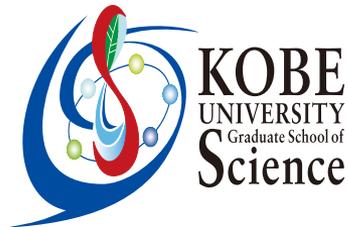


LHC-ATLAS実験Run 3における 速度の遅い荷電粒子用トリガーのための TGC検出器のバンチ識別性能評価

神戸大学 粒子物理学研究室 修士課程1年

田路 航也

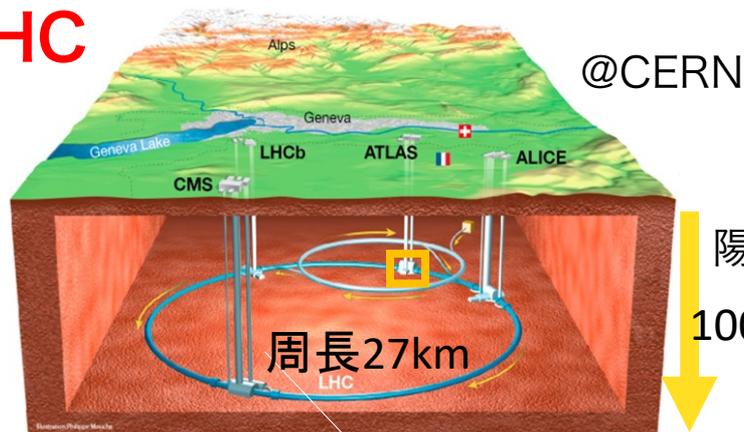


第29回 ICEPP国際シンポジウム

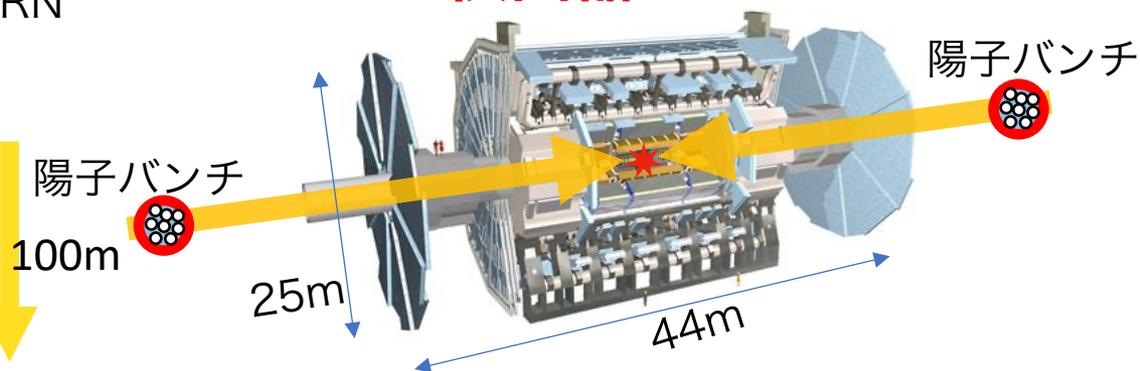
LHC-ATLAS実験

標準模型の精密測定・新物理探索

LHC



ATLAS検出器

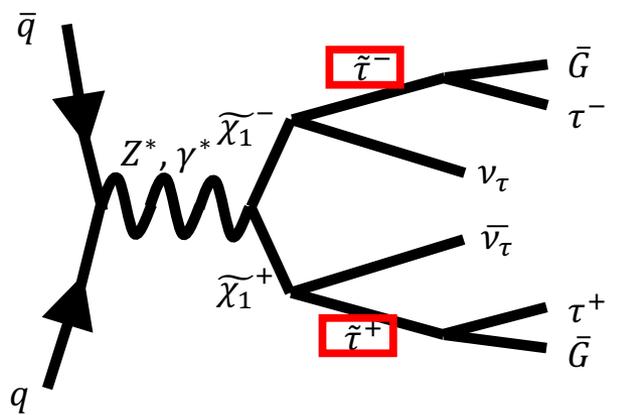


- 世界最高エネルギー13.6TeV
- 円形陽子加速器
- 衝突頻度：40MHz
- $L = 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 3年間の休止期間を経て
昨年より第3期運転 (Run 3)

- LHCの衝突点の一つ
- 大型汎用型粒子検出器
- 内部飛跡検出器
- 超伝導ソレノイド磁石
- カロリーメータ
- ミューオン検出器

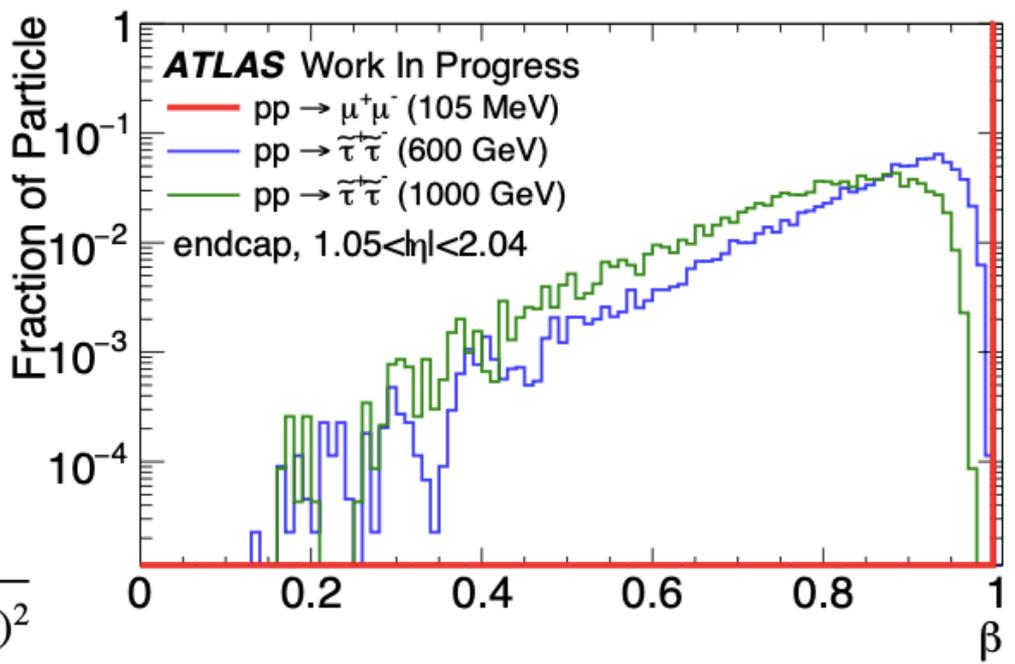
重い長寿命粒子の探索

粒子速度分布



e.g.) 超対称性理論
stau 粒子

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{pc}{E} \quad E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

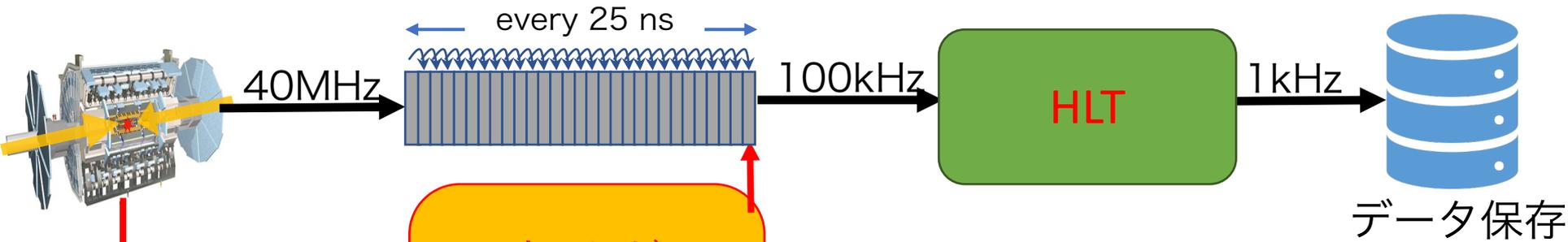


- プローブとする新粒子
- 安定
 - 質量が重い
 - 電荷を持つ

- ATLAS検出器の外層にある
ミューオン検出器まで遅れて到達
- 直接検出が可能

ATLAS Run-3 トリガーシステム

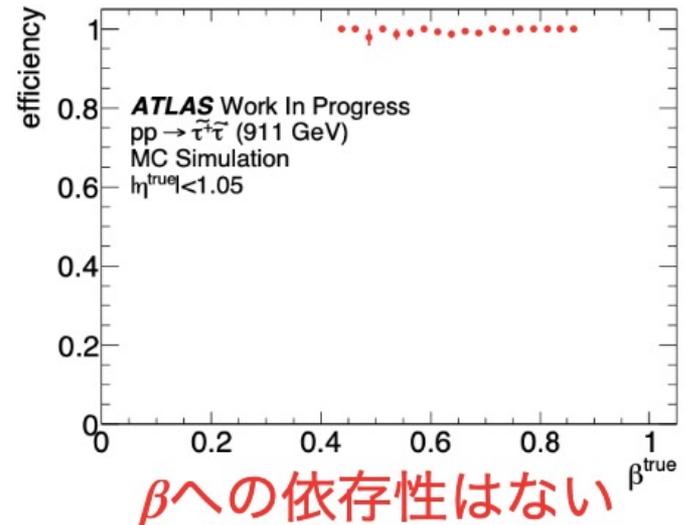
物理的に興味のある事象のみを選択する



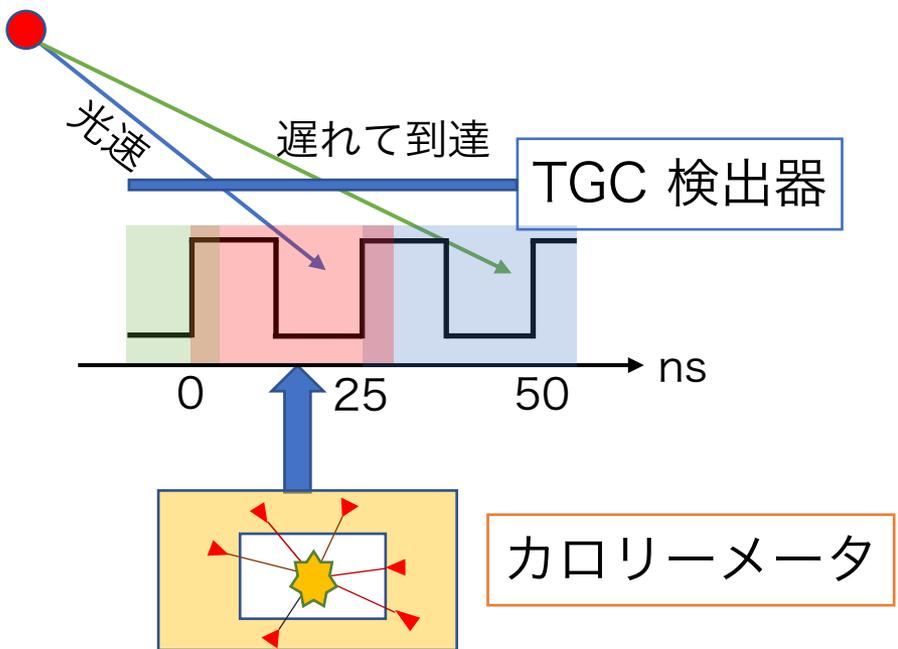
L1トリガー
カロリメータ
ミュオン
トポロジカル

➤ L1 トリガーにおける速度の遅い粒子のための研究

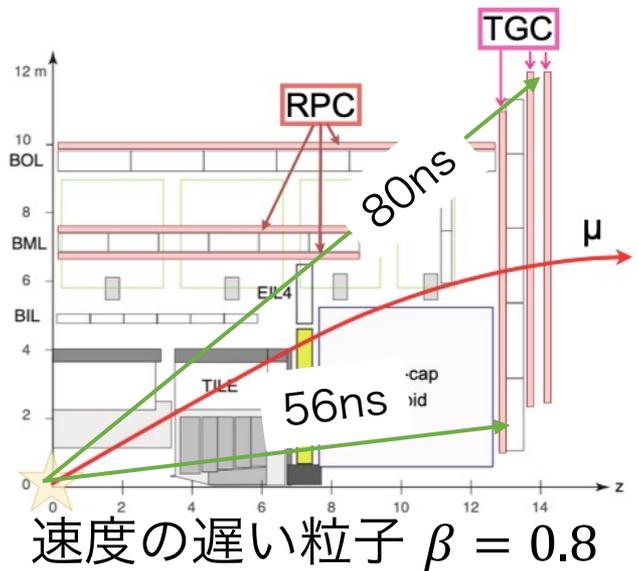
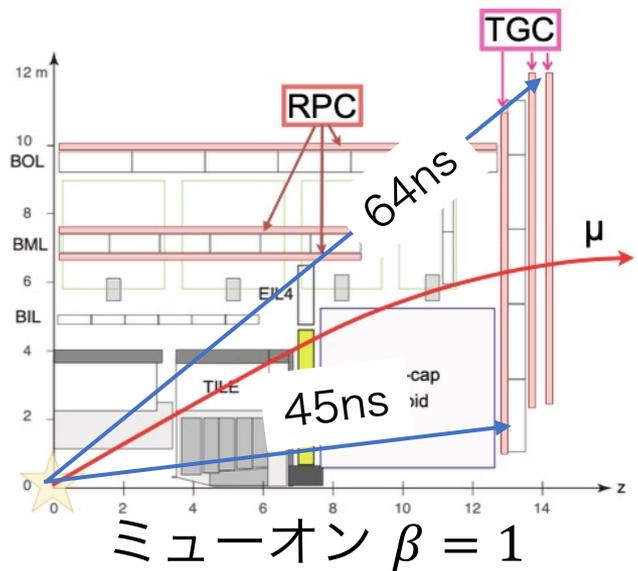
HLT トリガー効率 for stau 粒子



速度の遅い粒子のためのトリガー



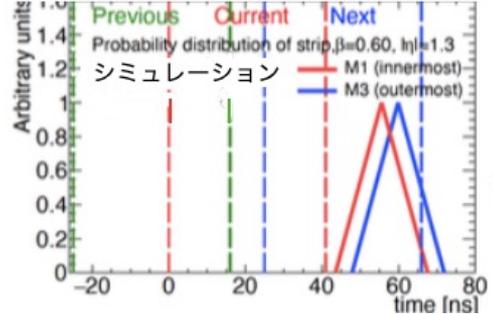
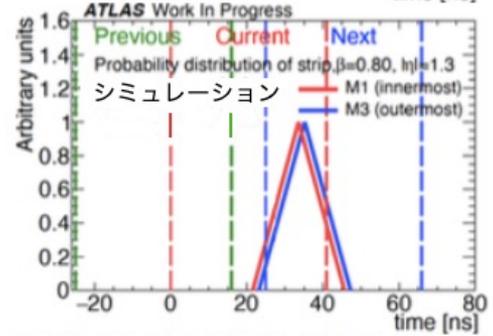
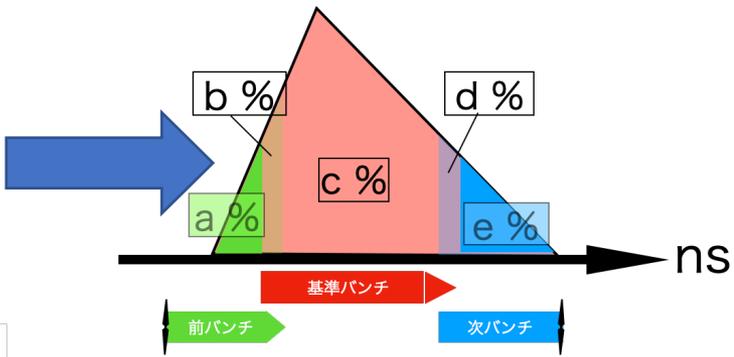
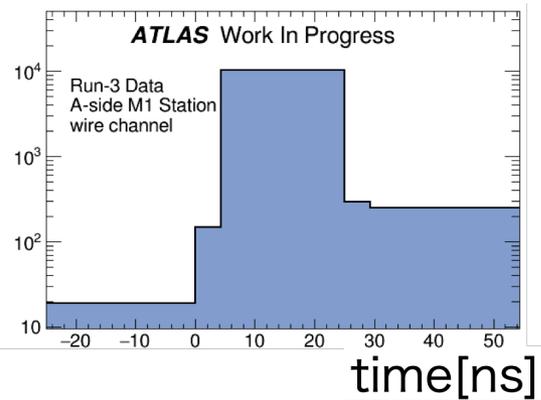
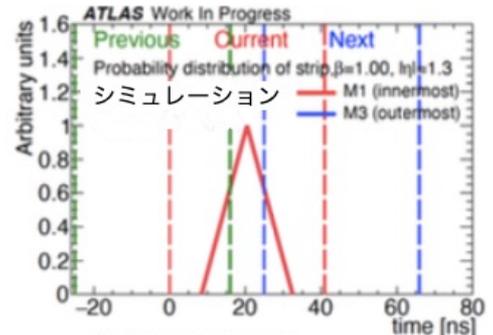
- 基準バンチにカロリメータの信号を要求
- 次バンチに遅れてきた信号をトリガーする



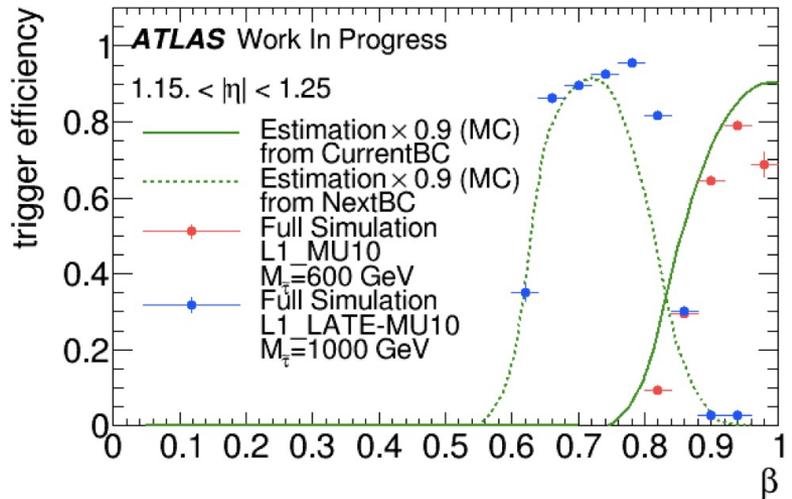
速度の遅い粒子のためのトリガー効率の見積もり

- 新物理探索における解析のために実データにおけるトリガー効率の測定が必要

確率密度分布を定義

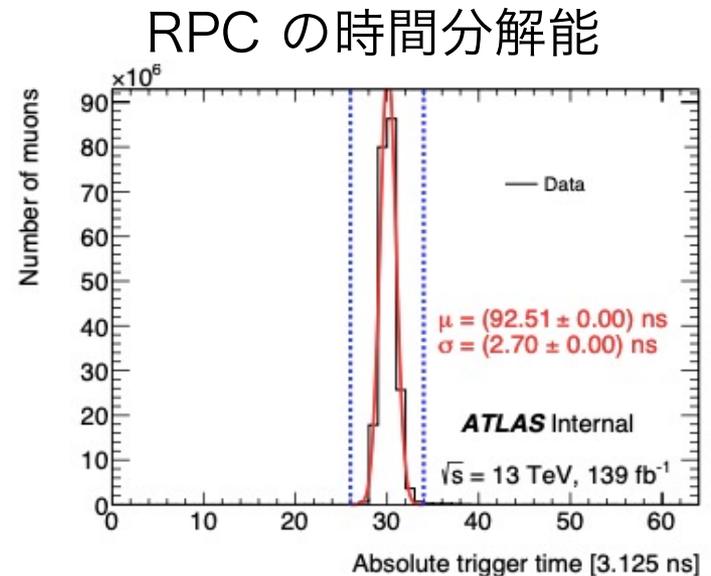
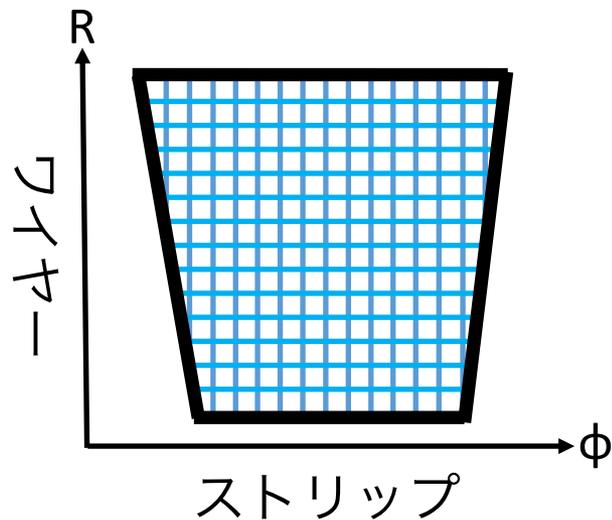


速度βに依存したトリガー

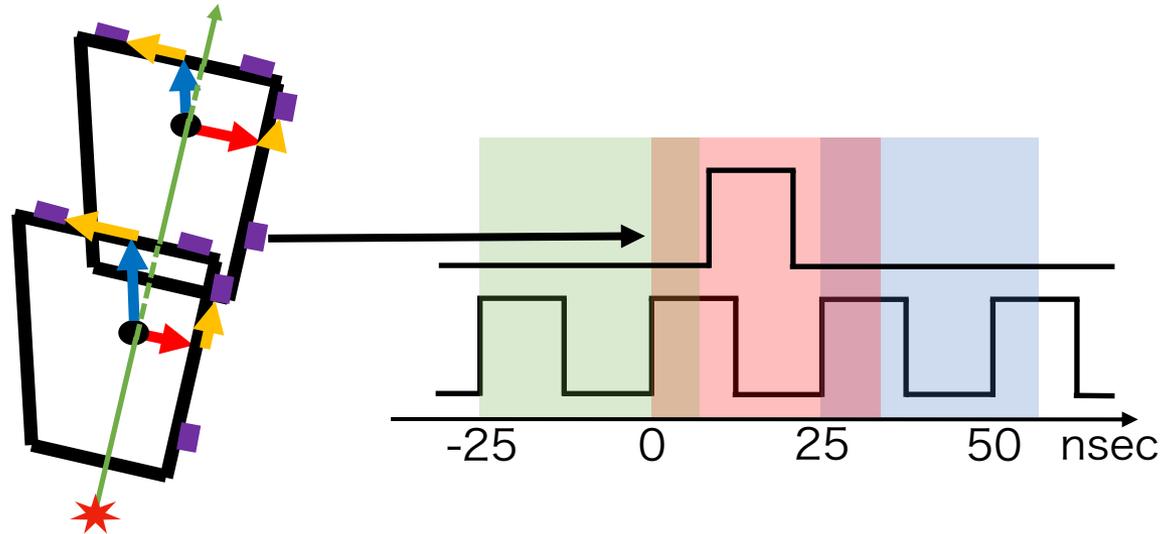


TGC検出器における 速度の遅い粒子のためのトリガー

- TGC 検出器はクロックを跨ぐような時間分布を取得可能
 - トリガー信号の前後のクロックの情報も取得している
- クロックの切り替わるタイミング付近で到来する粒子に関しては数nsecのずれが検出効率の低下に繋がる
 - ▶ 詳細なタイミング設定が必要

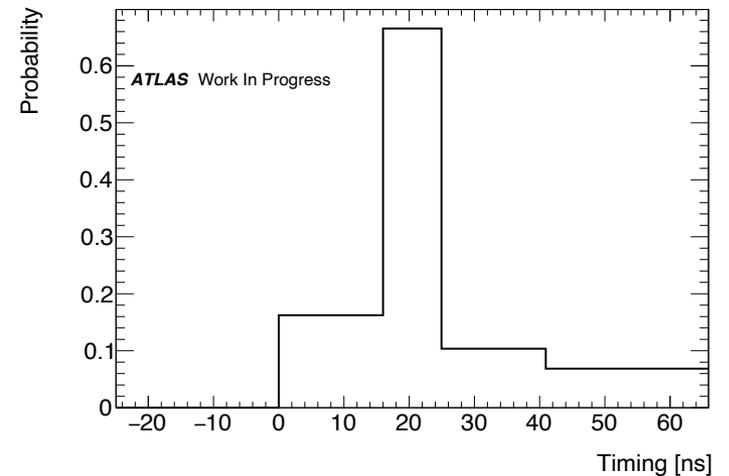


TGC検出器 タイミング設定



- TGC検出器はヒットした衝突の前後の情報も読み出す
- ゲート幅はLHCクロック25nsよりも大きい

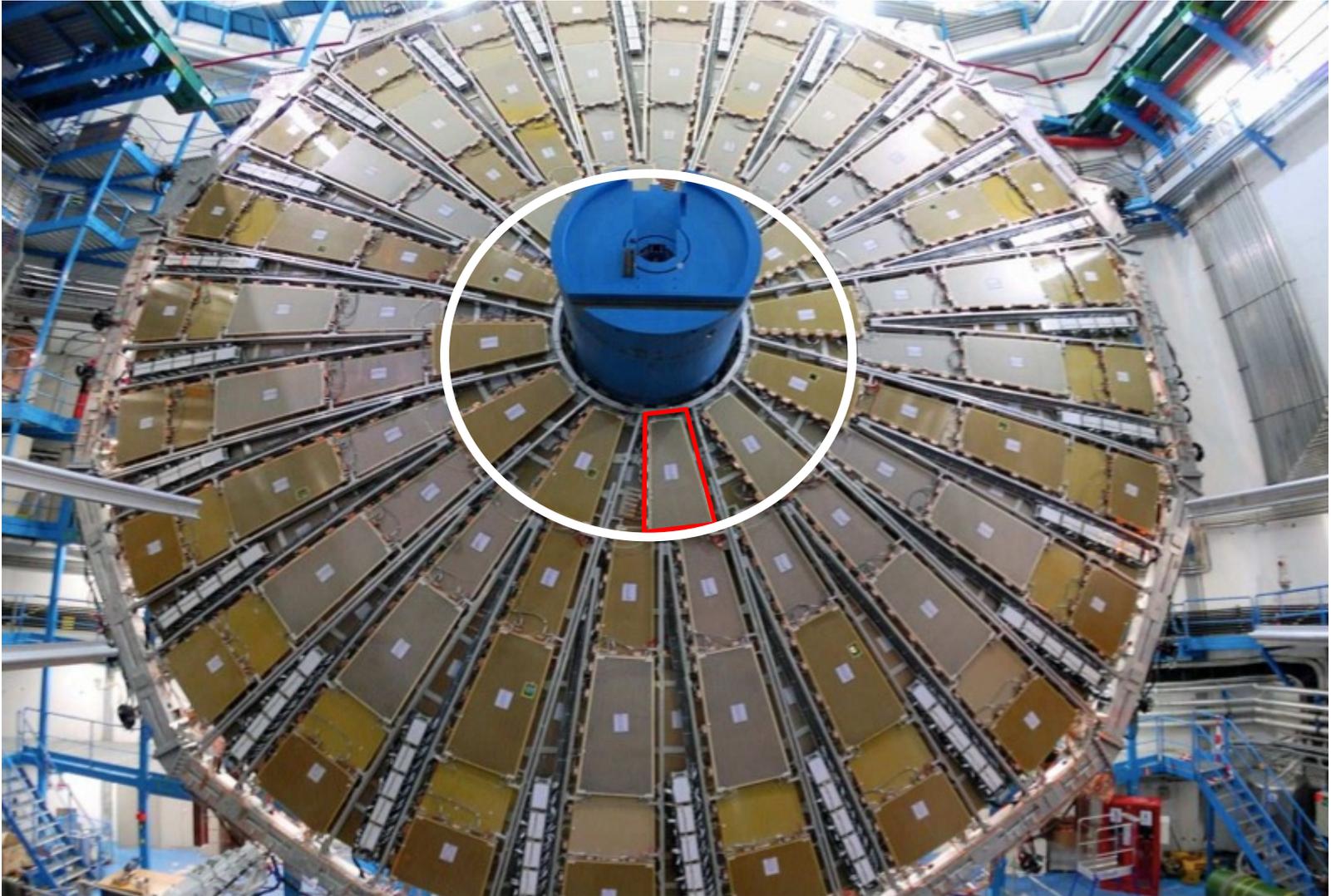
ある1チェンバーのタイミング



	ゲート
BW ワイヤー	29.32 ns (26 ns + 4 × 0.83 ns)
BW ストリップ	40.94 ns (26 ns + 18 × 0.83 ns)
SW ワイヤー	33.47 ns (26 ns + 9 × 0.83 ns)
SW ストリップ	45.09 ns (26 ns + 23 × 0.83 ns)

TGC フォワード領域

- ビーム軸に近い領域($\eta > 1.9$)

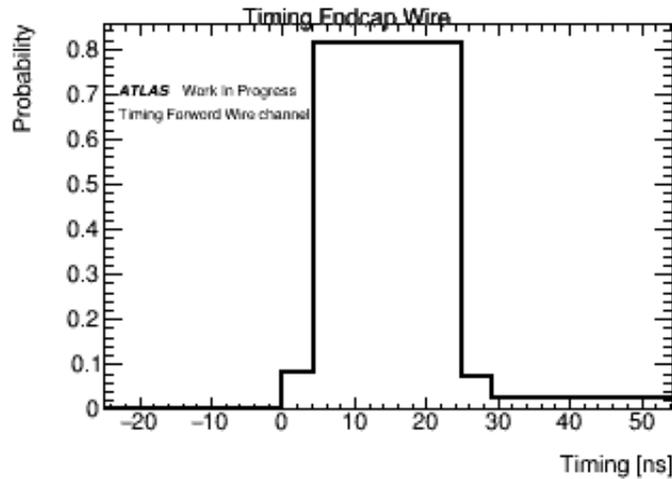


TGC フォワード領域 の遅延

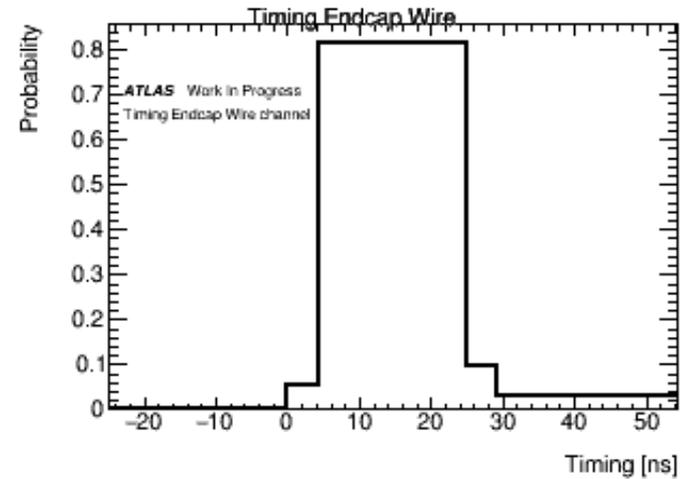
- フォワード領域のストリップ読み出しが遅れている

ワイヤー

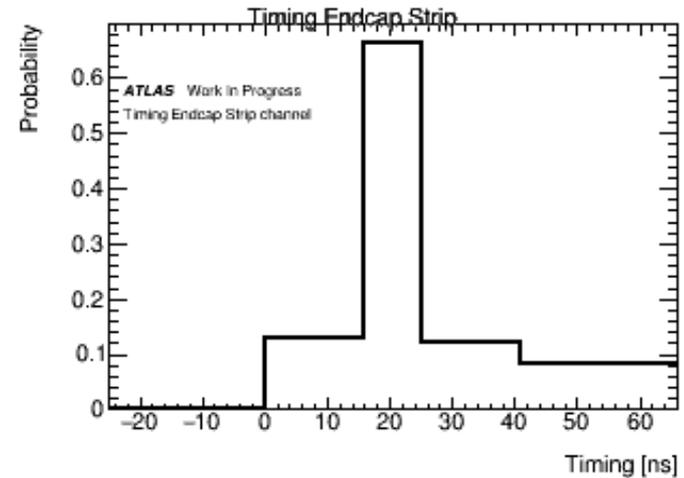
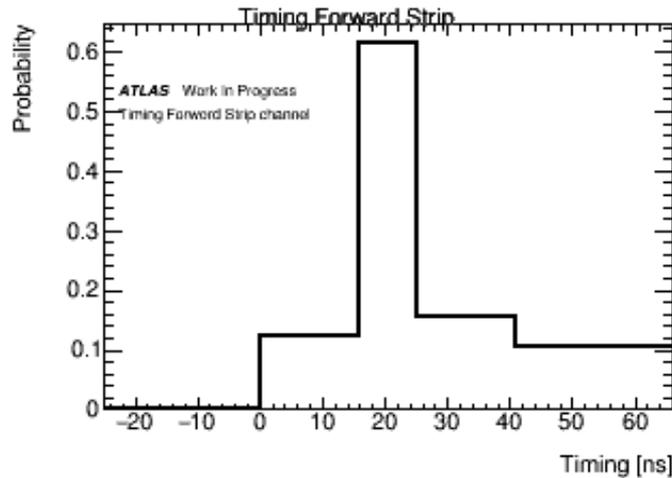
フォワード領域



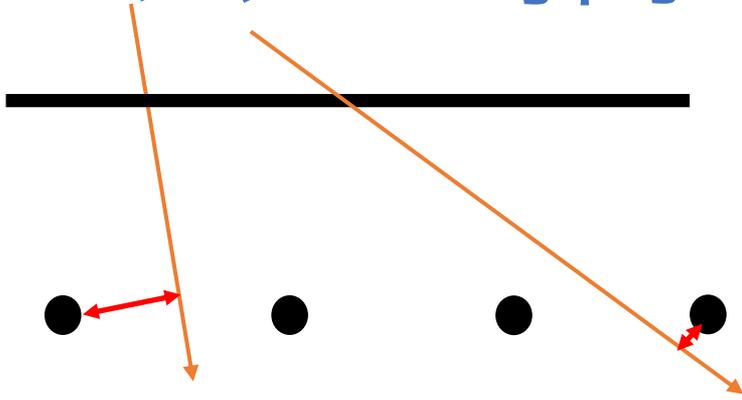
エンドキャップ領域



ストリップ



ジッター一時間の計算



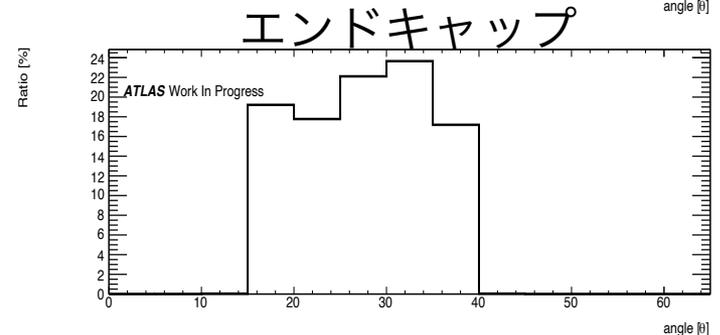
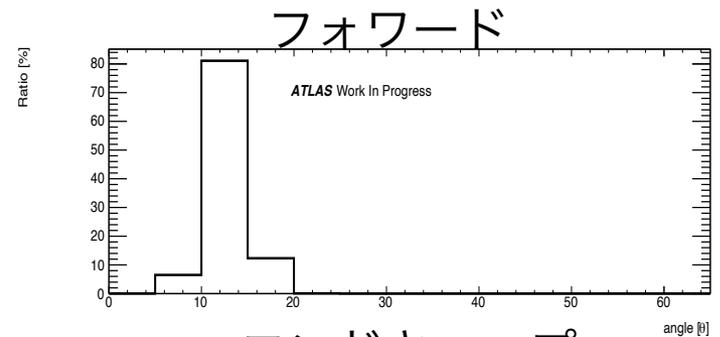
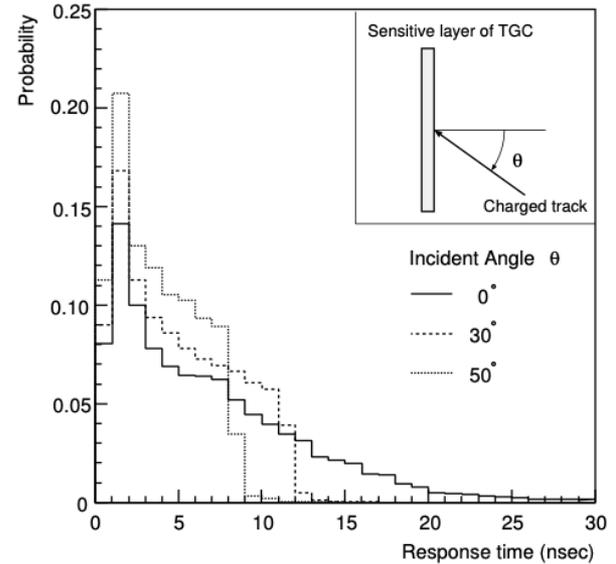
入射角度が小さい

➤ ドリフト時間が大きくなりやすい

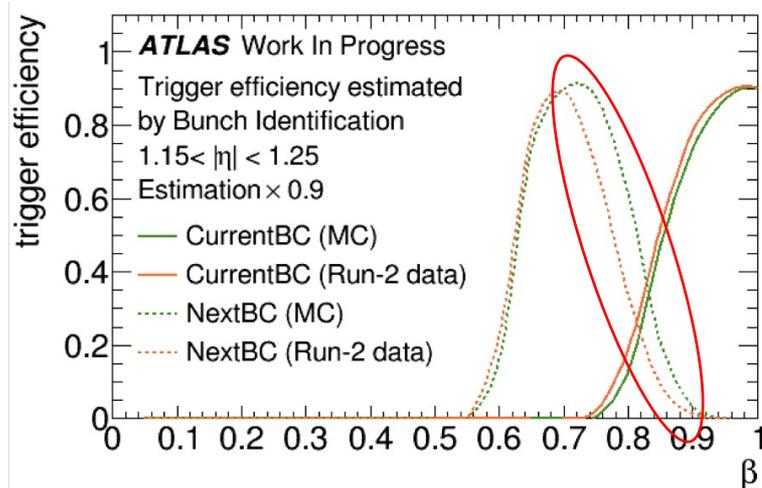
- フォワード領域は入射角度が小さくなりやすい
- オフラインミュオンをTGCへ外挿し入射角度を計算
- ビームテスト結果を利用し、ジッター分布を算出

➤ ジッター時間を考慮したタイミング設定が必要

ATL-SOFT-PUB-2007-001
過去のビームテストの結果



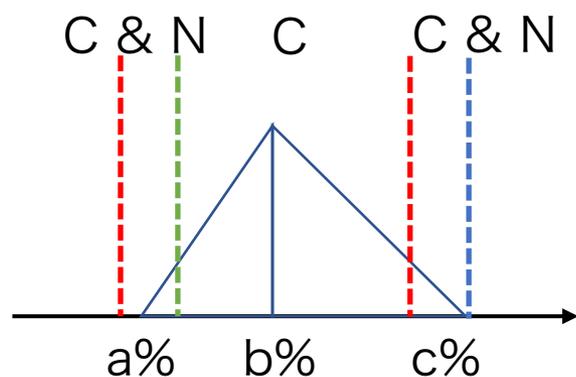
速度の遅い粒子のための トリガー効率の見積もり (Run 2)



- シミュレーションと実データによる見積もりはおおよそ一致を示す
- バンチ判定から速度に依存したトリガー効率を算出する方法を確立

• MCと実データの不一致の部分

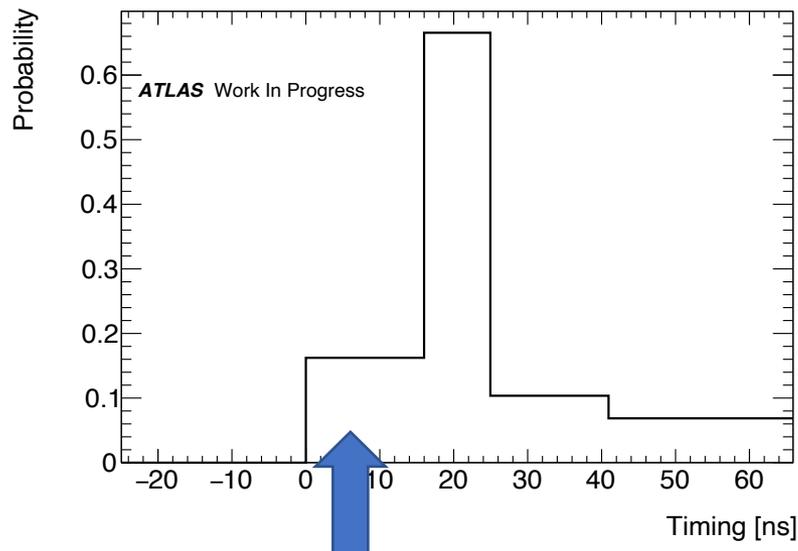
- そもそものバンチ識別が異なる
 - MCシミュレーションが実際のデータを正しく再現しておらず、MCは基準バンチの割合が高い
- 前バンチの情報のないデータの使用
 - 確率密度分布による系統誤差 (不定性)



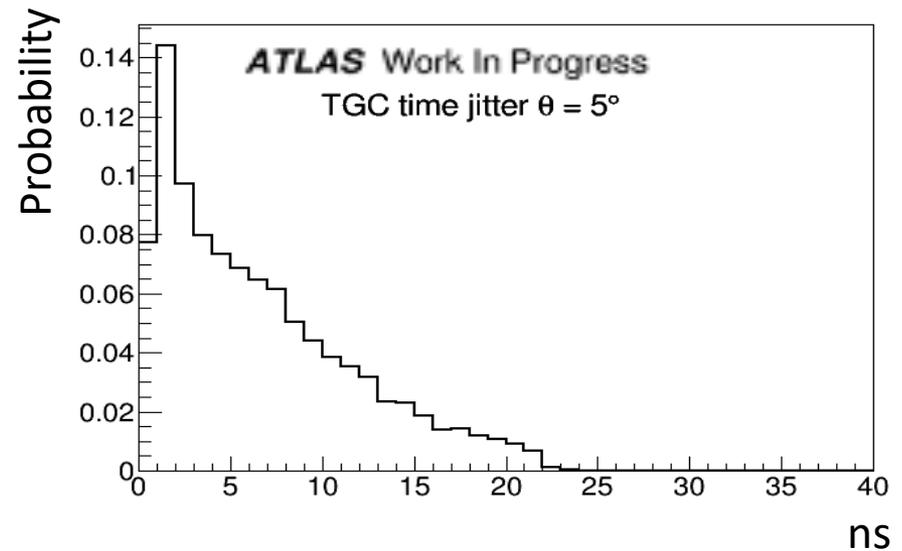
確率密度分布を三角形に定義

速度の遅い粒子のための トリガー効率の見積もりの改善点

- 前バンチの情報を加えたタイミング分布を用いる
 - MCのタイミングのずれの改善
- 確率密度分布の再定義
 - ジッター分布にヒット位置によるToFや伝播時間を考慮した計算を加えたより詳細な確率分布を定義する
 - P & C, C, C & N → P, P & C, C, C & N, N の割合の一致を見る

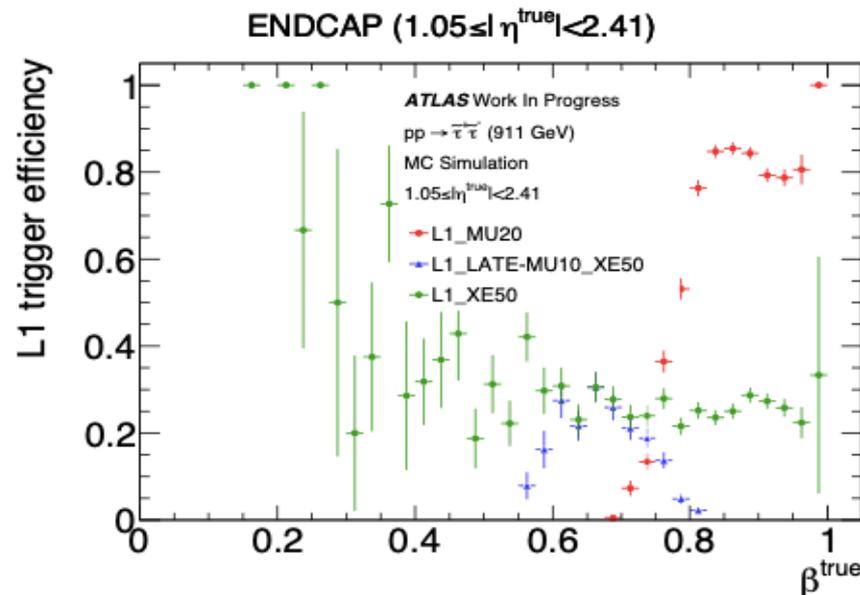


前バンチかつ基準バンチ



MET トリガーによる効率の低下

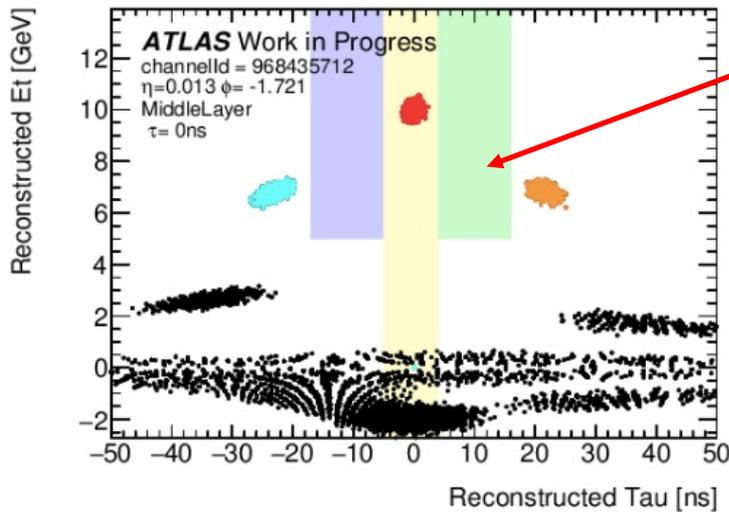
- カロリーメータではMissing Transverse Energy Trigger (MET)を利用している
 - (横方向エネルギー)の不均一さを測定
 - 基準バンチのタイミングに要求
- METトリガーのトリガー効率が30%ほどあるため、速度の遅い粒子のためのトリガー効率も下がる
- METトリガーを利用しない新たな方法を考えたい



展望

- LAr カロリメータ検出器のアップグレード

- 粒度が細かくなり通過する荷電粒子の位置をより詳細に検出可能
- タイミングの遅れた信号をL1 トリガーシステムに送信可能に



6~18 ns で遅れを識別
開発中のトリガー

カロリメータ

TGC検出器

到来方向のコインシデンスを取る

課題

日本物理学会 2021 秋季大会16pT4-3 古川真林

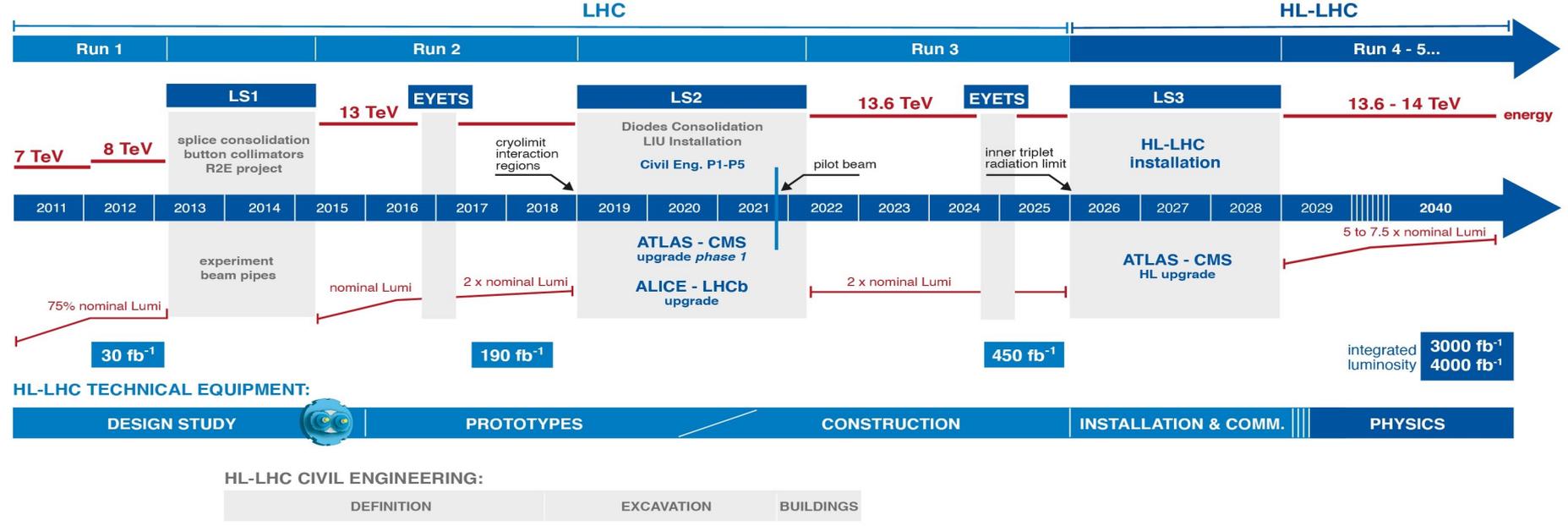
- ミューオンがカロリメータで落とすMIP信号を見る
- L1トリガーシステムでの処理の確立

まとめ

- 超対称性理論などでは、安定で質量の重い粒子が存在する
 - 外層にあるTGC検出器まで遅れて到達する
 - 速度の遅い粒子のためのトリガー
- TGC検出器のより詳細なタイミング設定が重要となる
 - フォワード領域において、タイミングが遅れやすい
 - 入射角度によるタイミング分布の広がりがある
 - 位置を考慮した最適な遅延時間を実装する必要がある
- TGC検出器の特性により、LHCクロックをまたぐようなタイミング分布を取得可能
 - 速度の遅い粒子のためのトリガーの実データを用いたトリガー効率を見積もることができる
 - Run 3 で取得できる前バンチの情報を用いる
 - ジッター分布を利用して詳細なタイミング分布を計算する

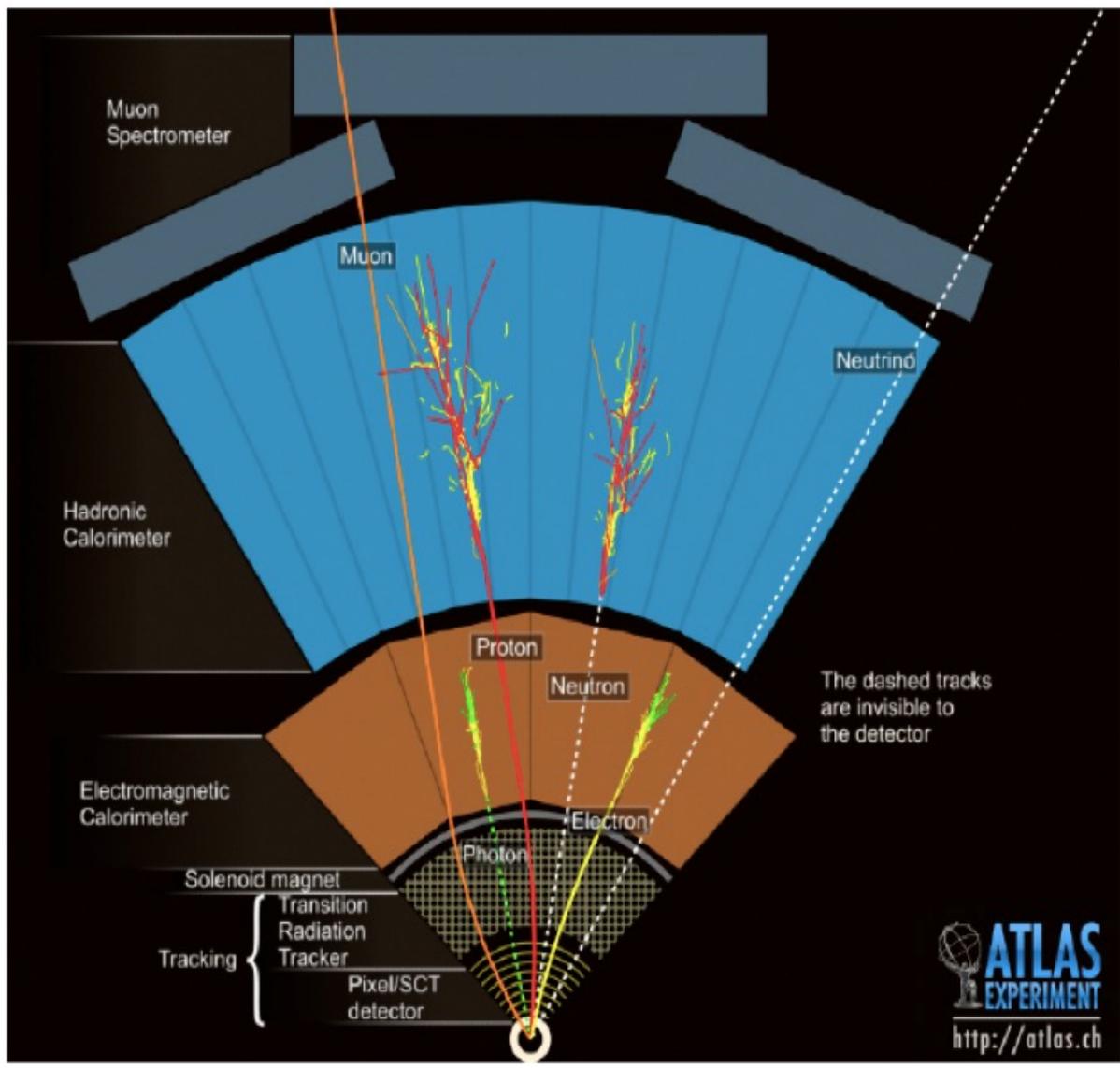
Back up

LHC 運転稼働状況



- 2008年：稼働開始
- 2012年：標準模型の最後のピースであるヒッグス粒子を発見
 - ノーベル賞
- 2019年-2021年：休止(Phase-1 upgrade)
- 2022年7月：第3期運転が稼働開始
- 2029年：さらにビーム強度、輝度を高める

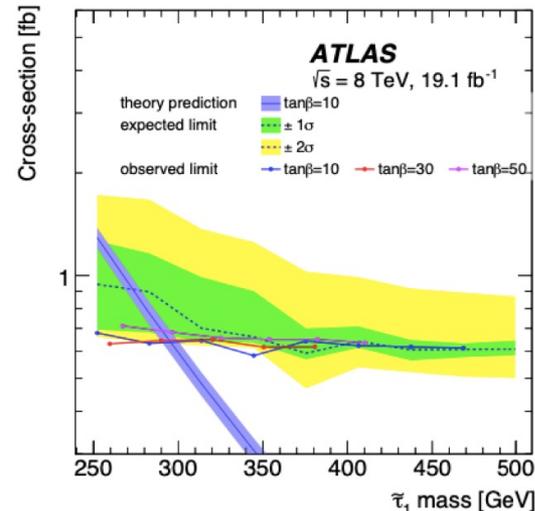
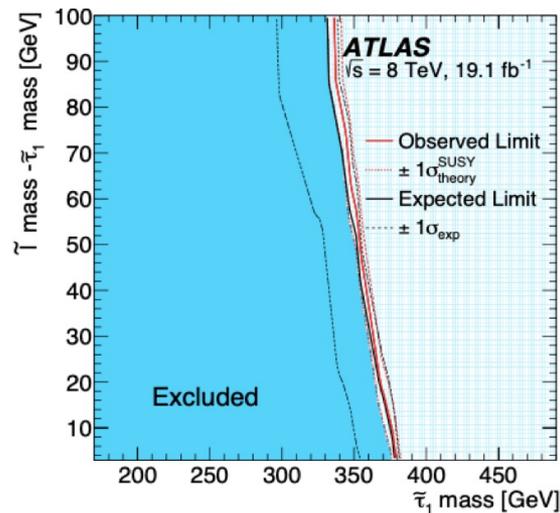
イベントディスプレイ



SUSY (SUper SYmmetry)

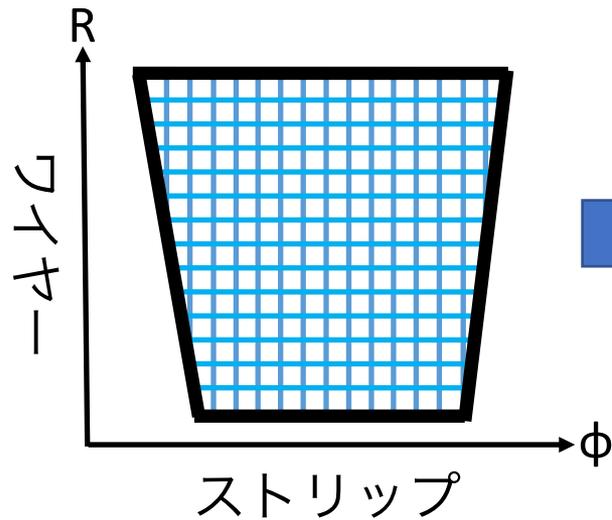
- ゲージ階層性問題の解決策として提案されている
- フェルミオンとボソン間の対称性を説明するを標準理論を拡張したもの
- stau粒子の探索
 - 約 までの質量制限が課せられている
 - 粒子質量と速度の関係

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{pc}{E} \quad E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

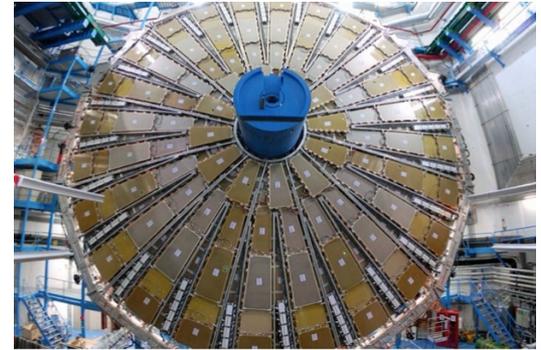


TGC (Thin Gap Chamber)検出器

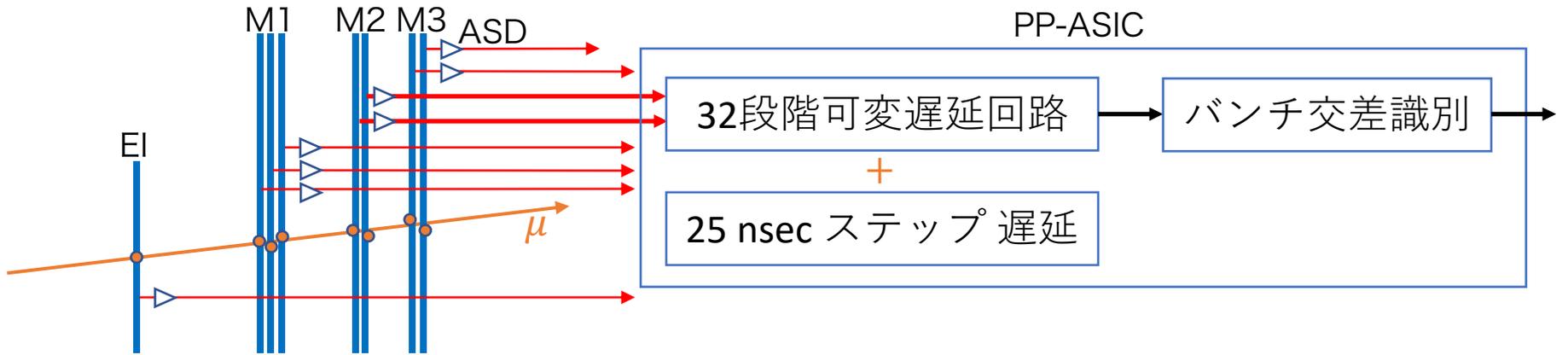
エンドキャップ部のミュオン検出器



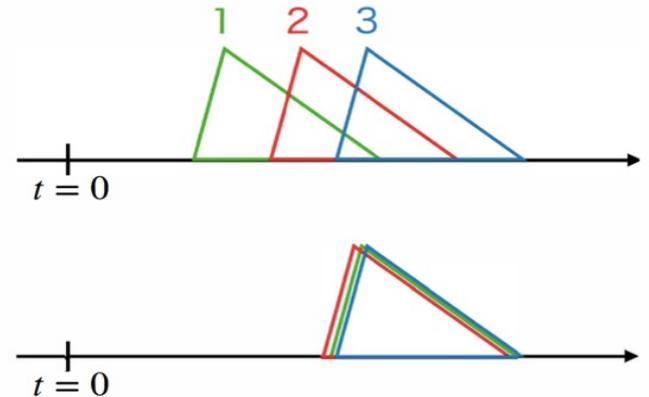
円状に配置



TGC検出器 信号読み出し

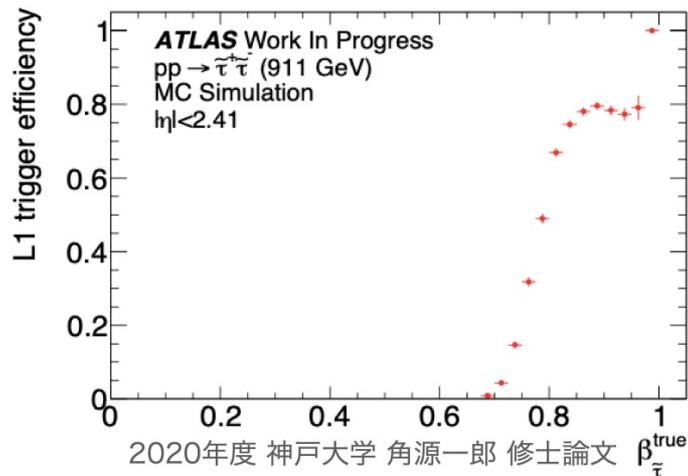
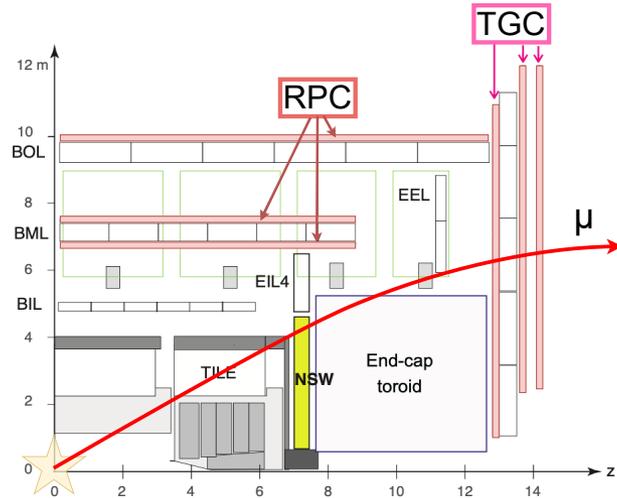


- 生の電流信号をASDで電圧信号に変換、増幅
 - ASD 1枚あたり16ch
 - LVDS信号を出力
- PP-ASICで0.83 nsごとの遅延をかけタイミングを揃える
 - 2つのASDに対して共通した遅延



L1 シングルミュオントリガー

ミュオン検出器は最外層に位置



- ★ToFが存在
- ★ と仮定
- タイミングを揃える
- ★高い運動量のミュオンを検出
 - ➡L1トリガー発行
- ★粒子の速度が遅い場合
- ToFの影響で効率が落ちる
- ➡シングルミュオントリガーでは遅い荷電粒子に対して不十分

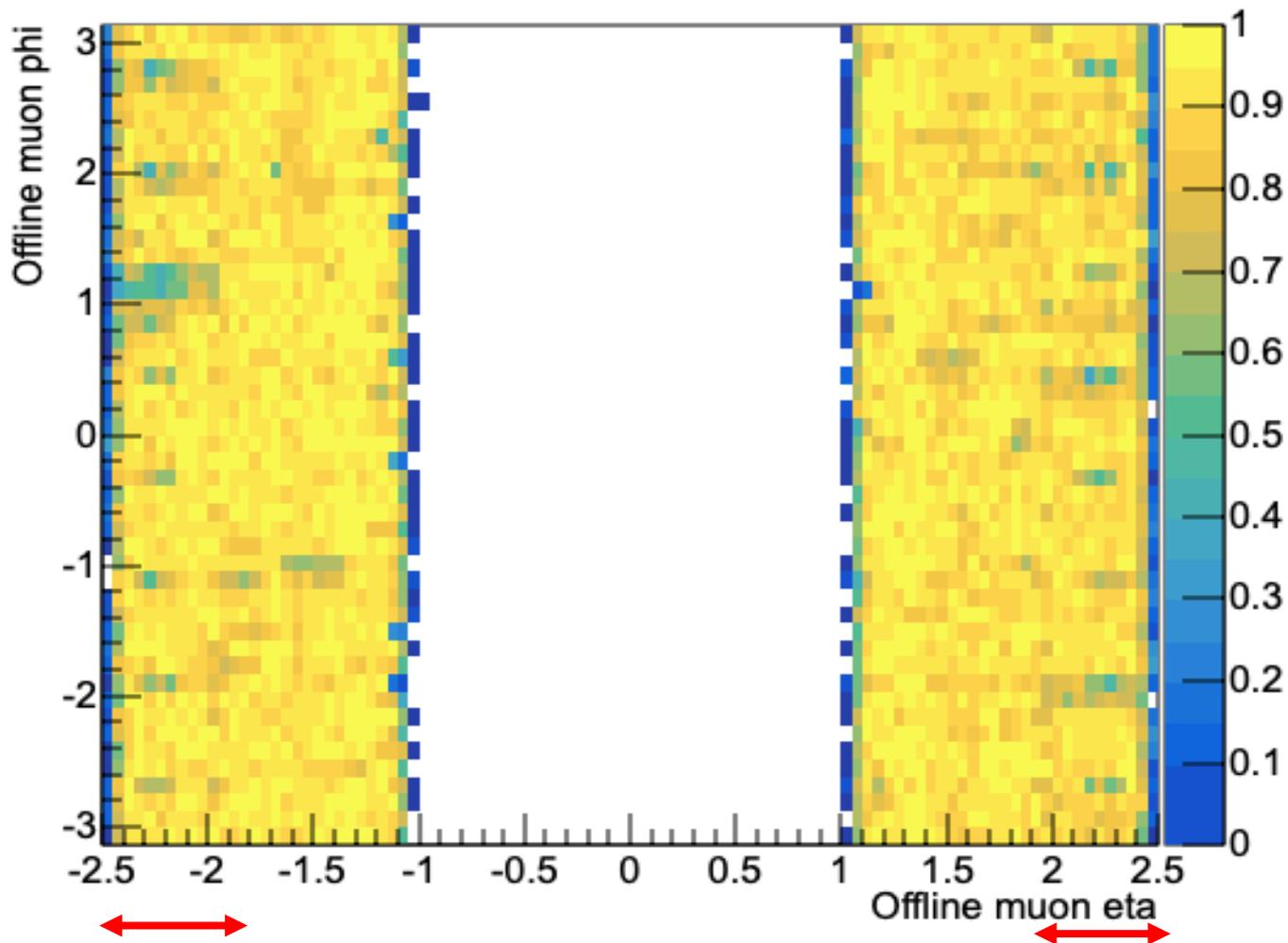
TGC デジタイズ時間

衝突が起きてからTGCの信号が読み出されるまでの時間

- ToF (Time of Flight) : 衝突から検出器まで粒子が飛ぶ時間
- ジッター時間 : 荷電粒子がガスを電離し電流信号となるまでにかかるドリフト時間による内在的なタイミングのふらつき
 - 検出器への入射角度ごとに異なる
- 信号伝播時間 :
 - ワイヤー及びストリップにおいて信号が伝播する時間
 - ケーブル長
 - センサーの端からチェンバーに沿ってASDに到達するまでの時間

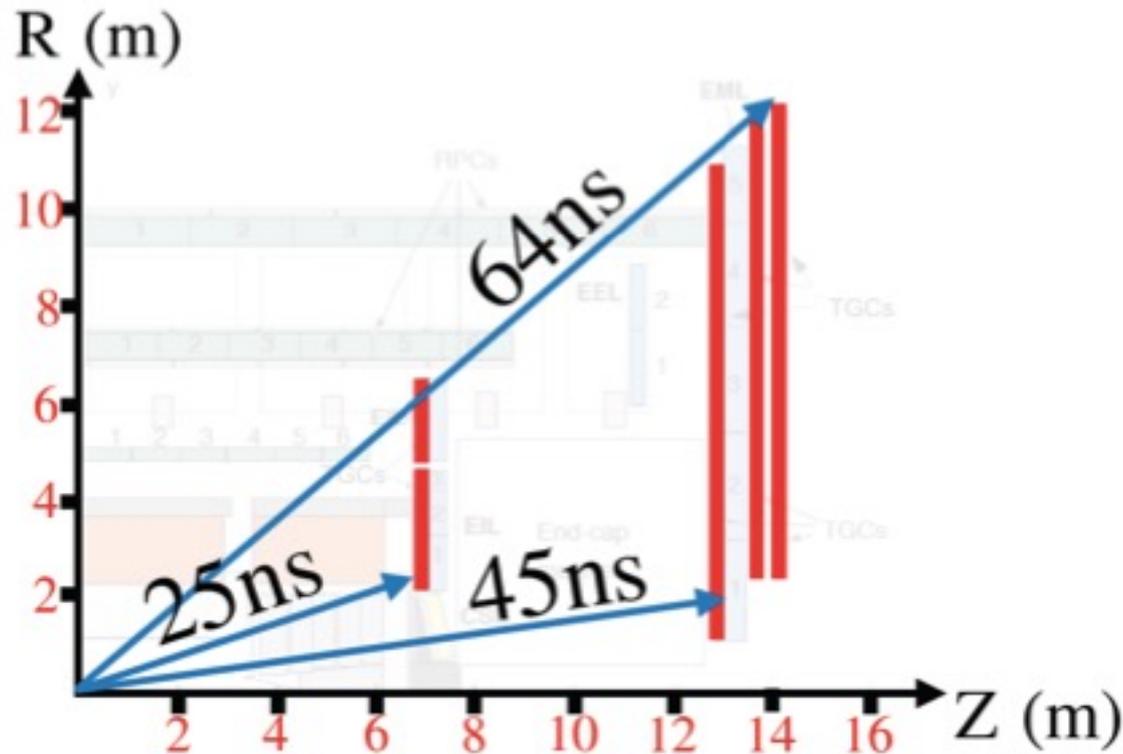
フォワード領域のトリガー効率

- トリガー効率の低下が問題となっている



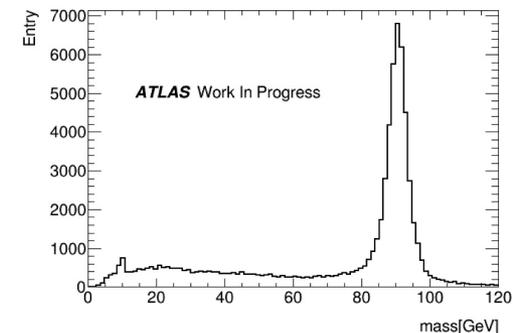
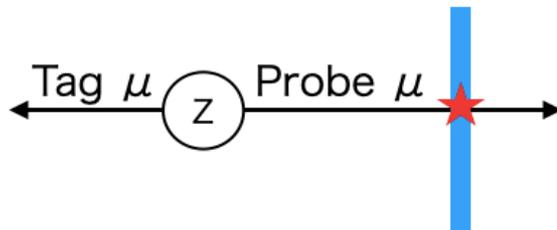
ToF (Time of Flight)の計算

- TGC検出器のヒット位置(x, y, z)座標により飛跡の長さを計算
 - $ToF = \text{飛跡長}/c$

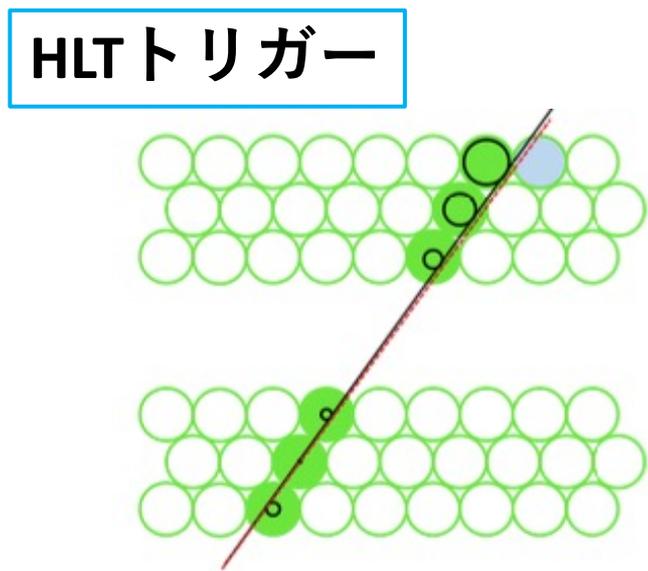
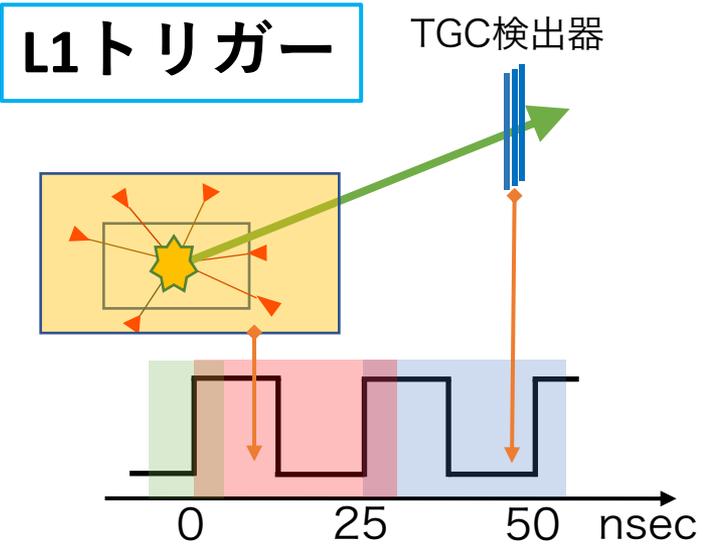


Tag and Probe 法

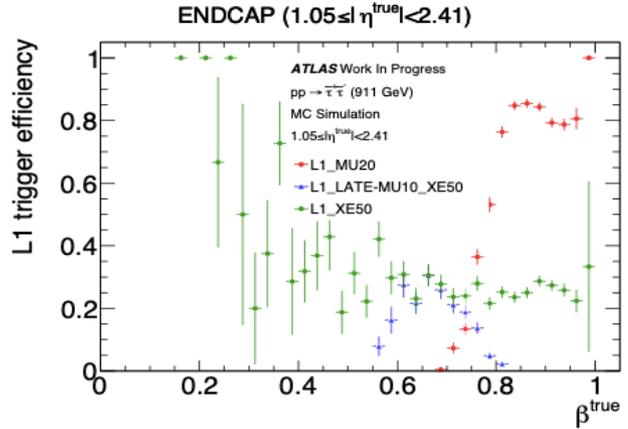
- Run 3 実験データを用いる
 - トリガーを通過した粒子の情報のみが保存されておりバイアスがある
- Probe ミューオンをTGC 検出器まで外挿し、TGC検出器のヒット位置とマッチングをとる
 - $Z \rightarrow \mu\mu$ 由来のミューオン候補を利用する
 - 1回のバンチ衝突に対し2つ以上の候補
 - 電荷が異符号
- 正しく再構成されたミューオンのうち一方をTagミューオンとする
- Tagミューオンがトリガーを通過したかどうかを判定
 - ➡もう一方をProbeミューオンとする
 - ➡バイアスに寄らずに解析に使用できる



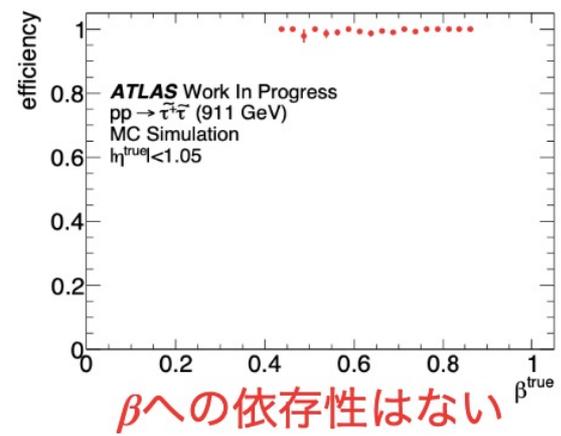
速度の遅い粒子のための トリガー効率



☆カロリメータとコインシデンス

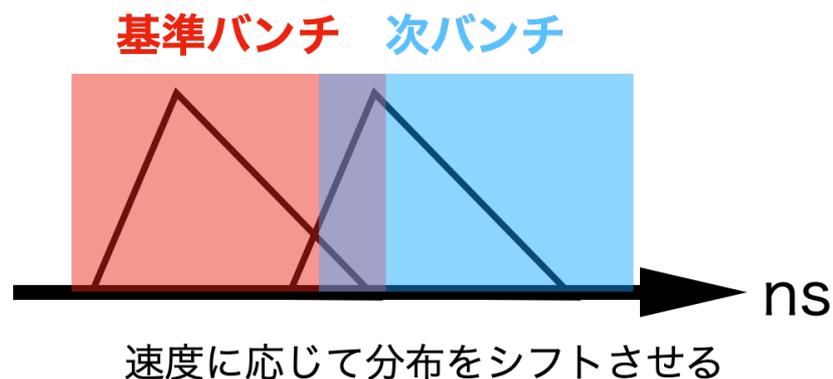


☆ToFに応じた飛跡の再構成



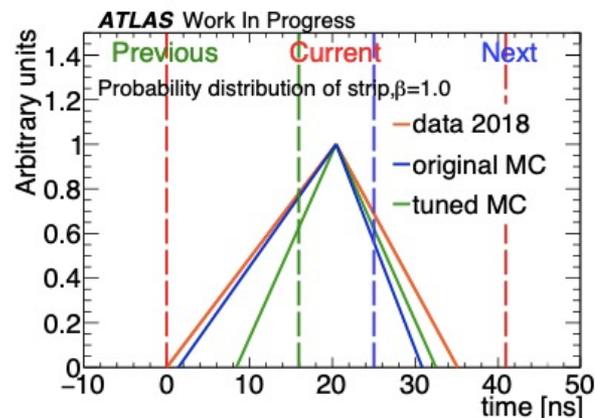
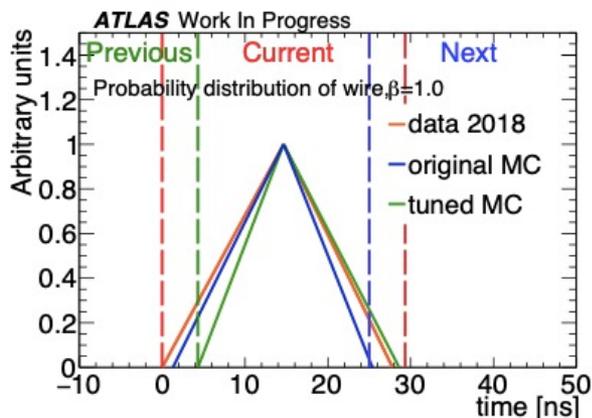
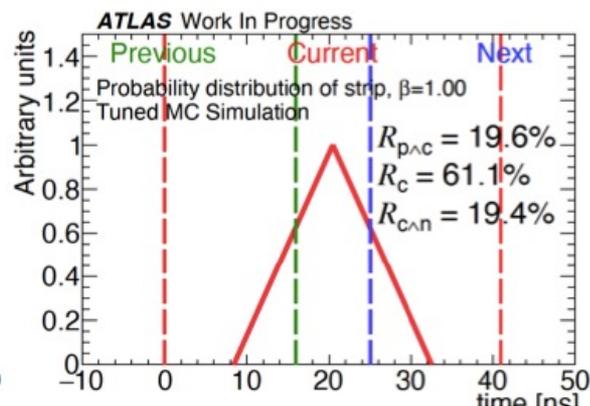
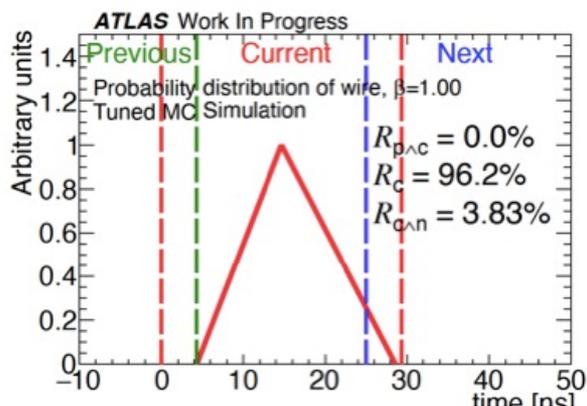
トリガー効率測定手法の開発

- ★最終目標：新物理探索における解析
 - 実データにおけるトリガー効率の β 依存性を測定
 - 実データとMCで効率の差異の補正が必要
- ★標準模型にはサンプルとなる速度の遅い粒子はない
 - 実データにおけるトリガー効率の直接測定は困難
 - 新たなトリガー効率の測定手法を開発する
- ミューオン検出器のヒットタイミングから
- バンチ識別の速度依存性を算出する
- 今回はTGC (Thin Gap Chamber)検出器における効率を算出する

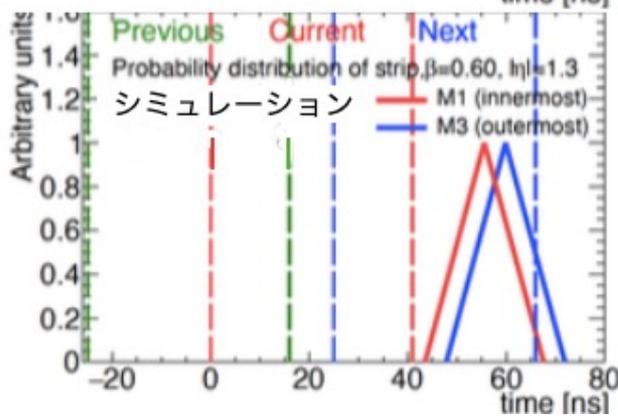
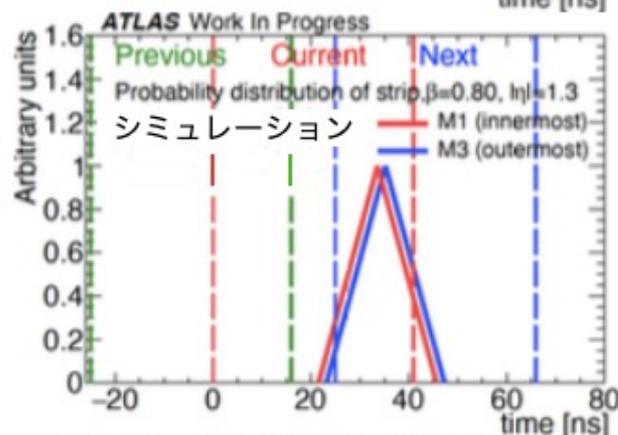
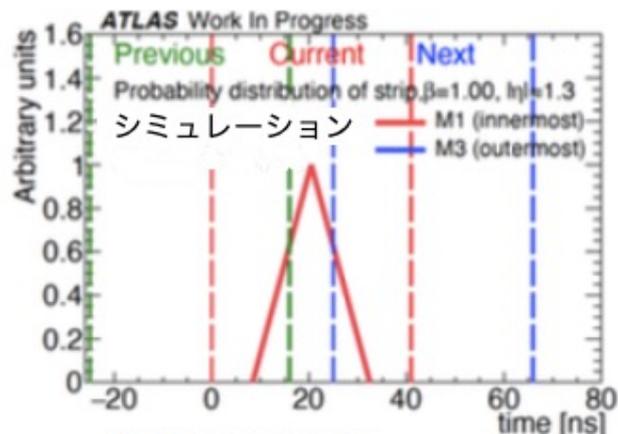


タイミング 確率密度分布の定義

- 三角形の頂点を基準バッチのゲートの中心にする
- PandC, C, CandNの割合を満たすように残りの2頂点を決定
- 前バッチの情報がないと左辺の頂点は0になる



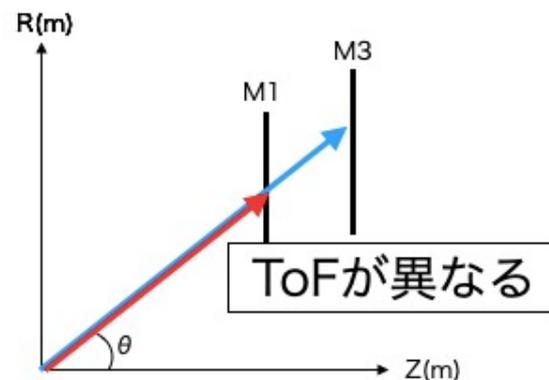
トリガー効率の算出



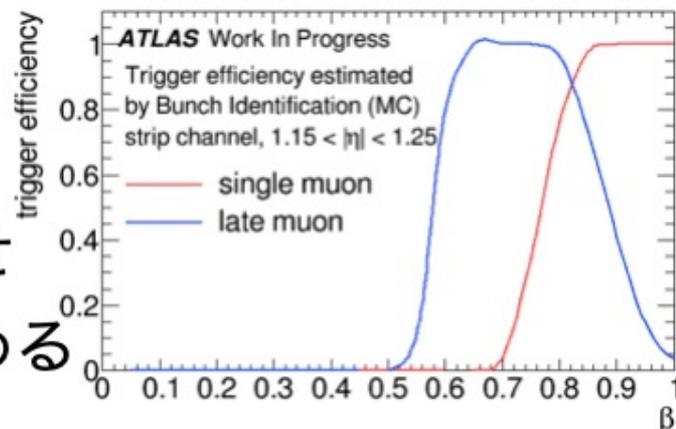
速度 β に応じてシフト

- ① データを用いて分布を定義する
- ② 速度に応じて分布をシフトさせ
ウィンドウに入った割合から効率を求める

- ③ M1とM3での
確率をかけ合わせる
入射角度に応じて計算



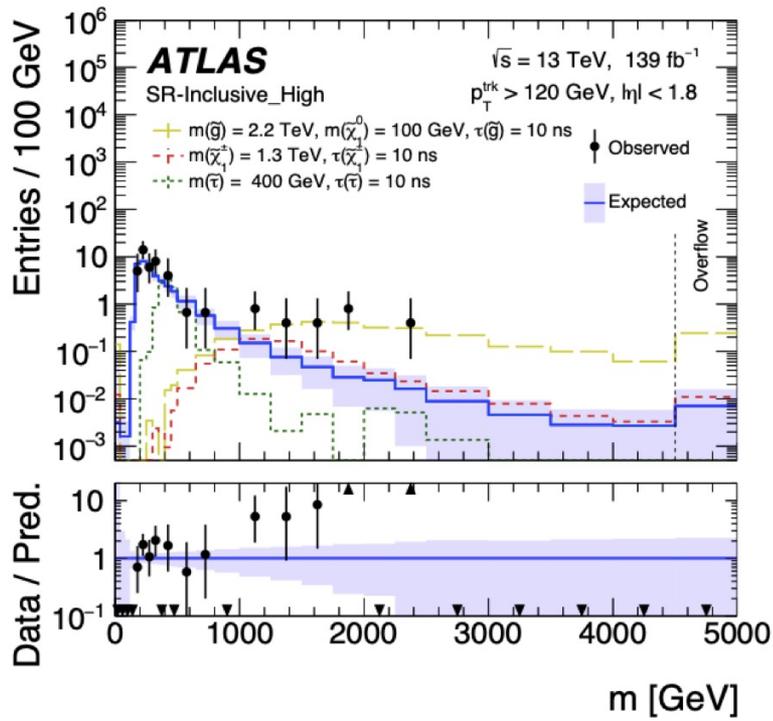
- ④ ワイヤーと
ストリップの
効率をかけ合わせ
全体の効率を求める



dE-dx 解析への貢献

- ベーテ・ブロッホの式
 - ピクセル検出器のdE/dxの解析

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K_Z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$



- ➡ 観測結果に期待値を超える領域 (エクセス)がある
- 時間情報を利用する
- ➡ 異なる速度の粒子を捉える

日本物理学会2022 秋大会
生出秀行 8aA431-5