

# LHC-ATLAS実験における 速度の遅い安定した粒子用トリガーの開発

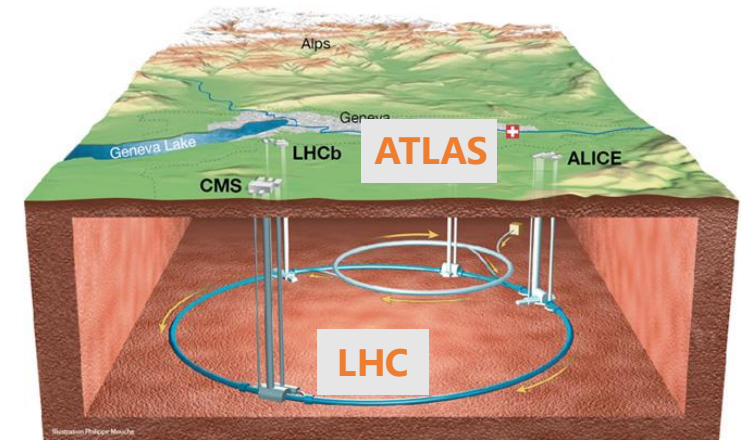
---

神戸大学 修士1年 佐倉慶汰

# LHC-ATLAS実験

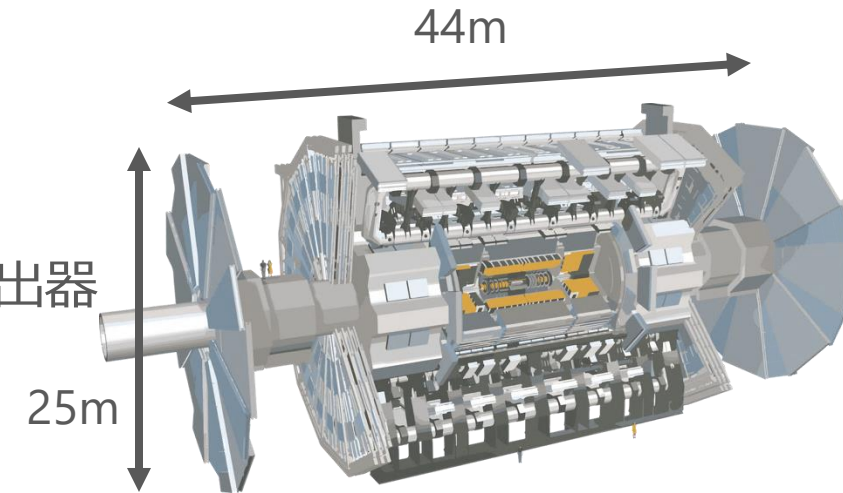
## LHC

- 欧州原子核研究機構(CERN)の地下に設置された陽子-陽子衝突型円形加速器
- 重心系エネルギー：13.6TeV
- 衝突頻度：40MHz



## ATLAS検出器

- さまざまな検出器から構成される大型汎用検出器
  - 内側から内部飛跡検出器、カロリメータ、ミューオン検出器



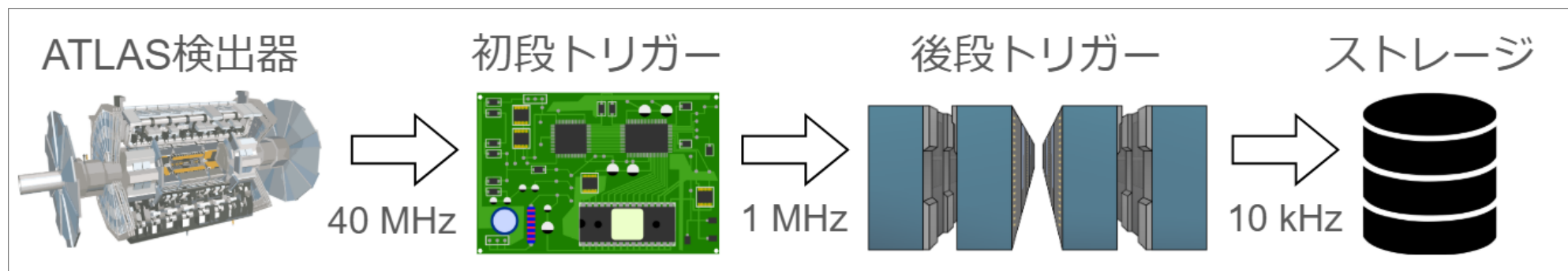
標準模型の精密測定や新物理探索が目的  
2030年から高輝度LHC-ATLAS実験が予定

# トリガーシステム

全てのデータを保存すると膨大なデータ量

▶ 物理的に興味のある事象のみの選択(トリガー)が必要

- 2段階トリガー(高輝度LHC-ATLAS実験)
  - 初段/後段トリガーの条件を組み合わせた、さまざまな基準で事象を選別



新たなトリガーを開発し、  
標準模型を超える質量の重い長寿命荷電粒子の発見を目指す

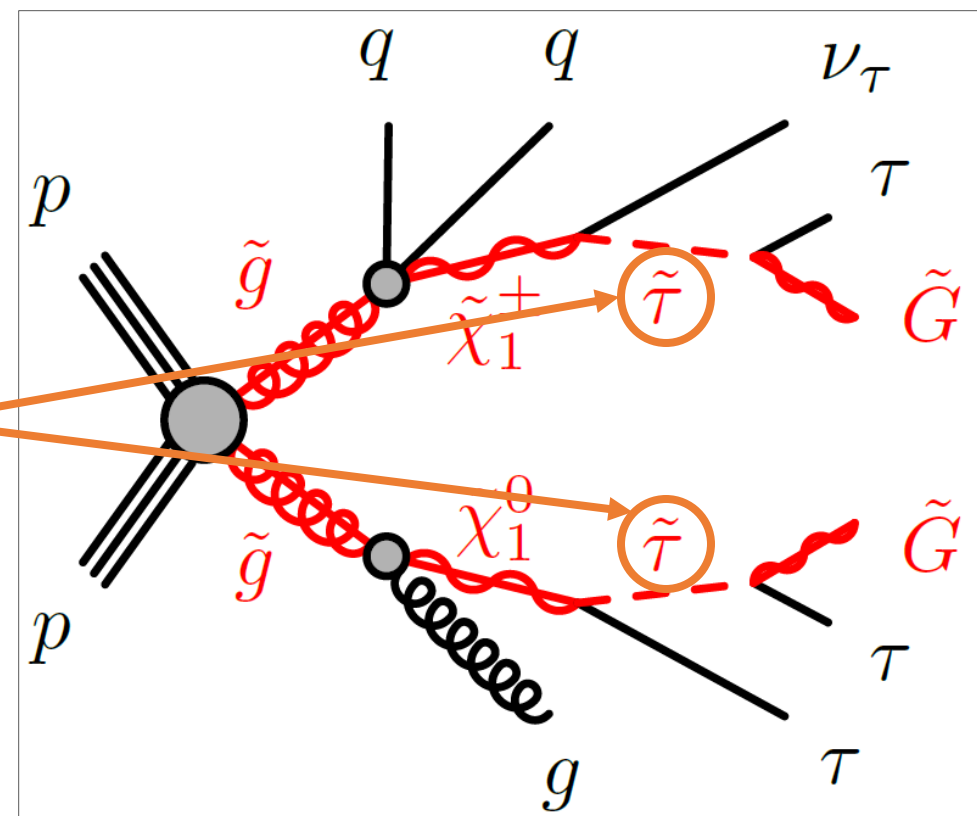
# 捉えたい粒子の例

## 標準模型を超える質量の重い長寿命荷電粒子

- 質量が重い ▶ 速度が遅い
  - $\beta = \frac{v}{c} = \frac{pc}{E}$ ,  $E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$
- 長寿命で崩壊しづらいため安定した粒子になる

## シミュレーションサンプル

- 超対称性理論で予言されるスタウ粒子
  - ミュオンのように  
ATLAS検出器中で崩壊せず通過



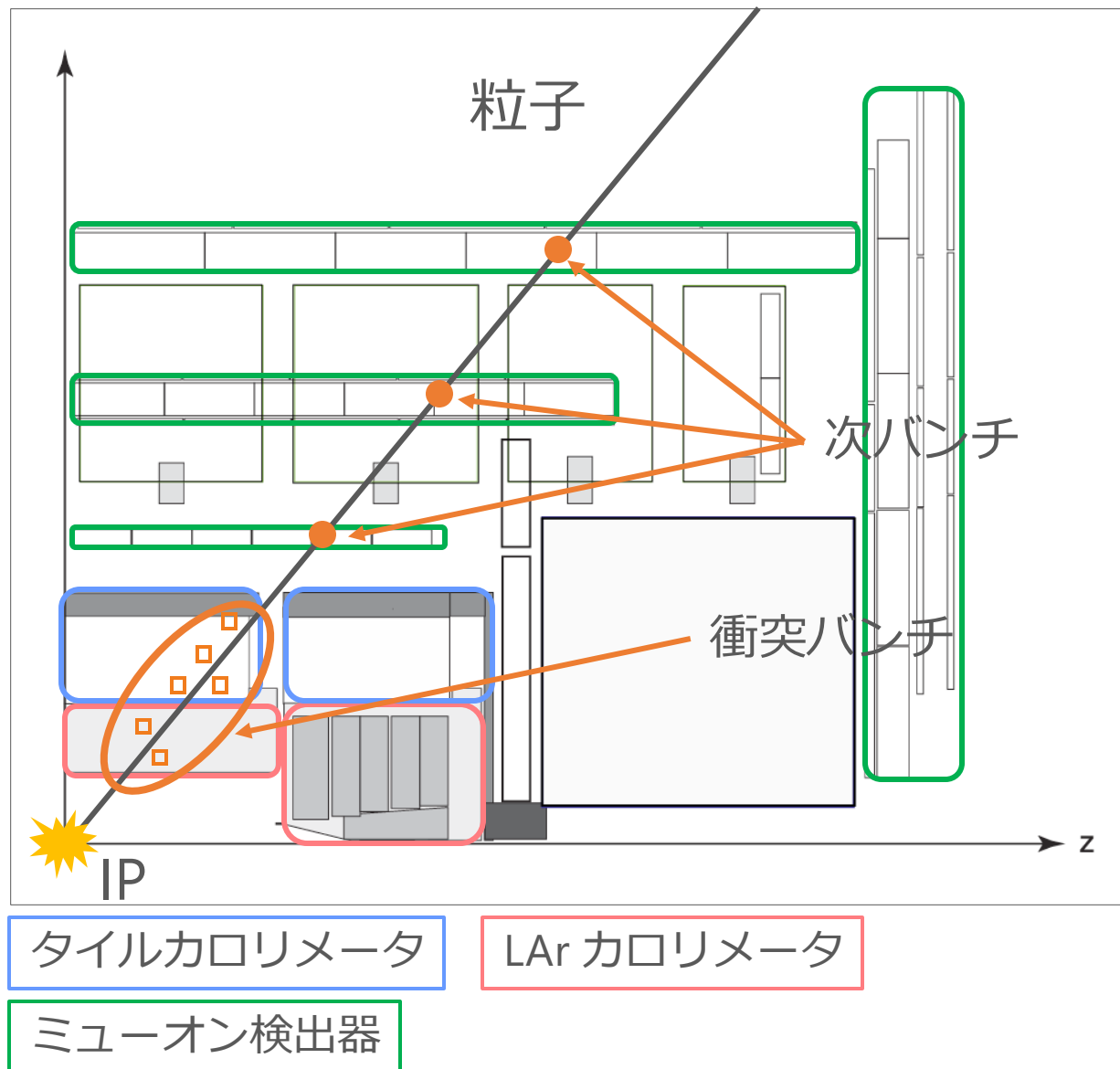
# 速度の遅い粒子の特徴

## ATLAS実験での特徴

- それぞれの検出器は光速の粒子の飛行時間(ToF)を基準に検出タイミングを校正
- 速度の遅い粒子は ToF が長いいため検出タイミングが遅れる



複数のバンチ衝突の時間に跨り信号を残す



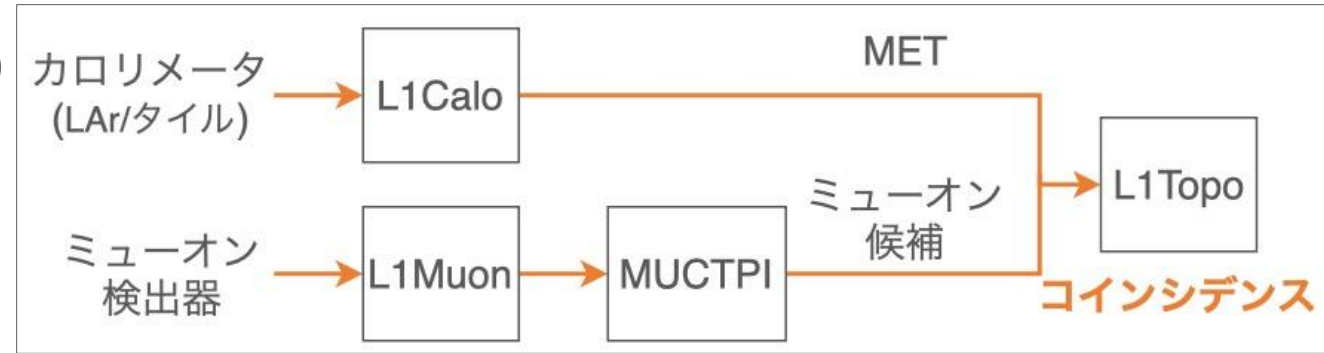
# Run2 での速度の遅い粒子用トリガー (1/2)

角 源一郎 2021年修士論文(神戸大学)

## 初段トリガー

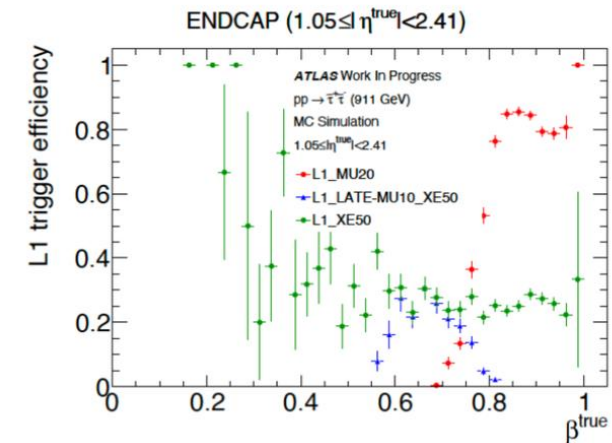
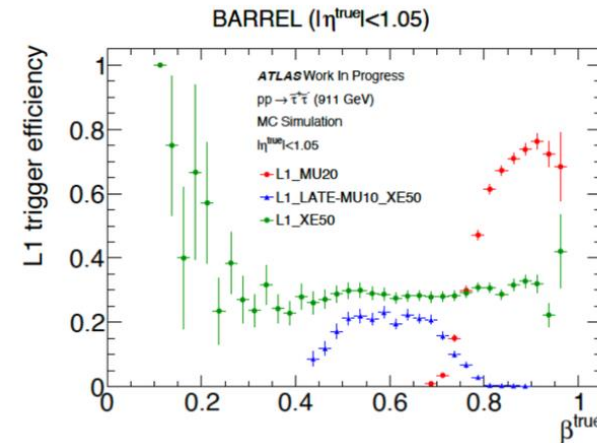
### • トリガーロジック

- 衝突バンチの消失横エネルギー(MET)  
 $MET \geq 50 \text{ GeV}$   
&
- 次バンチのミュオン候補  
 $p_T \geq 10 \text{ GeV}$



### • トリガー効率

- $\beta = 0.5-0.7$  で効率は 20% 前後
  - METトリガーの効率(約30%)  
×  
ミュオントリガー(次バンチ)の効率(約80%)
- METトリガーの効率が全体のトリガー効率に制限をかける

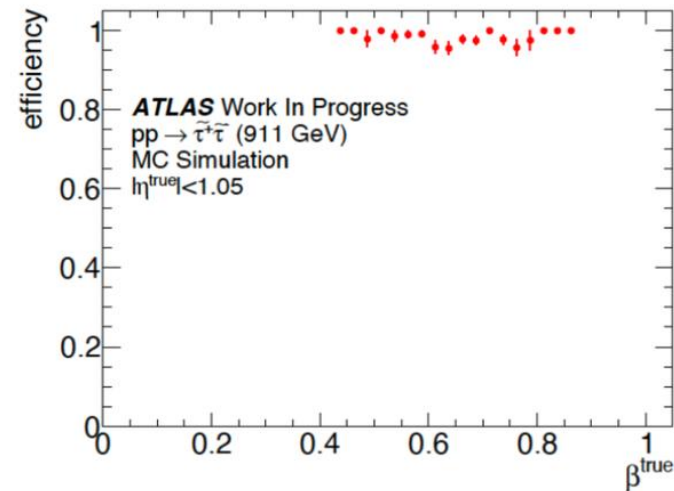


# Run2 での速度の遅い粒子用トリガー (2/2)

角 源一郎 2021年修士論文(神戸大学)

## 後段トリガー

- トリガーロジック
    - 初段トリガーでのミュオン候補の情報をもとに飛跡やヒット情報を取得
- ▼
- 内部飛跡検出器の飛跡をカロリメータ、ミュオン検出器の順に飛行時間を変化させながら、外側に向けて外挿しマッチング  
(通常のトリガーではミュオン検出器から内側に向けて外挿しマッチング)
- トリガー効率
    - 全領域において 100% に近い効率



トリガー効率を上げるためには、まず初段トリガーの効率を上げることが必要不可欠

# 新たに開発している速度の遅い粒子用トリガー (1/3)

現行のトリガーは初段トリガー、特にMETトリガーの効率が低い

## ▶ METトリガーを用いない、新たな初段トリガーを開発

### • トリガーロジック

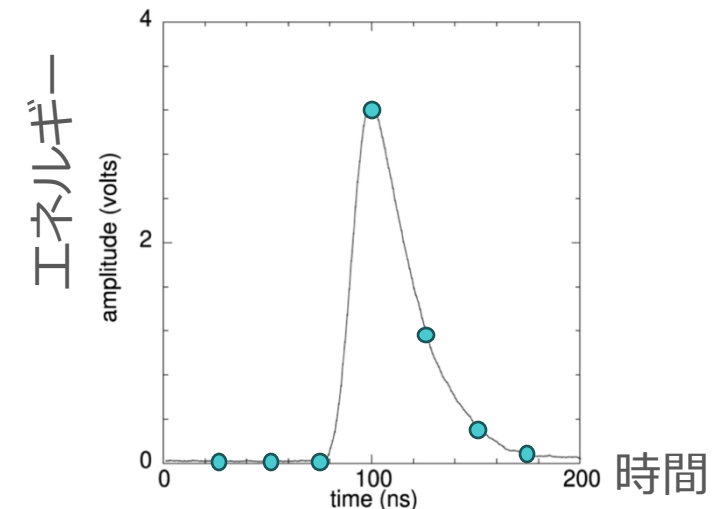
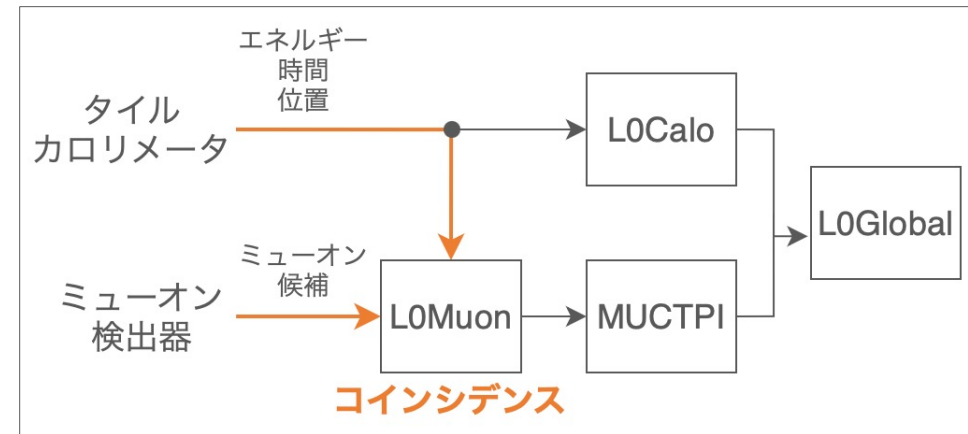
- 衝突バンチのタイルカロリメータでの情報  
&  
• 次バンチのミュオン候補
  - $p_T$  と粒子の通過した位置

### • 位置

- cell の位置

### • エネルギー、時間

- 25ns 間隔の4点を用い、横エネルギー( $E_T$ )、時間( $\tau$ )を再構成
  - 4点で  $E_T$ 、 $E_T\tau$  の和をとる
  - $\tau$  の基準は光速の粒子による理想的なタイミング

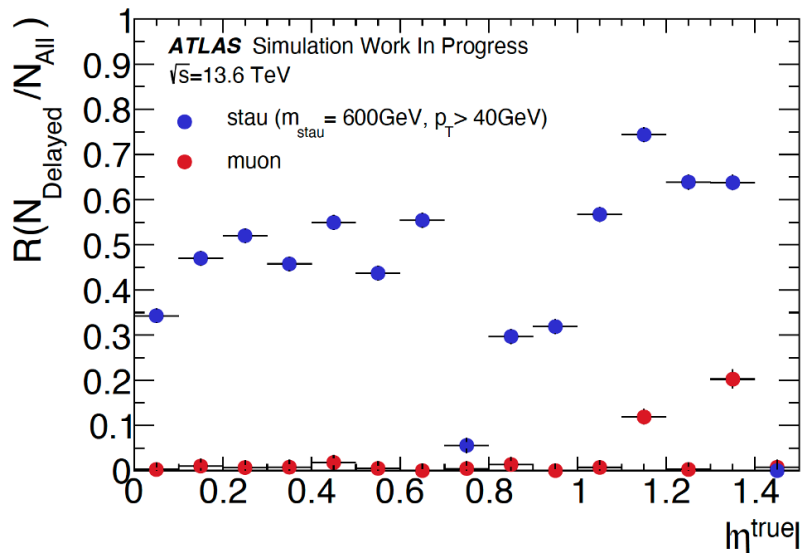




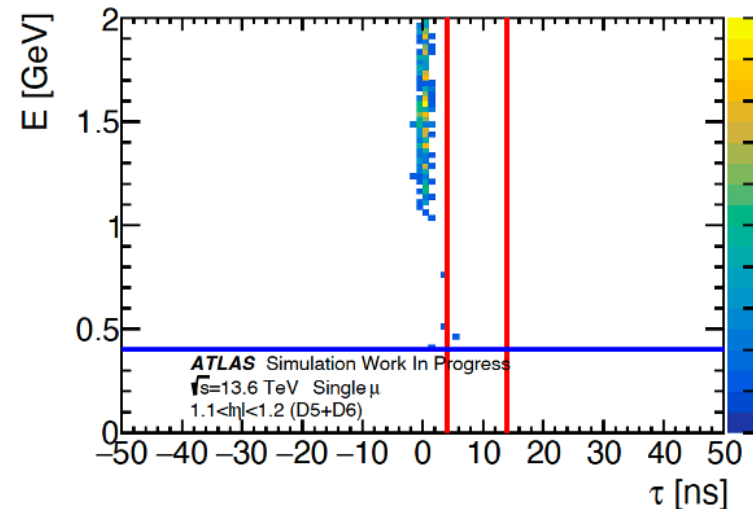
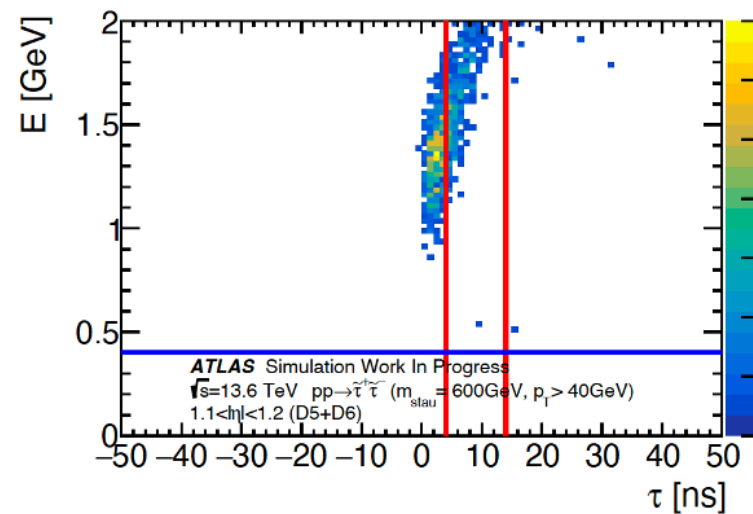
# 新たに開発している速度の遅い粒子用トリガー (2/3)

## タイルカロリメータでの時間分布

- 速度の遅い粒子は検出される時間が遅れる
- トリガーにおける時間への要求
  - $\tau = 4-14$  ns (“delayed”)



“delayed” に分布する割合がスタウ粒子が多い

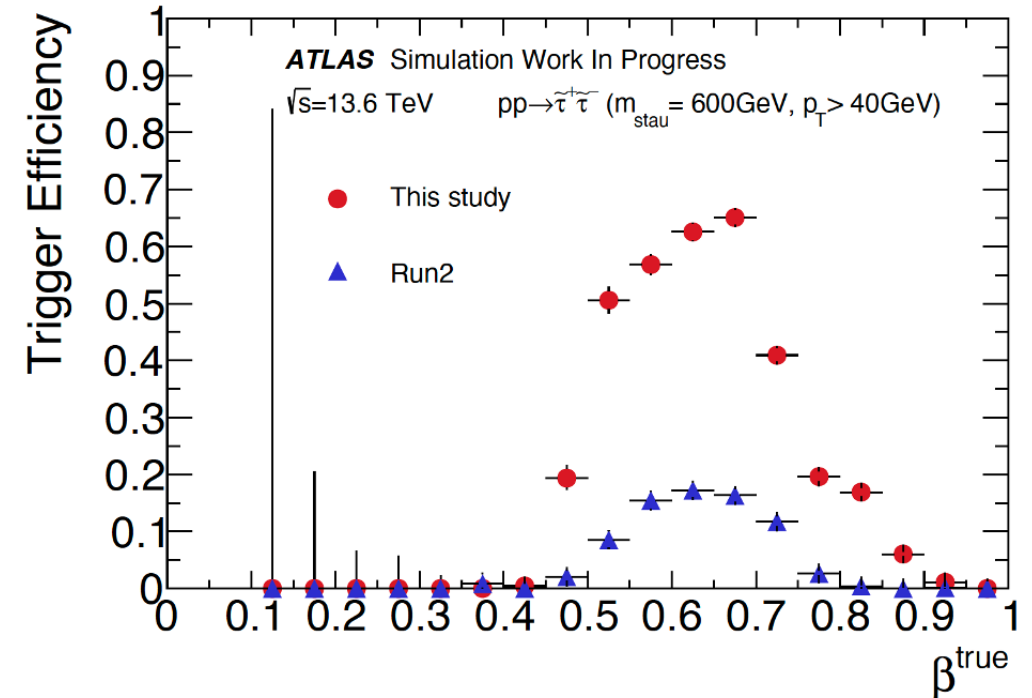


# 新たに開発している速度の遅い粒子用トリガー (3/3)

## スタウ粒子に対するトリガー効率

- トリガーへの要求
  - $E > 400\text{GeV}$
  - $\tau = 4\text{-}14\text{ ns}$  ("delayed") } D-cell
- D-cell とミュオン候補の位置の差が 0.1 未満
  - $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2} \leq 0.1$
- 位置、時間に対する要求が特定の  $\beta$  領域で感度が高い

効率 : 20% → 50% 以上 ( $\beta=0.5\text{-}0.7$ )

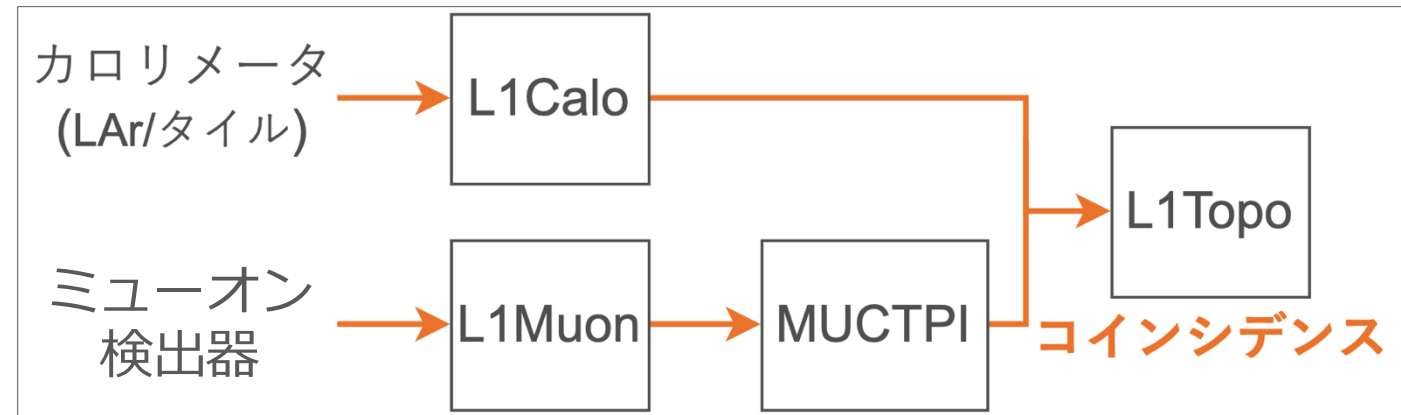


# 新たなトリガーロジックの実現可能性 (1/2)

高輝度LHC-ATLAS実験ではトリガーシステムが刷新

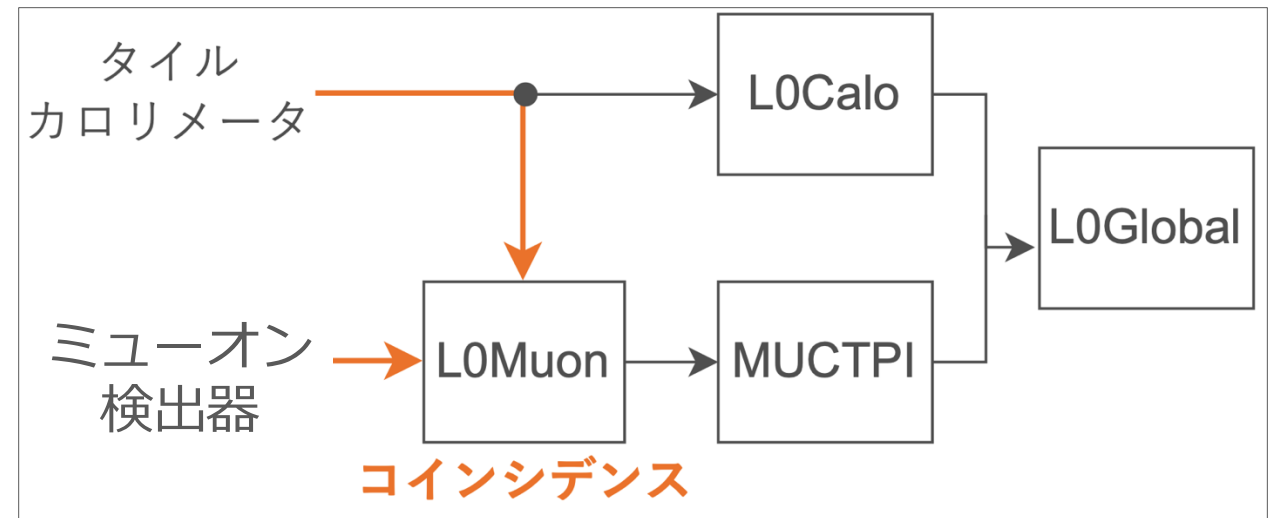
## • 現在のトリガーシステム

- L1Calo :  
電磁/ハドロンカロリメータの情報を統合
- L1Muon :  
バレル/エンドキャップで別々に  
ミュオン候補を判定
- MUCTPI :  
バレル/エンドキャップの  
ミュオン候補を統合



## • 新たなトリガーシステム

- L1Calo、L1Muon、L1Topo の機能は  
L0Calo、L0Muon、L0Global に引き継がれる
- L0Muon でのコインシデンスを試みる



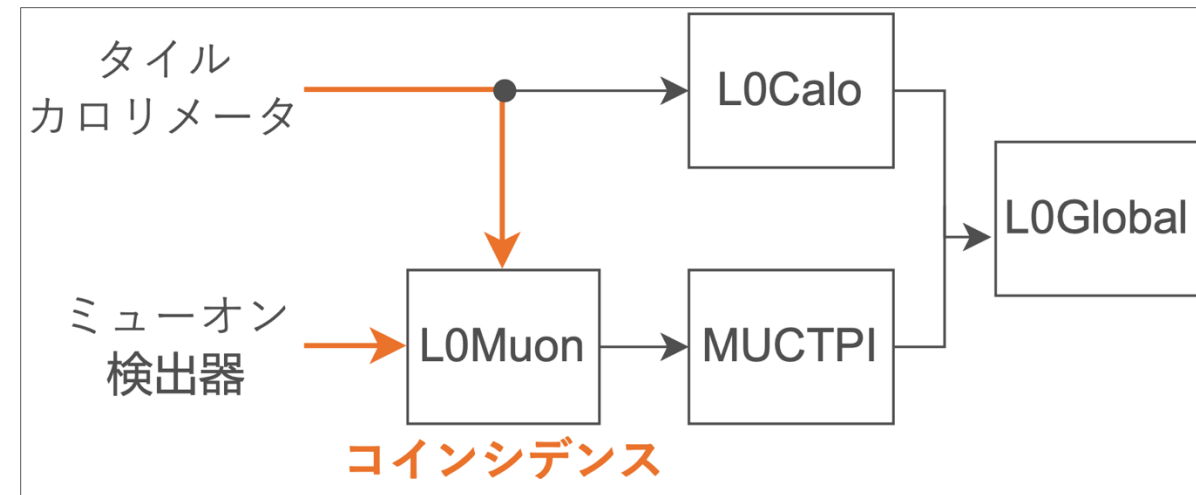
# 新たなトリガーロジックの実現可能性 (2/2)

ミュオン検出器 → L0Muon

- 既存のシステムでバレル/エンドキャップのミュオン候補について L0Muon でコインシデンスがとれる

タイルカロリメータ → L0Muon

- エネルギーが閾値を超えているかどうかの情報のみが送られている
  - 同様に “delayed” に属した Timing range であるかどうかを判定したフラグを足せばよい



# まとめと展望

## まとめ

- 標準模型を超える質量の重い長寿命荷電粒子発見のため新たなトリガーを開発している
- タイルカロリメータの検出タイミングを用いることでトリガー効率が上昇することを確認した
- 実装に向けてさまざまな検討が必要

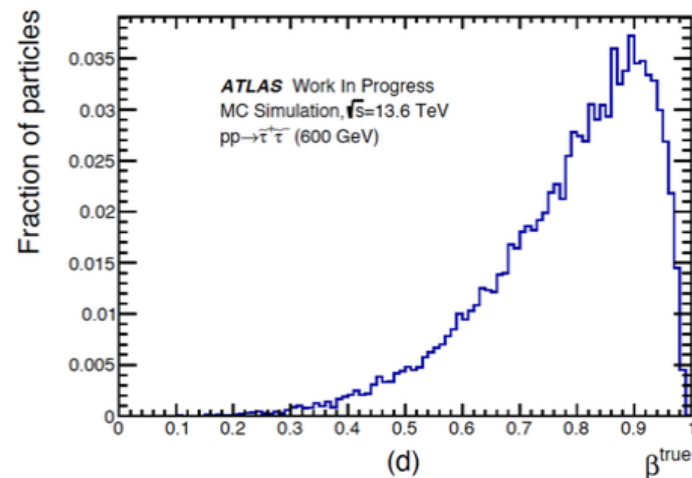
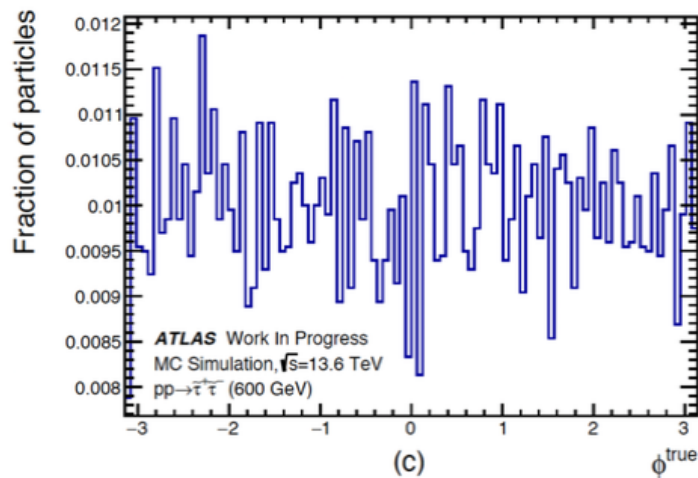
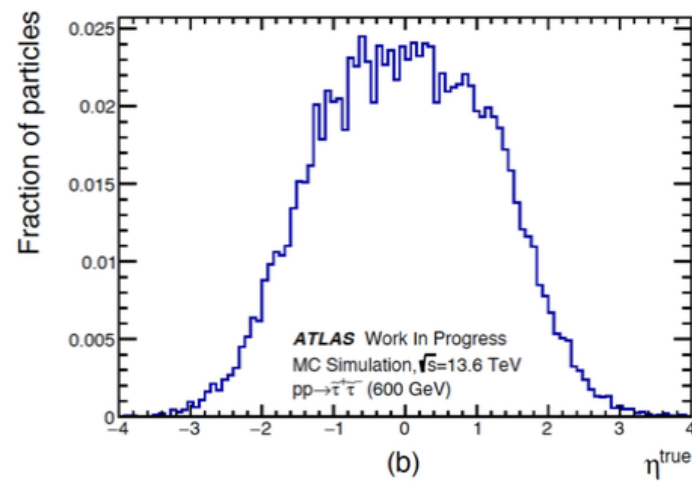
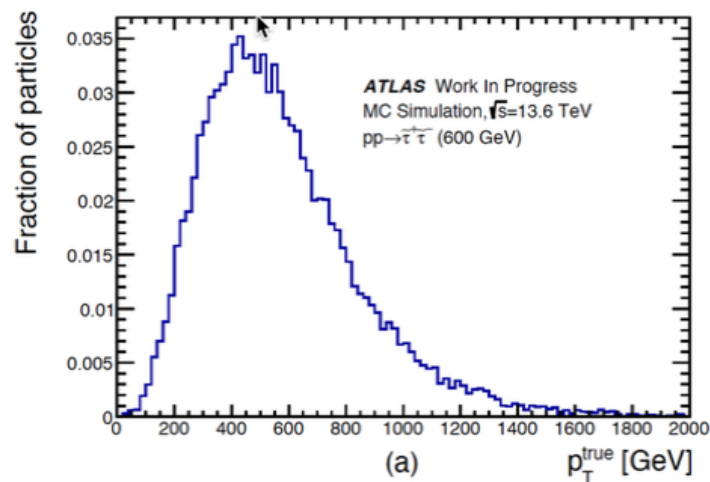
## 展望

- トリガーシステムの理解を深め、実装への精査を進める
- 現在はトリガー効率、トリガーレートに対するミュオン候補の  $p_T$  閾値の依存性について特に調査

# Back up

# 捉えたい粒子の例

## シミュレーションサンプルの運動学的変数

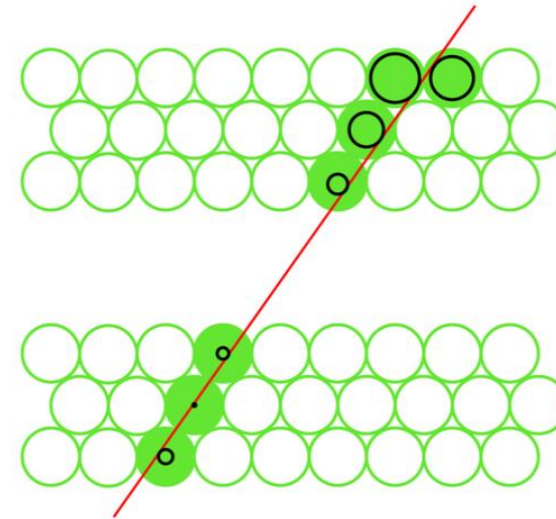


# Run2 での速度の遅い粒子用トリガー (1/2)

角 源一郎 2021年修士論文(神戸大学)

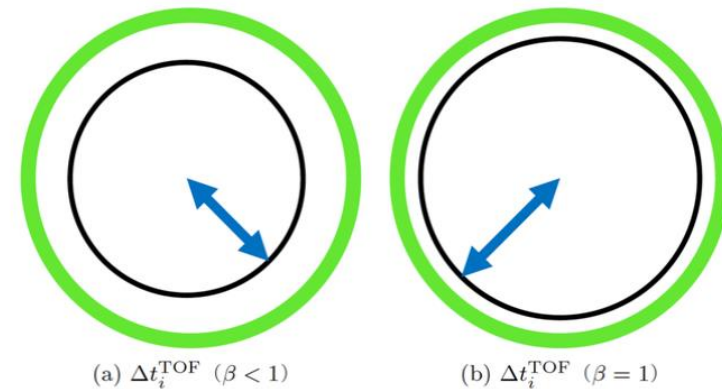
## 飛跡再構成のイメージ(MDT検出器)

- 6層のチューブにおけるドリフト半径の接線を引く
- ドリフト時間： $t_i^{\text{drift}}$ 
  - $t_i^{\text{drift}} = t_i - T_0 - \Delta t_i^{\text{ToF}}$ 
    - $t_i$  : 検出時刻
    - $T_0$  : バンチ衝突が起きた時刻
    - $\Delta t_i^{\text{ToF}}$  : 衝突点から検出器までの ToF



## ドリフト半径の違い

- $\beta$ によってドリフト半径は異なる
  - $\Delta t_i^{\text{ToF}}$ を正しく判定する必要がある



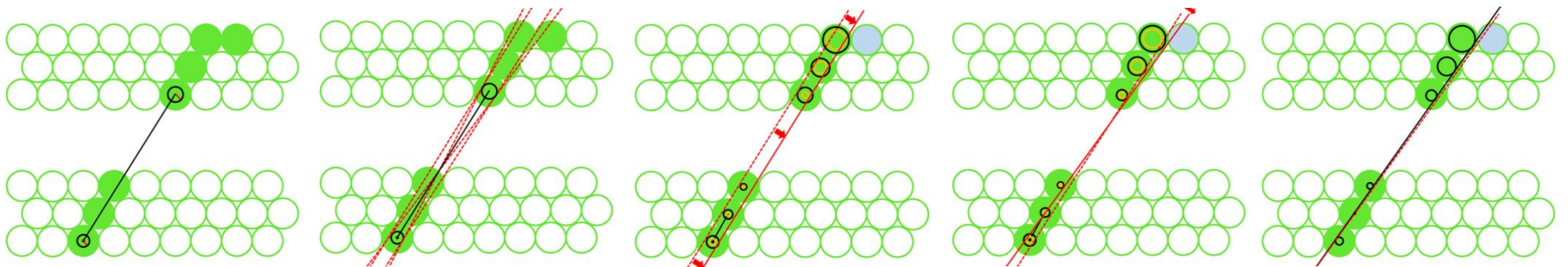


# Run2 での速度の遅い粒子用トリガー (2/2)

角 源一郎 2021年修士論文(神戸大学)

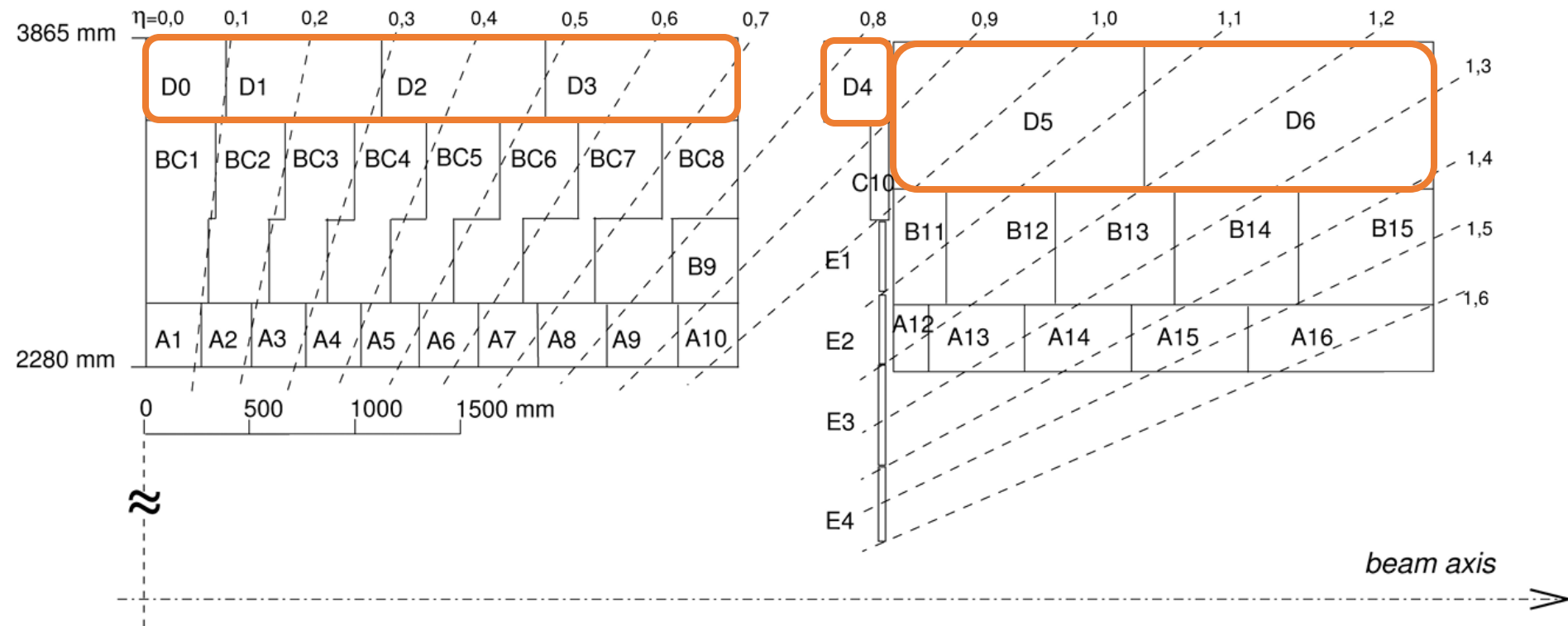
## 飛跡再構成の手順

- シードとなる2つのヒットを選び、ドリフト半径を取得
  - 上下の層で1つずつ、間は2層以下
- 4本の接線をひき、シードとなる1本の接線を選ぶ
- ToF を変化させ、最も $\chi^2$ が小さくなる ToF を探索(傾きは変えない)
- 傾きを変化させ、最も $\chi^2$ が小さくなる傾きを探索(ToFは変えない)
- ToF、傾きを変化させ、最も $\chi^2$ が小さくなる直線を探索



# 新たに開発している速度の遅い粒子用トリガー (1/2)

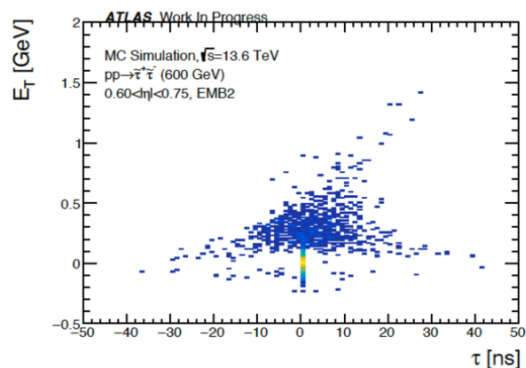
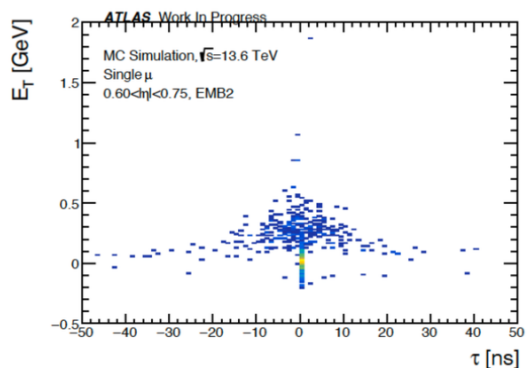
- タイルカロリメータの D-layer を使用
  - バックグラウンドの少ない状況で速度の襲い安定した粒子を検出



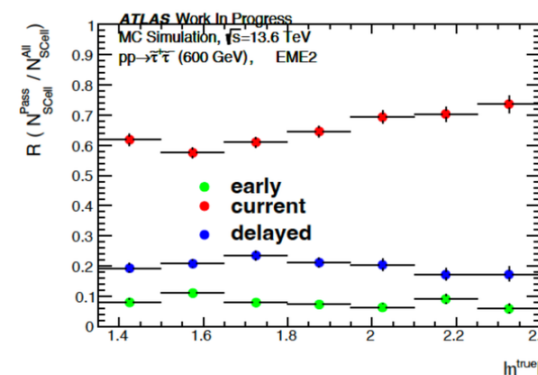
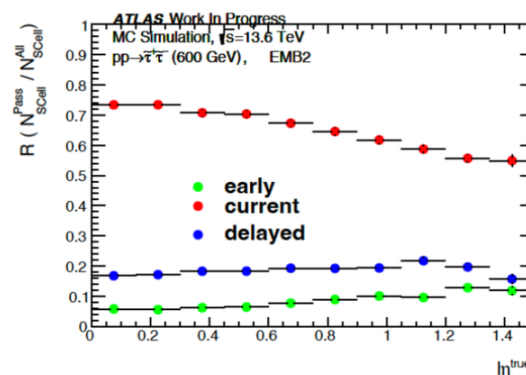
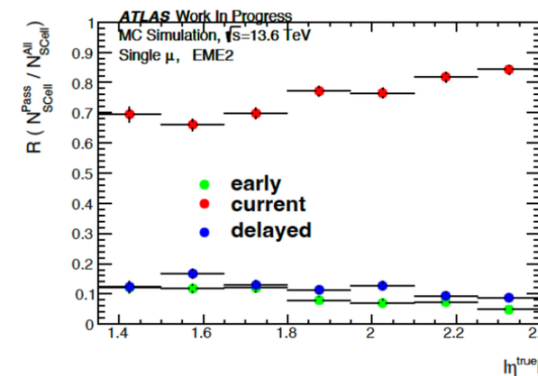
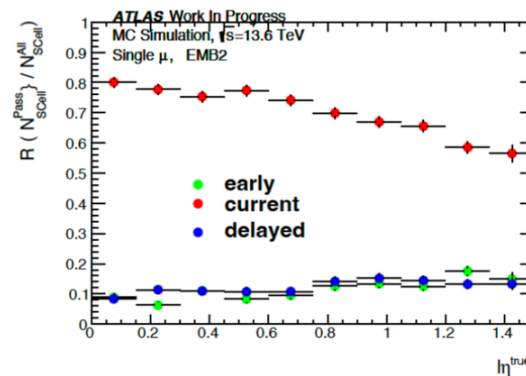
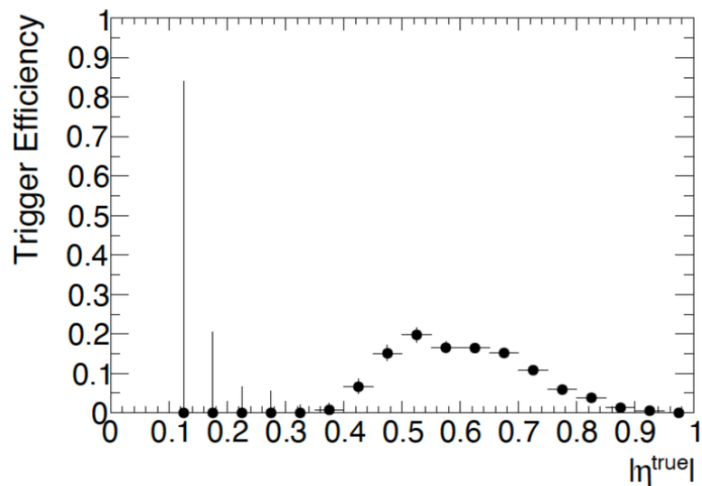
# 新たに開発している速度の遅い粒子用トリガー (2/2)

## LAr カロリメータでの検証

- 時間分布



- トリガー効率



# 新たなトリガーロジックの実現可能性

## L0Muon での新たなインターフェイス

