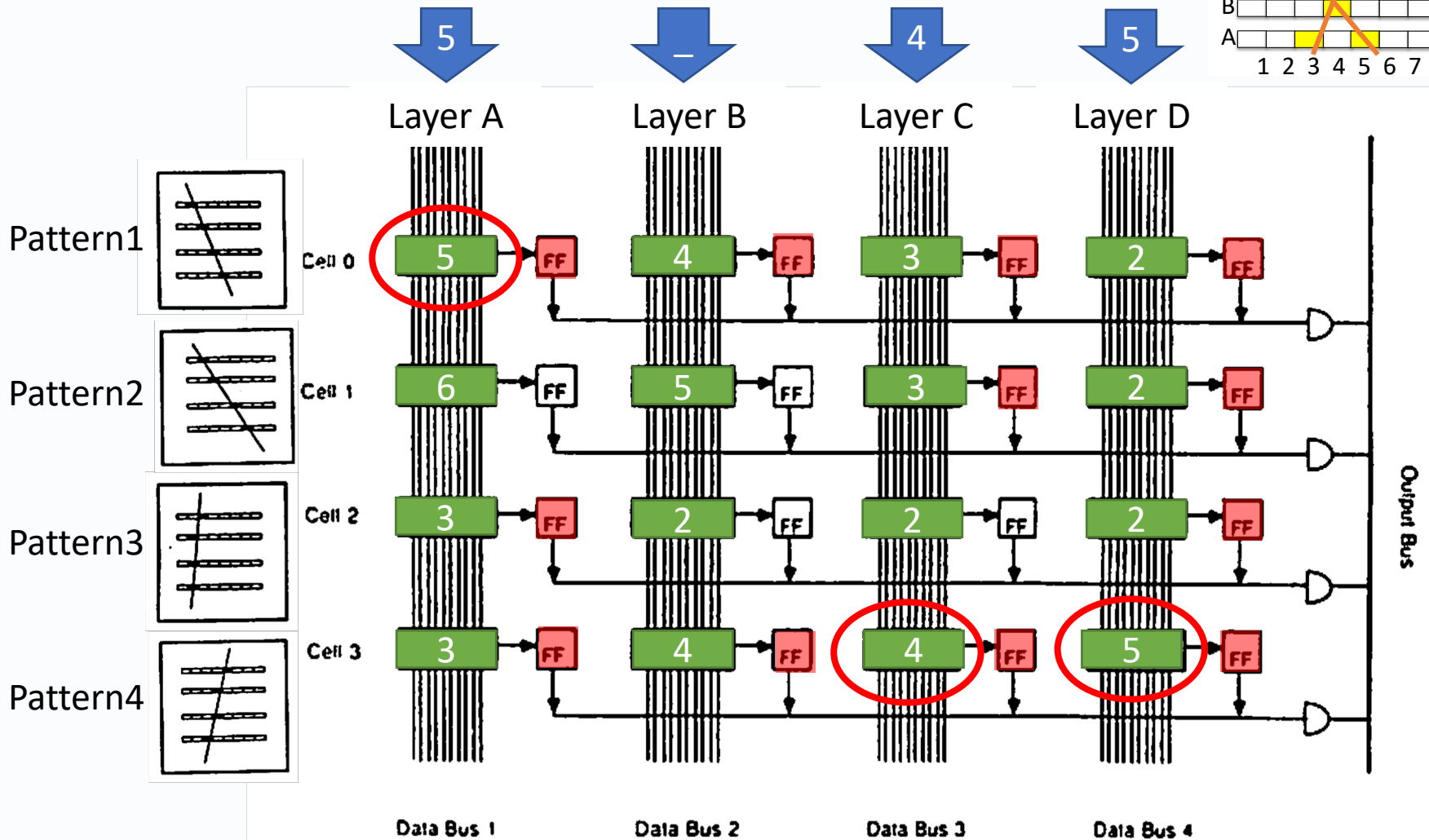
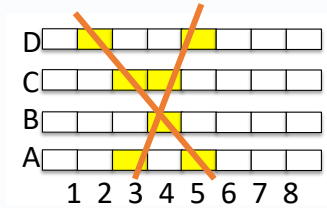


Input Hits: A-3, A-5, B-4, C-3, C-4, D-2, D-5

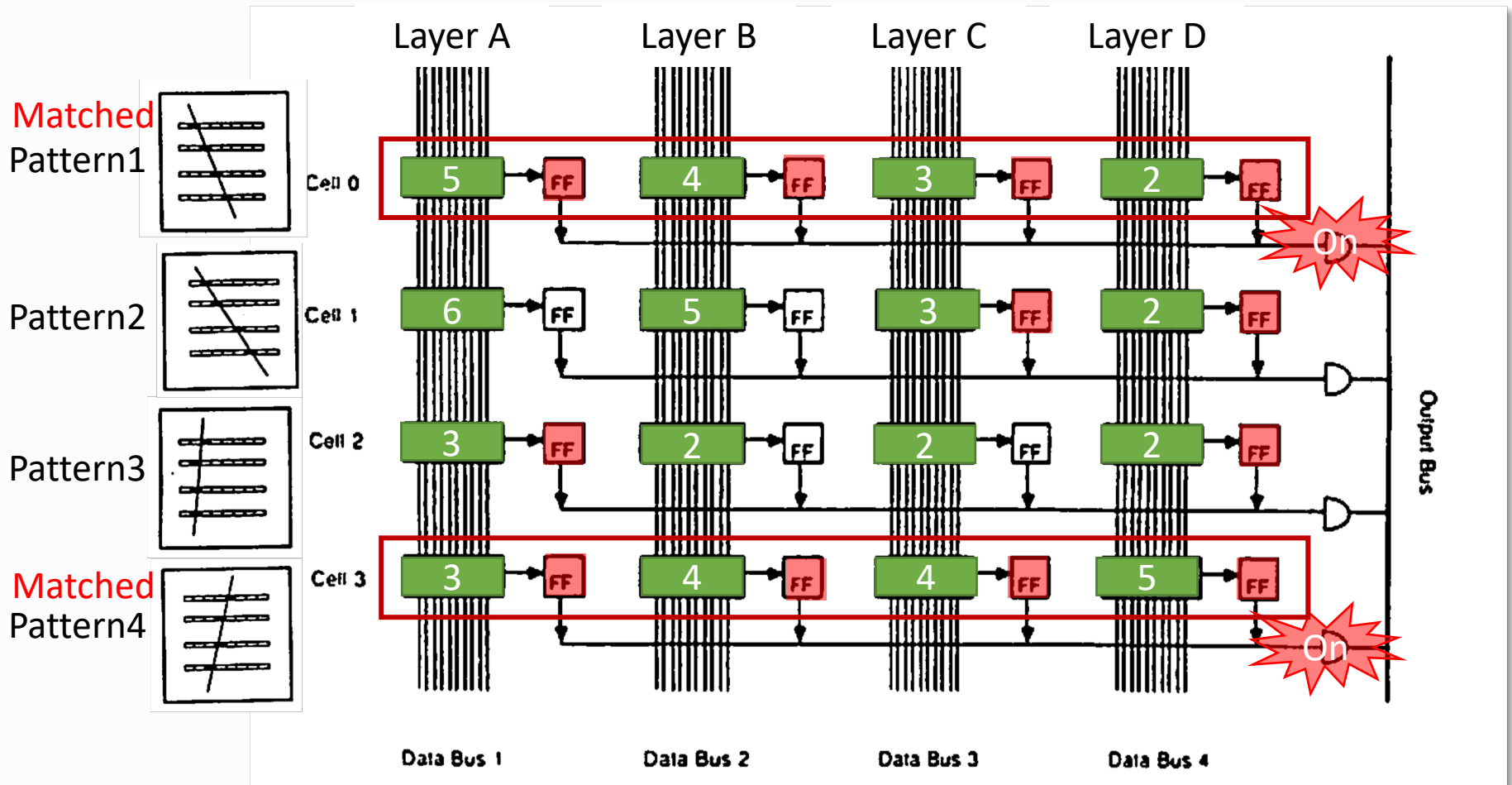


# Backup - AM chipの中で起きていること

Input Hits: A-3, A-5, B-4, C-3, C-4, D-2, D-5



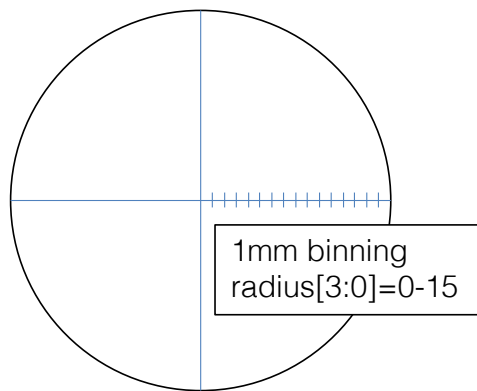
完全に一致したパターンがある場合、読み出し操作が始まり、パターンに紐づけされた情報も一緒に出力



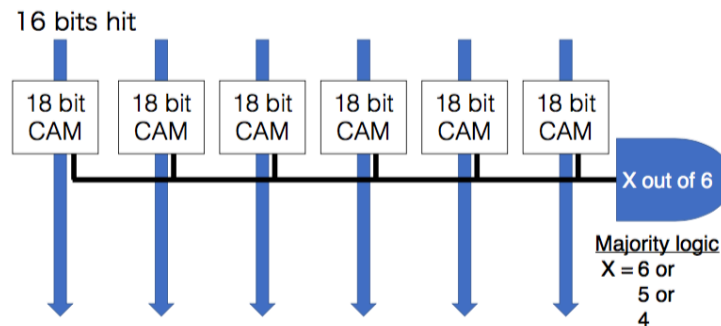
# AM pattern for L0 MDT

- Input hit representation (16 bits)
  - (Signed) drift radius + Tube channel ID

description	spare	tube channel number	sign	drift radius
number of bits	1	10	1	4



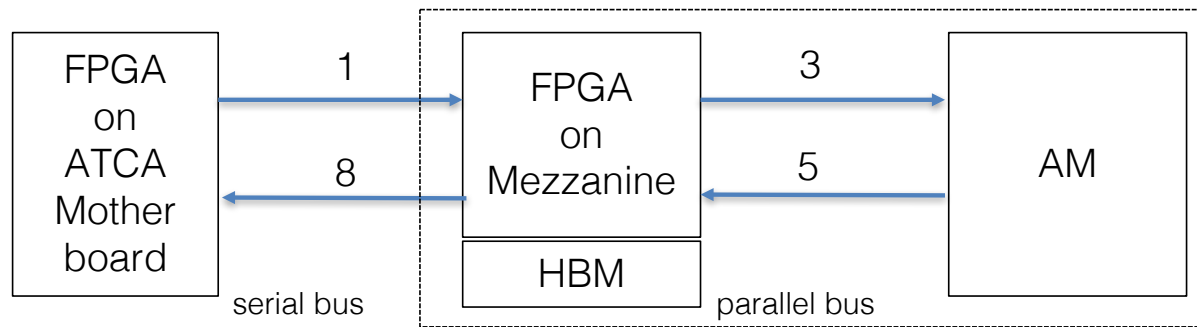
6 of 18-bit CAMs for 6 layers of MDT  
AM pattern for segment



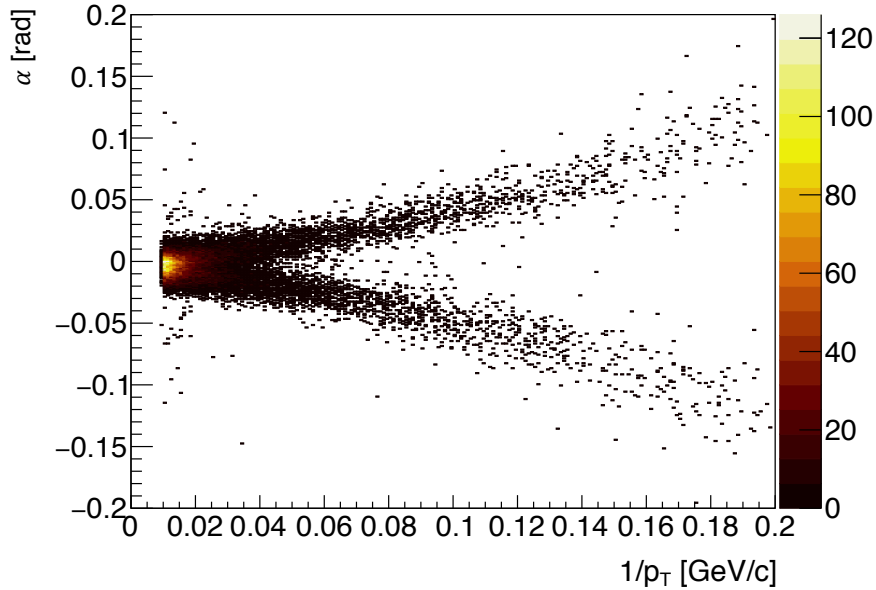
# Latency for segment reconstruction

item	latency [ns]	note	
1	Transceiver SerDes latency + FIFO	128	—
2	Logic in mezzanine FPGA before AM	20	5 clocks
3	FIFO at FPGA + Latch at AM	16	4 clocks (3+1)
4	AM segment finding	100	25 clocks in AM (at maximum)
5	pattern readout	25	
6	FIFO at FPGA + Majority logic selection	20	5 clocks (3+1+1)
7	Logic in mezzanine FPGA	40	10 clocks (to extract parameters)
8	Transceiver SerDes latency + FIFO	128	—
9	Reservation for queuing	144	reset AM chip (1 clock) + hits load to FPGA per layer (10 clocks at maximum) + AM segment finding (25 clocks at maximum)
total	621		

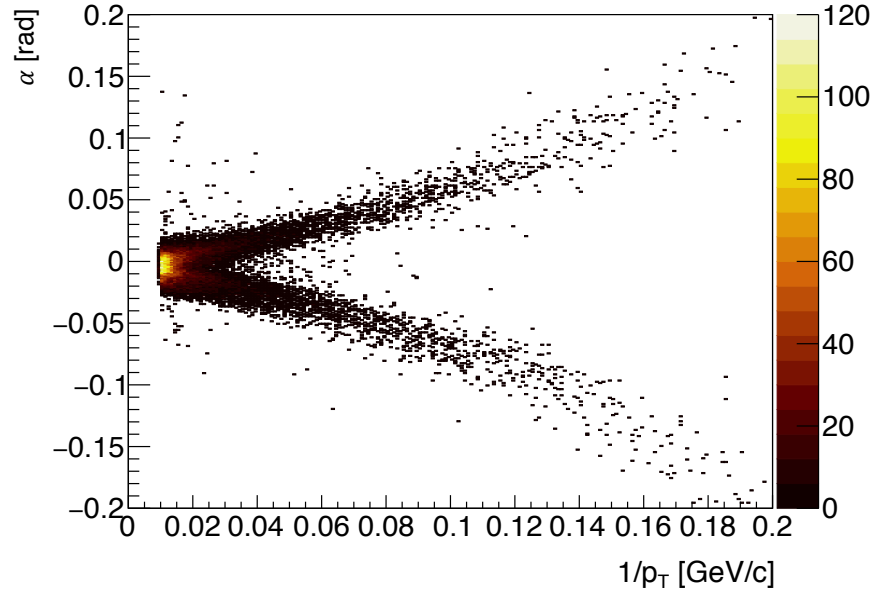
Table 9: Latency assuming 250 MHz clock speed at FPGA, and 250 MHz clock speed at AM chips.





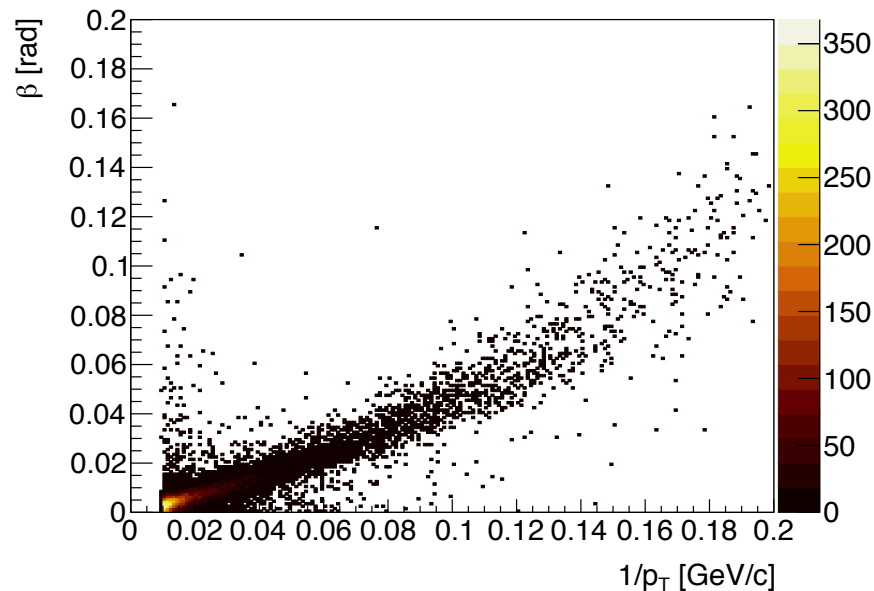
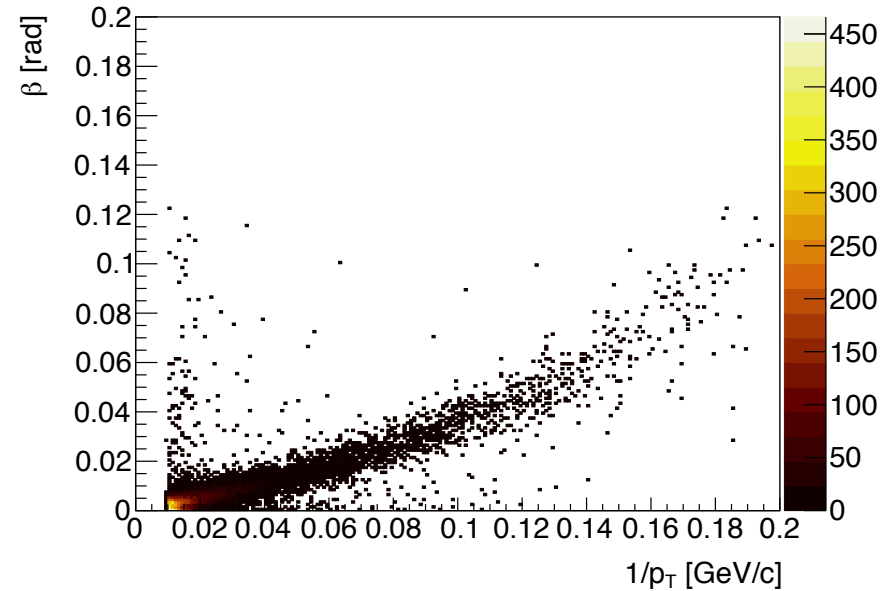
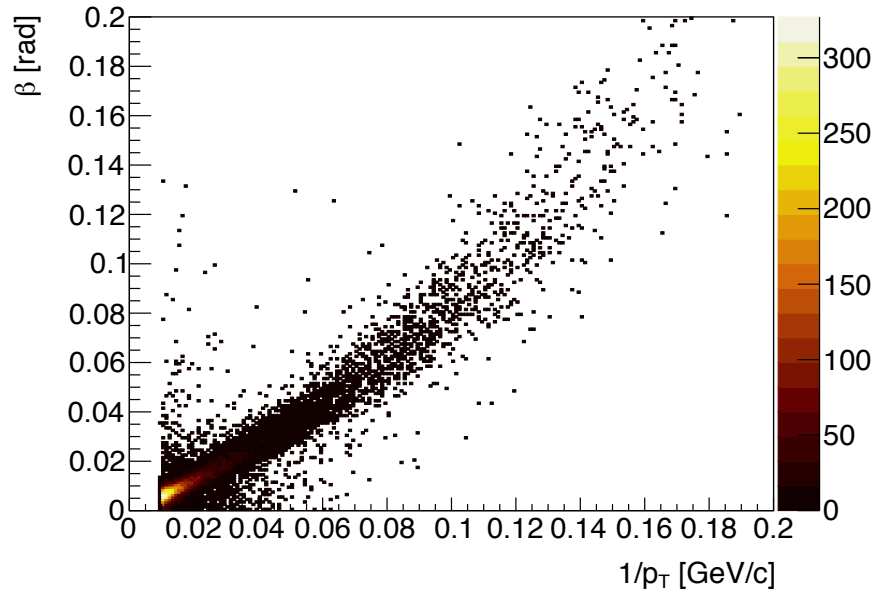


Outer station



Middle station

しきい値決定用の $\eta, \phi, p_T$ が flat な particle gun sample

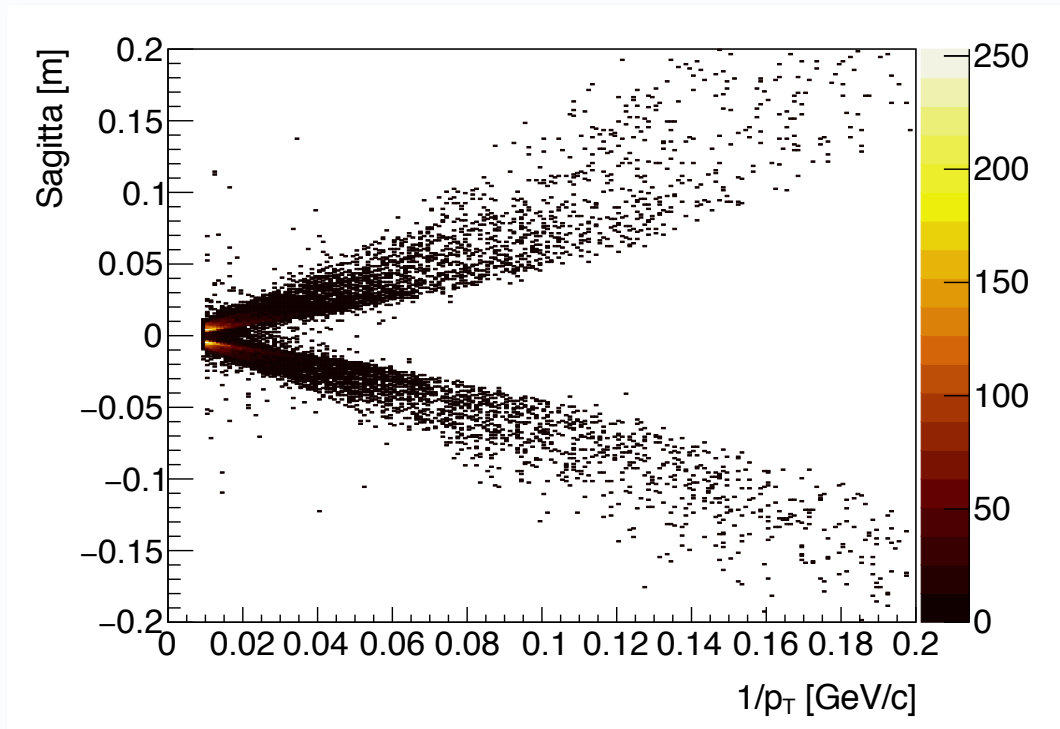


Inner-Outer

Middle-Outer

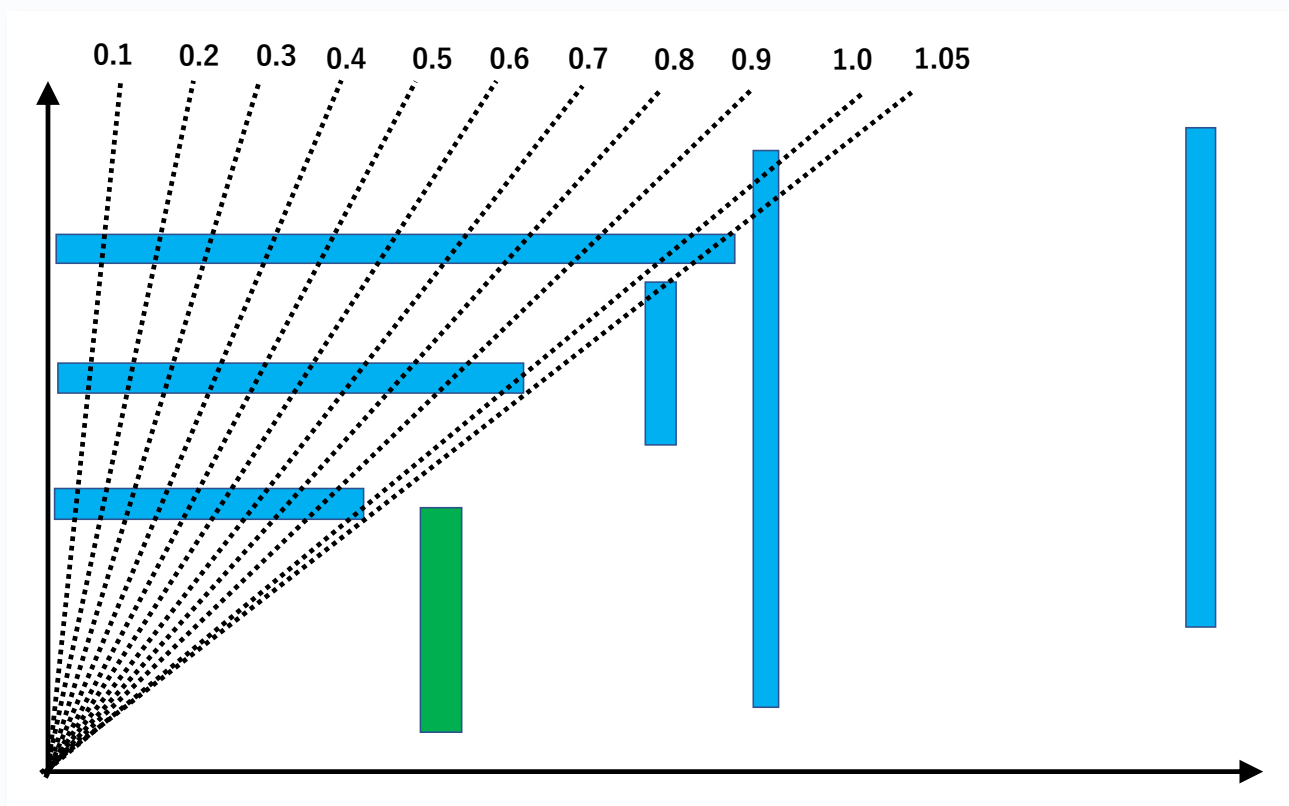
Inner-Middle

しきい値決定用の  
 $\eta, \phi, p_T$ が flat な particle gun sample



しきい値決定用の $\eta, \phi, p_T$ が flat な particle gun sample

$\eta$ によって通過した磁場が異なるため、領域分割を行った



しきい値決定領域にあるイベントの分布を積分し  
積分値が全体の95%となるパラメータの値を  
しきい値とする

