

Run: 479439
Event: 301428960
2024-07-03 00:11:26 CEST

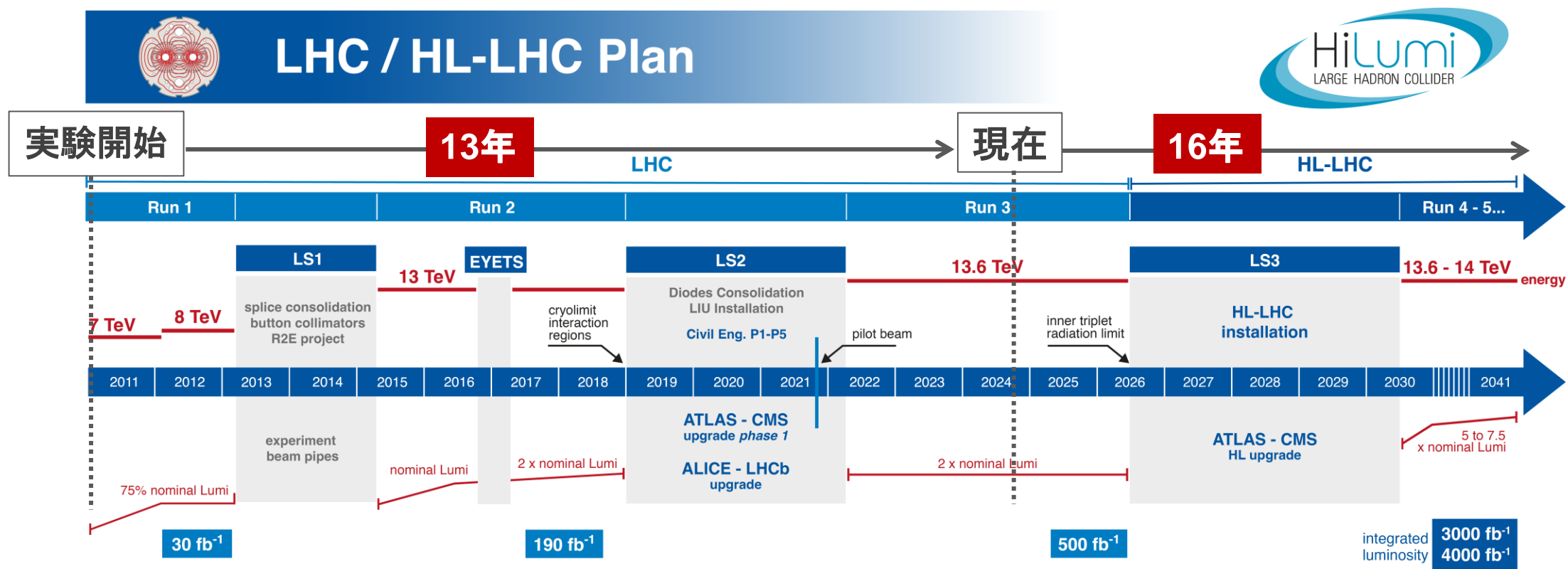
LHC-ATLAS Run3 実験 初段ミューオントリガー のインテグレーションと運転

齋藤智之 (東京大学, 素粒子物理国際研究センター ICEPP)

2024/11/19、計測システム研究会2024、東京大学



LHC-ATLAS実験 運転計画：“長期”プロジェクト



ATLASを最初に作ったレジェンド世代が実験現場から離れる時期で、ATLASグループ全体が現在過渡期。

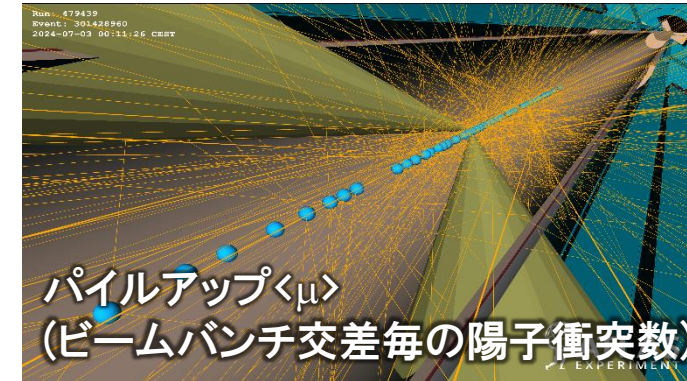
- 知識の伝達や後継の育成は絶対的に必要だが容易でない。長期プロジェクトの大きな課題。
- 次の世代を中心に現行Run3での改善を進めつつ、高輝度化の検出器アップグレード乗り越える

このような状況下で、進行中のRun3実験現場で最高性能を目指す奮闘を伝えたいです。

LHC 第3期運転 (Run3, 2022-)の性能向上

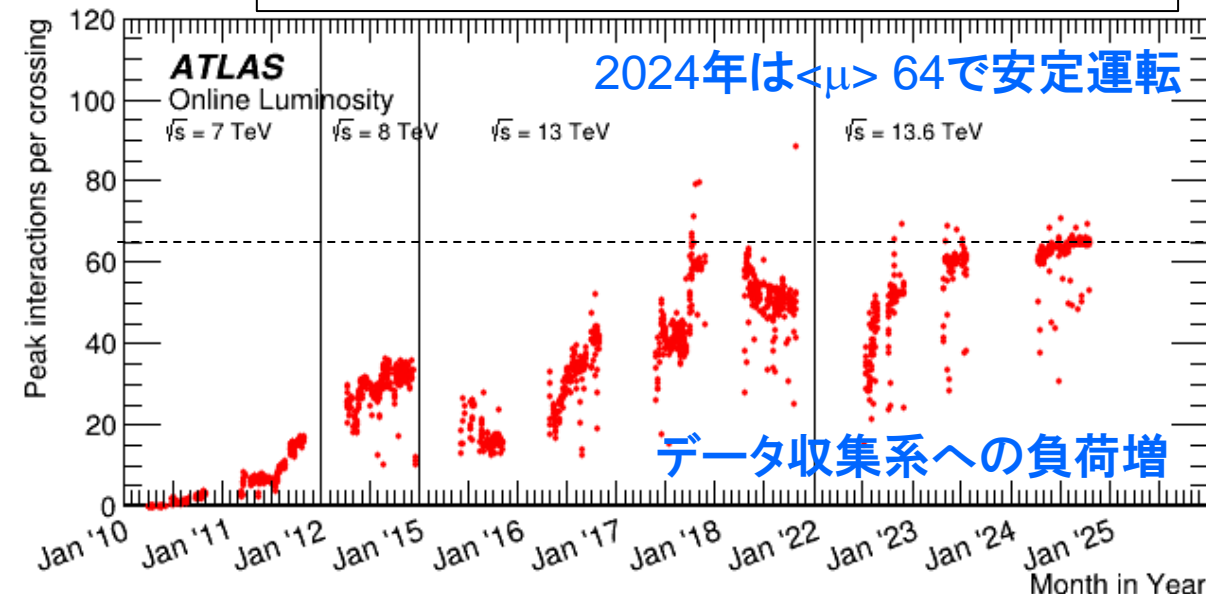
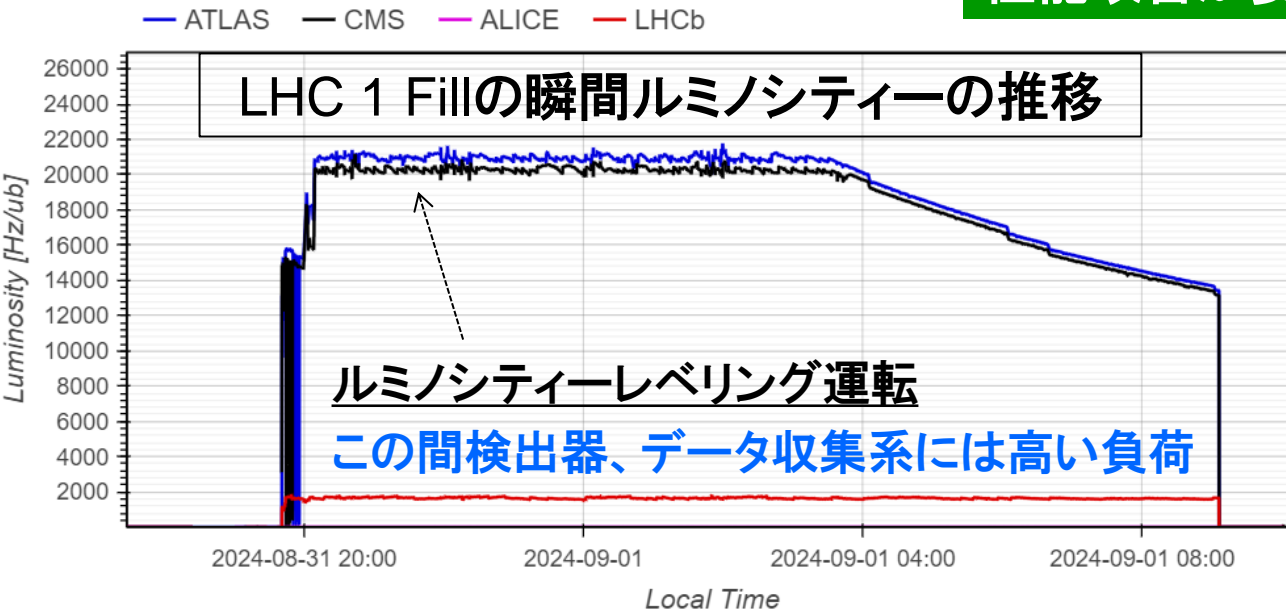
加速器アップグレードはすでに始まっている

- Injectorアップグレードでビーム強度 (ビームバンチ内の陽子数)増強
- 長時間高いルミノシティでの”レベリング”運転実現
 - 最初の数時間高いルミノシティ値を維持し積分ルミノシティ最大化
- パイルアップも年々増えている



ATLASデータ収集系の
性能改善が要求される

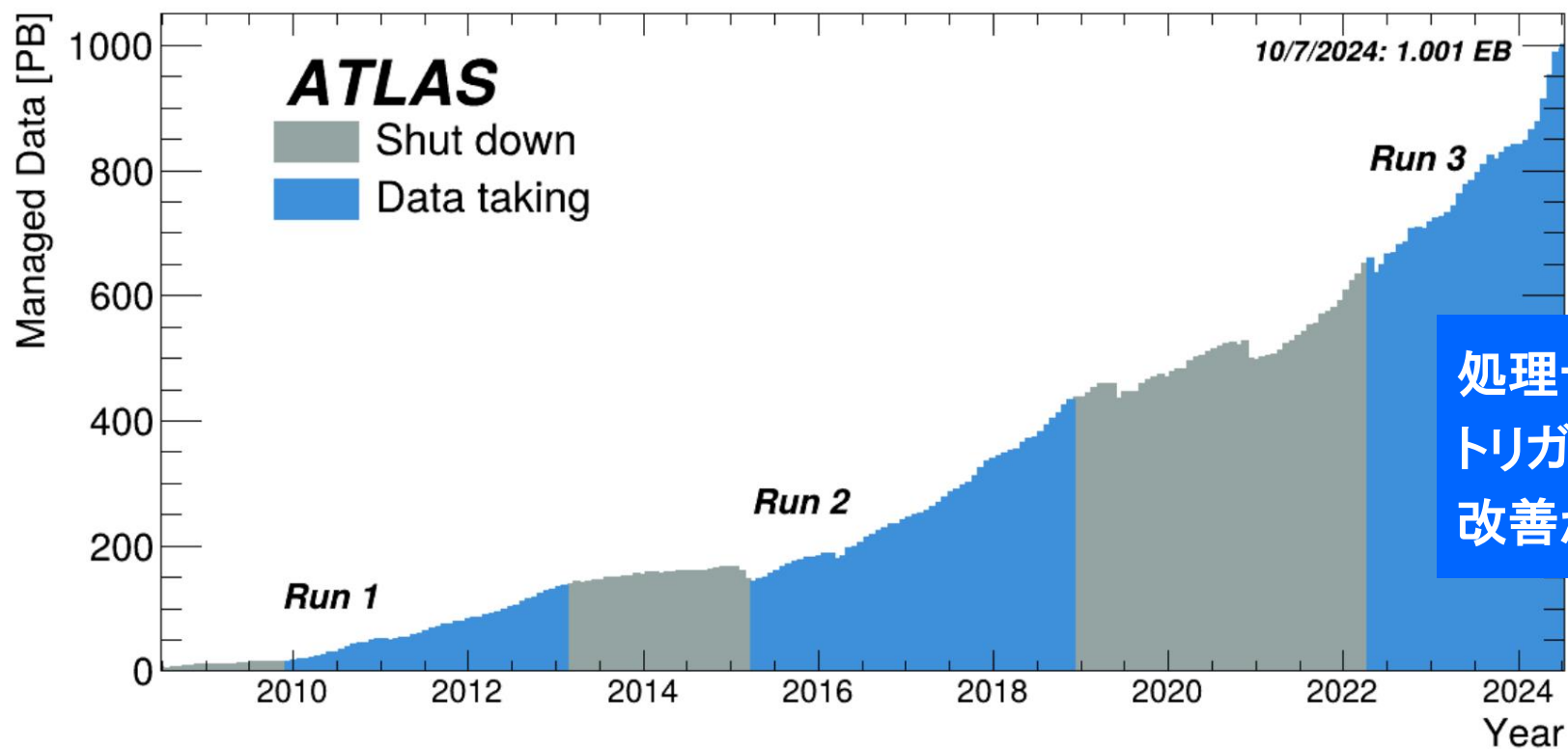
ATLASのピークパイルアップ値の推移



LHC-ATLASは莫大なデータ発生装置

1 Exabyte (Data+MC) に到達！

- 1事象サイズはO(MB) → 40 MHz x O(MB) ~ 100 TB/s というデータ発生
- このビックデータ処理のために、トリガー・データ収集系は高度な技術が要求される

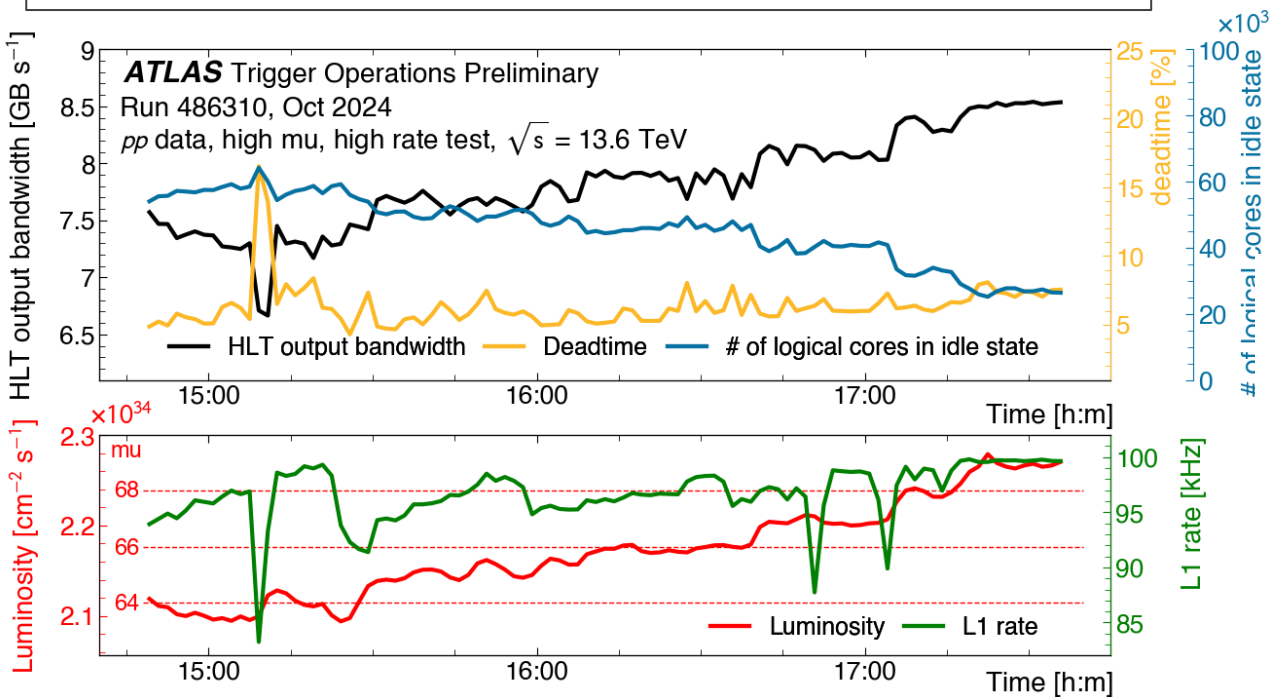


現状のATLAS運転性能の限界

通常ATLASは初段トリガーレート ~95 kHz で~5%のデッドタイムで運転

- デッドタイム主原因はフロントエンド上のバッファがオーバーフローするのを防ぐデッドタイム

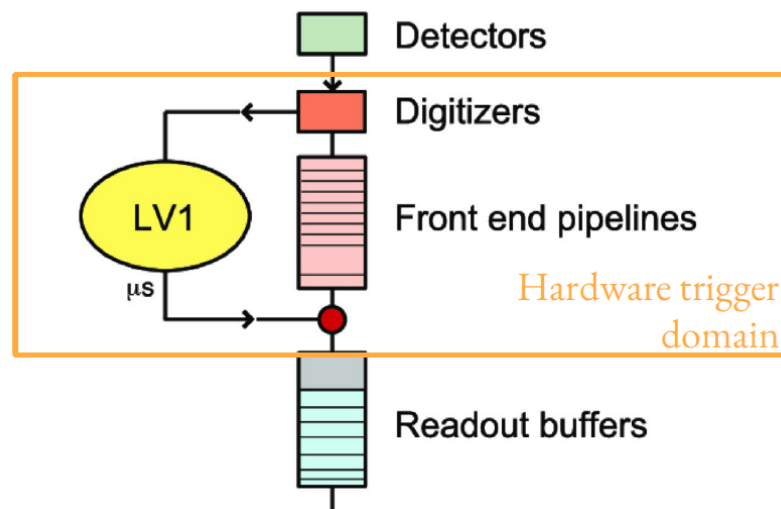
高負荷試験 (L1レートや $\langle\mu\rangle$ を増やして性能限界の理解)



L1レート増加とともにデッドタイム増

デッドタイム主原因

- 初段トリガー処理完了まで、各検出器のデータはフロントエンドのバッファに保持
- 高いトリガーレートでバッファの余裕度なくなり、支配的なデッドタイムとなる

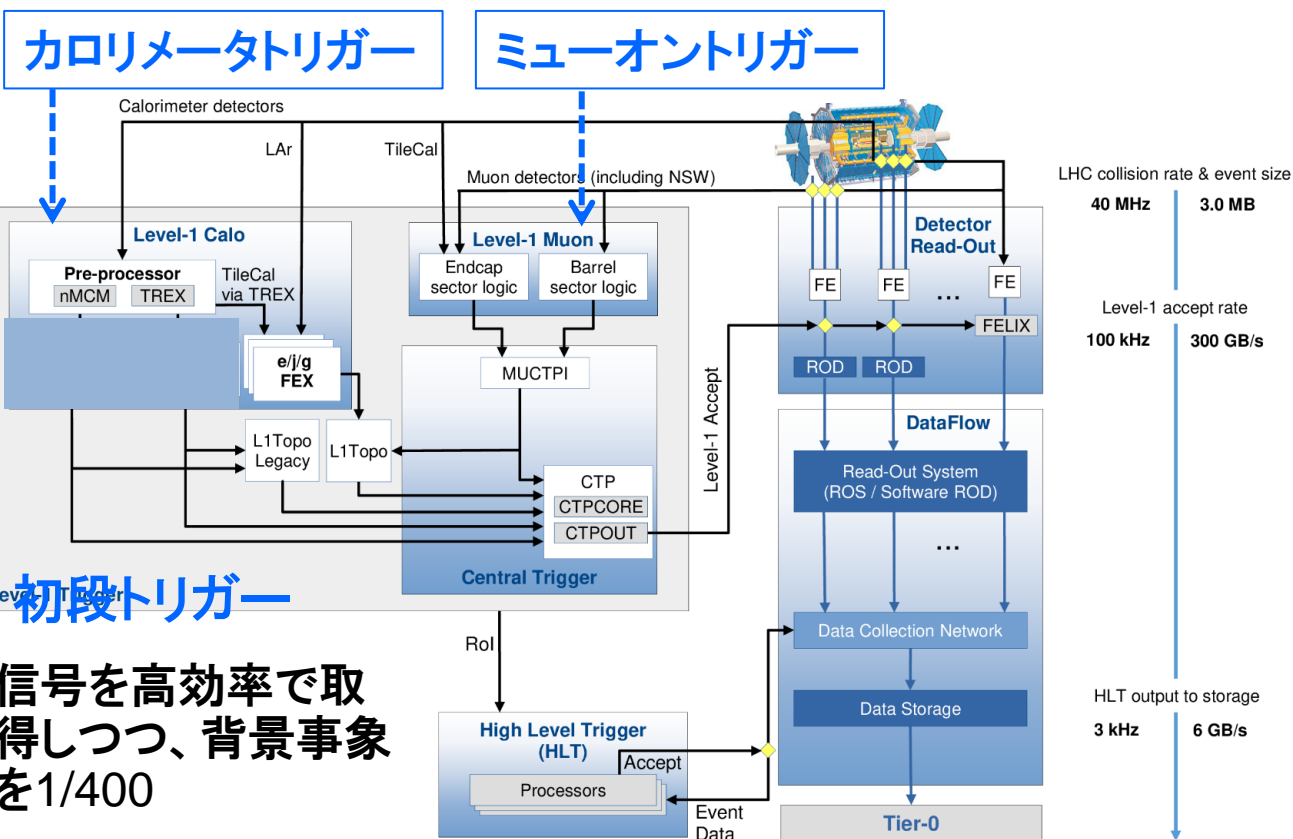


フロントエンドは次の長期停止まで取り替えられないので、性能向上には初段トリガーレートの削減しかない

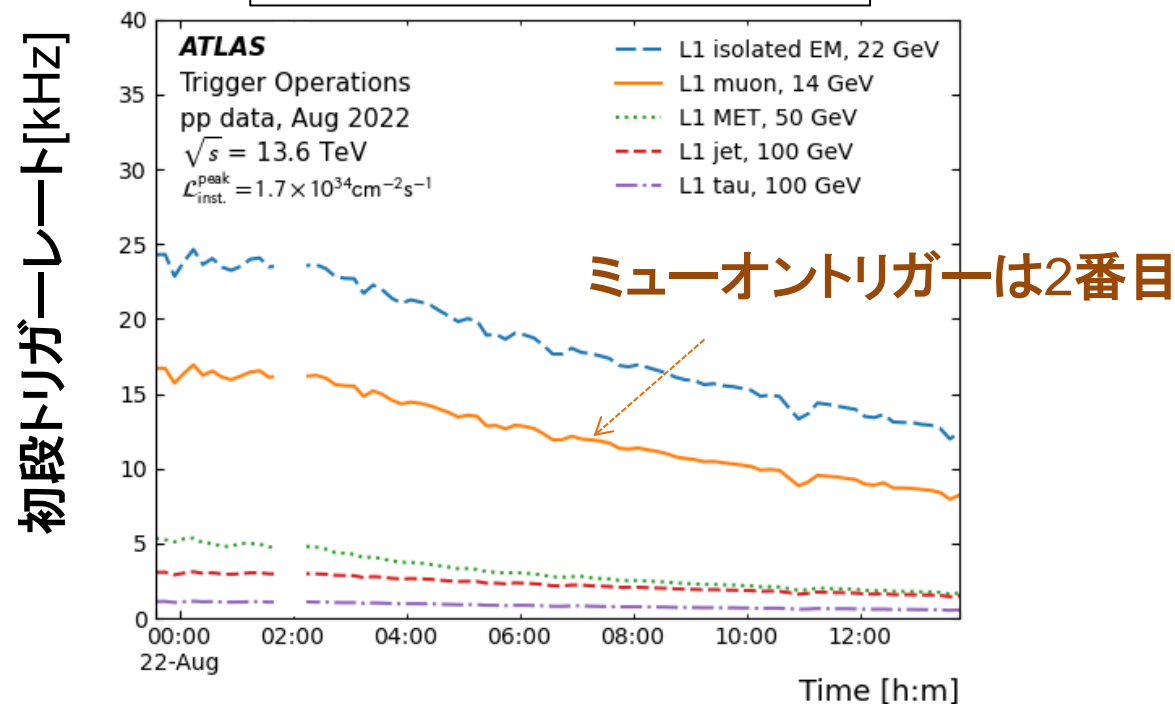
ATLAS 初段ハードウェアトリガー

40 MHzのバンチ交差で発生する衝突のオンライン事象選別

- 25ナノ秒毎のビームバンチ交差を識別しつつ、衝突から~2マイクロ秒でトリガー判定し、~100 kHzの帯域幅まで事象レートを落とす



初段トリガーレートの推移



ミュオントリガーレート削減に取り組み、ATLAS実験のデータ収集効率向上を狙った

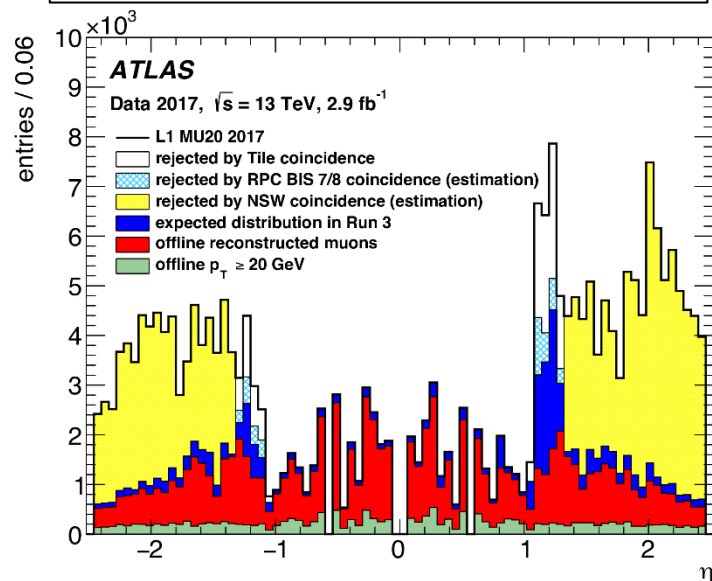
初段トリガー: ミューオン識別性能の向上

従来は外層ミュオン検出器 (Thin Gap Chamber; TGC) 7層のヒットコインシデンスでミュオン識別

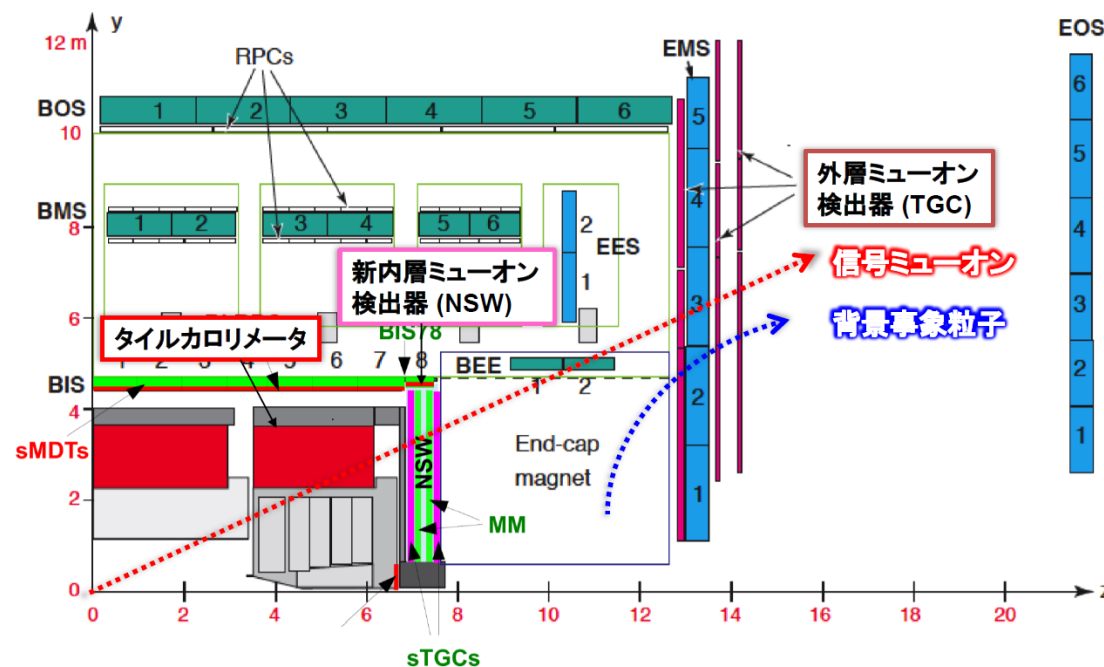
- 衝突点由来でない背景事象粒子が磁場で曲げられTGCへ入る場合の誤識別を抑制できない
- 内側の検出器を統合的に使った識別を実現すれば、誤識別を除きトリガーレート抑制可能
- 特に高分解能の新内層ミュオン検出器(16層)との飛跡の一致を要求し識別性能を向上させる

→ 初段トリガーエレクトロニクス上での高度なアルゴリズムが必要

初段トリガーレートの η 分布



背景事象の誤識別が支配的



新内層ミュオン検出器



2023年から本格稼働



多数検出器統合によるミュオン識別

識別性能を向上のために各領域毎に利用可能な検出器を追加統合

- 入力信号量の大幅増加。一方で、処理に使える時間は $O(100)$ ナノ秒
- 多数の高速シリアル通信のI/Oを備えた大規模回路で効率的に高速処理

外層ミュオンTGC検出器
($1.0 < |\eta| < 2.4$)

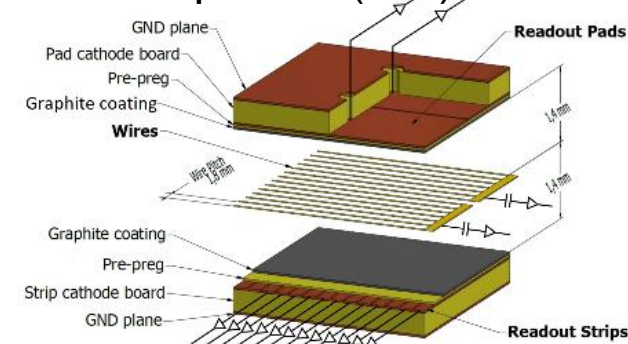
新内層ミュオン検出器NSW
Small-strip TGC/マイクロメガス
($1.3 < |\eta| < 2.4$)

ハドロンカロリメータ
最外層+内層TGC
($1.0 < |\eta| < 1.3$)

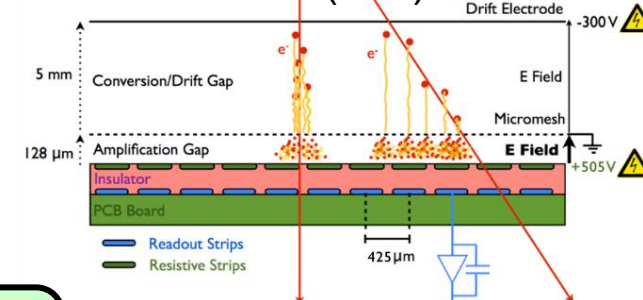
初段エンドキャップミュオントリガー系 (Sector Logic)

1. TGC情報からミュオン飛跡候補を識別し横方向運動量算出
 2. NSW/Tile/内層TGC信号との飛跡の一致を要求して誤識別を除く
- パターン認識: LUTにパターン照合結果を保持し、それを参照することで、飛跡検出と飛跡の一致確認を高速に実現
 - 柔軟なロジック変更: 運転状況に合わせた細かい領域単位で使用する検出器設定

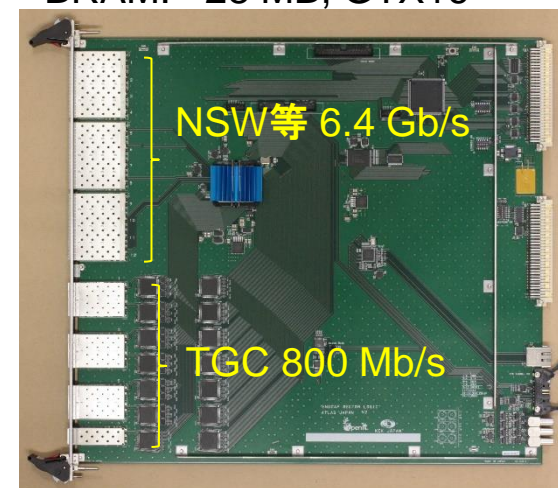
Small-strip TGC (8層)



マイクロメガス (8層)



Kintex-7 FPGA
BRAM: ~28 MB, GTX16



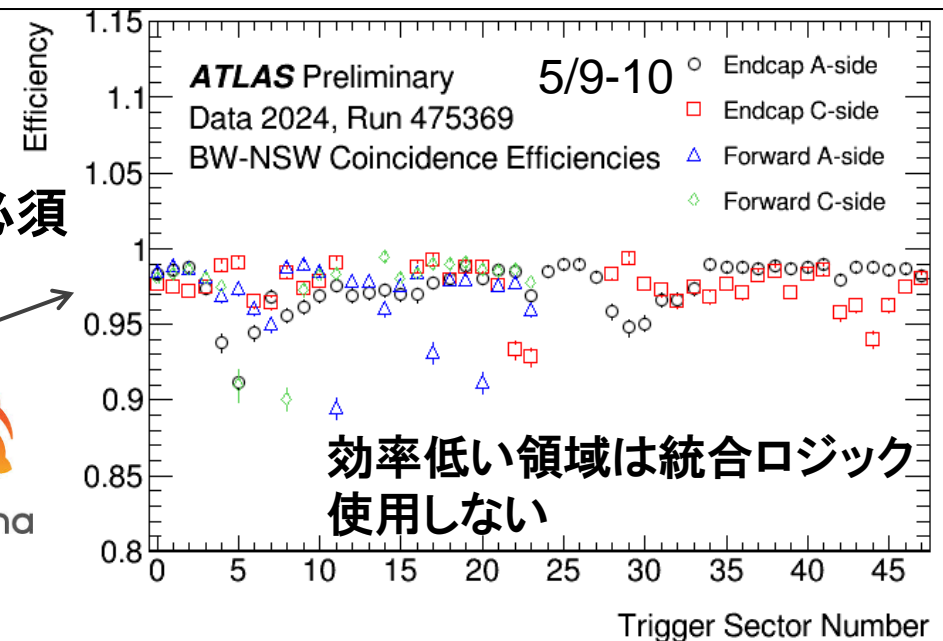
統合ロジック早期導入に向けた取り組み

早期インテグレーション達成のためのポイント

- **安定運転**: 入力信号のタイミング調整
 - 多数の高速通信リンク搭載したため全chで高い精度の調整必須
 - ナノ秒レベルでPhase固定し、各検出器を同期
- **素早い検証**: オンライン・オフラインモニタリング充実
 - 統合ロジック判断結果を導入前から検証を可能にした
- **円滑な統合**: トリガー効率損失の最小化
 - 細かい領域毎にロジック設定を変更可能にし、NSWが高い効率が実現した領域から導入開始
- **素早い統合**: ロジック変更は全てパラメーター更新のみ
 - Firmware変更なしで実現し、労力とミスを省くことが、迅速な統合に効果的



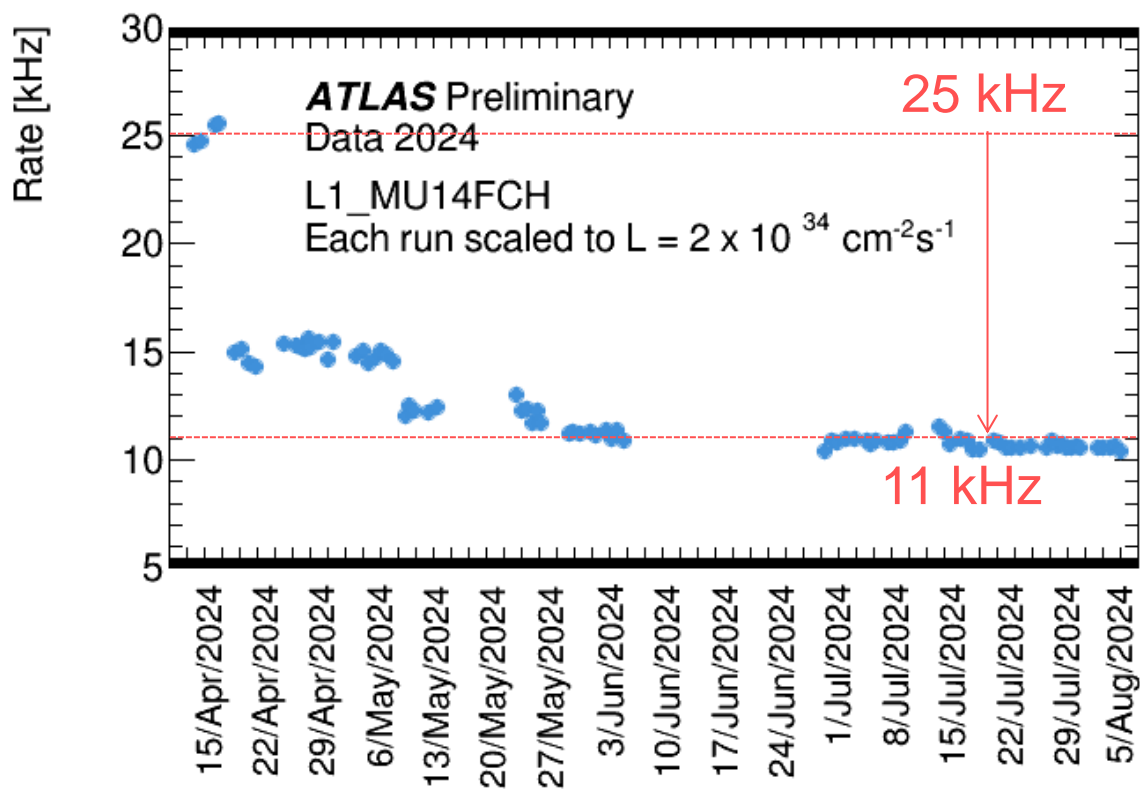
各領域毎のTGC-NSW統合ロジック効率



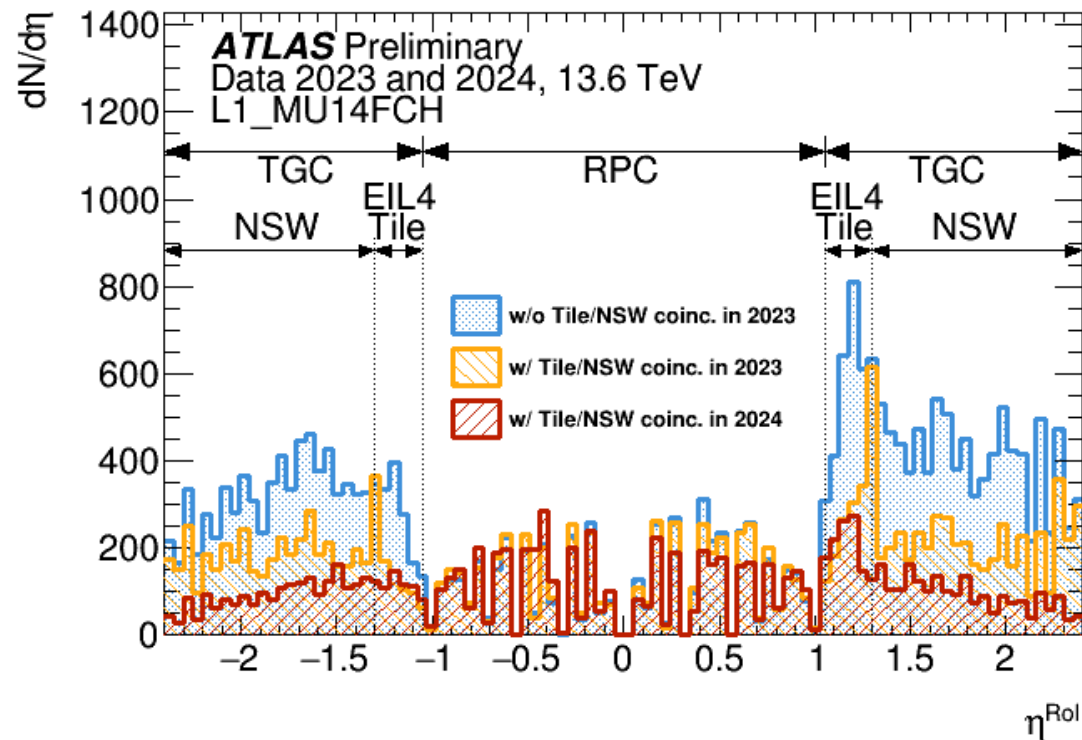
日付	NSW検出器の統合状況	
	sTGC	マイクロメガス
4/16	67%	-
5/7	87%	3%
5/24	92%	13%
5/28	100%	100%

統合ロジック導入によるトリガーレート削減

2024年初段ミュオントリガーレート推移



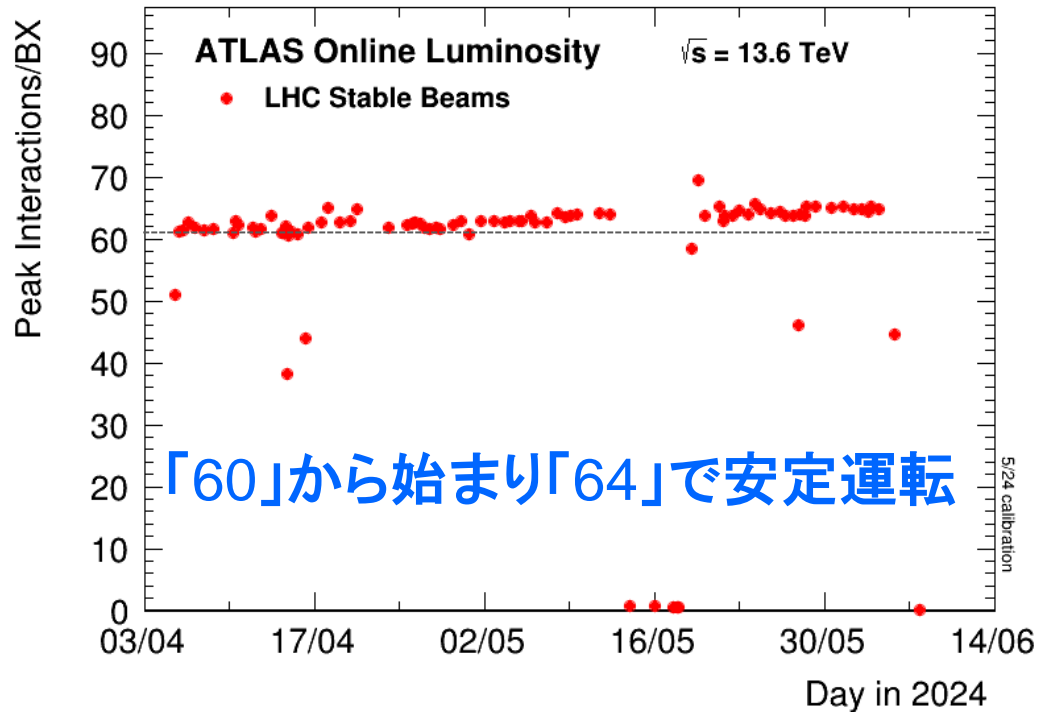
各領域ごとの初段ミュオントリガー数



- 新ロジック導入前(青), 導入後(赤)
- 背景事象の誤識別でレートが高かった全領域に渡って大幅なレート削減達成

トリガーレート削減によるATLASデータ収集の向上

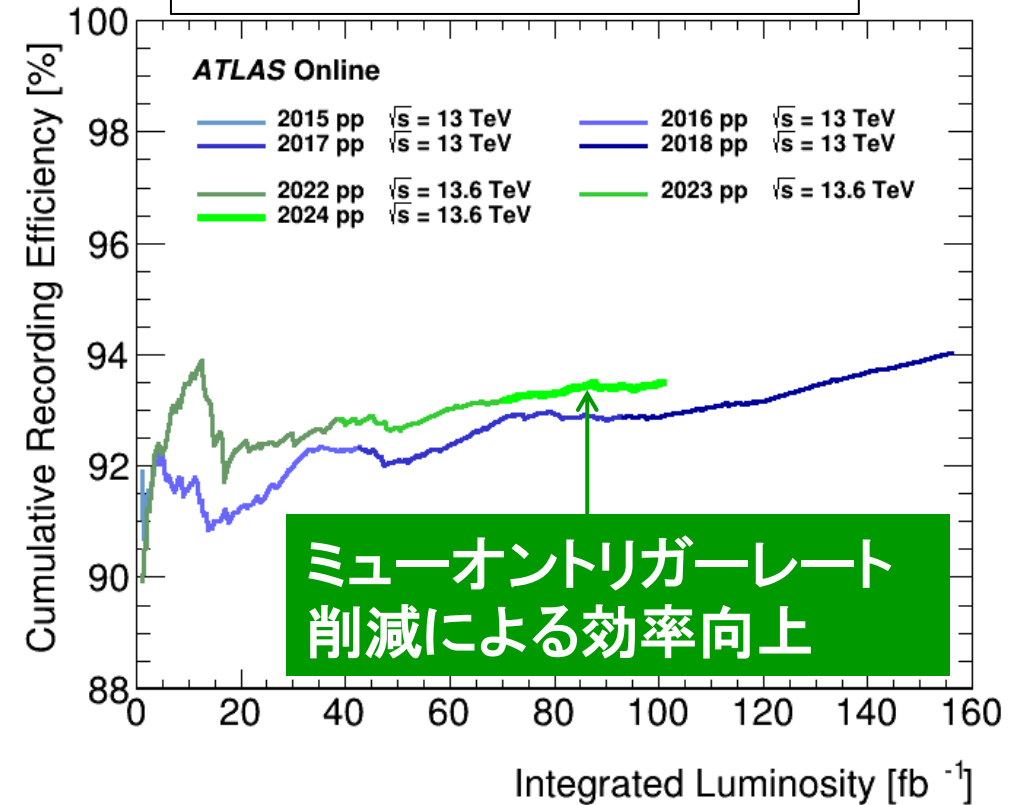
ATLASのレベリング時のパイルアップ数推移



- トリガーレート削減によりATLASデータ収集系の負荷に余裕ができ、パイルアップの更なる増強に貢献

→ データ蓄積スピードアップ

ATLASデータ収集効率



- 昨年より高パイルアップの中、高い効率
- パイルアップ増える中でもデータ収集効率向上に貢献

開発・統合・運用の経験からの一般的な教訓 (1/2)

大規模化したFPGAではFirmware開発はもちろん、動作検証と運用も難易度高い

- 初段トリガー系のFirmwareのミスの見逃しは、ATLASデータ損失に直結しうるが、複雑になると事前に全ての動作検証しきることは容易でない。

例) 飛跡検出に使うパターンの検証:

- 大リソース利用できるので、大量のパターンを準備・実装することになる
 - 全領域に渡るそのパターンを全て検証しきるのはとても難しい
 - 我々の運用時に起きた問題はパターンに関連するものがほとんどだった
- Firmware変更ミスによるデータ損失の最小化のための対策
 - ビーム期間中は時間・労力的な制限を考慮し、Firmwareの大きな変更を行わない
 - 運用中に要求されるロジック変更は全て変更可能なパラメータとして事前に実装

開発・統合・運用の経験からの一般的な教訓 (2/2)

事前にコミッショニングと運用手法をよく検討し準備することがとても大切

- コミッショニングに利用できる機能・道具が、その遂行スピードと質を決める
 - 例) Spy buffer (接続試験)、Data emulation for input/out data (ロジック検証)
- 運転中に起きうる潜在的な問題を想定し対策を実装しておく (対策は全部必要になった)
 - 例) トリガー効率保護: 統合した検出器に問題を検知した場合は、即座にバックアップロジックに切り替えて効率保持

事前準備がコミッショニングと運転の質を決定

それでも全部はうまくいかない。妥協も要求される。ただしどこまで妥協できるかの見極めが重要

- 妥協例) NSW検出器信号の時間較正が完璧でなく、2-3バンチ交差に渡って信号が分布。NSW側で適切なバンチ交差タイミング(25ナノ秒)に完璧に調節するのが正しい姿勢。しかし統合が遅れてしまうと判断し、代替案として、~4 BCに信号を強制的に引き延ばし、トリガー効率損失を抑制。それでも十分なレート削減が得られた。ATLASハッピー。

必ずしも正論に固執しない。

何が起きているかを正確に理解すれば、物事を前に進める妥協案を提示できる

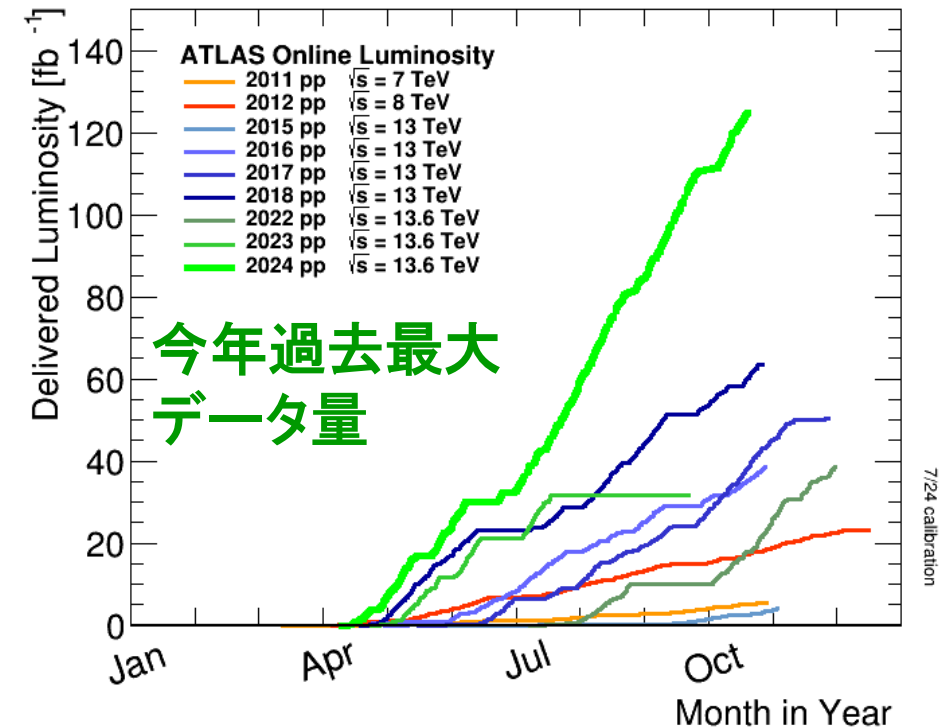
まとめ： 初段ミュオントリガーの識別能力向上

LHC加速器の性能向上に対応するためにATLAS実験のトリガーデータ収集系に改善が必要

- データ収集効率の改善には初段トリガーレート抑制が必要

初段ミュオントリガーのトリガーレート削減

- 従来の外層ミュオン検出器TGCに加えて、他の複数の検出器を統合的使用し識別性能の向上達成
- ATLAS全体の初段トリガーレートの~15%削減を達成 (14 kHz削減)
- ATLAS実験のデータ収集系の負荷を減らし、データ取得効率・ペースの向上に貢献



残り1年半Run3運転でのデータ蓄積量最大化の努力を継続しつつ(Run3後~4年間の物理解析精度)、高輝度LHCに向けた検出器アップグレードを遂行する (スケジュール厳守)

ATLASという巨大システムを運用して、安定したデータ収集するのは、
多くの人々の努力によって達成されています。

高いモチベーションの環境下で高い専門性が得られるとても貴重な経験。

日本グループは大きな貢献をしています。

