修　士　学　位　論　文

LHC-ATLAS 実験における
極近接 2 ミューオン分離トリガーアルゴリズムの開発

令和 3 年 2 月 5 日

専攻名　　物理学専攻

学籍番号　191S110S

氏名　　谷口浩平

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

概要

Large Hadron Collider (LHC) は世界最高エネルギーの陽子陽子衝突型加速器である。ATLAS 検出器は LHC の衝突点に設置された検出器の 1 つであり, 標準模型の精密な検証や標準模型を超える物理の探索などの幅広い物理を目的として, 陽子陽子衝突のデータを取得し解析を行っている。

LHC における陽子陽子衝突はおよそ 40 MHz と非常に高頻度なため, その全てをデータとして記録することは計算機資源と事象再構成の計算リソースの限界のために不可能である。そのため ATLAS 実験では, トリガーシステムを用いて興味のある事象を選び出して記録することにより, データ取得頻度を 2 kHz 程度に抑えている。ATLAS のトリガーシステムは, ハードウェア高速演算の Level 1 (L1) と, ソフトウェアを用いる High Level Trigger(HLT) の 2 段階を組み合わせて行われる。

トリガーは様々な物理事象に応じて多数用意されているが, その中でも横方向運動量 (p_T) の高いミューオンは様々な重要な事象で発生するため, 高い p_T を持つミューオンのトリガー効率を高く保つことが求められる。一方で低い p_T のミューオンの場合は生成頻度が高く, 背景事象も多いため, トリガー発行頻度が許容範囲を上回る。そのため, B 中間子の 2 ミューオン稀崩壊モードなど, 低い p_T を持つミューオンが重要なチャンネルに対しては L1, HLT ともに 2 つのミューオンを見つけることを要求し, トリガー発行頻度を低く抑えている。

しかし, 2 ミューオンが近接している場合, L1 でそれら 2 つのミューオンが 1 つに見えてしまうことでトリガー取得効率が低下する問題がある。本論文ではこのトリガー非効率の回復のために, 2 ミューオンが近接していることにより L1 で 1 ミューオンのみを見つける事象に対して, HLT で複数のミューオンを見つけることができる新しいソフトウェアアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを用いることによって, L1 で 1 つのミューオンのみを見つけた事象を, およそ 85% の割合で 2 つのミューオンに分離できることを示した。

このアルゴリズムを用いたとき, 近接 2 ミューオン事象のトリガー取得効率がどの程度回復するかを評価した。今後新しく導入される, L1 で近接 2 ミューオンを識別することができる信号を L1 トリガーの条件に加えることで, トリガーの取得頻度を許容範囲に抑制しつつ, 近接 2 ミューオン事象のトリガー取得効率を向上することに成功した。

目次

第 1 章　序論　1
1.1　標準模型 1
1.2　標準模型を超える物理 1
1.2.1　ミューオン対に崩壊する粒子の生成と標準模型を超える物理 3

第 2 章　LHC-ATLAS 実験　5
2.1　LHC 加速器 5
2.2　ATLAS 検出器 5
2.2.1　粒子再構成 7
2.2.2　内部飛跡検出器 8
2.2.3　カロリメータ 11
2.2.4　ミューオンスペクトロメータ 12

第 3 章　ATLAS トリガーシステム　21
3.1　ミューオントリガーシステム 21
3.1.1　レベル 1 ミューオントリガー 22
3.1.2　Standalone muon trigger (MuonSA) 25
3.1.3　Combined muon trigger (MuonCB) 29
3.1.4　Event Filter (EF) 30
3.1.5　オフライン再構成 30
3.2　ミューオントリガーチェーン 31
3.2.1　概要 31
3.2.2　マルチミューオントリガー 31
3.2.3　Overlap remover 31
3.2.4　HLT トポロジカルトリガー 33
3.3　トリガー効率の評価 33
3.3.1　トリガー効率の評価方法 34
3.3.2　トリガー効率の評価用サンプル 35
3.4　近接 2 ミューオン事象における 2 ミューオントリガーの効率 36
3.5　本論文の目的 40

第 4 章　Barrel 領域における近接 2 ミューオントリガー非効率の改善　41
4.1　L1 における 2 ミューオントリガーの非効率 41
4.1.1　近接した 2 ミューオンのトリガー非効率の原因 41

4.2 mtSA algorithm 42
4.3 mtSA algorithm の性能 47
4.3.1 1 ミューオンに対する飛跡数同定と運動量再構成 47
4.3.2 2 ミューオンに対する飛跡数同定と運動量再構成 50

第 5 章 mtSA を用いた 2 ミューオントリガーの評価 57
5.1 mtSA を用いた 2 ミューオントリガーの流れ 57
5.2 L1 の 1 ミューオントリガーと mtSA を組み合わせた場合 58
5.2.1 トリガー効率の評価 58
5.2.2 L1 のトリガー頻度 62
5.3 L1 で近接 2 ミューオンを判定するフラグを利用した場合 63
5.3.1 L1 近接 2 ミューオンフラグ 63
5.3.2 L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた場合の L1 トリガー頻度 64
5.3.3 mtSA におけるトリガー頻度 65
5.3.4 L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた mtSA トリガー効率の評価 66

第 6 章 結論 73

付録 A Overlap remover の mtSA 用トリガー効率への影響 75

付録 B NSW のための MuonSA アルゴリズムの動作検証 79

付録 C Run3 に向けた MuonSA の整備 83

参考文献 85

謝辞 87

図目次

1.1 標準模型で GIM 機構により禁止されている $B_s \to \mu^+\mu^-$ のファインマンダイアグラム。 3
1.2 標準模型で抑制されている $B_s \to \mu^+\mu^-$ のファインマンダイアグラム。 3
1.3 MSSM で予測される $B_s \to \mu^+\mu^-$ のファインマンダイアグラム。 4
1.4 NMSSM における $H \to aa \to 4\mu$ の崩壊分岐比に対する制限 [3]。 4

2.1 LHC の運転計画 [4]。上側の赤線が衝突の重心系エネルギーを表し, 下側の赤線がルミノシティを表す。 6
2.2 ATLAS 検出器の全体図 [5]。内側から順に内部飛跡検出器, カロリメータ, ミューオン検出器が配置されている。 6
2.3 ATLAS 検出器における座標系 7
2.4 ATLAS 検出器における粒子識別の概念図 [6] 8
2.5 バレル部の内部飛跡検出器の構造 [5] 9
2.6 エンドキャップ部の内部飛跡検出器の構造 [5] 9
2.7 IBL のレイアウト [7] 10
2.8 電磁カロリメータの構造 (アコーディオン型)[5] 12
2.9 バレル部 (左側) と拡張バレル部 (右側) のハドロンカロリメータの構造 [5] 12
2.10 エンドキャップ部のハドロンカロリメータの構造 [5] 13
2.11 ミューオン検出器の Small 部 (上) と Large 部 (下) の $r-z$ 平面断面図 [8] 14
2.12 ミューオン検出器バレル部の $r-\phi$ 平面断面図 [8] 15
2.13 ミューオン検出器におけるトロイド磁石の構造 [9] 15
2.14 RPC 各層の構成 [5] 16
2.15 $x-y$ 平面で見た RPC の配置 [5] 16
2.16 TGC の断面図 17
2.17 MDT チューブの断面図 [5] 17
2.18 MDT の構造 [5] 18
2.19 CSC の配置 [5] 18
2.20 CSC 各層の構造 [5] 18
2.21 NSW の Large 部 (左) と Small 部 (右) の構造 [10]。Large 部と Small 部が各 8 セクターずつ, ϕ 方向に 2° 重なった状態で交互に配置されている。 19
2.22 Micromegas の構造 [11] 19
2.23 sTGC の構造 [11] 20

3.1 ミューオントリガーシステムの流れ。 22

3.2 バレル L1 トリガーの Coincidence matrix (CM) と Pad の構成。η−CM と ϕ−CM が重なる領域が RoI。 23
3.3 バレル部レベル 1 ミューオントリガーアルゴリズム [12]。左の飛跡は低い p_T しきい値の判定, 右の判定は高い p_T しきい値の判定に使用されるロード。 23
3.4 エンドキャップ部レベル 1 ミューオントリガーの概念図 (左) とエンドキャップで定義されている RoI の区分 (右)[5]。 24
3.5 $p_T \geq 6\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求するレベル 1 トリガーと, それにイベントトポロジーに対する要求を加えた L1 トポロジカルトリガーのトリガー頻度 [14]。トポロジカルトリガーでは, 不変質量に対して $2 < m_{\mu\mu} < 9\,\mathrm{GeV}$, $\Delta R_{\mu\mu}$ に対して $0.2 < \Delta R_{\mu\mu} < 1.5$ を要求している。横軸は 1 つのランをある時間で区切ったルミノシティブロック (Luminosity Block:LB) ごとで, 1LB は約 60 秒に相当する。 25
3.6 RPC ヒットからロードを作成する流れ 27
3.7 インナー, ミドル, アウターステーションの荒い飛跡 (ロード中心) 作成に用いる RPC ヒット 27
3.8 ロード内の MDT ヒットの選別 [15]。破線がロード中心を表す。 28
3.9 MDT ヒットのドリフト半径を直線フィットし, superpoint を作成する [15]。。 29
3.10 2 ミューオントリガーの流れの概念図。 31
3.11 1 つのミューオンが検出器の境界に入った場合の, 2 ミューオントリガーの流れ。 32
3.12 1 つのミューオンが検出器の境界に入った場合の, Overlap remover が用意された 2 ミューオントリガーの流れ。 32
3.13 一般的な BLS トリガーチェーンの流れ [13]。 33
3.14 $b\bar{b} \to J/\psi \to \mu\mu$ シミュレーションサンプルにおけるオフラインミューオンの分布。 35
3.15 $b\bar{b} \to J/\psi \to \mu\mu$ サンプルにおける, オフラインミューオンの p_T とミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ の相関 . 36
3.16 近接 2 ミューオン事象を多く含む $J/\psi \to \mu\mu$ シミュレーションサンプルにおけるオフラインミューオンの分布。 37
3.17 $b\bar{b} \to J/\psi \to \mu\mu$ サンプル (青点線) と, 近接 2 ミューオン事象の多いシミュレーションサンプル (赤実線) における分布の比較。 37
3.18 トリガーを通過することが期待される事象 (オフライン) に対する, L1 の 2 ミューオントリガー効率。 38
3.19 L1 の 2 ミューオントリガーを通過した事象に対する, MuonSA の 2 ミューオントリガーの効率。 . 38
3.20 RoI サイズと MuonSA における RPC ヒットの探索領域。 39
3.21 2 ミューオン事象に対する, L1 と MuonSA を要求した場合のバレル 2 ミューオントリガーの効率。黒色で示された分布が従来の効率であり, 赤色で示した分布が Δ_{RPC} を実装した場合のトリガー効率。 39

4.1 2 ミューオン事象に対する, L1 を要求した場合のバレル 2 ミューオントリガーの効率。 42
4.2 バレル部ミドルテーションにおけるオフラインミューオンの飛跡 (太い赤実線) とトリガー情報。L1 が出力した RoI 中心の η, ϕ を辛子色の太い破線で示し, RoI 中心周りの RoI サイズを辛子色の点線で表す。MuonSA で取得した RPC ヒットを緑点で示す。RPC ヒットはロードの作成に用いられる η ストリップのみを表示している。$6.8\,\mathrm{m} < \mathrm{r} < 7\,\mathrm{m}$ の領域に存在する RPC ヒットは RPC1 層に属するもので, $7.4\,\mathrm{m} < \mathrm{r} < 7.8\,\mathrm{m}$ の領域に存在するものは RPC2 層に属するヒットである。 43
4.3 mtSA アルゴリズムの流れ 44

4.4 単一ミューオンが 1 つの Pad に入った場合の, ミドルステーションに設置されている RPC η ストリップ層 (計 4 層) ごとの RPC ヒット数 44
4.5 単一ミューオンが 1 つの Pad に入った場合の RPC クラスター数。ミドルステーションに設置されている RPC η ストリップ層 (計 4 層) ごとに別々に計数した。 45
4.6 現行の MuonSA におけるセット作成アルゴリズムをそのまま活用した場合 (a) と, mtSA のために最適化した場合 (b) のセット 1, 2 に含まれる RPC クラスターの違い 46
4.7 単一ミューオンが通過した場合に作成されるセット候補のパターンの例。現行の MuonSA では, これらのセット候補のうち最も RPC クラスター数の多い set 1 が選ばれ, 他は棄却される。 46
4.8 バレル部ミドルテーションにおけるオフラインミューオンの飛跡 (赤実線) とトリガー情報。L1 が出力した RoI 中心の η, ϕ を辛子色の破線, MuonSA で取得した RPC η ヒットを緑点で示し, それらから作成された RPC クラスターを黒点で表している。クラスターロードの中心を青色の破線, ロードの範囲を青色の領域で示す。 47
4.9 $Z \to \mu\mu$ サンプルでのミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ 分布。 48
4.10 単一ミューオン事象に対して, mtSA にてミドルステーションに作成したクラスターロードの数 (左) と再構成したミューオンの数 (右) 48
4.11 ミドルステーションのクラスターロードの数 (横軸) と, 再構成したミューオンの数 (縦軸) の相関図。 49
4.12 バレル部ミドルテーションにおけるオフラインミューオンの飛跡 (太い赤実線) とトリガー情報。mtSA で取得した RPC η ヒットを緑点, それらから作成された RPC クラスターを黒点で示している。各クラスターロードの中心 (青色の破線) から選別した MDT ヒットを緑色の丸印, MDT hit から作成された superpoint を赤色の三角形で表している。 50
4.13 単一ミューオン事象に対して, mtSA にて 1 つのミューオンを再構成できた事象の割合 50
4.14 p_T residual 分布。青のヒストグラムが $p_{T,\mathrm{MuonSA}}$, 赤のものが $p_{T,\mathrm{mtSA}}$ に対する分布。 51
4.15 Pad に 2 ミューオンが入った事象に対して, mtSA にて再構成したミューオン候補の数。 52
4.16 Pad に 2 ミューオンが入った事象に対して, 2 つのミューオンを再構成できた mtSA の割合。 . . . 52
4.17 Pad に 2 ミューオンが入った事象に対して, mtSA にて 2 つ未満, または 2 つを超えた飛跡が再構成された割合。 53
4.18 RPC ストリップ層ごとの RPC クラスター数と, mtSA で再構成したミューオンの数の相関。 . . . 54
4.19 バレル部ミドルテーションにおけるオフラインミューオンの飛跡 (赤実線) とトリガー情報。MuonSA で取得した RPC η ヒットを緑点で示し, それらから作成された RPC クラスターを黒点で表している。クラスターロードの中心を青色の破線, ロードの範囲を青色の領域で示す。 54
4.20 近接した 2 ミューオン事象を多く含む $J/\psi \to \mu\mu$ サンプルを用いて, 2 ミューオンに対して mtSA で計算した p_T の residual 分布 (赤) と, $Z \to \mu\mu$ サンプルを用いて, 1 ミューオンに対して mtSA で計算した p_T の residual 分布 (青)。単一ミューオンに対する mtSA の p_T residual 分布は, 1 つの Pad に 2 ミューオンが入った場合の p_T residual 分布の全イベント数で規格化している。 55

5.1 通常の 2 ミューオントリガーの組み合わせと, L1 1 ミューオントリガーに mtSA を組み合わせたときのトリガーの流れ。 57
5.2 L1 1 ミューオントリガーに mtSA を組み合わせた場合のトリガーの流れ。L1 トリガーでは 10 GeV のミューオンを 1 つ要求し, HLT の各トリガーにて 10 GeV のミューオンが 2 つあることを要求する。 58

5.3 トリガー効率の評価に用いる $b\bar{b} \to J/\psi \to \mu\mu$ サンプルにおいて, $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のオフラインミューオンが 2 つ存在する場合の $\Delta R_{\mu\mu}$ 分布。 59
5.4 L1 で $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 1 つ要求するトリガーの効率 (赤) と, 2 つ要求するトリガーの効率 (黒) の $\Delta R_{\mu\mu}$ 分布 60
5.5 L1 で $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 1 つ要求し, mtSA で $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求した場合のトリガー効率 (赤) と, L1 で 2 つのミューオンを要求し, MuonSA でも 2 ミューオンを要求する既存のトリガーの効率 (黒)。 61
5.6 1 つの Pad に 2 つのミューオンが入り, かつ $\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.2 程度の場合における, mtSA での RPC ヒット探索範囲 (グレーの領域) の概念図。 61
5.7 既存の $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオン用トリガー (黒) と mtSA を用いた 2 ミューオン用トリガー (赤) のトリガー効率の ϕ 依存性と η 依存性 62
5.8 L1 近接 2 ミューオンフラグ を用いることで識別することの可能な 2 ミューオン事象と, 不可能な事象 63
5.9 L1 近接 2 ミューオンフラグを用いたトリガーと mtSA を組み合わせたときのトリガーの流れ。 . . 64
5.10 p_T しきい値が 20 GeV の L1 1 ミューオントリガーに mtSA を組み合わせ, HLT にて 2 つの $p_T \geq 20\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを要求した場合における各トリガー発行数の割合。 65
5.11 L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を組み合わせた $p_T \geq 11\,\mathrm{GeV}$ 用の 2 ミューオントリガーの頻度 (緑実線) と, L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求する既存の 2 ミューオントリガーの頻度 (黒点線)。 66
5.12 バレル部に $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンが 2 つ存在する事象に対する, L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ 用トリガーのトリガー効率 (赤) と既存の $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオン用 L1 トリガーの効率 (黒)。全体の 2 ミューオン取得効率の向上を見るため, 2 つの OR を取った効率を青色で示す。 67
5.13 単一ミューオンが 1 つの Pad に入ったにもかかわらず, L1 近接 2 ミューオンフラグ が立っているときのイベントディスプレイ。ミドルステーションにおけるミューオンの飛跡 (赤) と RoI 中心の方向 (黄), MuonSA で取得した RPC η hit (緑) を示す。 68
5.14 単一ミューオン事象で L1 近接 2 ミューオンフラグ が立つ原因。 68
5.15 単一ミューオン事象にて L1 近接 2 ミューオンフラグ が立った事象の数 (赤) と, そのうち 2 つの η–CM, または ϕ–CM が RPC ヒットを持ってる事象の数 (青)。横軸はオフラインミューオンの η ごとに表している。 69
5.16 L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のためのトリガーに, mtSA にて $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求した場合のトリガー効率 (赤) と, 既存の $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガーにおける MuonSA の効率 (黒)。2 つのトリガーの論理和を取った場合の効率を青色で示す。 . 69
5.17 L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を組み合わせた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガー (赤) のトリガー効率の $\Delta R_{\mu\mu}$ 依存性。比較のため, L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーの効率を黒色で示した。また, 全体的な 2 ミューオントリガーの効率 (青) を, 2 つのトリガーの論理和を取ることで評価した。図 5.17a が MuonCB まで, 図 5.17b が EF までのトリガー効率。 70
5.18 L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を組み合わせた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガーと L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーの論理和を取った場合と, L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーのみの場合の各トリガーステップにおける効率。ミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.2 未満の事象のみを評価した。 71

A.1 既存の 2 ミューオントリガーと mtSA 用の 2 ミューオントリガーにおいて, MuonSA(mtSA) と MuonCB の overlap remoover を要求しなかった場合のトリガー効率 (青) と要求した場合の効率 (赤)。既存の 2 ミューオントリガーを図上側, mtSA 用の 2 ミューオントリガーを図下側, 図左側が MuonSA または mtSA ステップ, 図右側が MuonCB ステップにおけるトリガー効率。 76
A.2 mtSA 用トリガーの MuonCB overlap remover で落ちている事象の数 (赤) と, そのうち同じ内部飛跡検出器の飛跡にマッチしている事象の数 (青) の分布。 77
A.3 MuonCB のマッチングの際の $\eta - \phi$ 平面でのイベントディスプレイ。オフラインミューオンを灰色の四角形 (■), 内部飛跡検出器まで外挿した mtSA ミューオンを色付きの三角形 (▲), mtSA ミューオンにマッチした ID の飛跡を色付きの丸 (●) で表している。マッチした mtSA と ID のペアを同じ色で表し, 図の左上に mtSA, ID ミューオンの p_T を示した。マッチしなかった ID の飛跡は穴抜きの丸 (◯) で示す。 78

B.1 NSW のための MuonSA アルゴリズムの確認に用いるサンプル。2 ミューオンをそれぞれエンドキャップの A-side, C-side に打ち込む。 80
B.2 $z - r$ 平面における, sTGC のヒット分布 80
B.3 $z - r$ 平面における, Micromegas のヒット分布 80
B.4 ロード中心から NSW の各検出器までの最短距離。それぞれ, ロードの範囲を赤破線で示す。 . . . 81
B.5 インナーステーションにおけるオフラインミューオンの飛跡と, インナーの superpoint がなす角の分布。 82

表目次

1.1 標準模型におけるフェルミオン 1
1.2 標準模型におけるボソン 2
1.3 超対称性模型を構成するボソン 2
1.4 超対称性模型を構成するフェルミオン 3

2.1 各検出器の有感領域と分解能の設計値 [5]。E および p_T の単位は GeV である。 7
2.2 内部飛跡検出器の各パラメータ [5] 11
2.3 ミューオン検出器を構成する各飛跡検出器のパラメータ [5] 13
2.4 ミューオン検出器の各ステーションに配置されているチェンバーの種類 [5] 14

3.1 MuonSA, MuonCB overlap remover において, ペアを組んだミューオンが同一ミューオンであるための条件 32
3.2 HLT にて 1 度目, 2 度目に再構成されたバーテックスに対して要求する BLS のトポロジー [13]。ミューオンの p_T に対する要求は各トポロジーのトリガー頻度によって調節される。 34

4.1 MuonSA と mtSA における p_T residual の Mean と σ。 51
4.2 1 ミューオン, 2 ミューオンに対する mtSA の p_T residual から求めた, ガウス分布の Mean, σ と, テール部分が全事象数に占める割合 55

5.1 オフラインミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.2 未満である事象のうち, mtSA または MuonSA を通過した事象の割合。 62
5.2 Run2 における L1 の推定トリガー頻度。L1 トリガーは, p_T しきい値と要求するミューオンの数で表した。ルミノシティは $2.0 \times 10^{34}\,\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ を仮定している。 63
5.3 L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた場合の推定トリガー頻度 64
5.4 $\Delta R_{\mu\mu} < 0.2$ のオフライン事象に対する, 各トリガーの取得率。L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を組み合わせた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガーと L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーの論理和を取った場合と, L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーのみの場合を測定した。 70

A.1 1 ミューオン事象に対する mtSA 用の 2 ミューオントリガーにて, overlap remover を要求しなかった場合に MuonCB を通過した事象の数と, 要求した場合の MuonCB を通過した事象数。 . . . 77

B.1 各検出器に対するロードの範囲。ロード中心からの最短距離で表している。 81

第 1 章

序論

1.1 標準模型

物質を構成する最小単位の粒子のことを素粒子と呼ぶ。素粒子間の相互作用を, 重力を除いて記述する理論が標準模型である。標準模型では 17 種類の素粒子が記述され, それらの全てが実験によって発見されている。素粒子はフェルミオンとゲージボソン, スカラーボソン (ヒッグス粒子) に大別され, 物質を構成するフェルミオンは 12 種類, 相互作用を媒介するゲージボソンは 4 種類に分類される。素粒子間に働く相互作用は強い相互作用, 電磁相互作用, 弱い相互作用, 重力相互作用の 4 つに分類され, 重力を除いた 3 つの相互作用はゲージボソンによって媒介される。強い相互作用の媒介はグルーオンによって行われ, 弱い相互作用は W, Z ボソン, 電磁相互作用は光子 (γ) によって媒介される。

フェルミオンのうち強い相互作用を行う粒子をクオークと呼び, 3 個のクオークで形成される粒子をバリオン, 1 対のクオークと反クオークで形成される粒子をメソンと呼ぶ。これら 2 つを総称してハドロンと呼ぶ。

クオーク以外のフェルミオンをレプトンと呼ぶ。レプトンは電荷を持つ荷電レプトンと, 電荷を持たないニュートリノで構成される。レプトンは強い相互作用を行わず, 荷電レプトンは電磁相互作用と弱い相互作用を, ニュートリノは弱い相互作用のみを行う。

また, ヒッグス粒子はこれらの粒子に質量を与える粒子である。標準模型を構成する粒子の中で唯一見つかっていなかったが, ALTAS および CMS 実験によって 2012 年に発見された。フェルミオンとゲージボソン, スカラーボソンについて表 1.1, 1.2 にまとめる。

	電荷 (e)	**世代** **1**	**2**	**3**	**スピン**	**相互作用**
クオーク	$+2/3$	u	c	t	$1/2$	強い相互作用, 弱い相互作用, 電磁相互作用
	$-1/3$	d	s	b		
レプトン	0	ν_e	ν_μ	ν_τ	$1/2$	弱い相互作用
	-1	e	μ	τ		弱い相互作用, 電磁相互作用

表 1.1: 標準模型におけるフェルミオン

1.2 標準模型を超える物理

標準模型に現れる素粒子は全て発見され, ほとんど全ての実験事実を説明してきた一方で, 依然として以下のような現象に説明を与えない。

		電荷	スピン	相互作用
ゲージボソン	g	0	1	強い相互作用
	$W^{\pm}$	±1	1	弱い相互作用
	Z^0	0	1	
	γ	0	1	電磁相互作用
スカラーボソン	H	0	0	

表 1.2: 標準模型におけるボソン

CP 対称性の破れ

現在の宇宙では反粒子に対して粒子の割合が非常に高く, これは CP 対称性の観点から不自然である。その原因として CP 対称性の破れが考えられ, 様々な実験で CP 対称性の破れの精密測定が行われている。しかし, 現在の CP 対称性の破れの測定結果では現在の宇宙の粒子反粒子の割合が説明できず, これが新物理の存在を示唆している。

ダークマター

宇宙の組成のうち, 標準模型に準ずる物質 (陽子や中性子など) が占める割合は全体の約 5% に過ぎず, 残りは未知の物質またはエネルギーによって構成されている。この未知の物質は電磁波での観測ができないため, ダークマターと呼ばれる。ダークマターの存在は, 銀河の回転速度や重力レンズ効果に関連した観測から存在が予言されており, 宇宙の 27% を占めると考えられている。

ヒッグスの階層性

標準模型の枠組みでヒッグス粒子の質量の輻射補正を計算すると, 電弱スケールよりも数十桁も大きな値になる。しかし, 実際に発見されたヒッグス粒子の質量は 125GeV である。これは裸の質量と輻射補正が絶妙に近い値でなければならないことを意味しており, 不自然である。

これらの標準模型が抱える問題を解決するために様々な理論が提示されているが, 中でも有力とされる理論の 1 つに超対称性模型 (SUper SYmmetry:SUSY) がある。

超対称性模型は, 標準模型を構成する粒子に対してスピンが 1/2 異なる超対称性パートナーの存在を予言する。つまり標準模型のフェルミオンに対して超対称性ボソン, 標準模型のボソンに対しては超対称性フェルミオンの存在を予言する。超対称性模型を構成する粒子のパラメータは, 質量とスピン以外は標準模型のパートナーと同じであると考える。また超対称性模型を構成する粒子の中で, 最も小さい質量をもつものを LSP(Lightest Supersymmetric Particle) と呼ぶ。LSP はダークマターの有力な候補の一つであると考えられている。超対称性模型を構成するボソンを表 1.3, フェルミオンを表 1.4 にまとめた。

	電荷 (e)	世代 1	2	3	スピン
スクオーク	$+2/3$	$\tilde{u}$	$\tilde{c}$	$\tilde{t}$	0
	$-1/3$	$\tilde{d}$	$\tilde{s}$	$\tilde{b}$	
スレプトン	0	$\tilde{\nu_e}$	$\tilde{\nu_\mu}$	$\tilde{\nu_\tau}$	0
	-1	$\tilde{e}$	$\tilde{\mu}$	$\tilde{\tau}$	

表 1.3: 超対称性模型を構成するボソン

		電荷	スピン
ニュートラリーノ ($\tilde{\chi^0}$)	$\tilde{\gamma}, \tilde{Z^0}, \tilde{H_1^0}, \tilde{H_2^0}$	0	1/2
チャージーノ ($\tilde{\chi^\pm}$)	$\tilde{W^\pm}, \tilde{H^\pm}$	± 1	1/2
グルイーノ	$\tilde{g}$	0	1/2
グラビティーノ	$\tilde{G}$	0	3/2

表 1.4: 超対称性模型を構成するフェルミオン

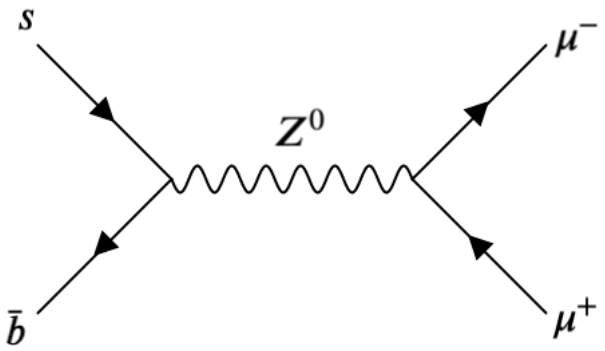


図 1.1: 標準模型で GIM 機構により禁止されている $B_s \to \mu^+\mu^-$ のファインマンダイアグラム。

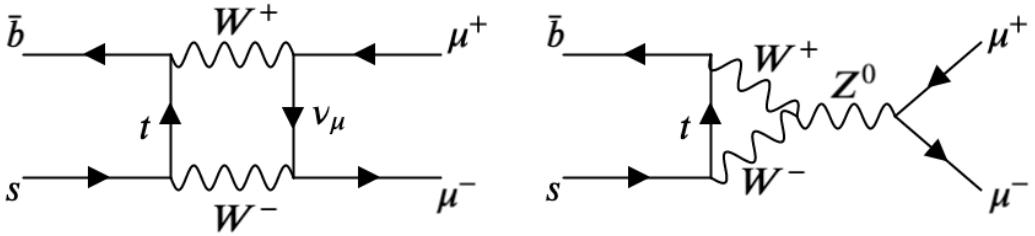


図 1.2: 標準模型で抑制されている $B_s \to \mu^+\mu^-$ のファインマンダイアグラム。

1.2.1　ミューオン対に崩壊する粒子の生成と標準模型を超える物理

ATLAS 実験では SUSY シナリオのような様々な物理の検証及び発見を目指しており, その中でも本研究のテーマであるミューオントリガーとの関わりが深い検証方法の 1 つとして, B_s 粒子の稀崩壊を測定する方法がある。

B_s 粒子は s クオークと $\bar{b}$ クオークからなるメソンであり, 崩壊のうち 93±25% は D_s メソンを含む崩壊である。しかし, 稀にレプトン対に崩壊することがあり, $B_s \to \mu^+\mu^-$ の崩壊分岐比は $(3.0 \pm 0.4) \times 10^{-9}$ と非常に小さい [1]。これは, $B_s \to \mu^+\mu^-$ が標準模型においてフレーバーを変える中性カレント反応 (FCNC:Flavor Changing Neutral Current) であるため, このような崩壊は GIM 機構によって制限されていることが理由である。従って, 図 1.1 のようなツリーレベルの崩壊は厳密に禁止され, 図 1.2 のような高次のループ過程でのみ崩壊しうる。

ここで, $B_s \to \mu^+\mu^-$ への SUSY の寄与を考える。SUSY シナリオのうち, MSSM(Minimal Supersymmetric Standard Model) では 2 つのヒッグス 2 重項を要請 (2 Higgs Doublet Model : 2HDM) するため, CP 対称である h^0, H^0, CP 非対称な A^0, 荷電ヒッグスである $H^\pm$ の 5 種類のヒッグス粒子の存在が予言される。

そのような SUSY で予言される未知の粒子が B_s の崩壊に寄与する場合, 例として図 1.3 のような崩壊過程が考

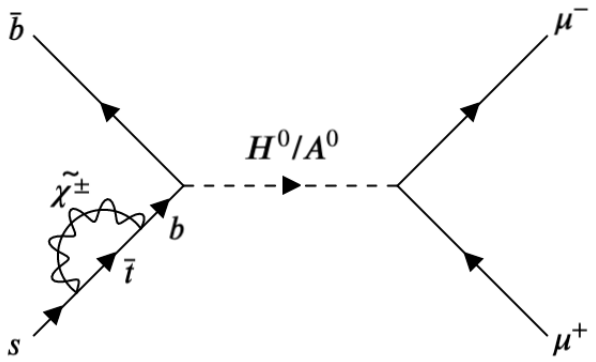


図 1.3: MSSM で予測される $\mathrm{B_s} \to \mu^+\mu^-$ のファインマンダイアグラム。

えられる。その際, 崩壊の分岐比が標準模型が予測する値を上回る可能性があり, $\mathrm{B_s} \to \mu^+\mu^-$ の崩壊モードの精密測定を行うことで SUSY の兆候を見ることができる。

その他の SUSY シナリオとして, NMSSM(Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model) がある。NMSSM ではスカラーボソンである $\mathrm{h_1, h_2, h_3}$ と, 擬スカラーボソンである $\mathrm{a_1, a_2}$ の 5 種類のヒッグス粒子が存在する。$\mathrm{h_1, h_2}$ は標準模型に現れるヒッグス粒子に近い粒子 ($m_{\mathrm{h_{1,2}}} = O(100)\mathrm{GeV}$) で, $\mathrm{h_{1,2}} \to \mathrm{a_1 a_1}$ と崩壊しうる [2]。$\mathrm{a_1}$ は標準模型の粒子と弱く結合し, その結合はフェルミオンとの結合の場合フェルミオンの質量に比例する。$\mathrm{a_1}$ は $m_{\mathrm{a_1}} = O(1)\mathrm{GeV}$ の質量領域が実験的に除外されておらず, 軽い可能性もある。 この場合, $\mathrm{a_1} \to \mu^+\mu^-$ の崩壊モードが感度を持ち, これまでの実験における $\mathrm{a_1}$ の探索でも用いられている (図 1.4)。

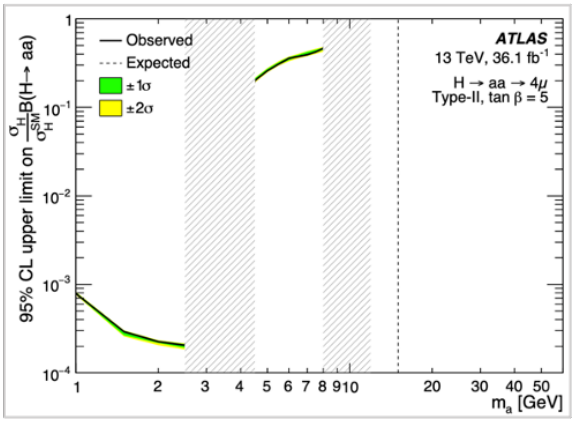


図 1.4: NMSSM における $H \to aa \to 4\mu$ の崩壊分岐比に対する制限 [3]。

このとき $\mathrm{a_1}$ はブーストされているため, $\mathrm{a_1}$ の崩壊によるミューオン対は互いに近接している。従って, 近接した 2 ミューオン事象を取得することにより, NMSSM にて予言されてる擬スカラーボソンに対して更に制限をかけることができる。

第 2 章

LHC-ATLAS 実験

この章では大型ハドロン衝突型加速器 LHC と, ATLAS 実験について述べる。

2.1 LHC 加速器

LHC(Large Hadron Collider) は, 高エネルギーでの陽子陽子衝突実験や重イオンの衝突実験を行うための大型ハドロン衝突型加速器である。スイス・ジュネーヴにある CERN(欧州原子核研究機構) の地下 $100\,\mathrm{m}$ に掘られたトンネルの中に, 周長 $26.66\,\mathrm{km}$ に渡って設置され, 2 本のリングで陽子を互いに逆向きに加速している。加速リング内には超電導磁石によって最大約 8.33T の磁場がかけられ, それによって陽子は曲げられ加速リング内を周回する。陽子は加速リング内でバンチと呼ばれる塊となって加速されており, バンチが連なってビームを形成している。衝突点は 4 箇所あり, それぞれで $25\,\mathrm{ns}$ に一度という非常に高頻度なバンチ同士の衝突を行う。4 箇所の衝突点にはそれぞれ検出器が設置されている。ATLAS(A Toroidal Lhc ApparatuS), CMS(Compact Muon Solenoid) では汎用型検出器を用いて, 標準模型の精密測定や新物理の探索など, 幅広い物理を対象にした研究を行っている。LHCb(Large Hadron Collider beauty) はビームライン付近に感度を持つ検出器を用いることで, b クオークの物理に特化した実験を行っている。ALICE(A Large Ion Collider Experiment) は重イオンを用いた衝突実験で, 鉛原子核を加速させ, 高エネルギー領域での衝突によって生じるクオーク・グルーオンプラズマの研究を目的とした実験を行っている。

LHC は 2010 年に運転を開始し, $7\,\mathrm{TeV}$ から $8\,\mathrm{TeV}$ の重心系エネルギー ($\sqrt{s}$) で 2012 年まで稼働した。この期間を Run1 と呼ぶ。瞬間最高ルミノシティは $0.77 \times 10^{34}\,\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ であった。その後, 2013 年から 2015 年までのシャットダウン期間 (LS1) で加速器のアップグレードを行い, 2015 年から 2018 年末まで $\sqrt{s} = 13\,\mathrm{TeV}$ で稼働した。この期間を Run2 と呼ぶ。Run2 における瞬間最高ルミノシティは $2.0 \times 10^{34}\,\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$, 得られた積分ルミノシティは約 $150\mathrm{fb}^{-1}$ であった。

図 2.1 に LHC の運用スケジュールを示す。LHC は 2 度目のシャットダウン (LS2) 期間を経て, 2022 年から $\sqrt{s} = 14\,\mathrm{TeV}$ の運転期間 (Run3) が始まる予定である。Run3 が約 2 年運転した後にシャットダウン期間を挟み, 更に瞬間ルミノシティを増加させた High Luminosity LHC(HL-LHC) が始まる。HL-LHC では, Run3 までに取得予定の $350\,\mathrm{fb}^{-1}$ に対して約 $3000\,\mathrm{fb}^{-1}$ のデータを取得する予定である。

2.2 ATLAS 検出器

ATLAS 実験で用いられる検出器は, 標準模型の精密測定から新しい粒子の探索や標準模型を超えた物理まで, 幅広い物理を研究対象としている。そのために, 衝突によって出てくる様々な粒子の種類やエネルギー・運動量を精密に測定できるように設計されている。ATLAS 検出器は直径約 25m, 長さ約 44m の円筒形検出器で, 内側から順に内部飛跡検出器, 電磁カロリメータ, ハドロンカロリメータ, ミューオン検出器で構成されている (図 2.2)。各検出器

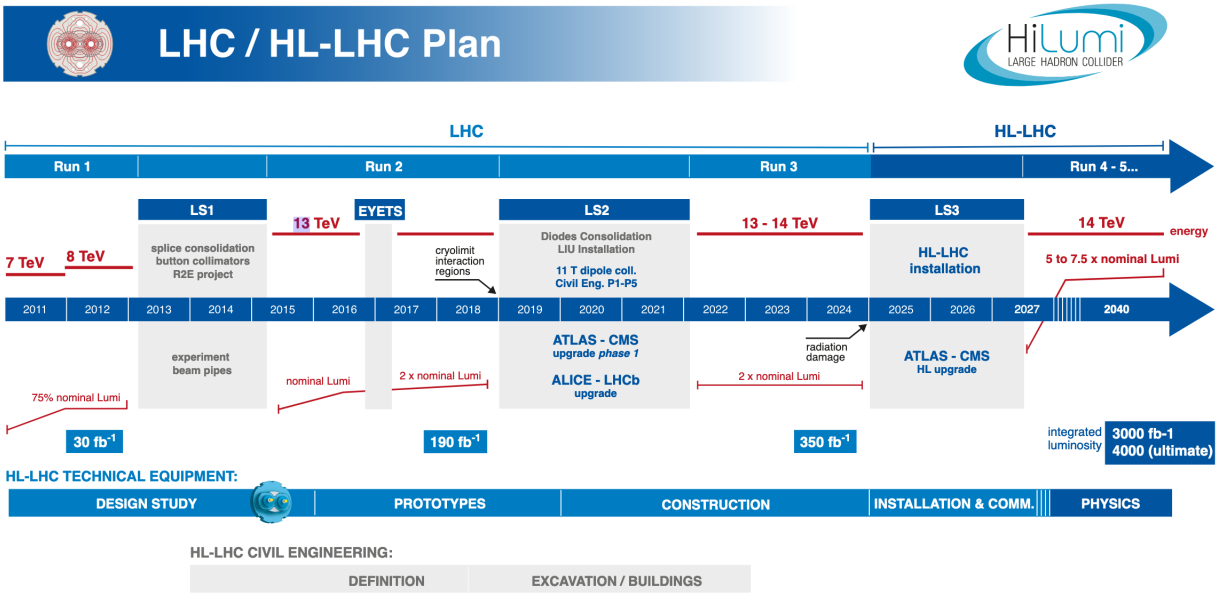


図 2.1: LHC の運転計画 [4]。上側の赤線が衝突の重心系エネルギーを表し, 下側の赤線がルミノシティを表す。

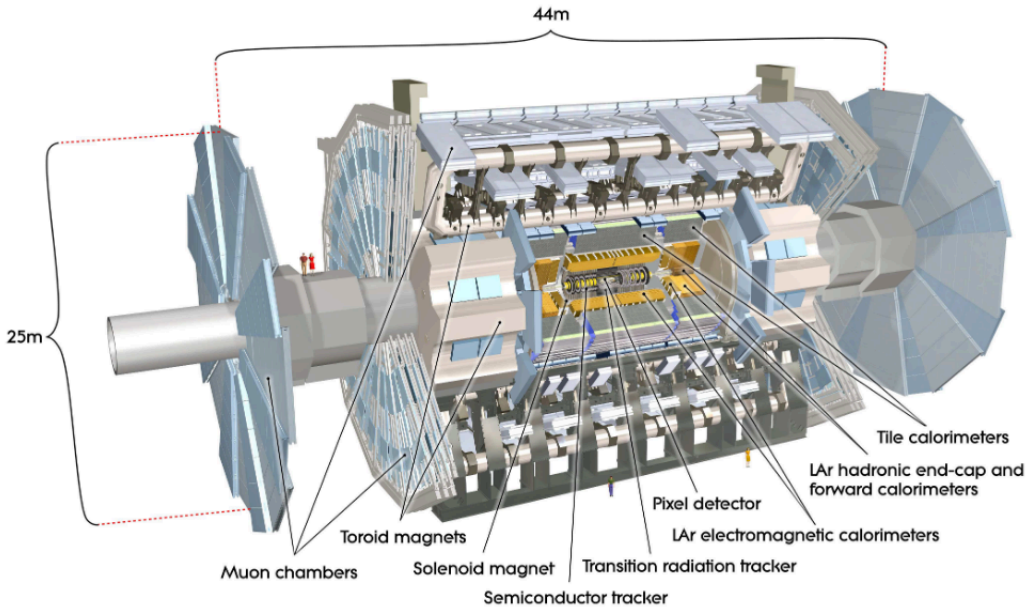


図 2.2: ATLAS 検出器の全体図 [5]。内側から順に内部飛跡検出器, カロリメータ, ミューオン検出器が配置されている。

の設計値を表 2.1 に示す。

検出器の座標系として, ビーム衝突点を原点とした直交座標や円筒座標を使用している。各軸は LHC リングの中心方向を x 軸, ビーム軸に対して平行に z 軸, x 軸と z 軸に対して右手系をなすように y 軸をとる。また, 検出器の中心から粒子が放出される方向を表すために, 角度 θ, ϕ と擬ラピディティ η を使用する。擬ラピディティ η はラピ

検出器	分解能の設計値	η の有感領域	
		Measurement	Trigger
内部飛跡検出器	$\sigma_{p_T}/p_T = 0.05\%/p_T \oplus 11\%$	± 2.5	
電磁カロリメータ	$\sigma_E/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.71\%$	± 3.2	± 2.5
ハドロンカロリメータ			
barrel and Endcap	$\sigma_E/E = 50\%/\sqrt{E} \oplus 31\%$	± 3.2	± 3.2
Forward	$\sigma_E/E = 100\%/\sqrt{E} \oplus 101\%$	$3.1 < \|\eta\| < 4.9$	$3.1 < \|\eta\| < 4.9$
ミューオン検出器	$\sigma_{p_T}/p_T = 10\%$ at $p_T = 1\,\mathrm{TeV}$	± 2.7	± 2.4

表 2.1: 各検出器の有感領域と分解能の設計値 [5]。E および p_T の単位は GeV である。

ディティ y の高エネルギー極限として定義され, 角度 θ だけの関数である。η を θ で表すと,

$$\eta = \lim_{|\boldsymbol{p}|\to E} y = \lim_{|\boldsymbol{p}|\to E} \frac{1}{2}\ln\frac{E+p_z}{E-p_z} = \frac{1}{2}\ln\frac{1+\cos\theta}{1-\cos\theta} = \ln\frac{\cos(\theta/2)}{\sin(\theta/2)} = -\ln\tan(\theta/2) \tag{2.1}$$

となる。これらの座標系を図 2.3 に示す。η に関して検出器は 3 つの領域に分けられ, $|\eta| < 1.05$ をバレル領域, $|\eta| > 1.05$ をエンドキャップ領域と呼ぶ。また, $\eta > 0$ の領域を A-side, $\eta < 0$ の領域を C-side と呼んで区別する。

ビーム軸方向に対して垂直方向の運動量, エネルギーを $p_T = |\boldsymbol{p}|\sin\theta$, $E\sin\theta$ と定義する。反応する陽子中のクオークやグルーオンのビーム軸方向の運動量は反応事象ごとに不明なため, z 軸方向の運動量保存則や重心系のエネルギー保存則を使うことができない。そのため, 解析や第 3 章にて説明するトリガーシステムでは運動量保存則が成り立つ p_T や E_T を主に用いる。ビーム軸垂直方向のエネルギーの和は 0 であるため, エネルギー保存則から衝突後の全粒子の p_T のベクトル和は理想的には 0 になる。しかし実際には検出器の隙間を突き抜けた粒子や, ニュートリノなどの観測できない粒子があるため, 検出した粒子の横運動量のベクトル和は 0 にならない。このときの差分を $E_T^{miss} = |\Sigma \boldsymbol{p_T}|$ と定義する。

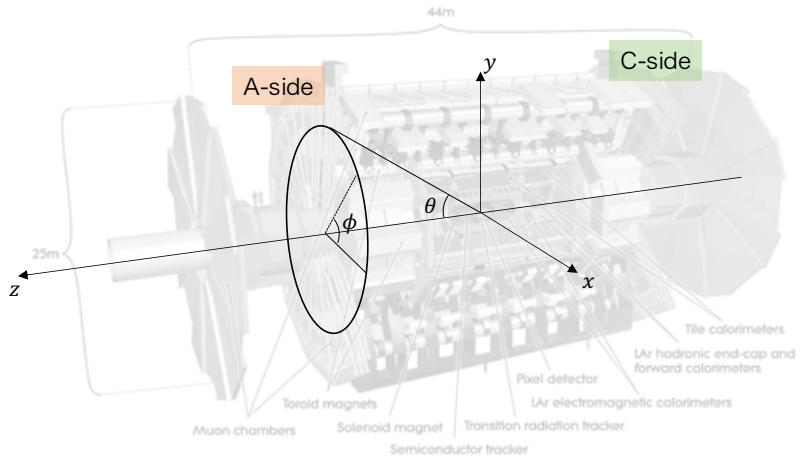


図 2.3: ATLAS 検出器における座標系

2.2.1 粒子再構成

粒子再構成は複数の検出器の情報を組み合わせることで行う。電子は電磁カロリメータ内で電磁シャワーを起こしエネルギーを落とす。また電子は荷電粒子なので内部飛跡検出器に飛跡を残す。一方光子も電磁カロリメータ内

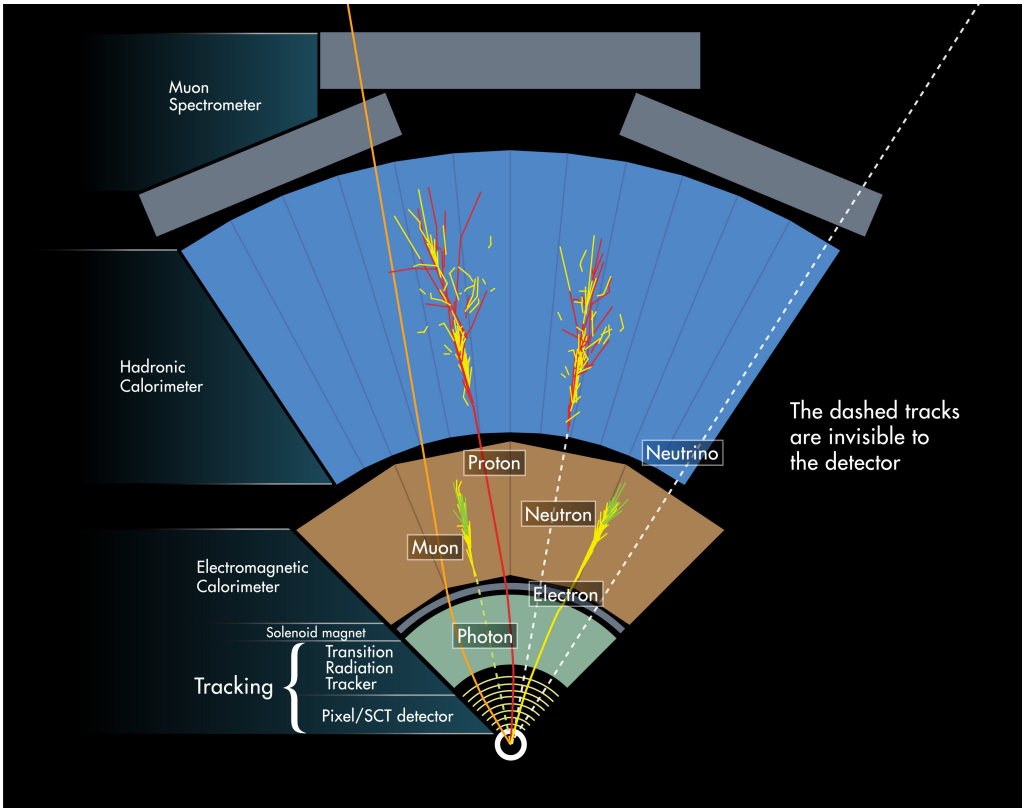


図 2.4: ATLAS 検出器における粒子識別の概念図 [6]

で電磁シャワーを起こすが, 電荷を持たないため対生成を物質と起こす場合を除き内部飛跡検出器に飛跡を残さない。これらの情報から電子, 光子を識別し再構成する。ハドロンは主にハドロンカロリメータにエネルギーを落とす。中性ハドロンの場合はカロリメータの情報のみ, 荷電ハドロンの場合は内部飛跡検出器とカロリメータの情報を組み合わせて粒子再構成を行う。ほとんどの粒子はカロリメータで止められるが, ミューオンは電子に比べて質量が 200 倍程度あるため電磁シャワーを起こさず, 強い相互作用を感じないためハドロンカロリメータも通過する。そのため, 最外層に設置されているミューオン検出器まで到達する充分に運動量の高い粒子をミューオンとして識別し, 内部飛跡検出器, カロリメータ, ミューオン検出器の情報を組み合わせることでミューオン再構成を行う。ニュートリノはどの検出器にも情報を残さないため, 横方向の消失エネルギー (E_T^{miss}) として間接的に観測される。粒子識別の概念図を図 2.4 に示す。

2.2.2　内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は内側から IBL (Insertable B Layer), Pixel 検出器, SCT (SemiConductor Tracker), TRT (Transition Radiation Tracker) で構成される。バレル部およびエンドキャップ部における内部飛跡検出器の構造をそれぞれ図 2.5, 2.6 に示す。内部飛跡検出器全体の長さは約 5.3 m, 半径は約 2.5 m であり $|\eta| < 2.5$ の領域を覆っている。検出器内にはソレノイド磁石によってビーム軸平行方向に約 2 T の磁場がかかっており, 磁場領域を通過した荷電粒子の飛跡の θ 方向の曲率から運動量を計算する。

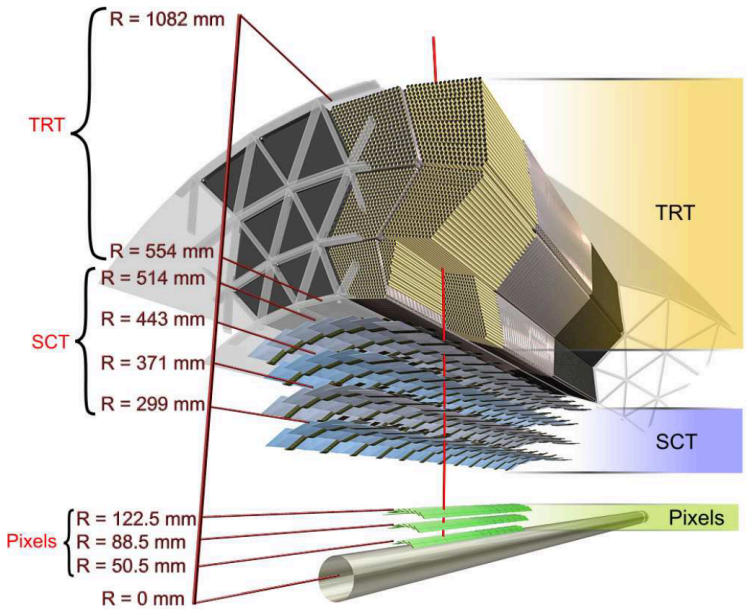


図 2.5: バレル部の内部飛跡検出器の構造 [5]

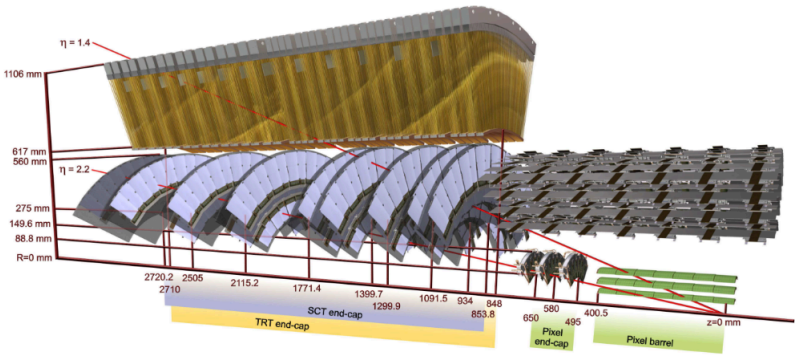


図 2.6: エンドキャップ部の内部飛跡検出器の構造 [5]

ピクセル検出器と IBL

Pixel 検出器は内部飛跡検出器の中で最も位置測定精度が高く, バレル領域は 3 層からなる同心円のシリンダ形状, その外側では A-side, C-side それぞれ 3 枚ずつのディスク形状となっている。1 つの pixel の大きさは $(r\phi) \times z = 50 \times 400\,\mu\mathrm{m}^2$ 程度で, $r\phi$ 方向および z 方向にわたって敷き詰められている。Pixel 検出器の位置分解能はバレル領域で $r\phi$ 方向に $10\,\mu\mathrm{m}$, z 方向に $115\,\mu\mathrm{m}$, ディスク形状のエンドキャップ領域で, $r\phi$ 方向に $10\,\mu\mathrm{m}$,z 方向に $115\,\mu\mathrm{m}$ である。

IBL はルミノシティ増加への対応と Pixel 検出器の性能向上のため, Run2 に, 当時 ATLAS 検出器の最内層にあった Pixel 検出器よりも内側に実装された飛跡検出器であり, 4 層目の Pixel 検出器とも言える。1 つの pixel の大きさは $(r\phi) \times z = 50 \times 250\,\mu\mathrm{m}^2$ 程度であり, 位置分解能は $r\phi$ 方向に $10\,\mu\mathrm{m}$, z 方向に $75\,\mu\mathrm{m}$ である。ここは Interaction Point (IP) に非常に近い位置で (図 2.7), IP と飛跡の距離 (impact parameter) の測定精度が Run2 から改善されている。これにより B 粒子識別性能の向上が期待される。

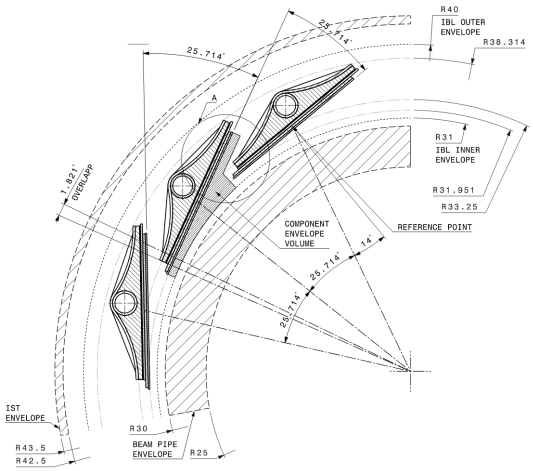


図 2.7: IBL のレイアウト [7]

Pixel 検出器

Pixel 検出器は内部飛跡検出器の中で最も位置測定精度が高く, バレル領域は 3 層からなる同心円のシリンダ形状, その外側では A-side, C-side それぞれ 3 枚ずつのディスク形状となっている。1 つの pixel の大きさは $(r\phi) \times z = 50 \times 400\,\mu\mathrm{m}^2$ 程度で, $r\phi$ 方向および z 方向にわたって敷き詰められている。Pixel 検出器の位置分解能はバレル領域で $r\phi$ 方向に $10\,\mu\mathrm{m}$, z 方向に $115\,\mu\mathrm{m}$, ディスク形状のエンドキャップ領域で, $r\phi$ 方向に $10\,\mu\mathrm{m}$,z 方向に $115\,\mu\mathrm{m}$ である。

SCT

SCT はバレル領域で 4 層からなる同心円のシリンダ形状, その外側では A-side, C-side にそれぞれ 9 枚ずつのディスク形状となっている。SCT の位置分解能はバレル領域, ディスク形状の領域共に, $r-\phi$ 方向におよそ $17\,\mu\mathrm{m}$, z 方向に $580\,\mu\mathrm{m}$ である。

TRT

TRT は内部飛跡検出器の最外層に設置されており, $|\eta| < 2.0$ の領域を覆っている。TRT はドリフトチューブを積み重ねるように配置している。チューブの向きは, バレル部ではビーム軸と並行方向, エンドキャップ部では放射状である。各チューブの位置測定精度は $130\,\mu\mathrm{m}$ だが, 長い飛跡を再構成できるため, 運動量の測定では重要な役割を持っている。チューブはポリイミドで作られ, チューブの隙間を radiator としてポリプロピレンで埋めている。この境界面では, 電子なら 1 GeV 程度, パイオンなら 100 GeV 程度で遷移放射 (transition radiation) のフォトンを発生する。チューブ内のガスに Xe を混合し, 遷移放射を観測することで電子の同定を行うことができる。

内部飛跡検出器は IBL, Pixel 検出器および SCT によってビームパイプ付近で高精度に計算された情報と, 位置分解能は劣るが TRT によって得られるビームパイプから離れた位置での多数のヒット情報を組み合わせることによって, $r-\phi$ 方向, $z(r)$ 方向ともに非常に高精度での飛跡再構成を実現している。内部飛跡検出器の各パラメータついて表 2.2 にまとめた。

検出器	**半径 (mm)**	**長さ (mm)**
IBL	$31.0 < r < 40.0$	$0 < \|z\| < 322$
Pixel 検出器		
バレル部シリンダ (3 層)	$50.5 < r < 122.5$	$0 < \|z\| < 400.5$
エンドキャップ部ディスク (2×3 枚)	$495 < \|r\| < 650$	$495 < \|z\| < 650$
SCT		
バレル部シリンダ (4 層)	$299 < r < 514$	$0 < \|z\| < 749$
エンドキャップ部ディスク (2×9 枚)	$88.8 < r < 149.6$	$839 < \|z\| < 2735$
TRT		
バレル部シリンダ (73 層)	$563 < r < 1066$	$0 < \|z\| < 712$
エンドキャップ部ディスク (2×80 枚)	$644 < \|r\| < 1004$	$848 < \|z\| < 2710$

表 2.2: 内部飛跡検出器の各パラメータ [5]

2.2.3 カロリメータ

ATLAS 検出器のカロリメータは電磁カロリメータとハドロンカロリメータで構成され, $|\eta| < 4.9$ の領域を覆っている。電磁カロリメータは主に電子や光子, 荷電ハドロンのエネルギー測定やジェット再構成に用いられ, ハドロンカロリメータはハドロンのエネルギー測定, ジェット再構成に用いられる。充分なエネルギー測定を行うために, カロリメータに到達した電子や光子, ハドロンのエネルギーをできる限り吸収して静止させる必要がある。そのために, カロリメータには一定以上の物質量が求められる。また充分な物質量を持つことで, ミューオン検出器に突き抜けてくるミューオン以外の粒子の数が減少し, ミューオンの識別精度が高まる。

電磁カロリメータ

電磁カロリメータはバレル部 ($|\eta| < 1.475$) とエンドキャップ部 ($1.375 < |\eta| < 3.2$) に分けられる。バレル部は中心に約 4 mm の隙間が存在し, そこで 2 つに分割される。エンドキャップ部は同心円状に 2 つのホイールに分割され, 外側のホイールは $1.375 < |\eta| < 2.5$, 内側のホイールは $2.5 < |\eta| < 3.2$ の領域を覆う。バレル部, エンドキャップ部共に, 鉛と液体アルゴンを組み合わせたアコーディオン型のカロリメータで構成される (図 2.8)。アコーディオン型にすることで, ϕ 方向の不感領域をなくすことができる。また放射長を X_0 とすると, 電磁カロリメータはバレル領域で $22X_0$ 以上, エンドキャップ領域で $24X_0$ 以上の厚さを持つ。

ハドロンカロリメータ

ハドロンカロリメータは電磁カロリメータの外側に設置され, $|\eta| < 1.0$ のバレル部と $0.8 < |\eta| < 1.7$ の拡張バレル部 (図 2.9), $1.5 < |\eta| < 3.2$ のエンドキャップ部 (図 2.10) に分かれている。ハドロンカロリメータは半径 2.28 m から 4.25 m, ϕ 方向に 64 分割されて配置されたモジュールである。 バレル・拡張バレル部では鉄とシンチレータを重ねた構造となっている。エンドキャップ部では電磁カロリメータと同じく液体アルゴンを使用している。ハドロンカロリメータはビーム軸垂直方向に 3 つの層に分割され, 原子核相互作用長を λ とおくと, バレル部はそれぞれ $1.5\lambda, 4.1\lambda, 1.8\lambda$, 拡張バレル部はそれぞれ $1.5\lambda, 2.6\lambda, 3.3\lambda$ の厚さを持つ。

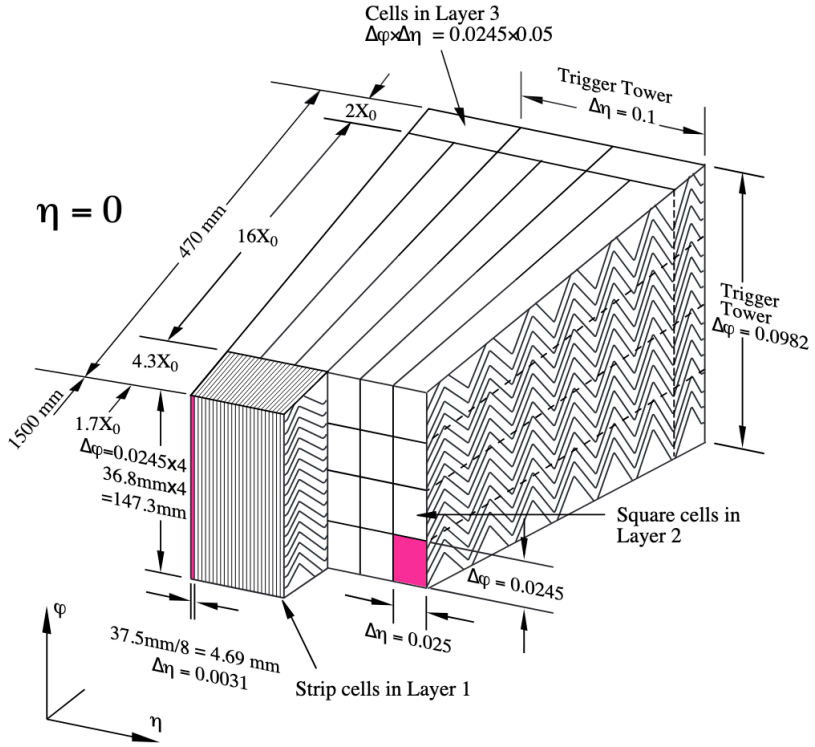


図 2.8: 電磁カロリメータの構造 (アコーディオン型)[5]

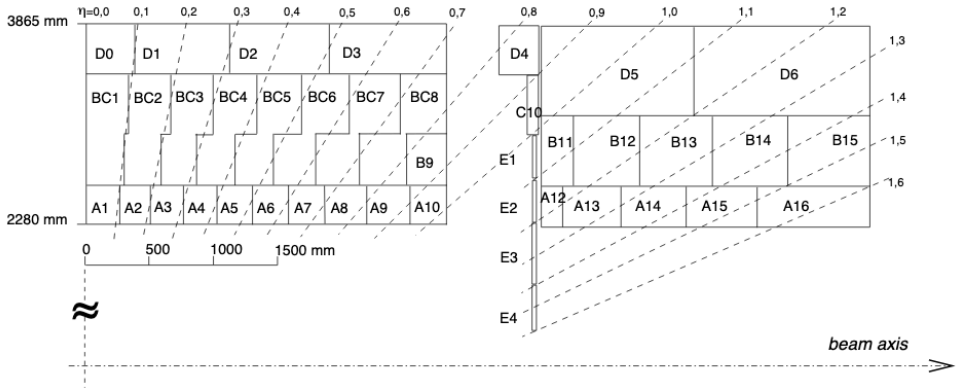


図 2.9: バレル部 (左側) と拡張バレル部 (右側) のハドロンカロリメータの構造 [5]

2.2.4 ミューオンスペクトロメータ

ミューオン検出器は ATLAS 検出器の一番外側に設置されている [5]。ミューオンは寿命 2.197 μs と ATLAS 検出器の大きさに対して十分長く, 質量が電子の約 200 倍と重いため制動放射によるエネルギー損失が小さい。そのため, エネルギーを落としきることなくミューオン検出器まで到達する。

ミューオン検出器にはトロイド磁石によって磁場がかけられ, ミューオンの飛跡は η 方向に曲げられる。基本的に 2 次元の位置検出器でミューオンの通過位置や方向を測定し, それを組み合わせて飛跡の曲率を求め, 運動量に変換する。

ミューオン検出器は主に 4 つの検出器によって構成され, トリガー用の検出器と, 精密測定用の検出器の二種類に

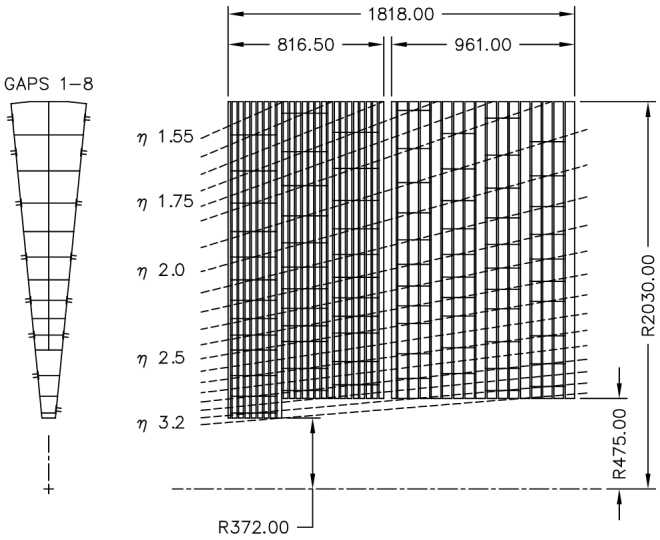


図 2.10: エンドキャップ部のハドロンカロリメータの構造 [5]

大別される。MDT(Monitored Drift Tube), CSC(Cathode Strip Chamber) は位置分解能が高いため精密測定用として, TGC(Thin Gap Chamber), RPC(Resistive Prate Chamber) は位置分解能は高くないが応答が速いため主にトリガー用として使われる。各飛跡検出器の情報を表 2.3 に示す。また後に詳しく説明するように, Run3 からはエンドキャップ部の一部が NSW(New Small Wheel) と呼ばれる検出器に置き換わる予定である。

検出器	領域	チェンバー数	z/r 分解能	ϕ 分解能	時間分解能
MDT	$\|\eta\| < 2.7$	1088	$35\,\mu$m(z)	-	-
CSC	$2.0 < \|\eta\| < 2.7$	32	$40\,\mu$m(r)	5 mm	7 ns
RPC	$\|\eta\| < 1.05$	544	10 mm(z)	10 mm	1.5 ns
TGC	$1.05 < \|\eta\| < 2.7$	3588	$2-6$ mm(z)	$3-7$ mm	4 ns

表 2.3: ミューオン検出器を構成する各飛跡検出器のパラメータ [5]

ミューオン検出器では, 検出器を r 方向に層状に重ね, ステーションと呼ばれる単位を構成する。エンドキャップ部では, 検出器を z 軸に垂直に並べてディスク状のステーションを構成する。ステーションは 3 つあり, それぞれを衝突点から近い順にインナー・ミドル・アウターステーションと呼んでいる。バレル部では, 同心円状に検出器を並べて円筒状のステーションを構成する。エンドキャップ部と同様にインナー・ミドル・アウターステーションの 3 つのステーションで構成されている。他にも EE (Endcap Extra), BEE (Barrel Endcap Extra) と呼ばれるステーションがあり, インナー・ミドル・アウターでの測定を補っている。各ステーションに配置されている検出器の種類を表 2.4 にまとめた。

また ϕ 方向によって, Small 部と Large 部が交互に 8 つずつ配置されている。ミューオン検出器の Small 部, Large 部の $r-z$ 平面断面図 (図 2.11), およびバレル部の $r-\phi$ 平面断面図 (図 2.12) を示す。

トロイド磁石

トロイド磁石は $|\eta| < 1.4$ 領域はバレルトロイド, $1.6 < |\eta| < 2.7$ はエンドキャップトロイドで構成されており, 共に同心円状の磁場を形成している。$1.4 < |\eta| < 1.6$ は transition 領域と呼ばれ, バレルトロイドとエンドキャップトロイドの境目付近にあたるため, 磁場の分布が複雑である。バレル, エンドキャップトロイドともに 8 つのコイル

	ステーション	略号	チェンバーの種類	測定方向
バレル部	インナー	BI	MDT	z
	ミドル	BM	MDT, RPC	z, ϕ
	アウター	BO	MDT, RPC	z, ϕ
	Barrel Endcap Extra	BEE	MDT	z
エンドキャップ部	インナー	EI	MDT, CSC, TGC, (NSW)	r, ϕ
	ミドル	EM	MDT, TGC	r, ϕ
	アウター	EO	MDT	r
	Endcap Extra	EE	MDT	r

表 2.4: ミューオン検出器の各ステーションに配置されているチェンバーの種類 [5]

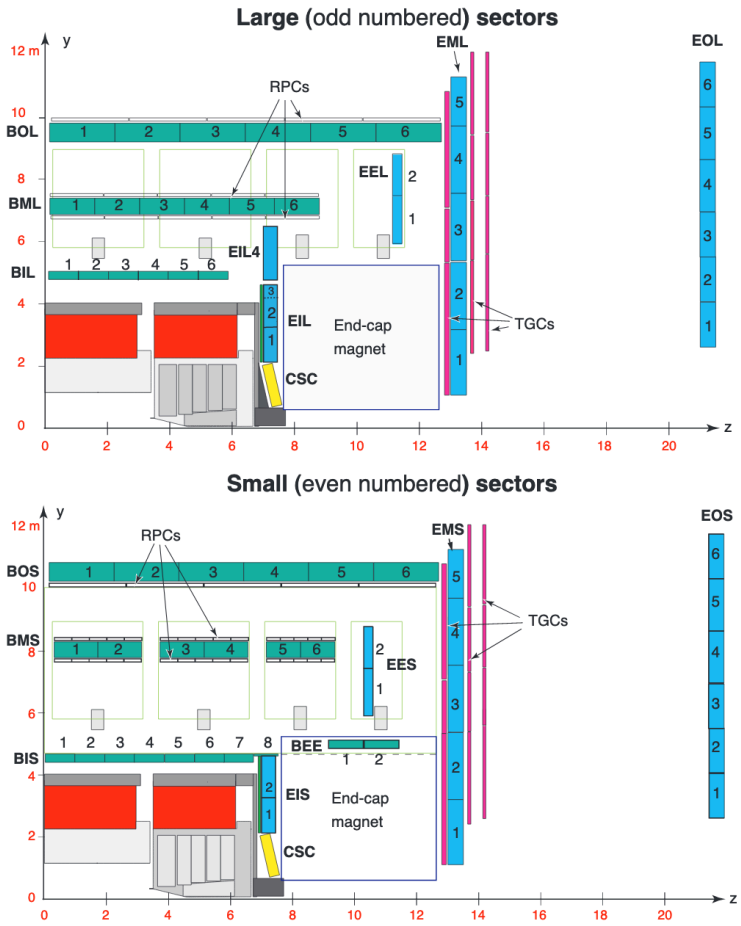


図 2.11: ミューオン検出器の Small 部 (上) と Large 部 (下) の $r-z$ 平面断面図 [8]

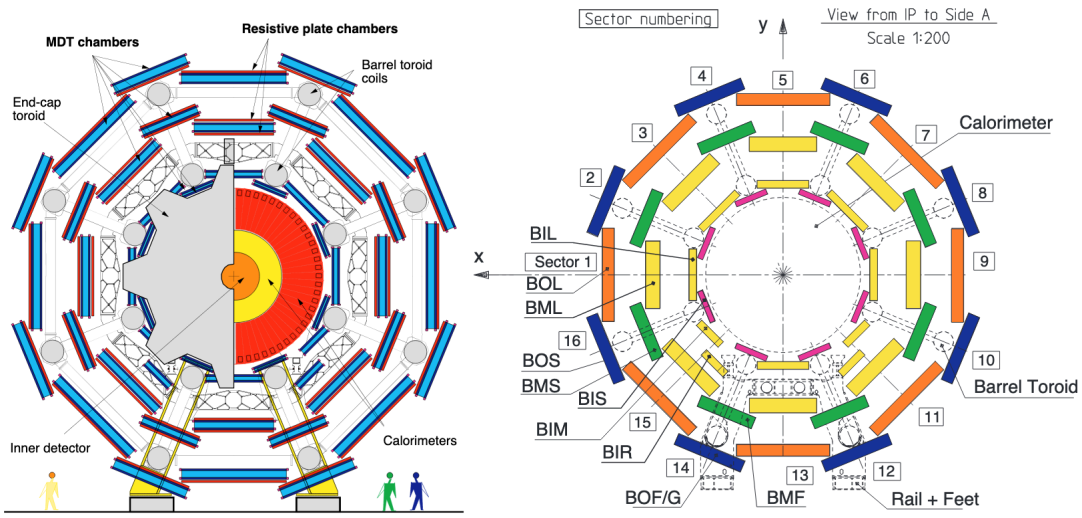


図 2.12: ミューオン検出器バレル部の $r-\phi$ 平面断面図 [8]

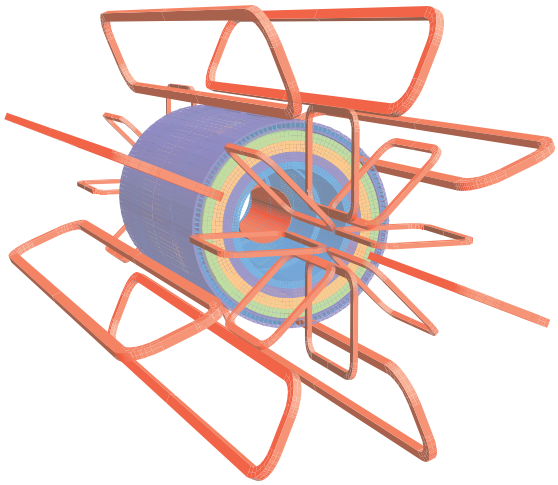


図 2.13: ミューオン検出器におけるトロイド磁石の構造 [9]

で構成され, それらがビーム軸に対して 8 回対称になるように配置されている。磁場の強さはバレルトロイドで約 0.5 T, エンドキャップトロイドで約 1 T である。ミューオン検出器におけるトロイドマグネットの構造を図 2.13 に示す。

RPC(Resistive Plate Chamber)

RPC はバレル部に設置されている主にトリガー用の飛跡検出器である。図 2.14 に示すように, ミドルステーションでは MDT を挟むように 2 枚, アウターでは Large 部では MDT の外側, Small 部では MDT の内側に 1 枚の合計 3 枚配置されている。図 2.12 右のセクター番号 12, 14 の領域は feet 領域と呼ばれる。この領域では RPC はアウターステーションの MDT を挟むように 2 枚配置されていて, Middle の 2 枚と合わせて合計 4 枚の RPC で構成される。1 つの RPC は 2 枚の RPC ストリップ層で作られ, 1 枚の RPC ストリップ層は, η, ϕ 方向をそれぞれ測定するストリップ (以降 η ストリップ, ϕ ストリップと呼ぶ) がガスギャップを挟んで組まれている。2 枚の抵抗板が 2 mm の隙間を挟んで平行に固定され, その隙間には $C_2H_2F_4/\mathrm{Iso}-C_4H_{10}/SF_6(94.7:5:0.3)$ の混合ガスが封入されている。抵抗板間には 4.9 kV/mm の電圧がかかっており, ミューオンが通過した際にイオン化した粒子がア

ノードに向かって電子雪崩を起こす。RPC 各層の構造を図 2.15 に示す。

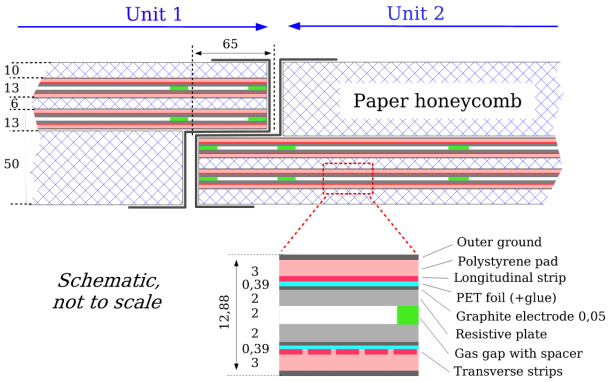


図 2.14: RPC 各層の構成 [5]

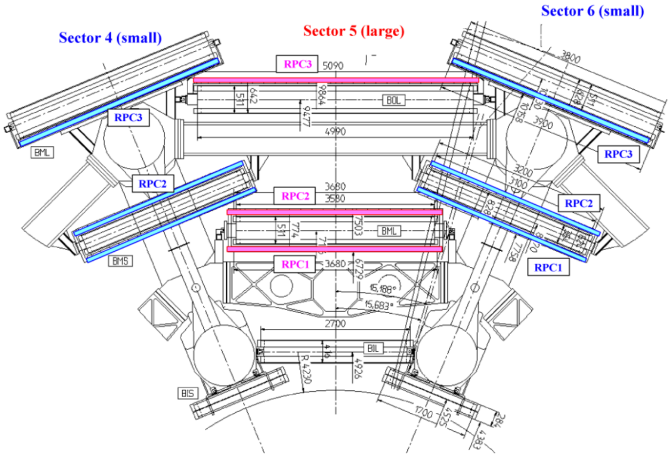


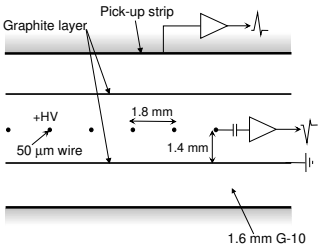
図 2.15: $x-y$ 平面で見た RPC の配置 [5]

TGC(Thin Gap Chamber)

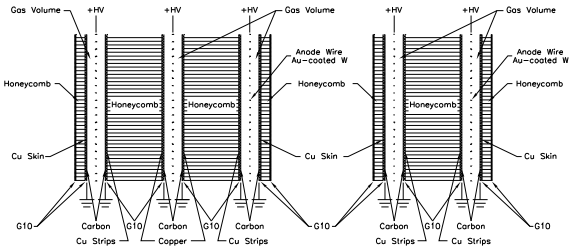
TGC はエンドキャップ部に設置されている主にトリガー用の検出器である。インナーステーションに 1 枚, ミドルに 3 枚配置されている (図 2.16a)。ミドルでは doublet 構造が 2 枚, triplet 構造が 1 枚の合計 7 層, インナーは doublet 構造が 1 枚の合計 2 層からなる。TGC の doublet 構造と triplet 構造を図 2.16b に示す。TGC の各層はワイヤーとカソード層, ストリップ層からなるマルチワイヤーガス検出器で, $r(\eta)$ 方向はワイヤー, ϕ 方向はストリップにより測定される。ワイヤー間の距離は 1.8 mm, ワイヤーとストリップの距離は 1.4 mm とワイヤー間の距離を短くすることによって高い時間分解能を実現している。また内部は CO_2 と $n-C_5H_{12}$ ガスが充填されている。

MDT(Monitored Drift Tube)

MDT は高い位置分解能を持ち, 精密測定に用いられる。MDT は, アルゴンと二酸化炭素ガスが 93 : 7 の割合で封入された半径 27.979 mm のドリフトチューブで構成され, 荷電粒子が通過することによって電離した電子が, チューブの中心にある 3080 V の電圧がかかったワイヤーに集められる。チューブ内に同心円状の電場が作られるため, 荷電粒子の通過位置は電子のドリフト距離から求めたドリフト円の接線である (図 2.17)。チューブのドリフト時間は最大 700 ns であるため, TGC, RPC の時間分解能が 4 ns, 1.5 ns であることに比べて時間分解能は悪い。



(a) TGC のガスギャップの断面 [9]



(b) TGC チェンバーの断面 [9]。左が triplet 構造, 右が doublet 構造。

図 2.16: TGC の断面図

MDT はチューブ 4 層または 3 層からなるチェンバーを 2 枚重ねた構造となっている (図 2.18)。MDT 自身や, それを支えるフレームなどが変形することなどによって位置がずれる可能性があるため, MDT 内部には位置のずれやチェンバー間の位置を定期的に測定するシステムが備わっている。これは図 2.18 で示すように, チューブと平行に射出された 2 本と, 交差するように射出された 2 本のレーザーで行われる。このシステムは ATLAS 検出器が稼働している間も継続して作動しており, 数 μm 単位でずれを検出し記録する。MDT はバレル部では長方形型, エンドキャップ部では台形型である。 チューブはそれぞれ ϕ 方向に沿って並べられている。そのため, MDT はバレル部では z 方向, エンドキャップ部では r 方向のみを測定できる。MDT はエンドキャップ部, バレル部でそれぞれインナー, ミドル, アウターの 3 層に分かれ, ϕ 方向は Large 部と Small 部が交互に 8 つずつ配置されている。またエンドキャップ部ではインナーとミドルの間に EE チェンバーが設置されている。

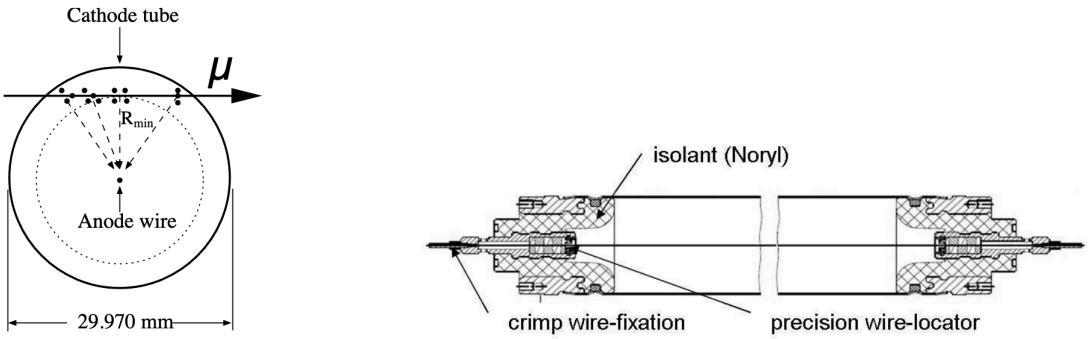


図 2.17: MDT チューブの断面図 [5]

CSC(Cathode Strip Chamber)

MDT が安定して検出を行うための粒子の到来頻度の上限は $150\,\mathrm{Hz/cm_2}$ 程度である。しかし $|\eta| > 2$ の領域におけるミューオン検出器第一層ではこの到来頻度を越えるため, MDT ではなくより位置と時間の分解能に優れ, 高い粒子到来頻度に対応できる CSC を用いる。CSC の粒子到来頻度の上限は $1000\,\mathrm{Hz/cm^2}$ であり, CSC が置かれている $2.0 < |\eta| < 2.7$ の領域における粒子到来頻度と比較しても十分な耐性を持つ。CSC は MDT と同じように ϕ 方向に Large 部と Small 部を 8 つずつ交互に並べた配置である (図 2.19)。1 つの CSC は η, ϕ を測定できる層を 4 枚重ねた構造になっている。CSC の各層は r 方向にそって並べられたワイヤーと, それと垂直および平行に配置されたストリップからなる。電子のドリフト時間は 40 ns 以下, 時間分解能は 1 層で約 7 ns である。また炭化水素ではなくアルゴンと二酸化炭素ガスを用い, さらに気体を封入する体積を小さくすることでバックグラウンドとなる中性子の検出感度を低くしている。CSC 各層の構造を図 2.20 に示す。

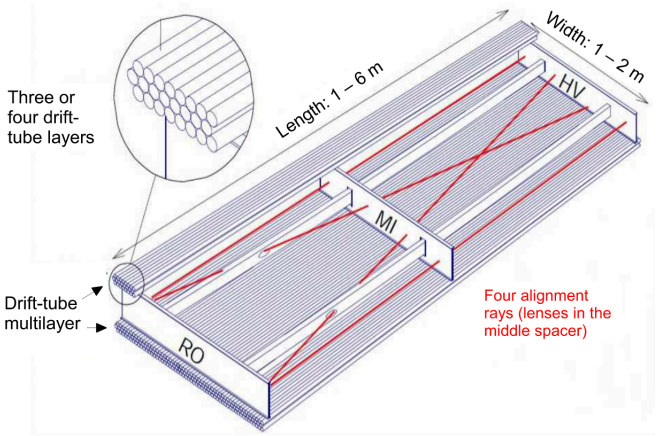


図 2.18: MDT の構造 [5]

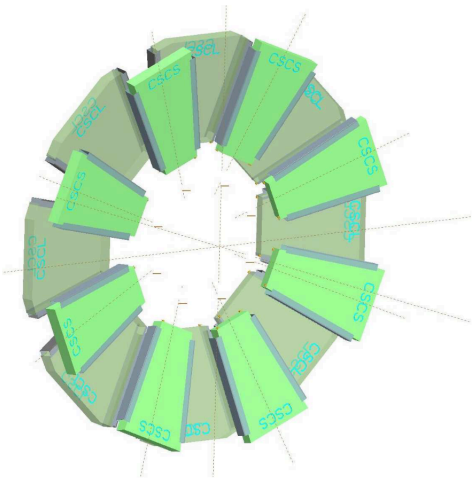


図 2.19: CSC の配置 [5]

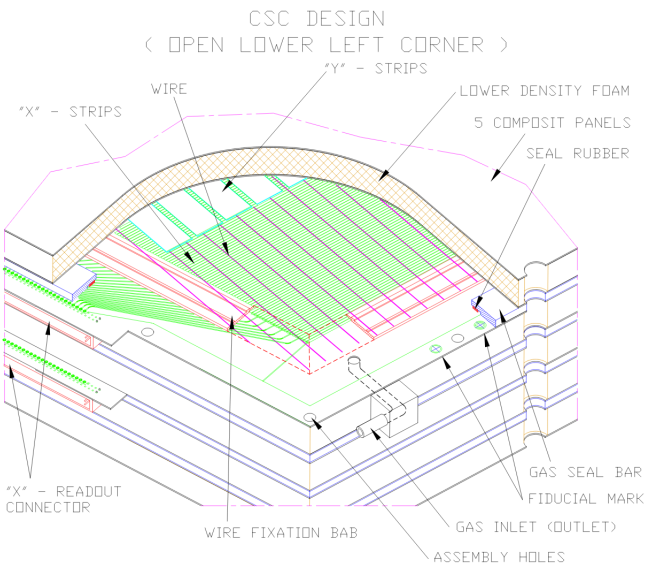


図 2.20: CSC 各層の構造 [5]

NSW(New Small Wheel)

NSW は Run3 からエンドキャップ部のインナーステーションに導入される予定の検出器である。磁場領域内側の $1.3 < |\eta| < 2.42$ の範囲をカバーし, Large 部と Small 部では同じ構造で大きさが異なるものを用いて全ての ϕ を覆うように設置される (図 2.21)。

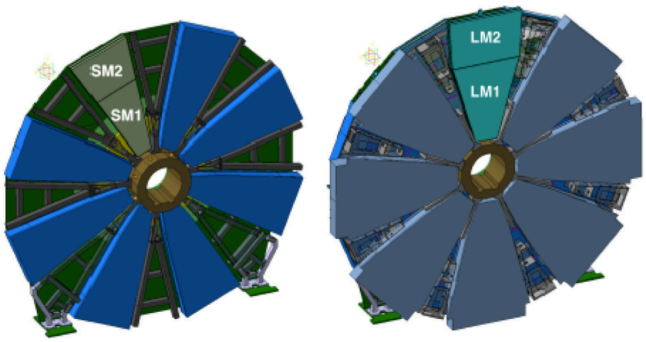


図 2.21: NSW の Large 部 (左) と Small 部 (右) の構造 [10]。Large 部と Small 部が各 8 セクターずつ, ϕ 方向に 2° 重なった状態で交互に配置されている。

NSW はトリガー用の small-strip TGC(sTGC), 精密測定用の Micromegas(MM) の二種類の検出器からなり, 衝突点から近い順に sTGC×4, MM×4, MM×4, sTGC×4 という並びの 16 層で構成されている。

Micromegas(Micro mesh gaseous structure) は高い位置分解能とレート耐性を持つガス検出器である。図 2.22 に Micromegas の構造を示す。Micromegas は上から順にドリフト用カソード電極板, 5 mm 程度のガスギャップ,

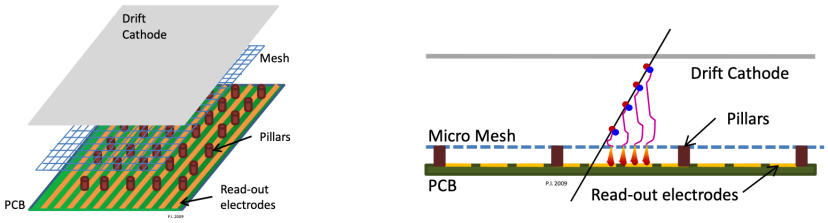


図 2.22: Micromegas の構造 [11]

金属メッシュ, 100 μm 程度の増幅領域とメッシュを支えるピラー, 読み出し電極, PCB で構成されている。ガスには Ar:CO_2= 93:7 の混合ガスを用いている。ドリフト領域と増幅領域が分かれているのが Micromegas の大きな特徴で, 電場の大きさはそれぞれ数 100 V/cm, 約 50 kV/cm であり, ドリフト領域で入射粒子によって電離された種電子が電場に沿って移動し, 増幅領域で電子雪崩を起こす。100 μm 程度の非常に狭い増幅領域による陽イオン高速回収 ($\sim$ 100 ns) が高ヒットレートへの対応を実現している。増幅された電子群をストリップ型の読み出し電極で受け取ることで, 入射粒子の位置を得ることができる。450 μm ピッチの読み出し電極による高精度位置分解能も Micromegas の利点である。

sTGC は現行の TGC に比べてストリップの間隔が小さく (3.2 mm), よい位置分解能を達成する。図 2.23 に sTGC の構造を示す。sTGC は 50 μm の金メッキタングステンワイヤが 1.8 mm 間隔で並び, このワイヤ面が 1.4 mm の距離で 2 つのカソード板に挟まれた構造になっている。カソード板は厚さ 100 μm の G-10 板にグラファイト・エポキシ混合物を吹きかけたものである。 一方のカソード板の背面にはストリップが, もう一方の背面にはパッドが組まれている。現行の TGC とは異なり, η 方向をストリップ, ϕ 方向をワイヤで測定することが可能である。

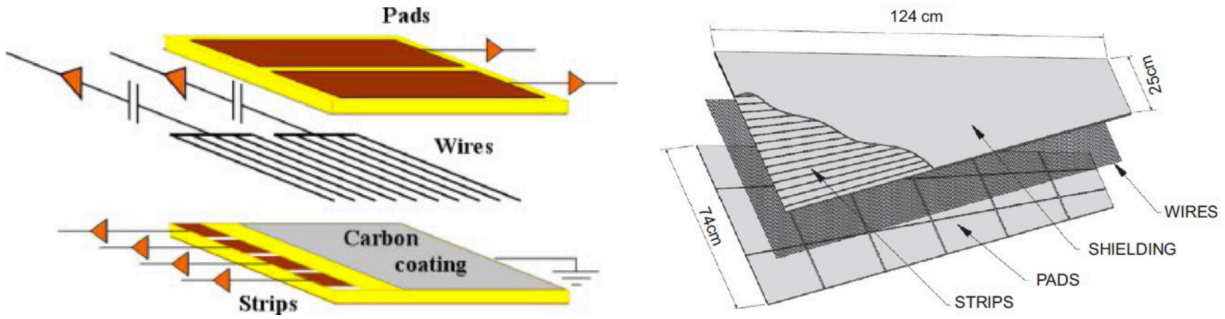


図 2.23: sTGC の構造 [11]

第 3 章

ATLAS トリガーシステム

LHC では 40MHz の頻度でバンチ同士の衝突を行う。しかし, その全てをデータとして記録することは計算機資源と事象再構成の計算リソースの限界のために不可能である。そのため ATLAS 実験では, トリガーシステムを用いて興味のある事象を選び出して記録することにより, データ取得頻度を 2kHz 程度に抑えている。

ATLAS のトリガーは目的とする物理に応じて様々な種類が用意され, ジェット, 電子, タウ, ミューオン, Missing Transverse Energy (E_T^{miss}) や Total Transverse Energy (E_T^{total}) などの特徴を持つ事象を選ぶトリガー論理をトリガー信号の基本的な要素としている。また, これらの基本的な要素を組み合わせ, 物理解析に必要な事象を効率よく集めるトリガーも複数用意されている。事象の選別には, 基本的に測定した運動量やエネルギーに対してしきい値を設定することで行う。例えばミューオンに対しては p_T にしきい値を設け, 電子やジェットに対してはエネルギーのしきい値を設けることで事象を選別する。また, p_T 以外のパラメータを要求するトリガーもある。例えば 2 つのミューオンが存在する事象のためのトリガーでは, 2 ミューオンの不変質量が何らかの共鳴付近にあることを要求するものも用意されている。

トリガーシステムは高速かつ精密な事象選別が求められるため, 多段階にトリガー判定を行う。トリガーシステムは, ハードウェアによる高速で大まかな事象選別を行うレベル 1 トリガー (L1) と, ソフトウェアによるオンライン事象再構成に基づいた精密な事象選別を行うハイレベルトリガー (HLT) に大別される。L1 トリガーはトリガー情報として Region of Interest(RoI) を出力する。RoI はどの検出器のどの η, ϕ でトリガーが発行されたかという情報を含み, HLT への入力となる。HLT ではミューオン, 電子等をオンラインで再構成するアルゴリズムを走らせ, 対応するレベル 1 トリガーに対してより精密なトリガー判定を行う。HLT は多段階に分かれている。初めに RoI 周辺の検出器情報からトリガー判定を行い, 負担の大きいデータ読み出しの頻度を軽減する Level 2 (L2) と, オフラインと同等の精密な飛跡再構成を行うイベントフィルター (EF) から構成されている。

3.1 ミューオントリガーシステム

図 3.1 にミューオントリガーの流れを示す。L1 ではハードウェアを用いた高速なトリガー判定を行い, トリガーが発行されたミューオンに対して RoI を定義する。HLT では RoI 周辺の検出器情報を用いて多段階の飛跡再構成を行い, それぞれの段階で飛跡から求めた p_T にしきい値を設けることでトリガー判定を行う。ミューオントリガーシステムも他のトリガーと同様に L1 と HLT (L2, EF) から構成される。ミューオン HLT トリガーの L2 は Standalone muon trigger (MuonSA), Combined muon trigger (MuonCB) の 2 段階にさらに分かれる。HLT の初段となる MuonSA では, RoI 周辺のミューオン検出器情報からミューオンの飛跡を再構成し, 次段である MuonCB の入力とする。MuonCB では MuonSA で再構成した飛跡と内部飛跡検出器の情報を組み合わせることで, より正確な飛跡の再構成と p_T 計算を行う。最後の EF にてミューオン検出器と内部飛跡検出器の情報をもとにしたオフラインと同等の精密な飛跡再構成アルゴリズムを用いることにより, 更に正確なトリガー判定を行う。次節にて各段

階を詳しく説明する。

3.1.1　レベル 1 ミューオントリガー

ここではレベル 1 ミューオントリガーについて, バレル部とエンドキャップ部それぞれに対して説明する。特に, 本論文で重要となるバレル部のレベル 1 ミューオントリガーについて詳細に説明する。

バレル部

バレル部のレベル 1 ミューオントリガーは RPC を用いて行う。バレル部にはミドルステーションに RPC1, RPC2 の 2 層, アウターステーションに RPC3 の 1 層が配置されている。RPC 層は, η または ϕ 方向 の測定を行う RPC ストリップ (以降それぞれを η ストリップ, ϕ ストリップと呼ぶ) を重ねたダブレット構造をしており, これを重ねてユニットを組んでいる。つまり, 1 層の RPC につき η, ϕ ストリップすべて含めて 4 層の RPC レイヤーで構成されている。

トロイド磁石によってミューオンの飛跡は η 方向に曲げられる。その曲率は p_T に依存し, 高い p_T のミューオンほどあまり曲がらないため, RPC 3 を通過しやすくなる。そのため, 低い p_T の場合の判定は RPC1, RPC2 の 2 層, 高い p_T の場合の判定は RPC1, RPC2, RPC3 の 3 層を用いてトリガー判定を行う (図 3.3)。Run2 までの期間では, 低い p_T しきい値の場合は 3 種類 $(4, 6, 10\,\mathrm{GeV})$, 高い p_T しきい値の場合は 4 種類 $(11, 15, 20, 21\,\mathrm{GeV})$ 用意されていた。21 GeV の p_T しきい値は, RPC3 層の中でもフィートセクターに配置された RPC 層にヒットが存在し, それを用いてトリガーを発行する場合のために用意されている。

バレル部レベル 1 トリガーは η の正負, 及び ϕ 方向に 32 分割された, 合計 64 分割のそれぞれ独立なトリガーセクターごとに判定を行う。各セクターは更に $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.2 \times 0.1$, $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.2$ の大きさの Coincidence matrix (η−CM, ϕ−CM) に区分され, この区分で RPC1 と RPC2, または RPC2 と RPC3 のコインシデンスをとる。隣接する 2 つずつの η−CM, ϕ−CM をまとめて $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.2 \times 0.2$ の大きさの Pad を構成し, Pad 内の η−CM,

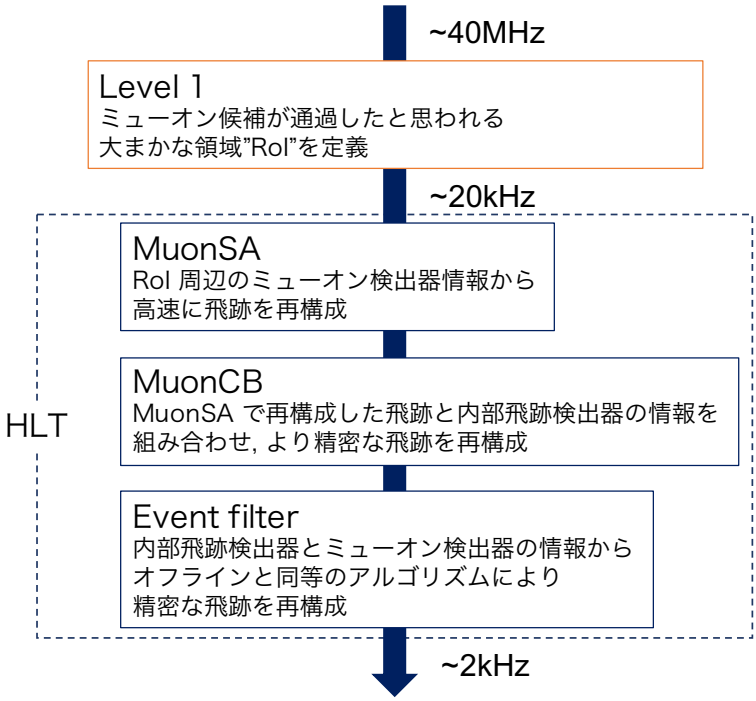


図 3.1: ミューオントリガーシステムの流れ。

ϕ−CM それぞれ 1 つが重なる $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ の領域を RoI と定義する (図 3.2)。Pad は η−CM, ϕ−CM から取れた RPC ヒットのコインシデンスにより p_T しきい値の判定を行い, RoI を出力する。1 つの Pad から出力される RoI は最大 1 つである。

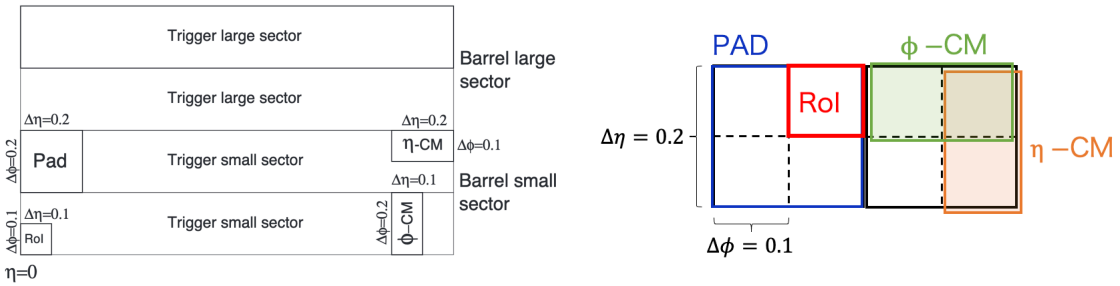


図 3.2: バレル L1 トリガーの Coincidence matrix (CM) と Pad の構成。η−CM と ϕ−CM が重なる領域が RoI。

p_T しきい値の判定では, 初めに RPC2 にヒットがあることを要求する。次に RPC2 のヒットと衝突点を直線で結び, その周りの一定幅を RPC ヒット探索領域と決める。この探索領域のことをロードと呼ぶ。偶発的な背景事象を減らすため, 探索領域は η, ϕ に対して範囲が設定されている。また, 要求する p_T しきい値が高くなるほど探索領域を狭める。 低い p_T しきい値のトリガーに対しては探索領域内に RPC1 と RPC2 合わせて 4 層のうち, 3 層以上でヒットが見つかることを要求する。高い p_T しきい値のトリガーでは RPC3 の情報も用いる。RPC1, RPC2 にヒットが見つかった後, 今度は RPC3 の方向へロードを広げる (図 3.3)。要求する p_T しきい値に応じてロードの広さを変え, RPC3 の 2 層の内 1 層以上でヒットが見つかることを要求する。

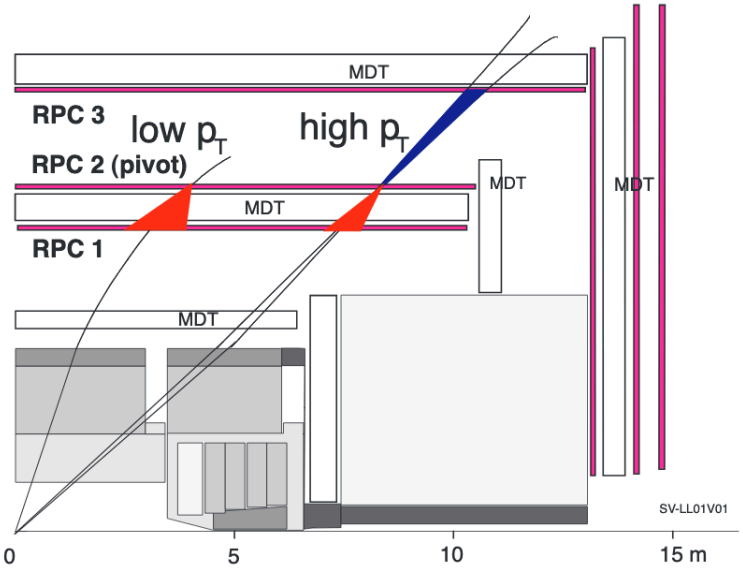


図 3.3: バレル部レベル 1 ミューオントリガーアルゴリズム [12]。左の飛跡は低い p_T しきい値の判定, 右の判定は高い p_T しきい値の判定に使用されるロード。

エンドキャップ部

エンドキャップ部のレベル 1 トリガーは TGC を用いて行う。TGC はインナーに 1 枚 (I), ミドルに 3 枚 (M1, M2, M3) 配置されている。トリガーしきい値の判定に用いられる TGC はミドルの 3 枚であり, インナーの TGC はバックグラウンド除去のために用いられる。バレル部と同様に p_T しきい値によって使用する TGC 層の枚数が異な

り, 低い p_T しきい値の場合は M2, M3 の 2 枚, 高い p_T しきい値の場合は M1, M2, M3 の 3 枚の情報を使用する。p_T しきい値の判定では, まず M3 層にてヒットがあることを要求し, ヒットと衝突点を直線で結ぶ。その直線から η, ϕ 平面にヒットの探索範囲を広げ, ロードを定義する。低い p_T しきい値の場合は M2 でロード内のヒットを探す。M2, M3 はそれぞれ η を測定するワイヤー, ϕ を測定するストリップのユニット 2 層で構成される。探索領域内に M2, M3 合わせて 4 層の内 3 層でヒットがあることを要求する。この時ロードの中心と M2 内のヒットとの距離は, p_T が小さいほど大きくなる。この性質を利用して, エンドキャップ部ではコインシデンスウィンドウ (CW) を RoI ごとに用意し, ロード中心と TGC ヒットの $\Delta\eta, \Delta\phi$ を求めることによって, 要求する p_T しきい値を満たしているか判断している。高い p_T しきい値の場合は M1 までロードを外挿する。M1 は 3 層のワイヤー, 2 層のストリップからなる (トリプレット構造)。ワイヤー 3 層のうち 2 層, ストリップ 2 層のうち 1 層にヒットがあることを要求する。また TGC インナーが使用できる領域ではインナーにもヒットがあることを要求し, 背景事象の削減を行う。

高い p_T しきい値の判定を行う際は、M1, M2 のコインシデンス, M1, M2, M3 のコインシデンス両方を用いるが, 低い p_T しきい値の場合は M1, M2 のコインシデンスのみを用いる。p_T しきい値決定方法の概念図を図 3.4 に示す。

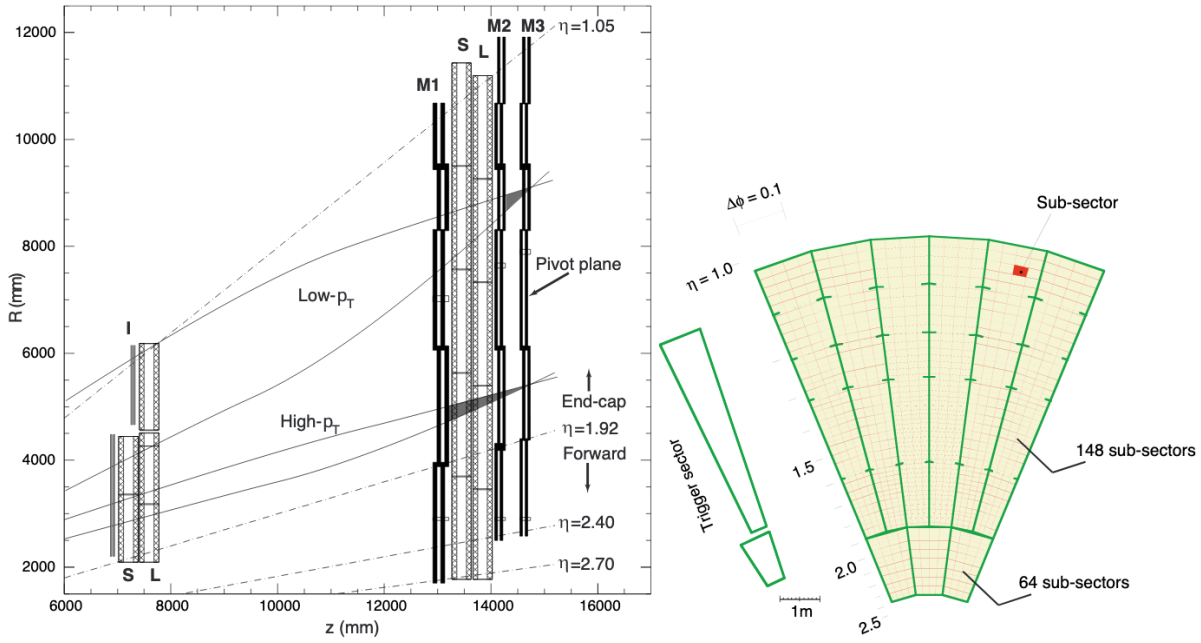


図 3.4: エンドキャップ部レベル 1 ミューオントリガーの概念図 (左) とエンドキャップで定義されている RoI の区分 (右)[5]。

L1 トポロジカルトリガー

B_s 粒子の 2 ミューオン稀崩壊モードなどの B の物理では, 低い p_T ミューオンを取得することが重要である。しかし, 単に p_T しきい値を低くしたトリガーでは事象取得頻度が高く, その全てを取得することは不可能である。そこで, p_T 以外にもイベントトポロジーに応じた要求を行うことで, 低い p_T しきい値でもトリガー頻度の上昇を抑えている。L1 ミューオンにおけるトポロジカルトリガーでは, 2 ミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ や, 2 ミューオンの不変質量

$$m_{\mu\mu}^2 = 2p_{T1}p_{T2}(\cosh\Delta\eta - \cos\Delta\phi) \tag{3.1}$$

に対する要求を行っている。図 3.5 に, $p_T \geq 6\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求するレベル 1 トリガーと, それにイベントトポロジーに対する要求を加えた L1 トポロジカルトリガーのトリガー頻度をルミノシティブロックご

とに示す [14]。この L1 トポロジカルトリガーでは, 2 ミューオンの不変質量が $2 < m_{\mu\mu} < 9\,\mathrm{GeV}$, $\Delta R_{\mu\mu}$ が $0.2 < \Delta R_{\mu\mu} < 1.5$ であることを要求している。また, ルミノシティブロックとは 1 つのランをある時間で区切ったものであり, 1 ルミノシティブロックは約 60 秒に相当する。図から, 2 ミューオンに $p_T \geq 6\,\mathrm{GeV}$ の要求を行うトリガーの頻度に対して, この場合の L1 トポロジカルトリガーは頻度がおよそ 4 分の 1 にまで削減することができている。

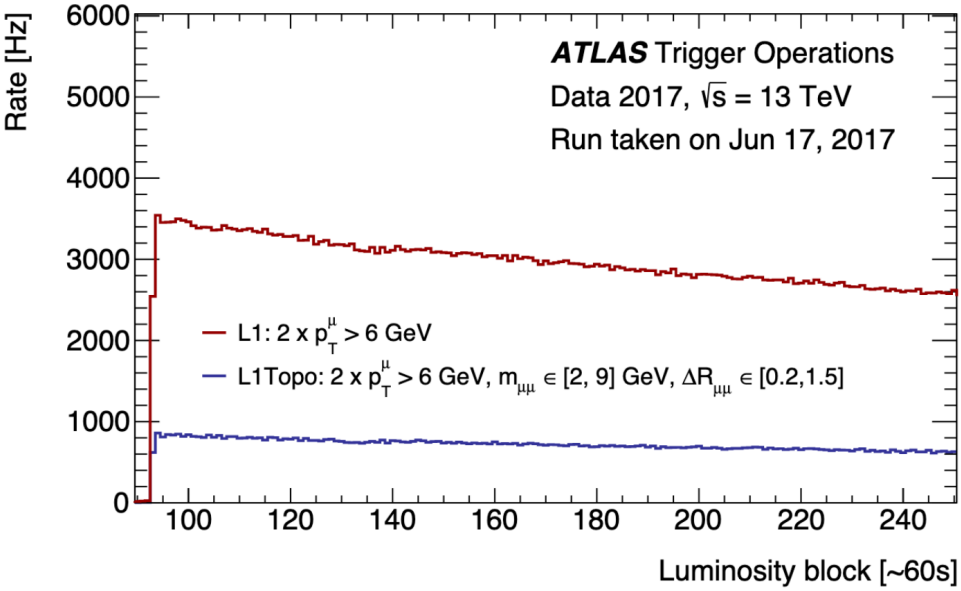


図 3.5: $p_T \geq 6\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求するレベル 1 トリガーと, それにイベントトポロジーに対する要求を加えた L1 トポロジカルトリガーのトリガー頻度 [14]。トポロジカルトリガーでは, 不変質量に対して $2 < m_{\mu\mu} < 9\,\mathrm{GeV}$, $\Delta R_{\mu\mu}$ に対して $0.2 < \Delta R_{\mu\mu} < 1.5$ を要求している。横軸は 1 つのランをある時間で区切ったルミノシティブロック (Luminosity Block:LB) ごとで, 1LB は約 60 秒に相当する。

3.1.2　Standalone muon trigger (MuonSA)

MuonSA は HLT の初段に当たるトリガーである。L1 から受け取った RoI の周辺でミューオン検出器情報を読み出し (検出器ヒットを取得), ミューオン候補の飛跡を再構成する。再構成したミューオン候補から p_T を計算し, しきい値を設けてトリガー判定を行う。 再構成したミューオン候補の飛跡は後段の MuonCB に渡され, 内部飛跡検出器のミューオン候補の飛跡と組み合わせるために用いられる。ここでは, 本研究にて改良するバレル部の Run2 における MuonSA アルゴリズムについて詳しく説明する。バレル部のアルゴリズムは大きく以下の手順に分かれる。

1. RoI 周辺の RPC ヒットを取得
2. ロードを引く
3. ロード内の MDT ヒットから, 各ステーションにミューオンの位置と方向の情報 (superpoint) を求める
4. superpoint から p_T を計算

以下に各手順の詳細を示す。

RoI 周辺の RPC ヒットを取得

L1 から受け取った RoI の η, ϕ 中心から $|\Delta\eta| = 0.1, |\Delta\phi| = 0.1$ 以内にある RPC ヒットを, 各ステーションにて選ぶ (図 3.6a 参照)。典型的に RoI の大きさは $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ であるため, MuonSA での RPC ヒット探索

領域はおおよそ隣接する RoI の中心付近まで至る。

ロードを引く

取得した RPC 各層の η ストリップヒットを用いて, ミューオン検出器のインナー, ミドル, アウターステーションそれぞれに飛跡を大まかに再構成する。荒く再構成した各ステーションでの飛跡に一定の幅をもたせた領域をロードと定義する。ロードは, ミューオン候補の通過位置を再構成するための MDT ヒットを選ぶ役割を持つ。なお, MDT ヒットからミューオン候補の ϕ 座標は測定できないため, RPC の ϕ ストリップヒットを用いてミドルステーションの ϕ 座標を計算し, MuonSA の ϕ 座標とする。

ロードの幅はステーションや RPC フィットが成功したかどうかによって異なる。RPC フィットが成功した場合のロード幅は, インナー, アウターステーションでは 400 mm, ミドルステーションでは 200 mm に設定されている。RPC フィットに失敗し, RoI 中心をロード中心として代用する場合は, インナーステーションのロード幅が 500 mm, ミドルステーションでは 650 mm, アウターステーションでは 800 mm に設定されている。

RPC ヒットから荒い飛跡を決定する大まかな流れを図 3.6 に示す。初めに RPC ヒット (η ストリップのみ) を各 RPC ストリップ層から 1 つずつ選び, 各層にまたがる RPC ヒットのまとまりを作成する (図 3.6b 参照)。このまとまりのことを RPC ヒットセットと呼ぶ。各 RPC ストリップ層から 1 つの RPC ヒットを選び RPC ヒットセットを作成するまでの流れは,

1. 起点となる RPC ヒットを 1 つ選び, RPC ヒットセットに加える。起点の属する RPC ストリップ層を i 層とし, RPC ヒットの座標を $(z_{\mathrm{RPC,i}}, r_{\mathrm{RPC,i}})$ とする。
2. RPC ストリップ $i+1$ 層で, 原点から見た起点の傾き $z_{\mathrm{RPC,i}}/r_{\mathrm{RPC,i}}$ に最も近い傾きを持つ RPC ヒットを, 一定の傾きの範囲内で探索する。
3. 最も近い傾き $z_{\mathrm{RPC,i+1}}/r_{\mathrm{RPC,i+1}}$ を持つ RPC ヒットをセットに加える。
4. RPC ストリップ $i+2$ 層で, 手順 3. にて加えた RPC ヒットに最も近い傾き $z_{\mathrm{RPC,i+2}}/r_{\mathrm{RPC,i+2}}$ を持つ RPC ヒットを一定範囲内で探索する。
5. 手順 3. と 4. を RPC ストリップ最外層まで行い, 1 つの RPC ヒットセットを完成させる。
6. 起点を別の RPC ヒットに移し, 再度 1. から同様の手順を行う。起点となる RPC ヒットは, 一番外側の RPC ストリップ層以外のヒット全てである。

である。このように, このアルゴリズムは衝突点に近い RPC ヒットから遠い方へと RPC ヒットを探索する。

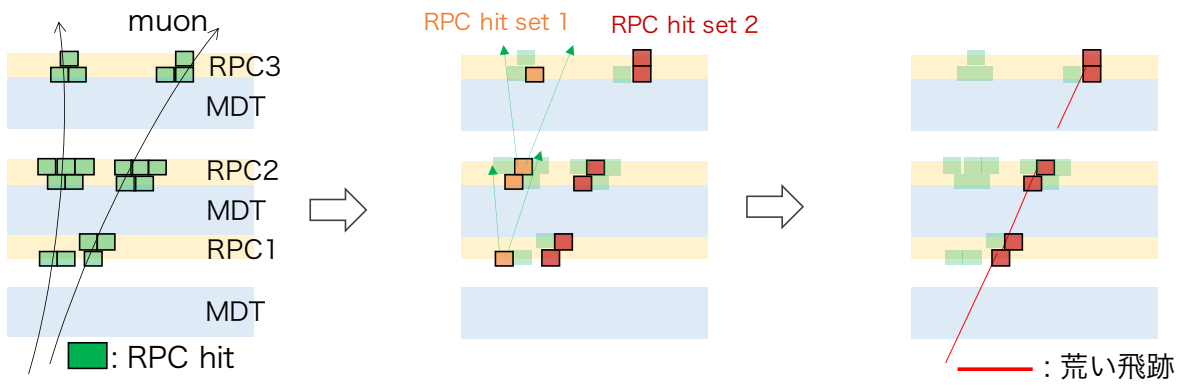
複数の RPC ヒットセットがある場合は, 以下の優先順位に基づいて 1 つのセットを選び, そのセットを用いて荒い飛跡を再構成, ロードを作成する。

1. RPC ヒットセットに含まれる, RPC ヒット数が最大のもの
2. RPC ヒットセットのうち, RPC1 層のヒットの傾きと RPC2 層のヒットの傾きが最も近いもの
3. RPC ヒットセットのうち, RPC2 層のヒットの傾きと RPC3 層のヒットの傾きが最も近いもの

選ばれた RPC ヒットセットを用いて, 荒い飛跡 (ロード中心) を, セットに含まれる RPC ヒットをインナー, ミドル, アウターステーションそれぞれについて直線でフィットすることで作成する (図 3.6c 参照)。以下に各ステーションでのロード中心作成方法を述べ, その概要図を図 3.7 に示す。

インナーステーションのロード中心

インナーステーションには RPC 検出器がない。そのため, ミドルステーションの RPC ヒットからロード中心を作成する。上記のように選ばれた RPC ヒットセットの中に, RPC1 層に 2 つ, かつ RPC2 層に 2 つ, すなわちミドルステーションに計 4 つの RPC ヒットがある場合, RPC1 層の RPC ヒットと原点を結んだ直線



(a) RoI 周辺の RPC ヒットを取得　**(b)** 傾きが近い RPC ヒットをまとめてセットを形成　**(c)** 最もヒット数の多いセットから各ステーションに荒く飛跡を再構成

図 3.6: RPC ヒットからロードを作成する流れ

と, RPC1, RPC2 層の RPC ヒットを結んだ直線の二等分線をロード中心とする。一方, ミドルステーションに 3 つ以下の RPC ヒットが存在する場合, RPC1 層の RPC ヒットと原点を結んだ直線をロード中心とする。

ミドルステーションのロード中心

RPC ヒットセットに含まれる RPC1 層, RPC2 層の RPC ヒットを直線フィットすることでロード中心を作成する。もし RPC1 層, または RPC2 層にのみ RPC ヒットが存在する場合, その層のうち最も衝突点に近い RPC ヒットと原点を結んだ直線をロード中心とする。

アウターステーションのロード中心

RPC ヒットセットに含まれる RPC2 層, RPC3 層の RPC ヒットを直線フィットする。もし RPC2 層, または RPC3 層にのみ RPC ヒットが存在する場合, その層のうち最も衝突点から遠い RPC ヒットと原点を直線で結びロード中心とする。

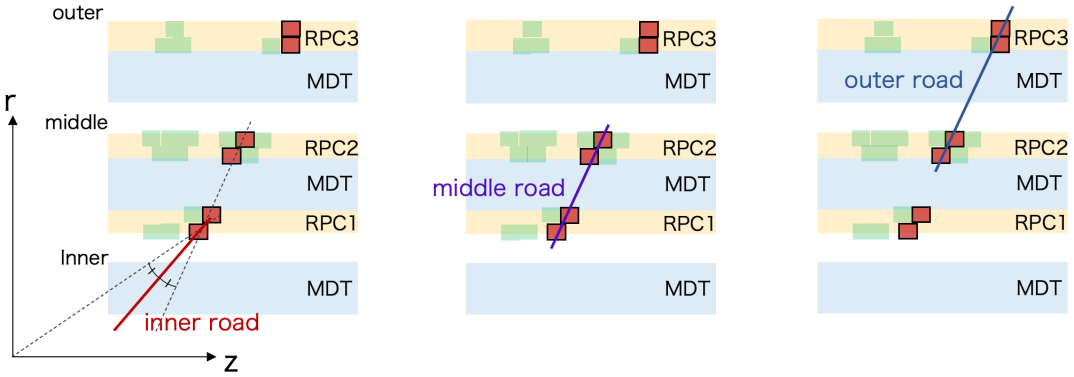


図 3.7: インナー, ミドル, アウターステーションの荒い飛跡 (ロード中心) 作成に用いる RPC ヒット

また, RPC ヒットセットに含まれる RPC ヒットが不十分な場合などは RPC フィットが失敗するときもある。その際は RoI の中心をロードの中心として代用する。

ロード周辺の MDT ヒットから superpoint を求める

superpoint はミューオン検出器の各ステーションにおけるミューオン候補の通過位置と, 通過方向の情報をあわせたもので, MDT ヒットから作成する。superpoint を作成するための大まかな手順は, ロード内の MDT ヒットを選ぶ, 選ばれた MDT ヒットのドリフト円 の接線をフィットする, の 2 つに分けられる。ロード内の MDT ヒットを選別する方法を図 3.8 と共に説明する。 初めに MDT ヒットの座標 $(r_{\mathrm{MDT}}, z_{\mathrm{MDT}})$ と, ロード中心 $r = a_w z + b_w$ の傾きと切片 (a_w, b_w) を用いて, residual を計算する。residual は

$$\mathrm{residual} = \frac{z_{\mathrm{MDT}} - \dfrac{(r_{\mathrm{MDT}} - b_w)}{a_w}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{1}{a_w}\right)^2}} \quad (\mathrm{mm}) \tag{3.2}$$

と定義される。ロードの傾き a_w の大きさが 10^{-4} より小さい場合, residual の発散を防ぐため, 代わりに residual $= r_{\mathrm{MDT}} - b_w$ として定義する。計算した residual がロードの幅よりも大きい場合, superpoint 作成には考慮しない。

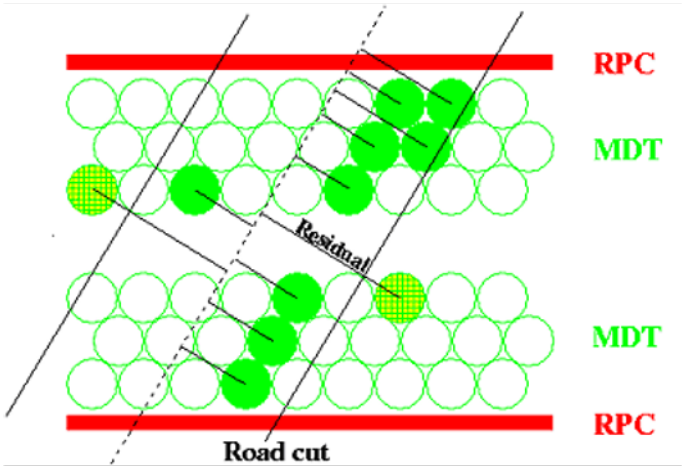


図 3.8: ロード内の MDT ヒットの選別 [15]。破線がロード中心を表す。

次に, ロード内の MDT ヒットのうち, 最もロード中心に近い MDT ヒットを各 MDT 層から最大 1 つ選択する。選択された各 MDT ヒットのドリフト時間から距離に換算したドリフト円の距離 (ドリフト半径) をもとに, その円全てに接する直線を仮定して直線フィットを行う。最も χ^2 の小さいものを各ステーションでのミューオン候補の飛跡と決定し, この飛跡と各 MDT チェンバーの中心線との交点を superpoint の r 及び z 座標とする。また, 飛跡の傾きを superpoint の傾きとする (図 3.9)。

superpoint から p_T を計算

superpoint の情報を用いて p_T と相関のあるパラメータを計算し, p_T を求める。MuonSA では事象を高速で処理することが求められるため, p_T と相関のあるパラメータからその都度 p_T を計算するのではなく, 予め両者の関係性を定義した表 (Look Up Table) をメモリ上に用意しておき, p_T と相関のあるパラメータから即座に p_T を引き出す。

バレル部ではインナー, ミドル, アウターステーションの superpoint から円軌道を再構成し, その曲率半径を p_T と相関のあるパラメータとする。3 つのステーション全てで superpoint を作成できた場合は, 3 点から円軌道を作成し曲率半径を計算する。3 つのステーションのうち 2 つで superpoint を作成できた場合は, 衝突点からインナーステーションまで $r - z$ 平面上で飛跡は直線であると仮定し, この直線と 2 点の superpoint から円軌道を再構成す

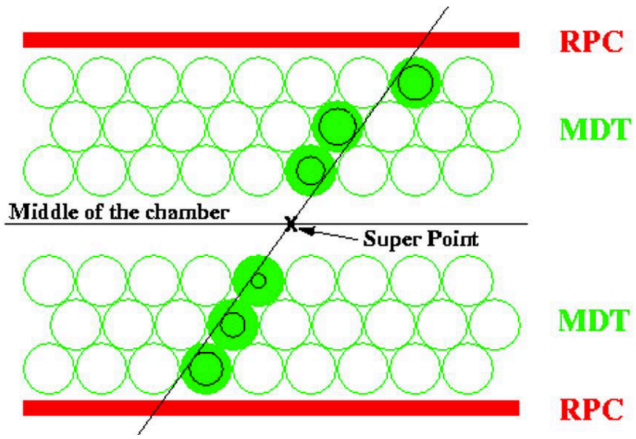


図 3.9: MDT ヒットのドリフト半径を直線フィットし, superpoint を作成する [15]。。

る。作成できた superpoint が 1 つ以下の場合は円軌道を計算できない。バレル部では, 曲率半径と p_T との相関関係をパラメータ A, B を用いて,

$$p_T = A \times R + B \tag{3.3}$$

で定義される。バレル部でのパラメータ A, B は sector $\times\, Q \times \eta \times \phi = 4 \times 2 \times 30 \times 30$ で分割され, LUT 上に用意されている。ここで sector は Large, Small, Large special, Small special の 4 つを表し, Q は電荷を表す。また, η の方向は η の正負にまたがって 30 分割されており, ϕ 方向は 8 回対称性を仮定した後, 更に 30 分割している。

MuonSA で計算した η, ϕ から分割領域を検索し, LUT から A, B のパラメータを引き出す。このとき, 検索に用いる η はインナー superpoint の (r, z) 座標から計算した値を用い, ϕ 座標は RPC ヒットから計算したミドルステーションでの座標を用いる。引き出したパラメータ A, B と, 各ステーションの superpoint から計算した曲率半径 R を用いて p_T を計算する。

3.1.3 Combined muon trigger (MuonCB)

MuonCB では, 初めに MuonSA の飛跡 (SA track) を内部飛跡検出器まで内挿する。次に内挿した飛跡から一定の範囲に存在する, 内部飛跡検出器で測定したミューオン候補の飛跡 (ID track) を取得する。その中で SA track と最も χ^2 が小さい ID track を選び, SA track と選別した ID track の情報を組み合わせて p_T を計算する。χ^2 の計算には以下の式を用いる。

$$\chi^2 = \chi^2_{p_T} + \chi^2_{\eta} + \chi^2_{\phi} \tag{3.4}$$

$$\chi^2_{p_T} = \frac{\Delta(1/p_T)^2_{\mathrm{SA,ID}}}{\sigma(1/p_T^{\mathrm{SA}})^2 + \sigma(1/p_T^{\mathrm{ID}})^2} \tag{3.5}$$

$$\chi^2_{\eta} = \frac{\Delta(\eta)^2_{\mathrm{SA,ID}}}{\sigma(\eta^{SA})^2 + \sigma(\eta^{\mathrm{ID}})^2} \tag{3.6}$$

$$\chi^2_{\phi} = \frac{\Delta(\phi)^2_{\mathrm{SA,ID}}}{\sigma(\phi^{SA})^2 + \sigma(\phi^{\mathrm{ID}})^2} \tag{3.7}$$

以上の式から計算した χ^2 が最も小さい ID track の η, ϕ を MuonCB におけるミューオン候補の η, ϕ とする。また, ID track の横運動量 p_T^{ID} と MuonSA で計算した p_T^{SA} から, MuonCB での横運動量 p_T^{MuonCB} を以下の計算式から求める。

$$\frac{1}{p_T^{\mathrm{MuonCB}}} = \frac{w^{\mathrm{SA}} \cdot \frac{1}{p_T^{\mathrm{SA}}} + w^{\mathrm{ID}} \cdot \frac{1}{p_T^{\mathrm{ID}}}}{w^{\mathrm{SA}} + w^{\mathrm{ID}}} \tag{3.8}$$

w^{ID}, w^{SA} は ID track の p_T と SA track の p_T の重みで, それぞれの p_T 分解能から決定されている。式は以下のように与えられている。

$$w^{\mathrm{ID}} = \left(0.017 \cdot \frac{1}{p_T^{\mathrm{ID}}} + 4.18 \times 10^{-10}\right)^2 \tag{3.9}$$

$$w^{\mathrm{SA}} = \left(0.042 \cdot \frac{1}{p_T^{\mathrm{SA}}} - 4.60 \times 10^{-4}\right)^2 \tag{3.10}$$

3.1.4　Event Filter (EF)

Event Filter (EF) は全検出器の情報を使用してミューオンの飛跡を再構成する。再構成アルゴリズムは, 後述するオフラインでの再構成と同等で, その精度に近い飛跡パラメータで判定が可能である。基本的には p_T に対するしきい値を設定することでミューオン候補の選別を行うが, ミューオンの内部飛跡検出器の飛跡の周辺に他の飛跡が存在しないこと (アイソレーション) などを要求した選別も可能である。このような p_T 以外の条件による選別は, しきい値を低くした場合の背景事象を削減できるため, トリガー発行レートを抑制できる。 そのため, 低い p_T のミューオンを含む事象を取得するために有用である。

また EF の前段階までは 1 つのミューオンを要求し, EF にて全検出器の情報を用いてもう 1 本のミューオンを探索する Full-Scan(FS) と呼ばれるトリガーも存在する。2 本のミューオンが非常に近いとき, 位置分解能が EF に比べて劣る MuonSA, MuonCB では 2 本のミューオンを分離できないことがある。そのような事象では, MuonSA, MonCB で 2 本のミューオンを要求するトリガーを通過することができない。また, 1 つのミューオンを要求し, p_T しきい値が比較的低いトリガーは, プリスケールされているため充分な統計を得ることができない。そのため, p_T が小さく互いに近いミューオンが存在する事象の場合, EF の段階で 2 ミューオンの存在を要求する FS トリガーが有用となる。しかし, 全検出器の情報を用いてミューオンの探索を行うため処理時間が長く, CPU を圧迫するため, 使用範囲は限られる。

3.1.5　オフライン再構成

データに記録された事象, つまり EF まで通過した事象に対してもう一度全検出器情報を用いてミューオン再構成を行う。これをオフラインミューオン再構成と呼ぶ。ミューオン検出器では MDT と CSC のヒット情報を用いて, ミューオン再構成を行う。トリガー稼働中とは異なり時間の制約が厳しくないため, より正確な事象再構成が可能である。例えばオフラインミューオン再構成では, EF での再構成では使わなかったカロリメータの情報を用いて, ミューオンのエネルギーの補正等を行っている。以降 MuonSA の性能を評価する場合は, オフラインミューオン再構成の結果を正しいと仮定して, p_T 分解能やトリガー効率を求める。オフラインミューオン再構成は, ミューオン検出器のみを用いて再構成を行うスタンドアローンミューオン (SA), 内部飛跡検出器も用いるコンバインドミューオンに分類される。コンバインドミューオンはさらに, Combined(CB), Segment-tagged(ST), Calorimeter-tagged(CT) の 3 つに分類される。

SA は内部飛跡検出器の情報は用いず, 主にミューオン検出器で再構成された飛跡の情報を用いる再構成法である。ミューオン検出器では, 基本的にミューオンの飛跡が少なくとも 2 層のチェンバーを通過していることを要求するが, フォワード領域では少なくとも 3 層のチェンバーを通過していることを要求する。SA は内部飛跡検出器が測定できない $2.5 < |\eta| < 2.7$ の範囲でも, ミューオンの再構成が可能である。

CB は, 内部飛跡検出器とミューオン検出器でそれぞれ独立に再構成された飛跡を, 組み合わせてフィットし直す再構成法である。

ST は, まず内部飛跡検出器でミューオンの飛跡を再構成した後, その飛跡をミューオン検出器まで外挿し, その飛跡に付随する MDT または CSC ヒットを加えて, もう一度再構成を行う。この方法を用いることで, ミューオンの

p_T が低い場合や, ミューオンが検出器の感度がない場所を通過してしまったことにより, ミューオン検出器で 1 層のチェンバーしか通過していない場合でも, ミューオン再構成が可能である。

3.2　ミューオントリガーチェーン

3.2.1　概要

ミューオントリガーは基本的に, L1, MuonSA, MuonCB, EF の判定を組み合わせることで構成される。この各トリガーステップを組み合わせたものをトリガーチェーンと呼ぶ。MuonSA, MuonCB, EF の p_T しきい値は後段のトリガーほど厳しく設定されている。これは, より後段のトリガーほど p_T の決定精度が高くなるためである。

3.2.2　マルチミューオントリガー

ミューオントリガーには 1 つのミューオンを含む事象用のシングルミューオントリガーの他に, 複数のミューオンを含む事象用の 2 ミューオントリガー, 3 ミューオントリガー等があり, これらを総称してマルチミューオントリガーと呼ぶ。複数のミューオンを含む事象取得用のトリガーチェーンは, 基本的に 1 ミューオントリガーの組み合わせで定義する。例えば, 10 GeV のミューオンが 2 つ以上存在する事象用のトリガーでは L1 の段階で 10 GeV 以上のミューオンを 2 つ要求し, HLT では各ステップにて 10 GeV の p_T しきい値を超えるミューオン候補が 2 つ以上存在することを要求する。2 ミューオントリガーの流れの概念図を, 図 3.10 に示す。図中にある通り, 2 ミューオントリガーでは, 各トリガーステップにおける p_T 判定の前に overlap remover という段階を課す。これについては以下で説明する。

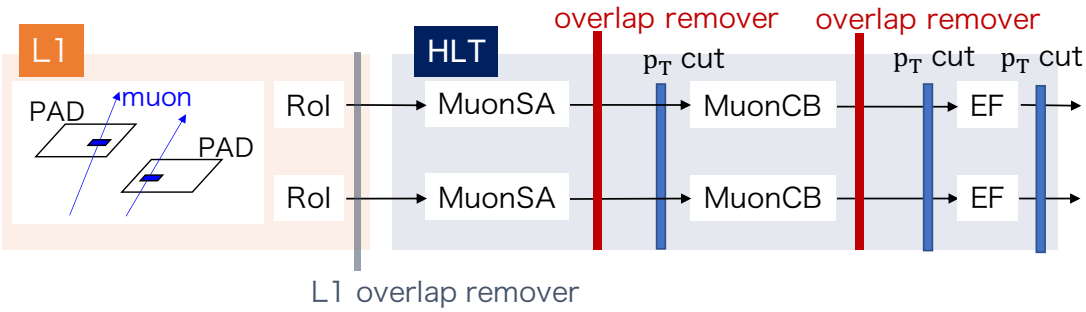


図 3.10: 2 ミューオントリガーの流れの概念図。

マルチミューオントリガーは複数のミューオン候補を要求するため, 1 ミューオントリガーに比べてトリガー頻度が低い。そのため, 1 ミューオントリガーに比べて低い p_T しきい値のトリガーを設定しても, 比較的低いトリガー頻度を維持することができる。マルチミューオントリガーのうち, 2 ミューオントリガーで取得される粒子に J/ψ がある。J/ψ は B 中間子のタグに使用され, 崩壊して生成されるミューオンの p_T は典型的に小さいため, 2 ミューオントリガーで取得される事象は B 物理に感度を持つ。

3.2.3　Overlap remover

1 つのミューオンが検出器の境界に入った場合, 複数のチェンバーにヒット情報を残し, その結果 2 つの同じミューオン候補が再構成される場合がある。この場合, 図 3.11 のように, ミューオンを 1 つだけ含む事象にも関わらずマルチミューオントリガーが発行される。

この誤判定によるトリガー頻度の増加を防ぐため, マルチミューオントリガーの場合は L1, MuonSA, MuonCB に

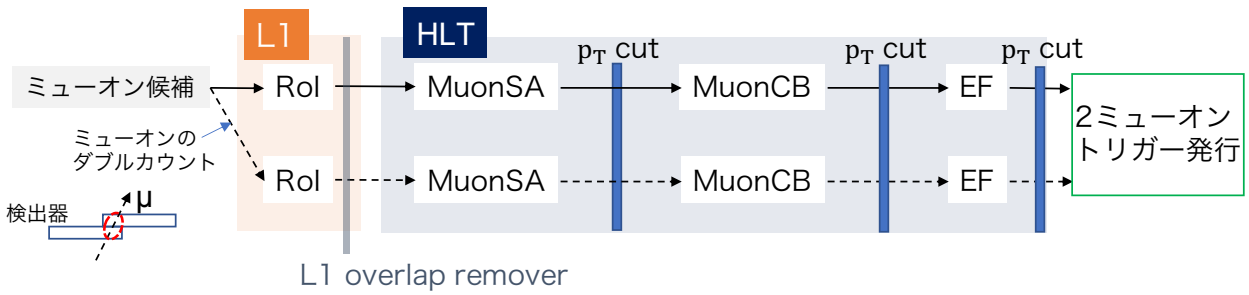


図 3.11: 1 つのミューオンが検出器の境界に入った場合の, 2 ミューオントリガーの流れ。

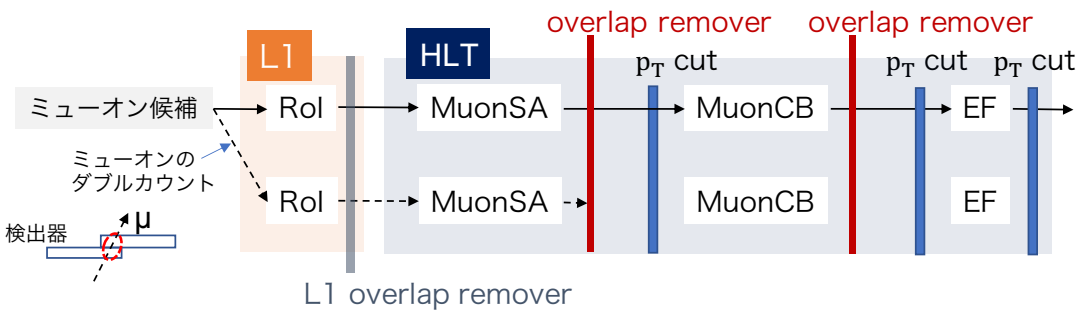


図 3.12: 1 つのミューオンが検出器の境界に入った場合の, Overlap remover が用意された 2 ミューオントリガーの流れ。

それぞれ Overlap remover というステップが用意されている。HLT での Overlap remover は, MuonSA, MuonCB におけるトリガー判定の際に実行される (図 3.12)。

MuonSA, MuonCB における Overlap remover は, 再構成されたミューオン候補のうち, 下記に説明する条件に基づいて同一ミューオンの有無を判定し, もし同一ミューオンが存在する場合は p_T が最も高いミューオン 1 つのみを優先的に残すアルゴリズムである。同一ミューオンの判定は, 全てのミューオン候補でペアを作り, 2 つのミューオン候補の電荷が同じであることの他に, ミューオン候補ペアで計算した不変質量 $M_{\mu\mu}$ と, ミューオン検出器のミドルステーションの位置における $\eta - \phi$ 平面でのミューオン候補ペア間の距離 $\Delta R_{\mu\mu}$ を条件に行う。$\Delta R_{\mu\mu}$ は,

$$\Delta R_{\mu\mu} = \sqrt{(\eta_{\mu 1} - \eta_{\mu 2})^2 + (\phi_{\mu 1} - \phi_{\mu 2})^2} \tag{3.11}$$

で定義される。ここで, $(\eta_{\mu 1}, \phi_{\mu 1})$, $(\eta_{\mu 2}, \phi_{\mu 2})$ はそれぞれミドルステーションにて再構成したミューオンの, 衝突点からみた方向である。$M_{\mu\mu}$ と $\Delta R_{\mu\mu}$ の値は, ペアを組んでいるミューオン候補が再構成された検出器の領域によって異なる。例として, ペアを組んでいる 2 つのミューオン候補がいずれもバレル領域で再構成された場合での, MuonSA, MuonCB の overlap remover にて同一ミューオンだとみなす条件を表 3.1 に示す。

	$\Delta R_{\mu\mu}$	$M_{\mu\mu}$	charge
MuonSA	≤ 0.05	$\leq 0.20\,\mathrm{GeV}$	same sign
MuonCB	≤ 0.002	$\leq 0.004\,\mathrm{GeV}$	same sign

表 3.1: MuonSA, MuonCB overlap remover において, ペアを組んだミューオンが同一ミューオンであるための条件

3.2.4　HLT トポロジカルトリガー

B の物理や軽い粒子のためのトリガー (B-physics and Light State trigger:BLS trigger) では, トリガー頻度をさらに抑制するために, 第 3.1.1 節にて説明した L1 トポロジカルトリガーに加えて, HLT でもイベントトポロジーに対する要求を行う。基本的な BLS トリガーチェーンの流れを図 3.13 に示す。MuonSA でのミューオンの再構成を行ったのち, 内部飛跡検出器 (ID) の飛跡を再構成し, ID の飛跡に対して p_T しきい値による選別を行う。選別後の ID の飛跡を 2 つ以上用いて 1 度目のバーテックスの再構成を行い, そのフィッティング χ^2 と不変質量についての条件を設け, その条件を通過した場合に EF においてミューオンを再構成する。EF にて 2 度目のバーテックスの再構成を行い, 主に 1 度目に比べてより厳しく χ^2 と不変質量の条件をかけることでトリガーを判定する。Run2 における 1 度目と 2 度目のバーテックスに対する要求を, ターゲットとしている粒子別に表 3.2 に示す。

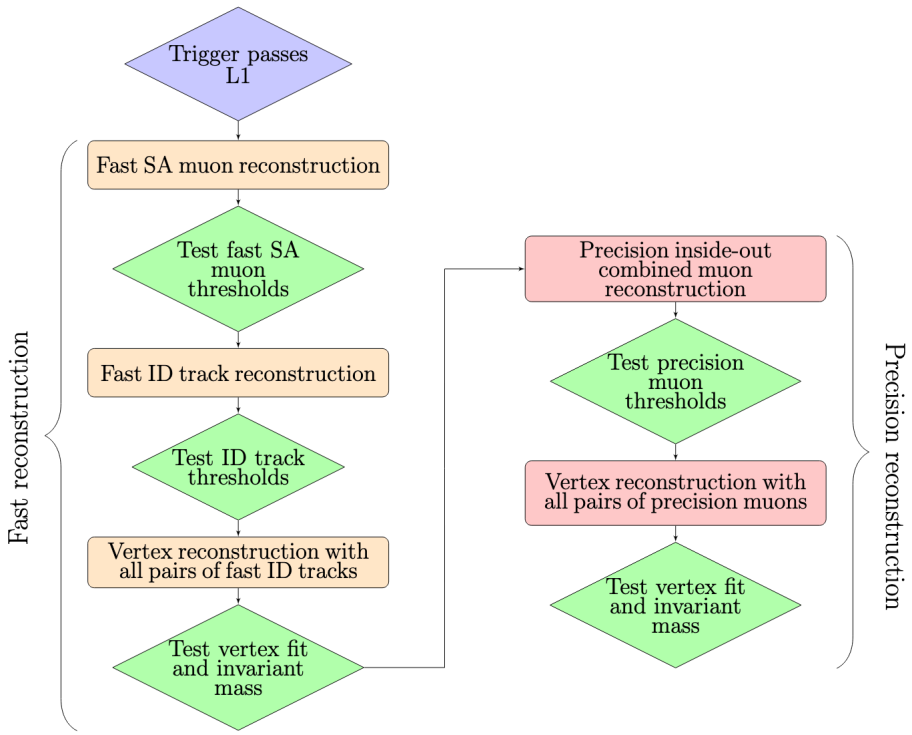


図 3.13: 一般的な BLS トリガーチェーンの流れ [13]。

Run2 の間の BLS トリガーでは, 近接 2 ミューオン事象に対する非効率を避けるため, MuonCB における MuonSA と内部飛跡検出器の飛跡を組み合わせるアルゴリズムを使用していなかった。これは, MuonSA にて, 2 つの近接した L1 RoI に対して 2 つのほぼ同一のミューオンを再構成することがあり, その場合 MuonCB にて別々のミューオンとして再構成することができないためである。この問題については, 第 3.4 節にて詳細に説明する。

3.3　トリガー効率の評価

トリガー効率 ϵ_{trig} は, 横運動量のしきい値以上の取得すべきミューオンをどの程度確実にトリガーできるかを示す量であり, 以下の式で定義される。

$$\epsilon_{\mathrm{trig}} = \frac{\text{トリガーを通過したオフラインミューオンの数}}{\text{オフラインミューオンの数}} \tag{3.12}$$

ターゲット粒子	1 度目の要求	2 度目の要求
$J/\psi \to \mu\mu$	$2.5 < m_{\mu\mu} < 4.3\,\mathrm{GeV}, \chi^2 < 20$	
$\Upsilon \to \mu\mu$	$8 < m_{\mu\mu} < 12\,\mathrm{GeV}, \chi^2 < 20$	
$B \to \mu\mu$	$4 < m_{\mu\mu} < 8.5\,\mathrm{GeV}, \chi^2 < 60$	$4 < m_{\mu\mu} < 8.5\,\mathrm{GeV}, \chi^2 < 20$
$B \to \mu\mu + X$	$0.1 < m_{\mu\mu} < 6.5\,\mathrm{GeV}, \chi^2 < 20$	Depends on channel
$\tau \to 3\mu$	2-μ triggers: $m_{\mu\mu} < 2.7\,\mathrm{GeV}, \chi^2 < 50$ 3-μ triggers: $m_{\mu\mu\mu} < 2.7\,\mathrm{GeV}, \chi^2 < 50$	
$\phi \to \mu\mu$	$0.94 < m_{\mu\mu} < 1.1\,\mathrm{GeV}, \chi^2 < 10$	

表 3.2: HLT にて 1 度目, 2 度目に再構成されたバーテックスに対して要求する BLS のトポロジー [13]。ミューオンの p_T に対する要求は各トポロジーのトリガー頻度によって調節される。

トリガー効率はデータ解析における信号の取得効率を補正するために用いられるため, 効率を精密に評価し, 理解することは重要である。効率を精密に評価するためには, 実際に取得したデータを用いる。ただし, 実データとして取得した事象には, 少なくとも 1 つのミューオンに対してトリガーが発行されている。そのため, 実際にはミューオンが存在していたにもかかわらず, トリガーが発行されなかった事象は調べないことになり, 効率を実際より高めに計算してしまう。

このバイアスを回避してトリガー効率を評価するために, Tag and Probe 法と呼ばれる方法が使用されている。Tag and Probe 法では, Z や J/ψ の崩壊で生じた 2 つのミューオンを使用する。2 つのミューオンのうち, 片方のミューオン (Tag) が事象選択のトリガーと同じトリガーを通過した場合に, もう一方のミューオン (Probe) を効率測定に用いる。Probe ミューオンに対してトリガーが発行されたかを見ることで, 実験でトリガーによって取得されたというバイアスをなくしてトリガー効率を見積もることができる。

ただし, Tag and Probe 法では, Tag, Probe ミューオンそれぞれに対応するトリガーの存在を前提としているため, 2 ミューオンを要求するトリガーの効率を評価することは難しい。本論文では, 2 ミューオントリガーの効率を, ミューオン対を終状態に持つシミュレーションサンプルを用いて見積もる。これを正確なデータ解析の取得効率を補正するために用いることは, シミュレーションとデータとの差異を補正する必要があるが, アルゴリズムの開発での評価には実用的である。本節では, 2 ミューオントリガーの効率の評価方法と, トリガー効率の見積もりやアルゴリズムの性能評価に用いたシミュレーショサンプルについて説明する。

3.3.1 トリガー効率の評価方法

本論文ではトリガー効率を見積もるため, 2 ミューオントリガーを通過することが期待される事象のうち, 実際にトリガーを通過した事象の割合を評価する。2 ミューオントリガーの通過が期待される事象の選別には, オフラインにて再構成されたミューオンの情報を用いる。例えば, 6 GeV 以上のミューオンを L1 と MuonSA ともに 2 つ要求した場合のトリガー効率 $\epsilon_{\mathrm{L1,MuonSA}}$ は,

$$\epsilon_{\mathrm{L1,MuonSA}} = \frac{\text{L1 かつ MuonSA を通過した事象の数}}{p_T > 6\,\mathrm{GeV}\text{のオフラインミューオンが 2 つ存在する事象の数}} \tag{3.13}$$

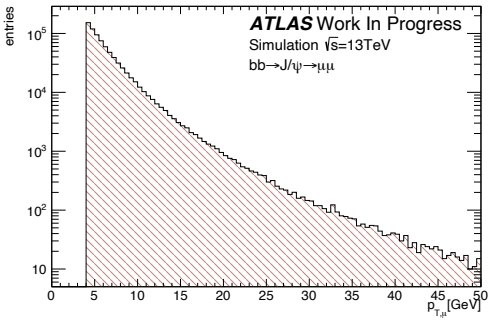
と計算する。また, MuonSA のみのトリガー効率を評価する場合は, 分母・分子を L1 を通過したオフラインミューオンに限って,

$$\epsilon_{\mathrm{MuonSA}} = \frac{\text{MuonSA を通過した事象の数}}{p_T > 6\,\mathrm{GeV}\text{のオフラインミューオンが存在し, かつ L1 トリガーを通過している事象の数}} \tag{3.14}$$

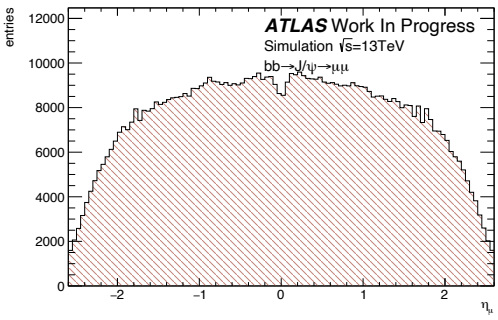
とする。

3.3.2　トリガー効率の評価用サンプル

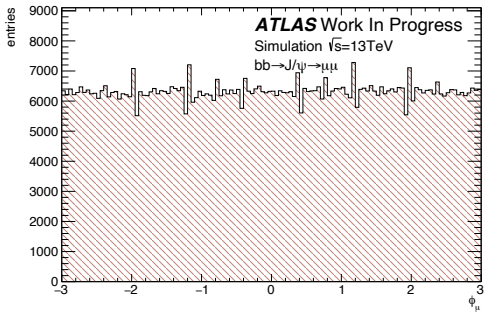
第 4, 5 章にて, 開発した近接 2 ミューオン事象のための MuonSA を評価する。そのために, b または $\bar{b}$ クオークの崩壊により J/ψ が生成し, その後 $J/\psi \to \mu\mu$ へと崩壊するシミュレーションサンプルと, 後述する近接 2 ミューオン事象を多く含むシミュレーションサンプルを用いた。前者のサンプルの基本的なパラメータを図 3.14 に示す。図 3.14b, 3.14c, 3.14d はそれぞれミューオンの η_μ, ϕ_μ, ミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ を表す分布である。それぞれの値はミューオン検出器のミドルステーションで再構成されたものを用いている。典型的にミューオンの p_T が小さく, Pad の典型的なサイズ $\eta \times \phi = 0.2 \times 0.2$ よりも大きい $\Delta R_{\mu\mu} \sim 0.43$ でピークを持つ。また, 本サンプルにおけるオフラインミューオンの $p_{T,\mu}$ とミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ の相関を図 3.15 に示す。この図から, ミューオンの横運動量が高いほどミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ が小さく, 近接 2 ミューオン事象となることが分かる。



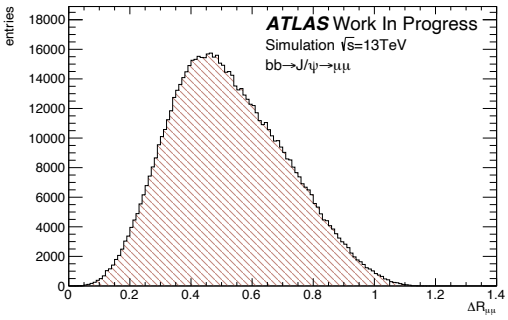
(a) p_T 分布



(b) η 分布



(c) ϕ 分布



(d) $\Delta R_{\mu,\mu}$ 分布

図 3.14: $b\bar{b} \to J/\psi \to \mu\mu$ シミュレーションサンプルにおけるオフラインミューオンの分布。

本研究にて開発した MuonSA アルゴリズムの性能評価 (第 4 章) にあたり, $\Delta R_{\mu\mu}$ が小さい領域を高統計でみるために近接 2 ミューオン事象を多く含むシミュレーションサンプルを用いた。このサンプルには $J/\psi \to \mu\mu$ の終状態のみ含まれる。終状態のミューオンは運動量が高く, ミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ が小さい。基本的なミューオン対のパラメータを図 3.16 に示す。図 3.16b, 3.16c, 3.16d はそれぞれミューオンの η_μ, ϕ_μ, ミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ を表す分布である。図 3.16d から, $\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.1 未満の事象が多いことが分かる。これはバレル部における典型的な RoI サイズに相当する。比較のため, $b\bar{b} \to J/\psi \to \mu\mu$ のシミュレーションサンプルと近接 2 ミューオンの多いサンプルにおけるミューオンの p_T, $\Delta R_{\mu\mu}$ の分布を重ねて図 3.17a, 3.17b に示す。

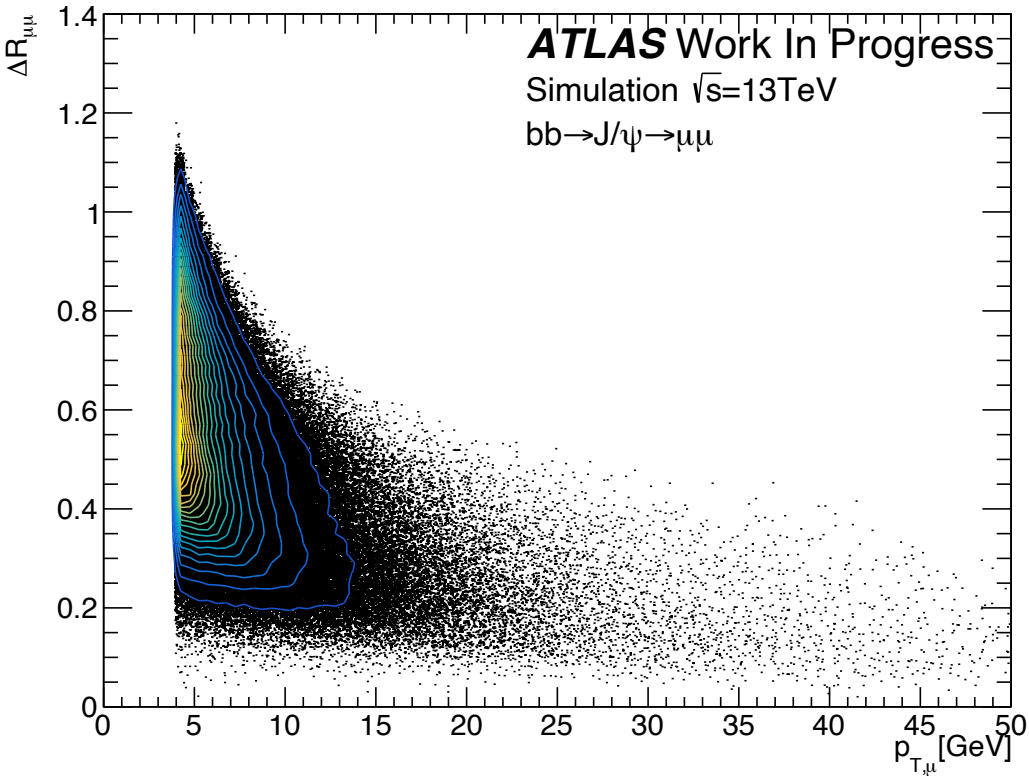


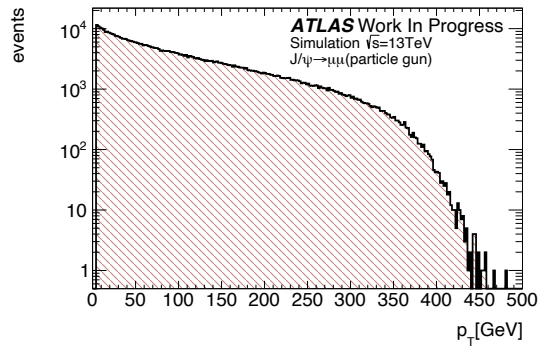
図 3.15: $b\bar{b} \to J/\psi \to \mu\mu$ サンプルにおける, オフラインミューオンの p_T とミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ の相関

3.4　近接 2 ミューオン事象における 2 ミューオントリガーの効率

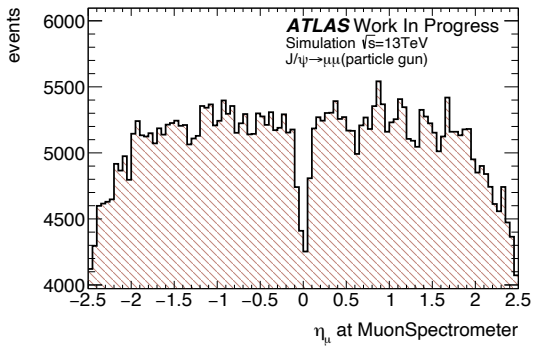
第 3.3.1 節にて述べた方法を用いて, L1 と HLT にて $p_T \geq 6\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求する 2 ミューオントリガーのトリガー効率をバレル部・エンドキャップ部別に図 3.18, 3.19 に示す。図 3.18 は $p_T > 6\,\mathrm{GeV}$ のオフラインミューオンが 2 つ以上バレル (3.18a), またはエンドキャップ (3.18b) に存在する事象に対して, L1 で 2 つの $p_T \geq 6\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを要求するトリガーの効率を評価した。図 3.19 はその L1 トリガーを通過した事象に対して, MuonSA で $p_T \geq 6\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求した場合のトリガー効率を評価した。

図 3.18, 3.19 から, 2 ミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ が小さい領域で L1, MuonSA 共にトリガー取得効率が低下しており, バレル部でより顕著に低下していることが分かる。また, $\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.2 よりも充分に大きい領域でも, トリガー効率が 50% 程度と低いことがわかる。これは, バレル部 L1 の 1 ミューオンを要求するトリガーの効率が, 主に RPC がカバーできていない領域があることにより典型的に 76% 程度であるため, 2 ミューオンを要求した場合のトリガー効率はおよそ $76 \times 76\%$ 程度となることが理由である。近接 2 ミューオン事象の際に, バレル部にて 2 ミューオントリガーの効率が低下する原因は以下の 2 つに大別される。

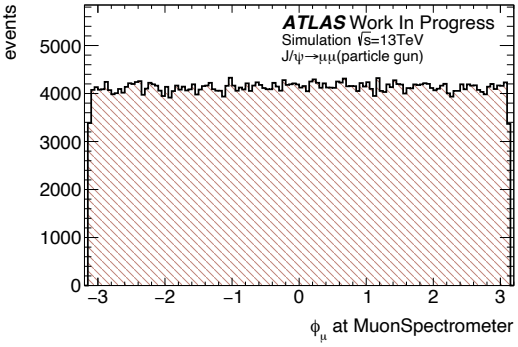
1. L1 トリガーを通過し 2 つの異なる RoI が発行されるが, MuonSA にて 2 つのミューオンの再構成に失敗する
2. 2 つのミューオンが 1 つの Pad 内を通過し, L1 で 2 ミューオントリガーの判定に失敗する



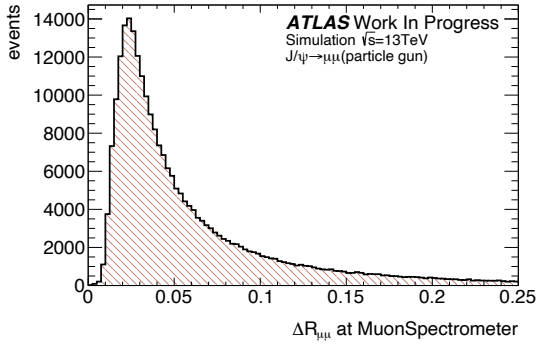
(a) p_T 分布



(b) η 分布

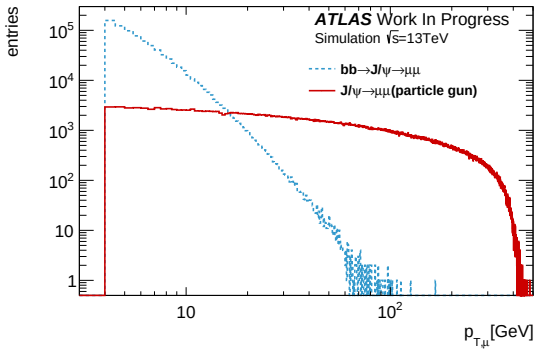


(c) ϕ 分布

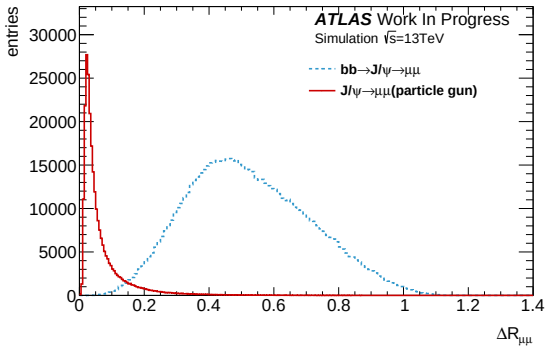


(d) $\Delta R_{\mu,\mu}$ 分布

図 3.16: 近接 2 ミューオン事象を多く含む $J/\psi \to \mu\mu$ シミュレーションサンプルにおけるオフラインミューオンの分布。

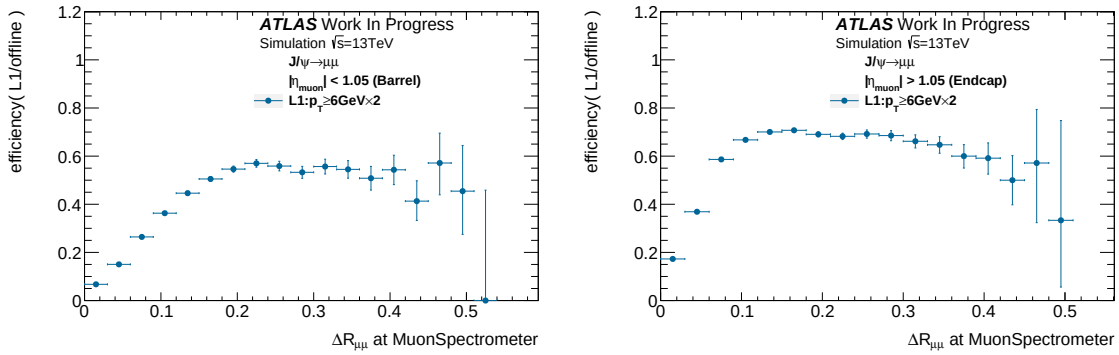


(a) p_T 分布



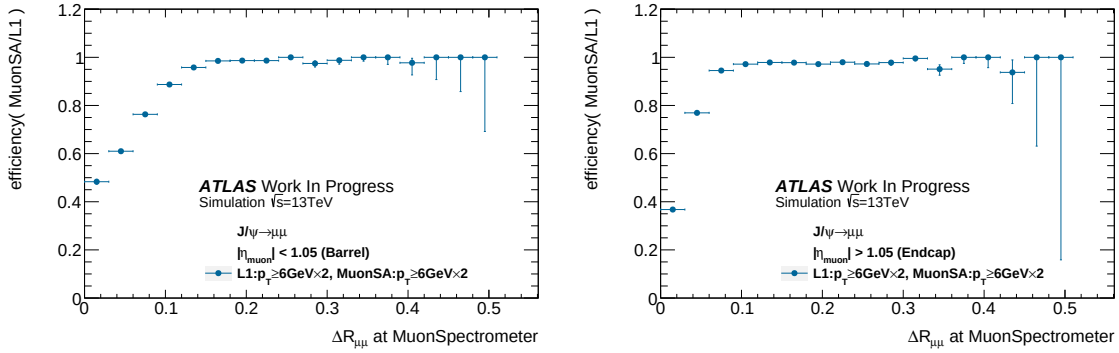
(b) $\Delta R_{\mu\mu}$ 分布

図 3.17: $b\bar{b} \to J/\psi \to \mu\mu$ サンプル (青点線) と, 近接 2 ミューオン事象の多いシミュレーションサンプル (赤実線) における分布の比較。



(a) バレル部 **(b)** エンドキャップ部

図 3.18: トリガーを通過することが期待される事象 (オフライン) に対する, L1 の 2 ミューオントリガー効率。



(a) バレル部 **(b)** エンドキャップ部

図 3.19: L1 の 2 ミューオントリガーを通過した事象に対する, MuonSA の 2 ミューオントリガーの効率。

原因 1 については先行研究にて, MuonSA の RPC 探索領域を RoI サイズに対応して動的に狭めることにより改善を行った [16](山下和輝, 2020)。

このトリガー非効率は, L1 にて 2 つのミューオン候補それぞれに対して発行した RoI が隣接している場合に起こる。第 3.1.2 節にて述べたように, MuonSA で探索する RPC ヒットの領域は, 典型的な RoI のサイズ ($\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$) よりも大きく設定されている。そのため, RoI が隣接している場合, MuonSA における RPC ヒットの探索範囲は互いに一部重複していることが多い。このような場合の, MuonSA にて RPC ヒットを探す範囲を示した概念図を図 3.20 に示す。このとき, 2 つの MuonSA が同じ RPC ヒットを用いて再構成を行うため, 異なる RoI に対して実行された MuonSA が全く同じミューオンの飛跡を再構成してしまう。その結果 MuonSA overlap remover にて同一のミューオンであると判定され, 片方が除外される。

この原因によるトリガー非効率を, 先行研究では RPC 探索領域を RoI サイズに対応して動的に狭めることにより改善を行った。従来の RPC 探索範囲は一律で RoI 中心から $|\Delta\eta| \times |\Delta\phi| = 0.1 \times 0.1$ であったが, 重複している探索範囲を削減するため, 新たな領域 Δ_{RPC} を

$$\Delta_{\mathrm{RPC}} = \frac{\text{RoI サイズ}}{2} + 0.02 \tag{3.15}$$

と定義した。これによるバレル部 MuonSA における $\Delta R_{\mu\mu}$ ごとの 2 ミューオントリガーの効率を, 図 3.21 に示す。ここでは, L1 トリガーと MuonSA のいずれも通過していることを要求している。図 3.21 から, MuonSA での RPC ヒットの探索領域を RoI サイズに対応して動的に狭めることにより, $\Delta R_{\mu\mu}$ が小さい領域におけるトリガー非

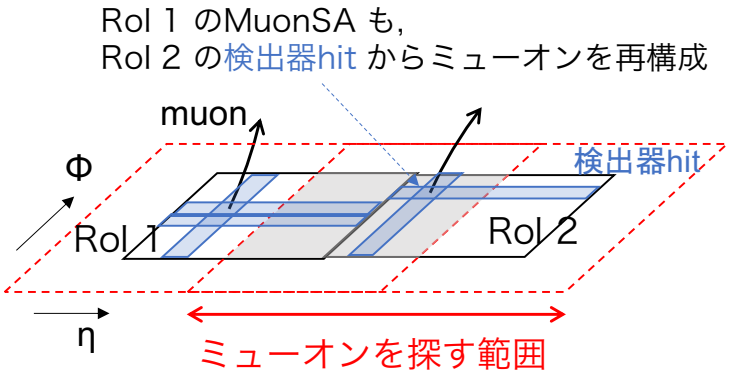


図 3.20: RoI サイズと MuonSA における RPC ヒットの探索領域。

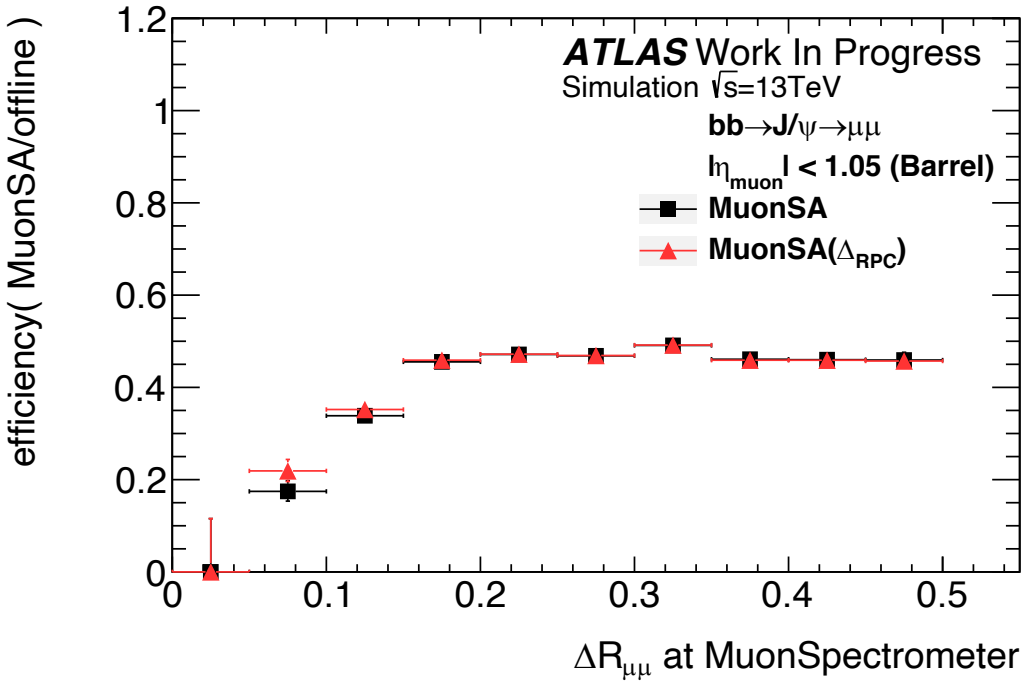


図 3.21: 2 ミューオン事象に対する, L1 と MuonSA を要求した場合のバレル 2 ミューオントリガーの効率。黒色で示された分布が従来の効率であり, 赤色で示した分布が Δ_{RPC} を実装した場合のトリガー効率。

効率が改善していることが分かる。

先行研究によって改善される事象は, L1 では 2 ミューオントリガーを通過している場合であるため, 原因 2. の L1 で 2 ミューオントリガーの判定に失敗する場合は先行研究による方法でも改善は見られない。原因 2. は L1 における非効率であり, 近接 2 ミューオンが同じ Pad 領域を通過した場合, 1 つのミューオンとしてコインシデンスが取られるため, HLT には 1 つの RoI のみ発行されることが問題である。現行の MuonSA では 1 つの RoI につき最大 1 つのミューオンのみ再構成できる設計であるため, 結果的に HLT でも 2 つのミューオンを再構成することができない。

3.5　本論文の目的

本研究では, 原因 2 による近接 2 ミューオン事象のトリガー非効率改善のために, 1 つの RoI から複数のミューオンを再構成することができる新たな MuonSA アルゴリズムを開発する。第 4 章にて原因 2. についての詳細な説明と, 新たな MuonSA アルゴリズムについての説明・評価を行う。第 5 章で, このアルゴリズムを用いて, レベル 1 トリガーと組み合わせた 2 ミューオントリガーチェーンの性能 (効率, トリガー頻度) を評価する。

第 4 章

Barrel 領域における近接 2 ミューオントリガー非効率の改善

第 3.4 で述べたように, 近接 2 ミューオン事象において 2 ミューオントリガーの効率が低下する原因は主に以下の 2 つである。

1. L1 トリガーを通過し 2 つの異なる RoI が発行されるが, MuonSA にて 2 つのミューオンの再構成に失敗する
2. 2 つのミューオンが 1 つの Pad 内を通過し, L1 で 2 ミューオントリガーの判定に失敗する

原因 1. については先行研究によって取り組まれ, トリガー非効率が改善したことを第 3.4 節にて述べた。

本論文では, 原因 2. に対する改善策として, 1 つの RoI から複数のミューオン候補を再構成できる新たな MuonSA のトリガーアルゴリズムを開発した。本章では, 原因 2. についての問題点とその改善策として開発した MuonSA アルゴリズムについて説明する。

4.1 L1 における 2 ミューオントリガーの非効率

トリガーを通過することが期待される 2 ミューオン事象に対する, バレル部 L1 における 2 ミューオントリガー効率を示す。分母の 2 ミューオン事象として, バレル部に $p_T \geq 11\,\mathrm{GeV}$, $p_T \geq 6\,\mathrm{GeV}$ のオフラインミューオンが 1 つずつ存在する事象を選別した。L1 においても, オフラインミューオンに課した選別条件と同様に, $p_T \geq 11\,\mathrm{GeV}$, $p_T \geq 6\,\mathrm{GeV}$ のミューオンをそれぞれ 1 つ見つけられた場合にトリガーを発行する 2 ミューオントリガーを要求している。この図が示すように, $\Delta R_{\mu\mu}$ が小さい領域 ($\Delta R_{\mu\mu} < 0.2$) にて, トリガー効率が低下していることが分かる。

4.1.1 近接した 2 ミューオンのトリガー非効率の原因

バレル部 L1 トリガーでは第 3.1.1 章にて説明したとおり, 1 つの Pad で区分される 4 つの RoI のうち, 1 つだけしか HLT に出力できない。すなわち Pad がトリガーの最小単位であるため, 近接 2 ミューオンが同じ Pad を通過した場合であっても単一ミューオンとしてコインシデンスを取り, 1 ミューオントリガーとして判定を行う。その結果, HLT には 1 つの RoI のみが出力される。

一方で MuonSA では第 3.1.2 章で説明したとおり, RoI 周辺の RPC ヒットを取得し, それらヒットからロードを定義する際に, ロード作成に用いる RPC ヒットを各 RPC ストリップ層から 1 つのみに限定する。これにより, 例え 2 つ以上のミューオンが RoI 周辺の RPC にヒットを残したとしてもロードは 1 つのみ定義される。つまり, 現在の MuonSA は 1 つの RoI を入力として最大 1 つのミューオン候補のみ再構成可能なアルゴリズムである。

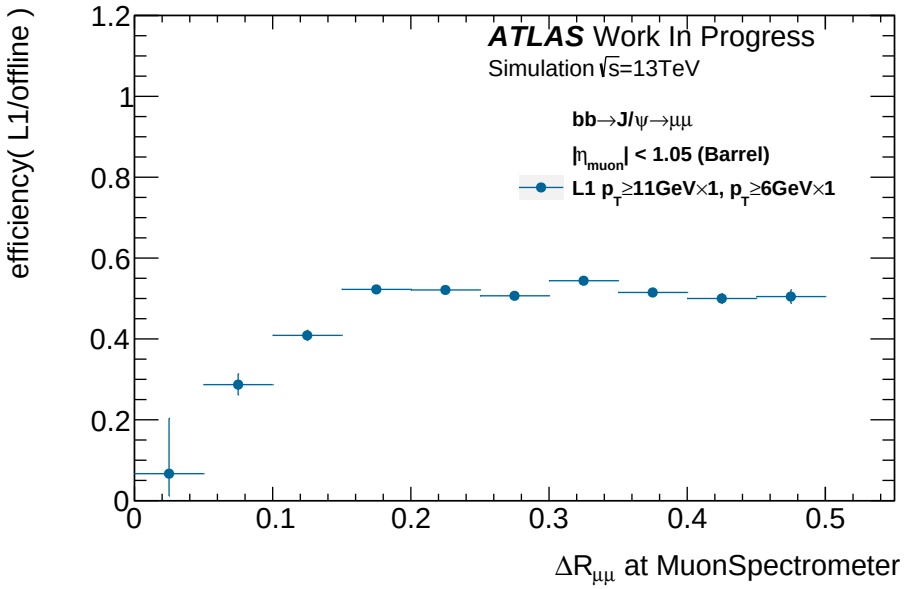


図 4.1: 2 ミューオン事象に対する, L1 を要求した場合のバレル 2 ミューオントリガーの効率。

一例として近接 2 ミューオンが 1 つの Pad を通過し, L1 から 1 つの RoI のみ出力された事象のイベントディスプレイを図 4.2 に示す。図には $z-r$ 平面上でのミューオンの飛跡やトリガー情報を示している。オフライン解析で再構成されたミドルステーションでのミューオンの飛跡を赤の直線で表示している。また, L1 が出力した RoI の情報である RoI 中心の η, ϕ 方向と, 典型的なバレル部の RoI のサイズを辛子色の破線で表す。これらから, RoI サイズの範囲内に 2 つのオフラインミューオンの飛跡があることが分かる。MuonSA にて取得した RPC ヒット (緑点) はロードの作成に用いられる η ストリップのみを表示している。$6.8\,\mathrm{m} < \mathrm{r} < 7\,\mathrm{m}$ の位置に存在する RPC ヒットは RPC1 層, $7.4\,\mathrm{m} < \mathrm{r} < 7.6\,\mathrm{m}$ の位置に存在するヒットは RPC2 層のものである。2 つのミューオンが 2 つの RPC ヒット群を各 RPC 層に残しているが, MuonSA にて作成されたロード (青色の領域) は 1 つのみであることが分かる。

図 4.2 のように 2 つのミューオンが飛来し, かつ RPC ストリップ幅であるおよそ 3 cm よりも充分に離れている場合, 複数個の RPC ヒット群を作る確率が高い。このように, RPC ヒットのパターンから通過したミューオンの数を推定できる。これを利用して, 1 つの RoI から複数のロードを作成することによりミューオンを複数再構成する新たな MuonSA “multi-track SA(mtSA)” を開発した。以下でアルゴリズムの説明とその評価について述べる。

4.2 mtSA algorithm

初めに大まかな流れを説明する。以下の各ステップは, 図 4.3 の図番号に対応する。

1. RoI 周辺の RPC ヒットを取得する。
2. 隣接する RPC ヒットを 1 つにまとめ, RPC クラスターを定義し, その RPC ヒットの重心座標を RPC クラスターの座標とする。
3. RPC クラスターのセットを複数用意する。このとき複数のセットを形成することを許す。各クラスターセットにロード (クラスターロード) を引く。
4. MDT ヒットを取得し, 最も近いクラスターロードに分配する。
5. クラスターロードごとに分配された MDT ヒットから superpoint を作成し, p_T を計算する。

mtSA アルゴリズムの理想的な目標は, 通過したミューオンの数だけ飛跡を再構成すること, つまり n 個のミューオンが 1 つの Pad に入った事象に対して n 個の飛跡を再構成することである。そのため, 初めに通過粒子の数との対応がよいオブジェクトとして RPC クラスターを用意し, それをもとに飛跡の再構成を行う。そのための手順が 2. の「RPC ヒットのクラスタリング」と 3. の「RPC クラスターセットの作成」である。これらについて, 以下に詳しく説明する。

RPC ヒットのクラスタリング

単一ミューオンが 1 つの Pad 内に入った場合の, MuonSA にて RoI をもとに取得した RPC ヒットの数の分布を図 4.4 に示す。この数はミドルステーションに設置されている RPC η ストリップ層 (図中では “layer”, 計 4 層) ごとのものである。RPC ϕ ストリップヒットはロードの作成に使用しないため計数に考慮していない。単一ミューオン事象での評価のため, サンプルには $Z \to \mu\mu$ のシュミレーションサンプルを用いている。

図 4.4 から, どの RPC ストリップ層でも, 約 4 割で RoI の周りのヒット数が 1 つだが, 5 割以上ではヒットが複数存在する。このように, RPC ストリップ層ごとの RPC ヒットの数は通過した粒子の数との対応がよくないことが分かる。そのため, mtSA アルゴリズムでは, 隣り合う RPC ヒットが同一の粒子の通過によるものであると仮定し, それらを 1 つにまとめて RPC クラスターとする。また, RPC ストリップ 1 つ分以上離れて RPC ヒットが存在する際は, それぞれを別々の RPC クラスターとする。こうして作成したクラスターの重心を, 荷電粒子の通過位置として以下で用いる。単一ミューオン事象の場合において, 作成された RPC η クラスターを各 RPC ストリップ層

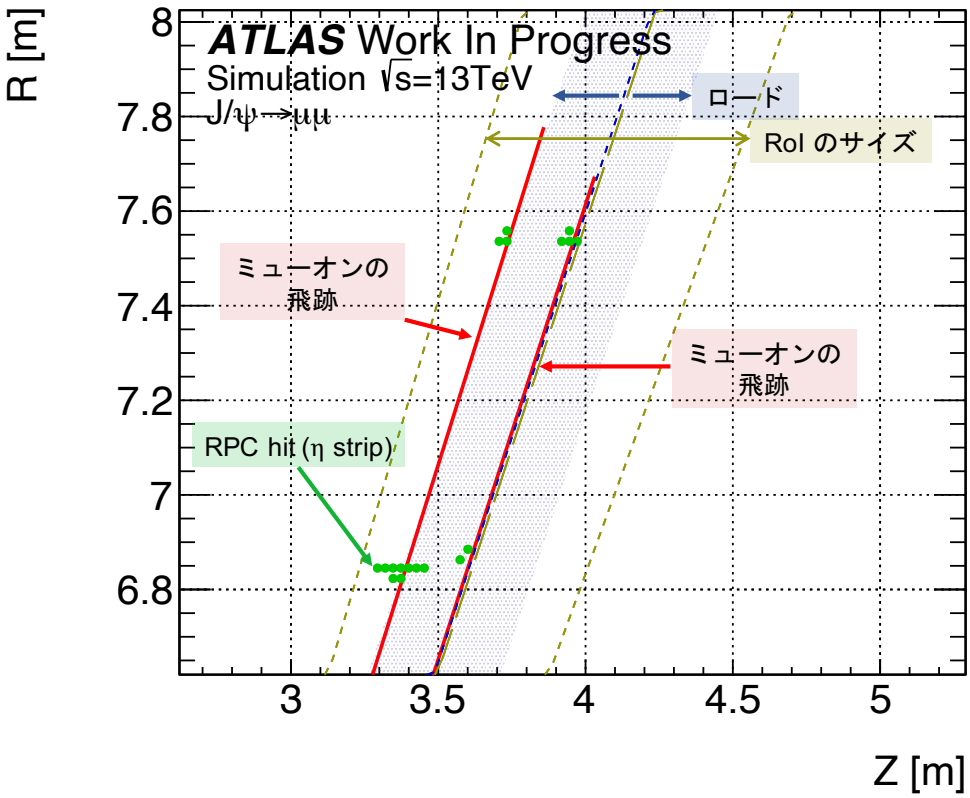


図 4.2: バレル部ミドルテーションにおけるオフラインミューオンの飛跡 (太い赤実線) とトリガー情報。L1 が出力した RoI 中心の η, ϕ を辛子色の太い破線で示し, RoI 中心周りの RoI サイズを辛子色の点線で表す。MuonSA で取得した RPC ヒットを緑点で示す。RPC ヒットはロードの作成に用いられる η ストリップのみを表示している。$6.8\,\mathrm{m} < \mathrm{r} < 7\,\mathrm{m}$ の領域に存在する RPC ヒットは RPC1 層に属するもので, $7.4\,\mathrm{m} < \mathrm{r} < 7.8\,\mathrm{m}$ の領域に存在するものは RPC2 層に属するヒットである。

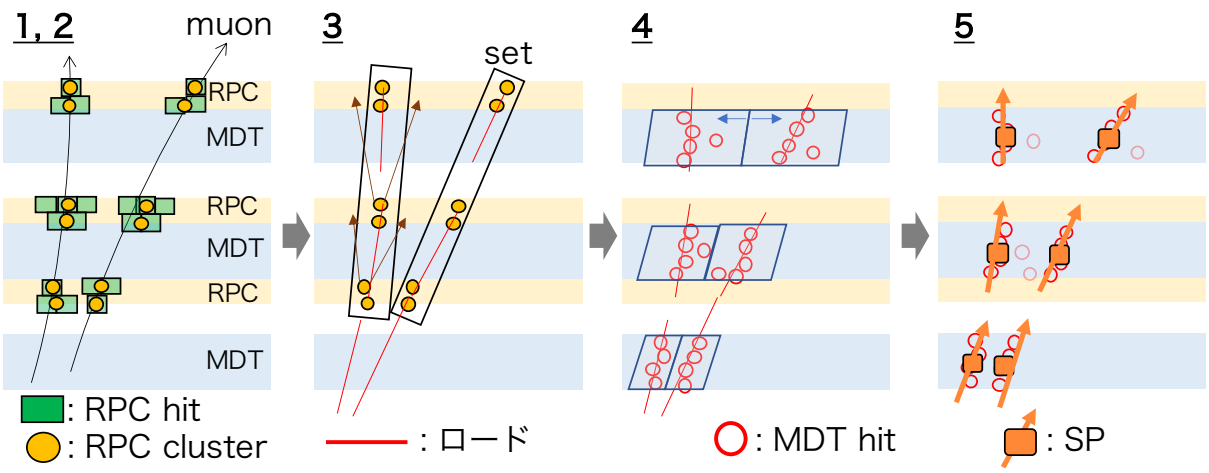


図 4.3: mtSA アルゴリズムの流れ

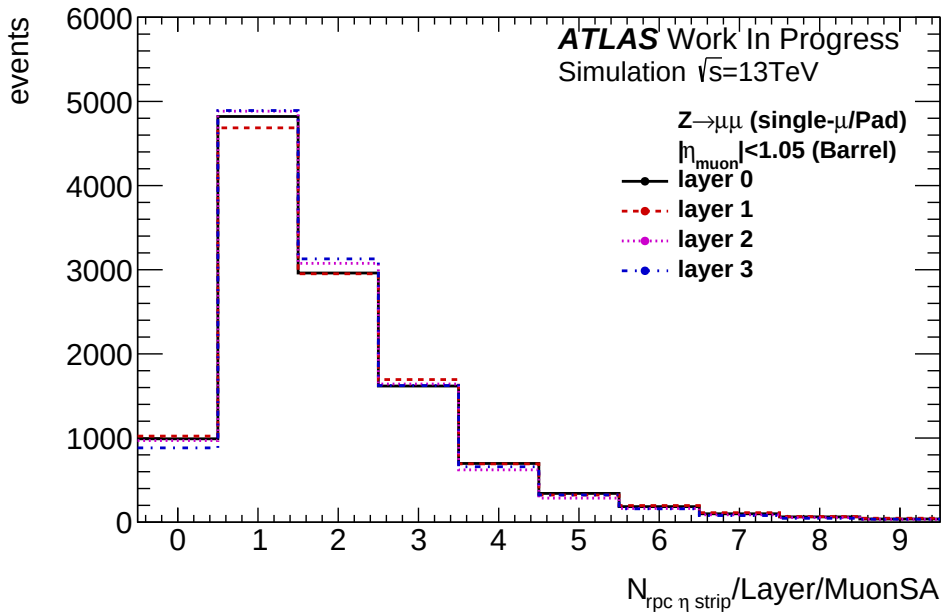


図 4.4: 単一ミューオンが 1 つの Pad に入った場合の, ミドルステーションに設置されている RPC η ストリップ層 (計 4 層) ごとの RPC ヒット数

ごとに計数した分布を図 4.5 に示す。この図から, どの RPC ストリップ層においても, RPC クラスターの数が 1 つであった場合は全体の 75% 以上を占めており, ストリップ層ごとに通過粒子の数と対応を改善できている。

RPC クラスターセットの作成

次に RPC クラスターを用いて, RPC クラスターセットを通過粒子の数と対応のよいオブジェクトになるように用意し, それぞれのセットからクラスターロードを各ステーションに作成する。基本的に RPC クラスターセットの作成方法は第 3.1.2 節にて説明した RPC ヒットセットの作成方法と類似だが, 全く同じにした場合に生じる問題が 2 つ生じたため, これらに変更を加えた。これらの問題点は複数のセットの用意を許すゆえに生じる。

1 つ目はセット作成のアルゴリズムである。衝突点に近い方の RPC クラスターから遠い方の RPC クラスターへ

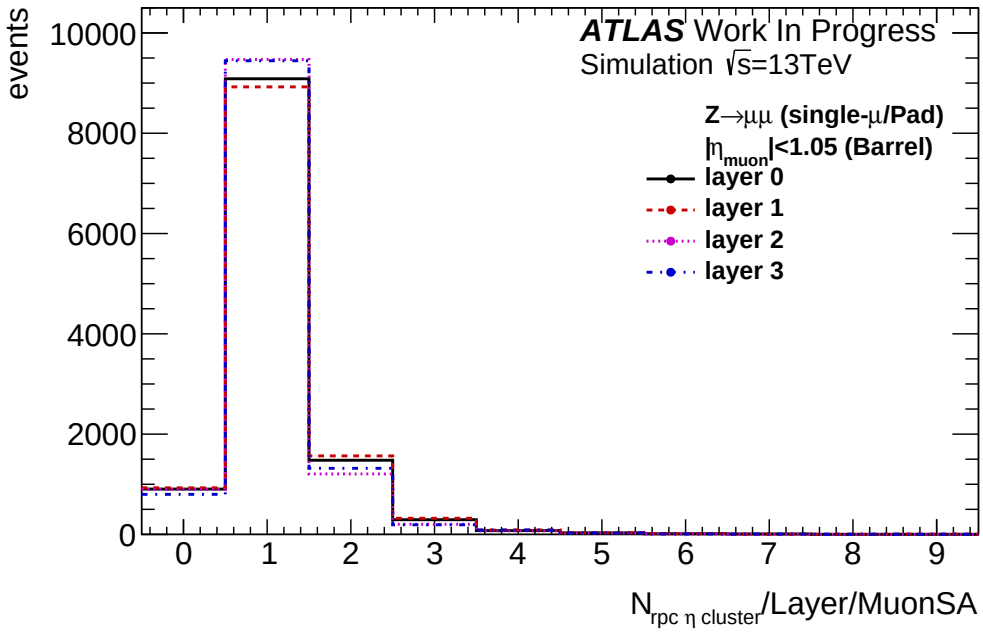


図 4.5: 単一ミューオンが 1 つの Pad に入った場合の RPC クラスター数。ミドルステーションに設置されている RPC η ストリップ層 (計 4 層) ごとに別々に計数した。

と探索を行う際, 現行の MuonSA アルゴリズムをそのまま適用すると, i 層の RPC クラスターに対して $i+1$ 層の RPC クラスターのみを探索の対象とする。そのため, 図 4.6a のような RPC クラスターを作る近接 2 ミューオン事象の場合, RPC ストリップ 3 層目の同じクラスターを 2 つのセットが選ぶ場合がある。このとき, RPC ストリップ 4 層目以降の探索において, 2 つのセットは同じ RPC クラスターを選んでいくことになる。これを回避するため, RPC 層をまたいだ RPC クラスターの探索の場合, RPC ストリップ i 層の RPC クラスターに対して RPC ストリップ $i+1$ と $i+2$ 層を探索範囲とする。例えば RPC1 層上側の RPC クラスター $(r_{\mathrm{RPC}}, z_{\mathrm{RPC}})$ から外側の RPC クラスターを探索する場合, RPC2 層に存在する RPC クラスター全てのうちで最も $z_{\mathrm{RPC}}/r_{\mathrm{RPC}}$ に近い値を持つ RPC クラスターをセットに含める (図 4.6b)。これにより, 図 4.6a のような事象において 2 つのセットが持つ RPC クラスターを分離することを可能にした。

2 つ目はセットの包含関係に関する問題である。セットの作成は最外層以外の全ての RPC クラスターを起点として行われる。そのため, 単一ミューオン事象であっても図 4.7 のように多くのセット候補が作成される。現行の MuonSA では主に最もヒットを多く含むセットのみを選び, 他のセット候補は棄却するため, この方法で問題はなかった。しかし mtSA アルゴリズムでは RPC クラスターセットが複数作成されることを許すため, 選別は下記の条件を満たすセット候補を 1 つの群にまとめ, その中から主に最も RPC クラスター数の多いセット候補を残すこととした。

- セットに含まれる RPC クラスターが別のセットの部分集合となっている
- セットに含まれる RPC クラスターが 1 つだけ異なる, または 1 つを除いて別のセットの部分集合となっている

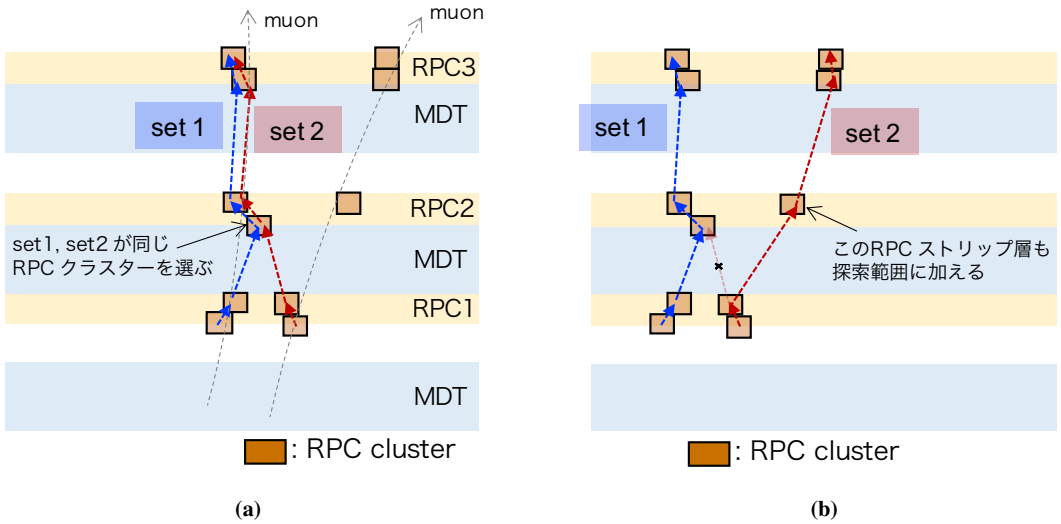


図 4.6: 現行の MuonSA におけるセット作成アルゴリズムをそのまま活用した場合 (a) と, mtSA のために最適化した場合 (b) のセット 1, 2 に含まれる RPC クラスターの違い

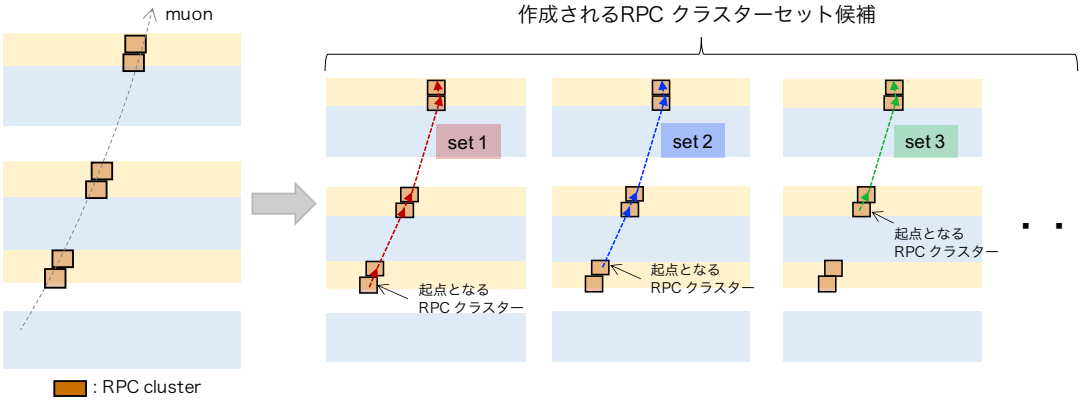


図 4.7: 単一ミューオンが通過した場合に作成されるセット候補のパターンの例。現行の MuonSA では, これらのセット候補のうち最も RPC クラスター数の多い set 1 が選ばれ, 他は棄却される。

クラスターセットのロード

上記の手順によって作成した RPC クラスターセットから, それぞれクラスターロードを定義する。方法はそれぞれの RPC クラスターセットに対して現行の MuonSA と同様に行う。近接 2 ミューオン事象における, mtSA によって作成された RPC クラスターとクラスターロードのイベントディスプレイを図 4.8 に示す。これは図 4.2 と同じイベントである。隣接する RPC ヒット (緑点) を 1 つにまとめた RPC クラスターを黒点で表し, RPC クラスターをフィットして作成するクラスターロードの中心を青色の破線で示している。このように, 2 つのミューオンの飛跡 (赤実線) に対して, 2 つのクラスターロードを作成できていることが分かる。

取得した MDT を最も近いクラスターロードに分配

各ステーションにおいてクラスターロードから MDT ヒットの選別を行い, superpoint を作成する。2 ミューオンの飛跡が近接し, 複数のクラスターロードの範囲が重複する場合, 各クラスターロードが同じ MDT ヒットを選ぶことがあり, その場合同一の superpoint を作成してしまう可能性がある。そのため mtSA では, クラスターロードを

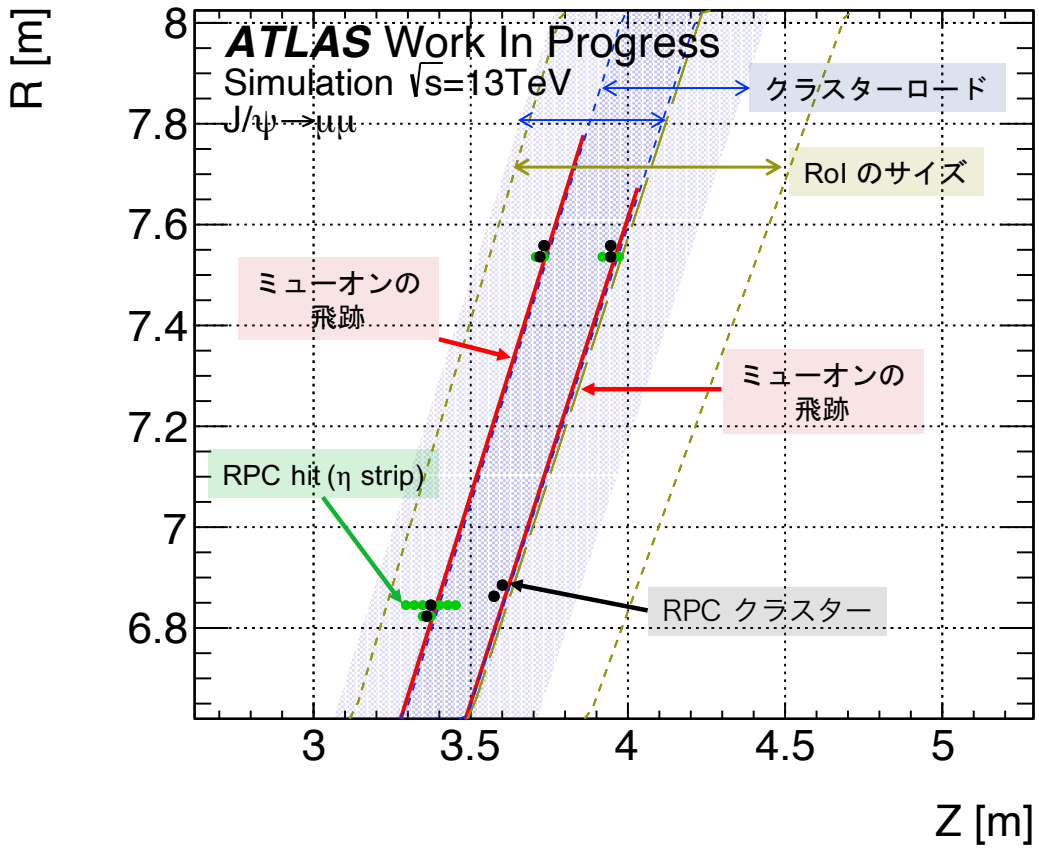


図 4.8: バレル部ミドルテーションにおけるオフラインミューオンの飛跡 (赤実線) とトリガー情報。L1 が出力した RoI 中心の η, ϕ を辛子色の破線, MuonSA で取得した RPC η ヒットを緑点で示し, それらから作成された RPC クラスターを黒点で表している。クラスターロードの中心を青色の破線, ロードの範囲を青色の領域で示す。

用いた MDT ヒットの選別を行う前に, MDT ヒットを各クラスターロードに排他的に分配することでヒットが混ざらないようにした。

その方法は以下のとおりである。ステーションごとに MDT の中心の座標 $(z_{\mathrm{MDT}}, r_{\mathrm{MDT}})$ と, クラスターロード中心 $r = a_w z + b_w$ の傾きと切片 (a_w, b_w) を用いて, 式 3.2 から residual を各クラスターロードに対して計算する。そのうち, もっとも residual が小さくなるクラスターロードに MDT ヒットを割り当てる。このようにしてまとめた MDT ヒットから, 既存の MuonSA と同様の方法で MDT に対するフィットを行い, superpoint を作成する。

4.3 mtSA algorithm の性能

ここでは, mtSA において粒子数をどの程度精度良く識別できるかを評価する。

4.3.1 1 ミューオンに対する飛跡数同定と運動量再構成

初めに単一ミューオンが 1 つの Pad に入った場合を評価する。そのために, サンプルには $Z \to \mu\mu$ シミュレーションサンプルを用いた。これは図 4.9 に示すように, Z 粒子由来の 2 ミューオンは離れており, 各ミューオンが別の Pad に入る事象が多いためである。本サンプルでは全ての事象が, 2 ミューオンが別々の Pad に入る事象であった。

各オフラインミューオンごとに, mtSA にてミドルステーションに作成されたクラスターロードの数 (図 4.10a)

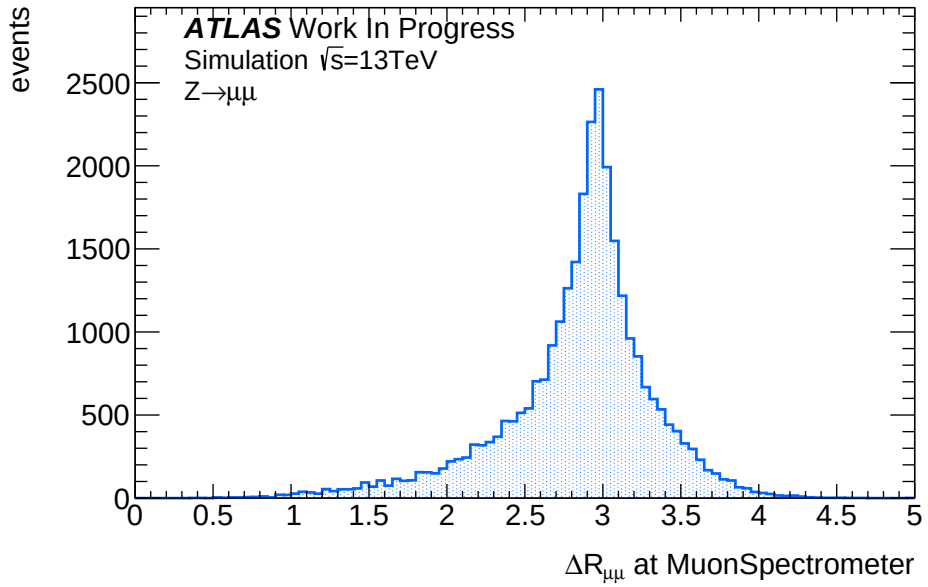
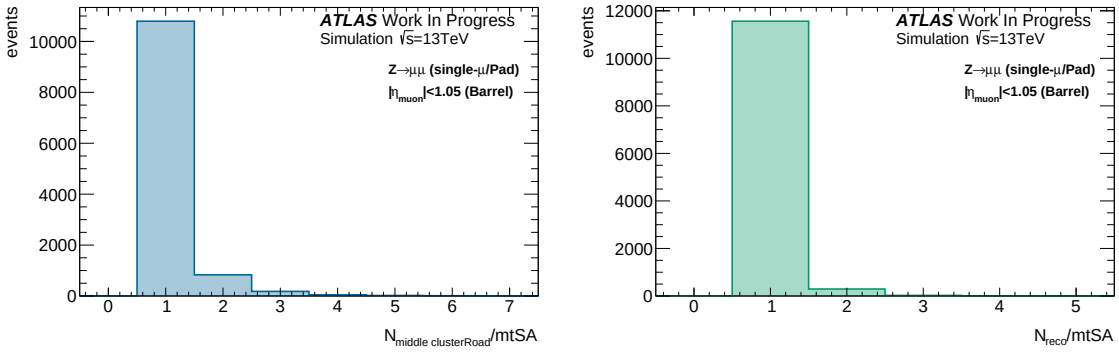


図 4.9: $Z \to \mu\mu$ サンプルでのミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ 分布。



(a) ミドルステーションでのクラスターロードの数

(b) 再構成したミューオン候補の数

図 4.10: 単一ミューオン事象に対して, mtSA にてミドルステーションに作成したクラスターロードの数 (左) と再構成したミューオンの数 (右)

と, 再構成した飛跡の数 (図 4.10b) を確認し, どの程度通過したミューオンの数だけ飛跡を再構成できたかを評価する。また, クラスターロードの数と再構成した飛跡の数の相関を図 4.11 に示す。

結果として, クラスターロードを 1 つミドルステーションに作成できた mtSA の数は全体の 91% , 1 つも作成できない割合は 6×10^{-2}%, 2 つ作成した割合は 7% であった。また, 通過したミューオンの数通り 1 つの飛跡を再構成できた mtSA の数は全体の 97%, 1 つも再構成できない割合は 6×10^{-2}%, 2 つ再構成した割合は 2% であった。

また, 図 4.11 から, クラスターロードがミドルステーションに 2 つ以上作成された場合でも, 再構成されたミューオンの数は 1 つになっている事象も存在することが分かる。主な理由は, 片方のクラスターロードに関連付けられる MDT ヒットの数が足りず, 結果的に片方のクラスターロードに対して superpoint が作成されないことである。そのような場合の mtSA のイベントディスプレイを図 4.12 に示す。1 つのミューオンの飛跡 (太い赤実線) に対して 2 つのクラスターロード (青色の領域) が存在するが, superpoint(赤色の三角形) は 1 つしか作成されていない。ディスプレイ上のミューオンの飛跡に重なるように作成されたクラスターロードでは, 6 つの MDT ヒットを用い

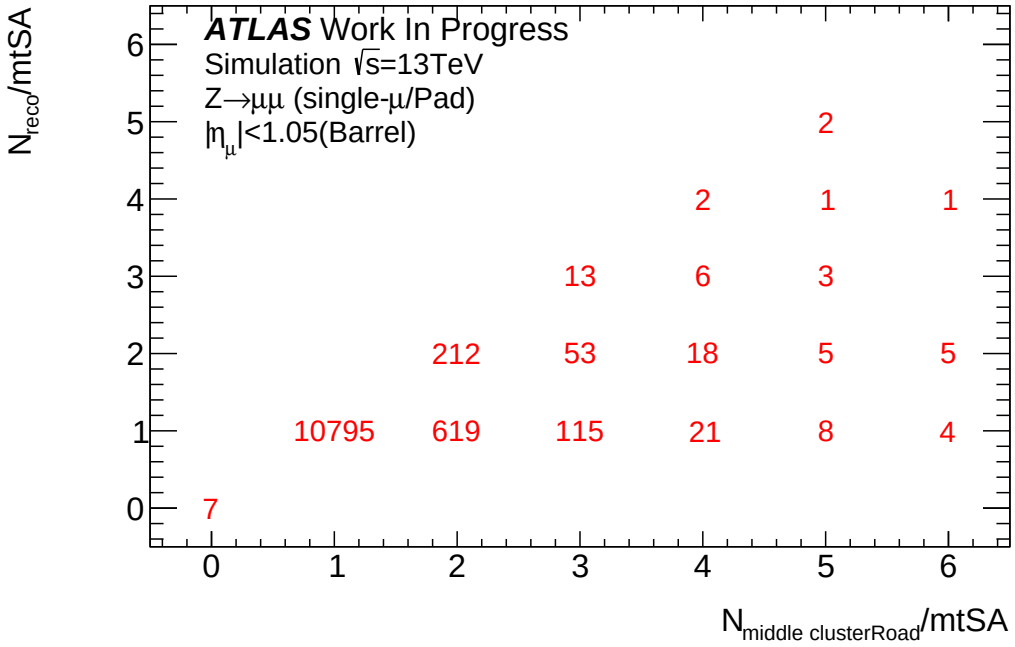


図 4.11: ミドルステーションのクラスターロードの数 (横軸) と, 再構成したミューオンの数 (縦軸) の相関図。

て superpoint を作成している。一方でもう 1 つのクラスターロードに対しては, MDT ヒットは 2 つのみである。superpoint は MDT ヒットを少なくとも 3 つ用いるため, この場合に superpoint が作成されない。このクラスターロードはミューオン由来のものではなく, それを superpoint を作成する過程で棄却できていることから, 単一ミューオンをよく識別できていると言える。

また, 1 つのミューオンが 1 つの Pad に入った場合において, mtSA で 1 つのミューオンを識別できた割合を図 4.13 に示す。ここでは, 大きく粒子数の識別効率が低下している特定の領域があるかを確認するため, オフライン再構成によるミューオンの η, ϕ ごとに評価した。これらのオフラインミューオンの飛跡方向は, 内部飛跡検出器で測定した飛跡情報をもとに, 磁場で飛跡が曲がることをシミュレーションしてミューオン検出器まで外挿した値を用いている。これらの図から, バレル部ミューオン検出器のどの領域においても, 高い識別効率を保っていることが分かる。

現行の MuonSA で計算した $p_{T,\mathrm{MuonSA}}$ と, mtSA で計算した $p_{T,\mathrm{mtSA}}$ の精度の比較を行う。p_T の精度を評価するために "p_T residual" という量を以下のように定義する。

$$p_T \text{ residual} = \frac{1/p_{T,x} - 1/p_{T,\mathrm{offline}}}{1/p_{T,\mathrm{offline}}} \quad (x = \mathrm{MuonSA}, \mathrm{mtSA}) \tag{4.1}$$

ここで, $p_{T,\mathrm{offline}}$ はオフラインで再構成した横運動量である。p_T residual は MuonSA または mtSA で計算した $1/p_T$ の $1/p_{T,\mathrm{offline}}$ に対する相対誤差で, p_T residual の分布を作ったときに, 0 付近により鋭いピークを作ったほうがより精度良く p_T を計算できていることになる。また, p_T の逆数を用いることで, residual を p_T にほぼ依存せず評価できる。MuonSA と mtSA における p_T residual を図 4.14 に示す。加えて, p_T residual の分布をガウス関数でフィットした。結果として得られるガウス関数の Mean と σ を表 4.1 に示す。これらの結果から, p_T residual 分布のピークの鋭さはほぼ同じであることが分かる。また, オフラインの p_T に対して, 各アルゴリズムで大きく間違った値を計算する割合を p_T residual 分布から評価する。そのために, p_T residual の大きさが 0.1 よりも大きい部分を「テール」と定義し, 全体の事象数のうちテールが占める割合を計算した。その結果, MuonSA は 34.5%, mtSA

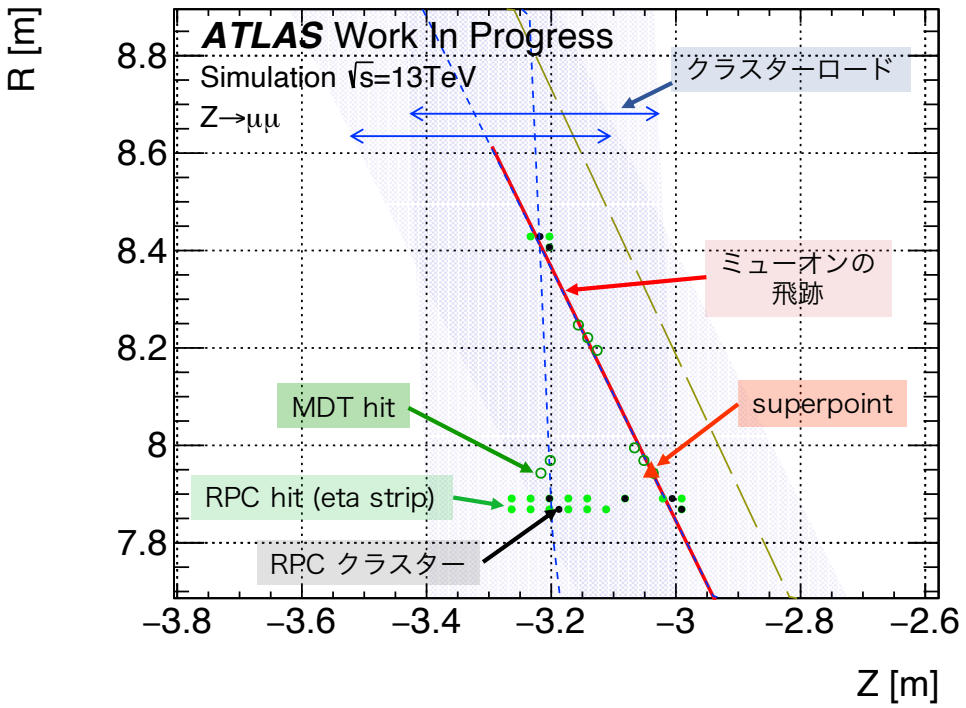
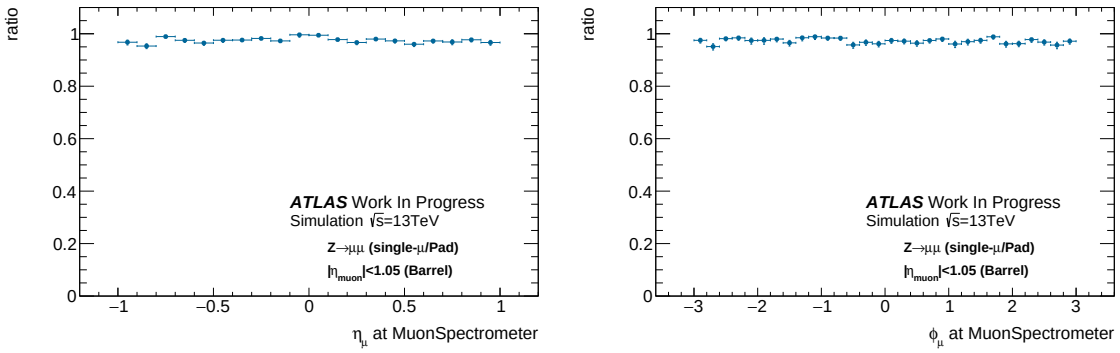


図 4.12: バレル部ミドルテーションにおけるオフラインミューオンの飛跡 (太い赤実線) とトリガー情報。mtSA で取得した RPC η ヒットを緑点, それらから作成された RPC クラスターを黒点で示している。各クラスターロードの中心 (青色の破線) から選別した MDT ヒットを緑色の丸印, MDT hit から作成された superpoint を赤色の三角形で表している。



(a) 粒子数の識別効率と η_μ の関係

(b) 粒子数の識別効率と ϕ_μ の関係

図 4.13: 単一ミューオン事象に対して, mtSA にて 1 つのミューオンを再構成できた事象の割合

は 35.2% であった。

これらの結果から, mtSA による p_T は現行の MuonSA アルゴリズムによる p_T の精度とほぼ同じであることが分かる。

4.3.2 2 ミューオンに対する飛跡数同定と運動量再構成

2 ミューオンが 1 つの Pad に入った事象に対して, mtSA における粒子数の識別率を評価する。サンプルには, 近接 2 ミューオン事象を多く含む $J/\psi \to \mu\mu$ シミュレーションサンプルを用いた。近接 2 ミューオンが 1 つの Pad に入った事象は, オフライン再構成によるミューオンの情報を用いて選別する。選別方法として, 初めにオフラ

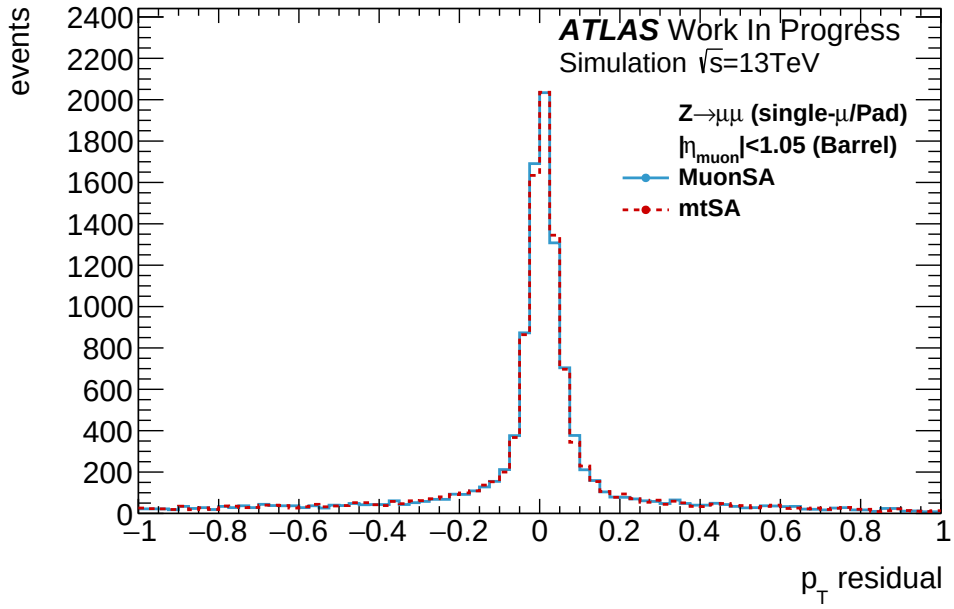


図 4.14: p_T residual 分布。青のヒストグラムが $p_{T,\mathrm{MuonSA}}$, 赤のものが $p_{T,\mathrm{mtSA}}$ に対する分布。

algorithm	Mean of p_T residual	Sigma of p_T residual
MuonSA	9.82×10^{-3}	4.75×10^{-2}
mtSA	9.94×10^{-3}	4.65×10^{-2}

表 4.1: MuonSA と mtSA における p_T residual の Mean と σ。

イン再構成によるミューオンに対して発行された RoI を探す (マッチング)。具体的には, オフラインミューオンの $\eta_{\mathrm{off}}, \phi_{\mathrm{off}}$ と RoI の $\eta_{\mathrm{RoI}}, \phi_{\mathrm{RoI}}$ を用いて $\Delta R_{\mathrm{L1match}} = \sqrt{(\eta_{\mathrm{off}} - \eta_{\mathrm{RoI}})^2 + (\phi_{\mathrm{off}} - \phi_{\mathrm{RoI}})^2}$ を定義し, $\Delta R_{\mathrm{L1match}}$ が式 4.2 を満たすことを要求する。また, 各ミューオンとマッチングの取れた 2 つの RoI が同一のものであることを要求する。

$$\begin{aligned} &\Delta R_{\mathrm{L1match}} < -0.01 \times p_{T,\mathrm{off}} + 0.18 \quad (p_{T,\mathrm{off}} < 10\,\mathrm{GeV}) \\ &\Delta R_{\mathrm{L1match}} < 0.08 \quad (p_{T,\mathrm{off}} > 10\,\mathrm{GeV}) \end{aligned} \tag{4.2}$$

ただし, 条件の範囲内で, 少なくともどちらかのミューオンに対して複数の RoI がマッチした事象は除いた。これらの要求を満たした近接 2 ミューオン事象に対して, mtSA にて再構成した飛跡の数を図 4.15 に示す。mtSA における粒子数は p_T が再構成できた飛跡の数で定義する。結果として, 通過したミューオンの数通り 2 つの飛跡を再構成できた mtSA の数は全体の 84%, 2 つ未満であった割合は 10%, 3 つ以上であった割合は 6% であった。また, mtSA にて粒子数を識別できた割合をオフラインミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ の関数として図 4.16 に示す。$\Delta R_{\mu\mu}$ はミューオン検出器のミドルステーションにおける値である。図 4.16 から, $\Delta R_{\mu\mu} \geq 0.02$ で 85% 以上は 2 つのミューオンを識別できていることが分かる。

一方で 2 つのミューオンの識別に失敗した割合を図 4.17 に示す。青色の分布が再構成できたミューオンの数が 2 つ未満であった mtSA の割合で, 赤色の分布が 3 つ以上ミューオンを再構成したものの割合である。図 4.16 と図 4.17 から, $\Delta R_{\mu\mu} < 0.02$ にて 2 つのミューオンの識別効率が低下し, 1 つのみと誤識別した場合の割合が高くなっていることが分かる。ミューオン検出器における $\Delta R_{\mu\mu} = 0.02$ はおよそ RPC ストリップ 2 本分に相当する。そ

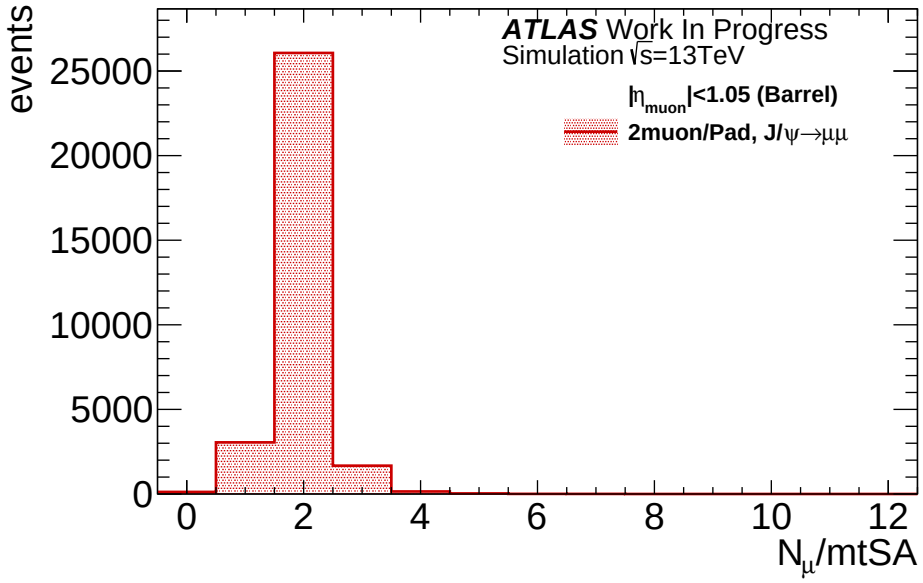


図 4.15: Pad に 2 ミューオンが入った事象に対して, mtSA にて再構成したミューオン候補の数。

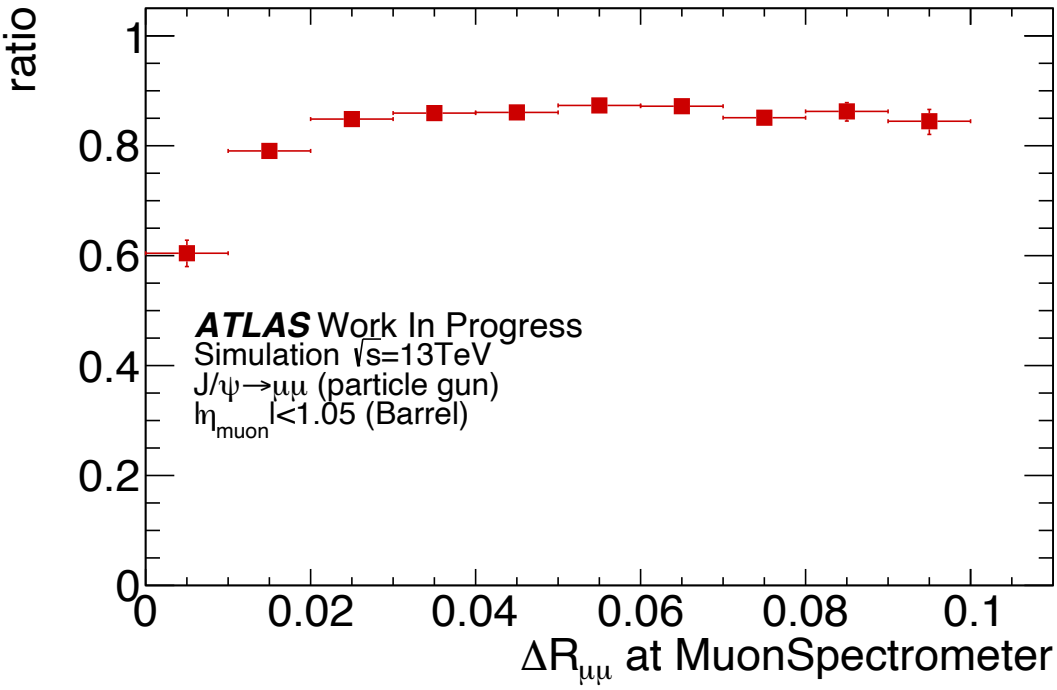


図 4.16: Pad に 2 ミューオンが入った事象に対して, 2 つのミューオンを再構成できた mtSA の割合。

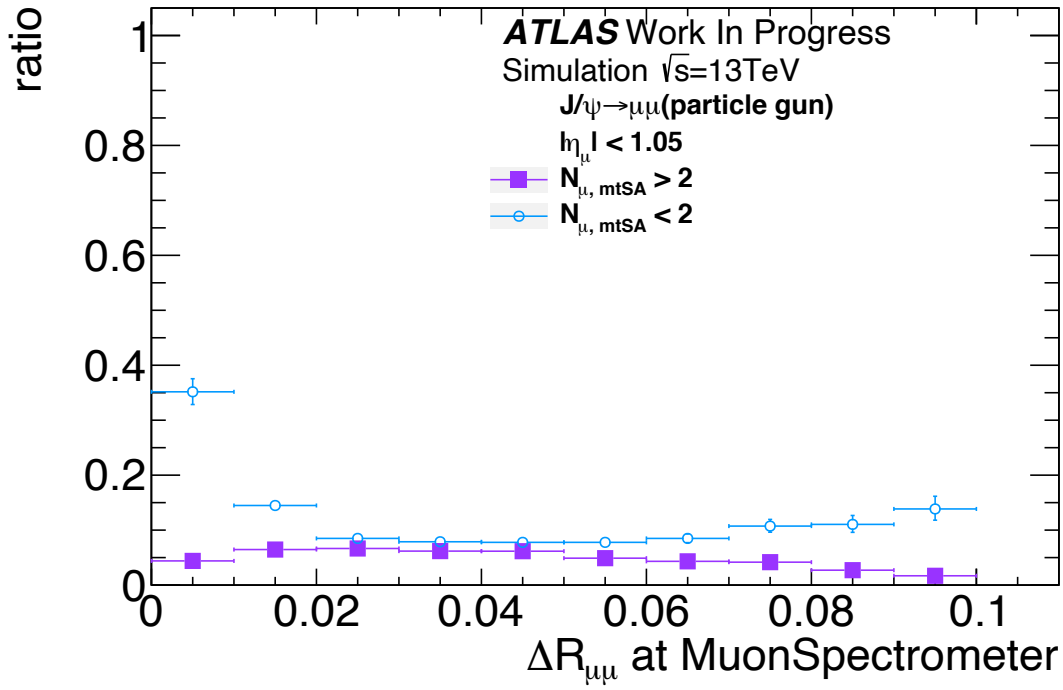


図 4.17: Pad に 2 ミューオンが入った事象に対して, mtSA にて 2 つ未満, または 2 つを超えた飛跡が再構成された割合。

のような事象の場合は隣接する RPC ストリップにヒットするため, 1 つの RPC クラスターにまとまる。その結果 RPC クラスターセットが 1 つのみ作成され, クラスターロードが各ステーションに 1 つしか作成されない。一方で, 3 つ以上ミューオンを再構成した mtSA の割合は比較的 $\Delta R_{\mu\mu}$ の大きさによらず 7% 程度ある。これは, RPC ストリップ層に 3 つ以上の RPC クラスターが生成された場合, 3 つ以上の RPC クラスターセットを作成することがあるためである。図 4.18 に, RPC ストリップ層ごとの RPC クラスター数と, mtSA で再構成したミューオンの数の相関を示す。RPC クラスター数は, 各 RPC ストリップ層の数のうちの最大値を用いた。この図に示すように, 3 つ以上のミューオンを再構成したとき, RPC クラスターを 3 つ以上含む層が存在している場合が多い。例として, 3 つ以上のクラスターロードをミドルステーションに作成したイベントディスプレイを図 4.19 に示す。ミドルステーションの最も外側に位置する RPC ストリップ層に 3 つの RPC クラスターが存在し, それぞれを用いてクラスターロードが作成されていることが分かる。

次に 1 つの Pad に 2 つのミューオンが入った事象における, mtSA で計算した $p_{T,\mathrm{mtSA}}$ の精度をオフラインミューオンの $p_{T,\mathrm{offline}}$ と比較する。オフラインミューオンを用いて 1 つの Pad に 2 ミューオンが入る事象の選別を行った後, 2 つのオフラインミューオンと比較するために 2 つのミューオンを再構成できた mtSA のみを選ぶ。また, 比較のために近接 2 ミューオン事象におけるオフラインミューオンとトリガーミューオン間の近さ ΔR を用いたマッチングを行うことは難しい。理由の 1 つとして, ミューオンの飛跡が磁場によって曲がり, ミューオン検出器の各地点でマッチするミューオンが異なる可能性があるためである。そのため, 2 つのオフライン $p_{T,\mathrm{offline}}$ のうち大きい値 (小さい値) を持つ方と, トリガー再構成ミューオンの $p_{T,\mathrm{mtSA}}$ のうち大きい値 (小さい値) を持つ方同士を用いて p_T residual を評価した。図 4.20 に赤色で示す。p_T residual の算出方法は式 4.1 に基づく。ここでの評価のために選別した事象では, 現行の MuonSA では 1 つの p_T のみの算出されるため, 同じミューオンサンプルを用いて現行の MuonSA と直接比較することは不可能である。そのため, $Z \to \mu\mu$ サンプルを用いた場合の, 1 ミューオンに対する mtSA で計算した p_T の residual 分布と比較する。図 4.20 に重ねて青色で示す。1 ミューオンに対する mtSA の p_T residual 分布は, 2 ミューオンに対する mtSA の p_T residual 分布の全イベント数で規格化した。ま

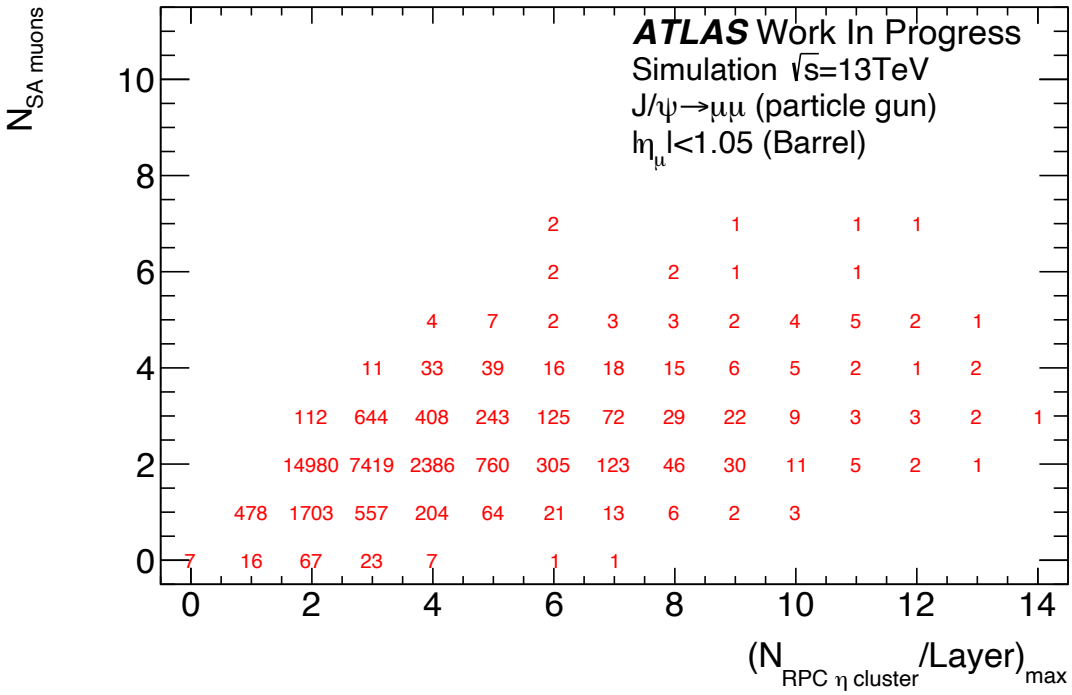


図 4.18: RPC ストリップ層ごとの RPC クラスター数と, mtSA で再構成したミューオンの数の相関。

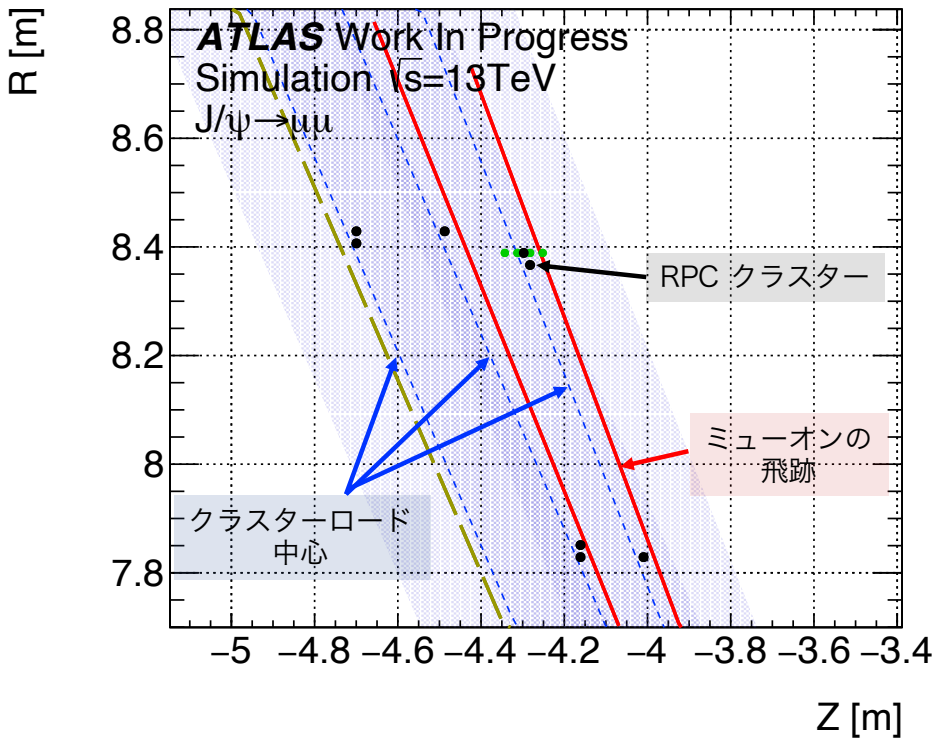


図 4.19: バレル部ミドルテーションにおけるオフラインミューオンの飛跡 (赤実線) とトリガー情報。MuonSA で取得した RPC η ヒットを緑点で示し, それらから作成された RPC クラスターを黒点で表している。クラスターロードの中心を青色の破線, ロードの範囲を青色の領域で示す。

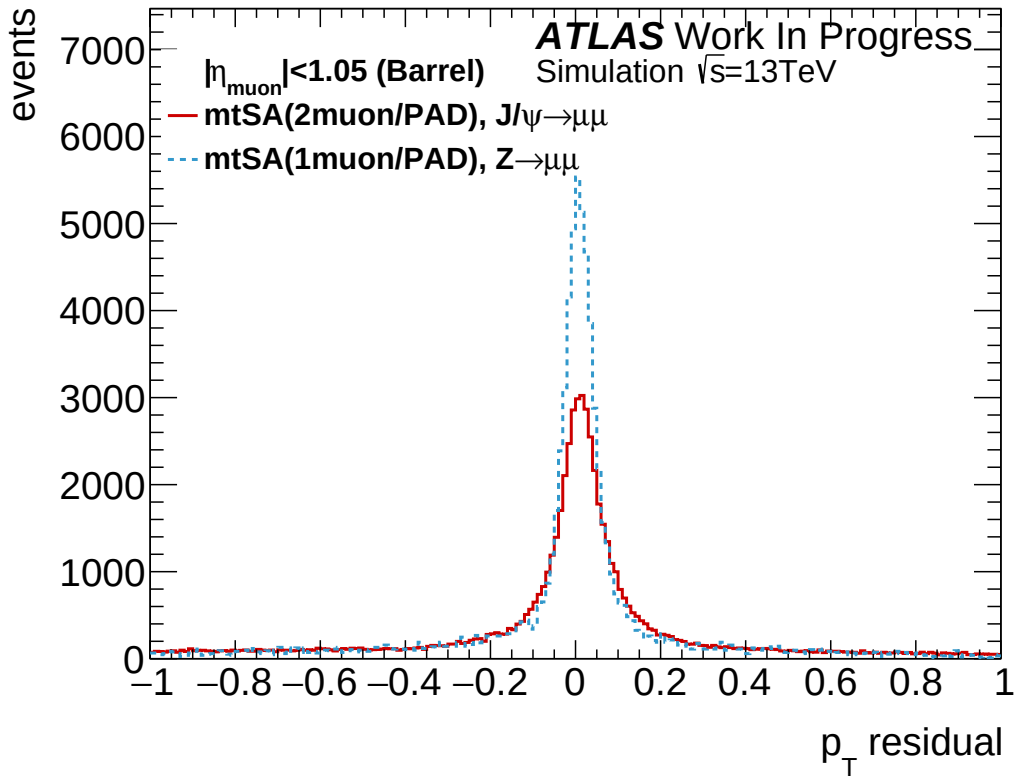


図 4.20: 近接した 2 ミューオン事象を多く含む $J/\psi \to \mu\mu$ サンプルを用いて, 2 ミューオンに対して mtSA で計算した p_T の residual 分布 (赤) と, $Z \to \mu\mu$ サンプルを用いて, 1 ミューオンに対して mtSA で計算した p_T の residual 分布 (青)。単一ミューオンに対する mtSA の p_T residual 分布は, 1 つの Pad に 2 ミューオンが入った場合の p_T residual 分布の全イベント数で規格化している。

p_T residual	**Mean**	σ	**テール部分の割合**
1 ミューオン事象に対する mtSA	9.94×10^{-3}	4.75×10^{-2}	35.2%
2 ミューオン事象に対する mtSA	1.33×10^{-2}	8.30×10^{-2}	54.7%

表 4.2: 1 ミューオン, 2 ミューオンに対する mtSA の p_T residual から求めた, ガウス分布の Mean, σ と, テール部分が全事象数に占める割合

た, 2 ミューオンに対する mtSA の p_T residual 分布をガウス関数でフィットし, その結果得られた Mean と σ, テール部分が全体の事象数に占める割合を表 4.2 に示す。表には, 1 ミューオンに対する mtSA の p_T residual 分布の同パラメータも示す。

これらの結果から, 1 ミューオンに対して mtSA で計算する p_T residual に比べて, 2 ミューオンの場合の p_T residual はピーク部分がなまっており, テール部分が占める事象数の割合が高い。

以上のことから, mtSA で計算した p_T は, 1 ミューオンが 1 つの Pad に入った場合に対しては MuonSA とほぼ同等の精度で計算できることに比べて, 2 ミューオンが 1 つの Pad に入った事象に対して mtSA で計算した p_T は精度が 2 倍近く悪くなっていることが分かる。しかし, 極端に悪化しているわけではなく, トリガー効率向上のためには充分実用に足ると判断し, 以下ではこのアルゴリズムを用いたトリガーの性能を評価する。

第 5 章

mtSA を用いた 2 ミューオントリガーの評価

第 4 章で mtSA アルゴリズムの開発とその評価を行った。このアルゴリズムを利用することで, 1 つの Pad 内に 2 ミューオンが入る事象 (極近接 2 ミューオン事象) における 2 ミューオントリガーの非効率をどの程度改善できるかを評価する。そのために, このとき mtSA アルゴリズムにイベントを送り込む L1 トリガーを，許されるトリガー頻度の制限内でトリガー効率が向上するように選んだ。以下ではそのトリガーの選択と，組み合わせた後のトリガー効率について議論する。

5.1　mtSA を用いた 2 ミューオントリガーの流れ

このチェーンは L1 で 1 つの RoI のみが発行されるような極近接 2 ミューオン事象を対象にしている。そのため, 一般的な 2 ミューオントリガーのように L1 トリガーで 2 ミューオンを要求するのではなく, L1 トリガーでは 1 ミューオントリガーを要求し, HLT で 2 つのミューオンを要求する。この組み合わせによる各トリガーの流れを図 5.1 に示す。

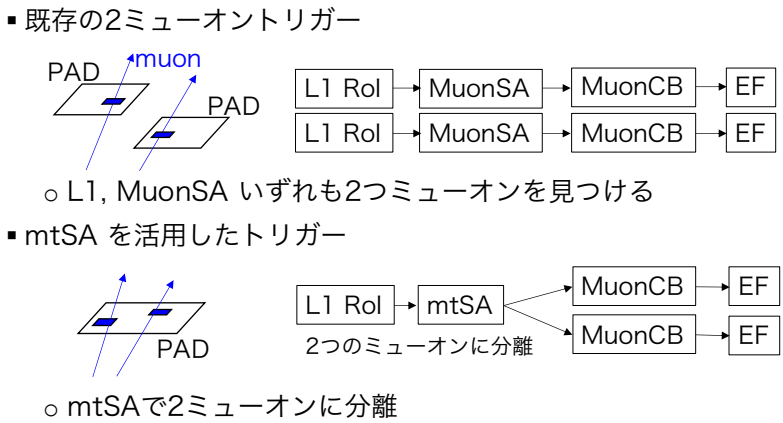


図 5.1: 通常の 2 ミューオントリガーの組み合わせと, L1 1 ミューオントリガーに mtSA を組み合わせたときのトリガーの流れ。

このトリガーの組み合わせでは, L1 で発行された 1 つの RoI から mtSA で 2 つ以上のミューオンに分離し, SA overlap remover を要求した上で p_T しきい値によるトリガー判定を行う。mtSA 以降のトリガーでは，2 つ以上のミューオンそれぞれについて現行の MuonCB, EF を実行する。SA と CB の overlap remover における判定の条件は, 現行の 2 ミューオントリガーで用いられているパラメータと同じに設定している。本アルゴリズムはバレル部の L1 トリガーから発行された RoI に対してのみ有効であるため, エンドキャップ部の L1 トリガーから発行された RoI に対してはミューオンの再構成を行わないようにする。

L1 ではこれまでの 2 ミューオントリガーと異なり, 1 ミューオンだけを要求するため, その L1 で低い p_T しきい値を要求した場合, mtSA が呼び出される頻度が非常に高くなる。2 ミューオンと同じ p_T しきい値でトリガーすると，L1 トリガー頻度が最大値の 100 kHz を大きく超えてしまう。また, 第 4.3.1 節で示した通り, 単一ミューオン事象にも関わらず 2 つ以上のミューオンを再構成する mtSA は 3% 程度存在する。これらの誤って再構成された 2 つのミューオンが p_T しきい値によるトリガー判定を通過した場合, 後段の MuonCB, EF を実行してしまうことになるため, L1 の 1 ミューオントリガーのしきい値が低い場合は計算機資源, 特にデータアクセスが問題となり, 不感時間が生じる。もし, L1 で p_T しきい値以外のパラメータを用いて事前に選別を行うことができれば, しきい値を下げた場合のトリガー頻度を抑制することができる。そこで, 今後実装予定の L1 ミューオントリガーで, 1 つの Pad 内に 2 つ以上のミューオン候補の有無を判定するフラグを用いる。以降, このフラグのことを「L1 近接 2 ミューオンフラグ」と呼ぶ。このフラグ については第 5.3.1 節にて詳細に説明する。

本章では, mtSA に繋げるための L1 トリガーとして,

1. 既存の L1 1 ミューオントリガーと mtSA の組み合わせ
2. L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた L1 1 ミューオントリガーと mtSA の組み合わせ

の 2 つの場合のトリガー効率と, トリガー頻度について評価する。前者により L1 の条件を最大限緩和したときのトリガー効率を求め，トリガー頻度の点で現実的な後者と比較する。また, 前者のトリガーに比べて後者がどれだけトリガー頻度を削減できるか調べる。

最後に, L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた L1 トリガーに mtSA を組み合わせたトリガーのトリガー効率を評価し, 許されるトリガー頻度の制限内でどの程度近接 2 ミューオン事象のトリガー取得効率が向上するかを評価する。

5.2　L1 の 1 ミューオントリガーと mtSA を組み合わせた場合

5.2.1　トリガー効率の評価

L1 で $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 1 つ要求し, それを通過した事象に対して mtSA を実行するトリガーの効率を評価する。mtSA に対しては, $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求する。mtSA 以降の HLT トリガーには既存の MuonCB, EF を組み合わせ, それぞれの HLT トリガーで $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求する。このように組み合わせた場合のトリガーの流れを図 5.2 に示す。また, mtSA と MuonCB にて同じミューオンを再構成した場合に, そのうちの 1 つのみを残す overlap remover(第 3.2.3 節を参照) を課す。p_T しきい値に 10 GeV を選んだ理由は, 後述するように, L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた際に Run3 からのトリガー頻度が許容範囲まで抑えられるためである。

トリガー効率を求めるために, 第 3.3.1 節にて説明したとおり, トリガーを通過することが期待される事象数に対

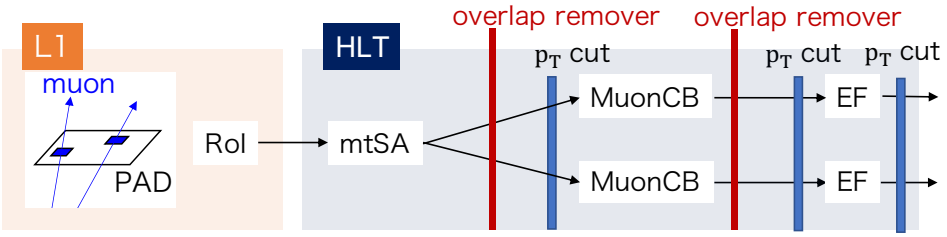


図 5.2: L1 1 ミューオントリガーに mtSA を組み合わせた場合のトリガーの流れ。L1 トリガーでは 10 GeV のミューオンを 1 つ要求し, HLT の各トリガーにて 10 GeV のミューオンが 2 つあることを要求する。

して, 実際にトリガーを通過した事象数の割合を求める。例えば MuonSA までのトリガー効率を,

$$\epsilon_{\mathrm{L1,MuonSA}} = \frac{\text{L1 かつ MuonSA で再構成した飛跡の } \mathrm{p_T}\text{がしきい値以上であった事象の数}}{p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}\text{のオフラインミューオンがバレル部に 2 つ存在する事象の数}} \tag{5.1}$$

と定義する。同様に MuonCB(EF) までのトリガー効率は, 上の式の分子に MuonCB (かつ EF) を通過していることを追加で要求する。このトリガー効率を, 従来の 2 ミューオントリガーである, L1, HLT ともに 10 GeV のミューオンを 2 つ要求する既存の 2 ミューオントリガーの効率と比較する。なお, いずれの 2 ミューオントリガーでも, $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンのために mtSA(MuonSA) に要求する p_T しきい値は, 第 3.2.1 節に説明したとおり 10 GeV よりも低い値 (バレル部では 5.17 GeV) である。サンプルには, 第 3.3.2 節で説明した, $b, \bar{b}$ クオークの崩壊により J/ψ が生成し, その後 $J/\psi \to \mu\mu$ へと崩壊するシミュレーションサンプルを用いた。図 5.3 に, このサンプルにて $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のオフラインミューオンが 2 つ存在するときの $\Delta R_{\mu\mu}$ 分布を示す。本サンプルのような低質量粒子の崩壊による 2 ミューオンは互いに近接する傾向にあるため, 既存の 2 ミューオントリガーでは取得に失敗する領域 ($\Delta R_{\mu\mu} < 0.2$) の事象が多く含まれている。

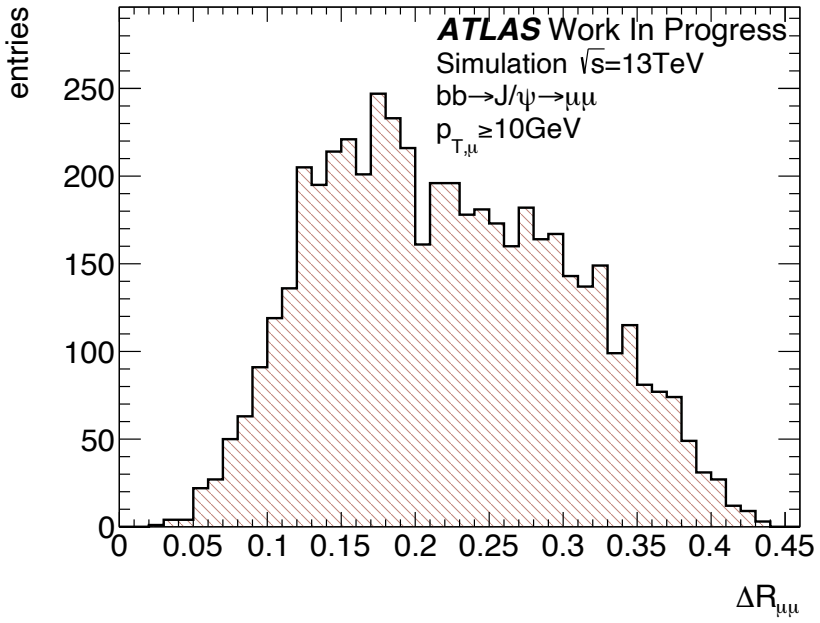


図 5.3: トリガー効率の評価に用いる $b\bar{b} \to J/\psi \to \mu\mu$ サンプルにおいて, $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のオフラインミューオンが 2 つ存在する場合の $\Delta R_{\mu\mu}$ 分布。

mtSA のための L1 トリガーである, L1 で $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 1 つ要求するトリガーと, 既存の 2 ミューオントリガーのための L1 で $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求するトリガーの効率を図 5.4 に示す。以下で mtSA に L1 1 ミューオントリガーをつなげた場合のトリガー効率を評価するため, 2 ミューオンがバレル部に存在する事象に限って評価する。ここから, 既存の L1 2 ミューオントリガーにて, $\Delta R_{\mu\mu} < 0.2$ で効率が低下していることが分かる。また, 1 つの $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを要求する L1 トリガーの効率が約 94% 程度と極めて高いが, これは 2 つのミューオンのうちどちらかが L1 トリガーの条件を満たせば, 事象はトリガーを通過するからである。1 ミューオンに対するバレル部 L1 の 1 ミューオントリガーの効率は 76% 程度である。2 ミューオン事象にて両方のミューオンに対しても L1 1 ミューオントリガーが発行されない事象 (24% × 24%) のみがトリガー非効率となる。一方で, L1 で 2 ミューオンを要求したトリガーの効率は, $\Delta R_{\mu\mu} \geq 0.2$ と 2 ミューオンが充分に離れている場合でも 55% 程度と低い。これは第 4.1 節でも説明したとおり, 2 ミューオン事象において, 両方のミューオン

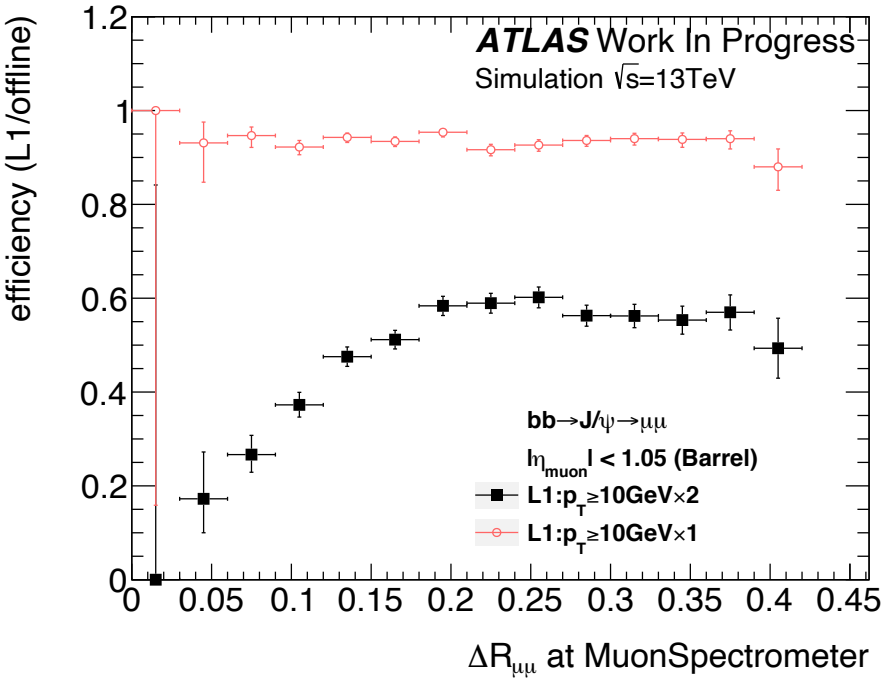


図 5.4: L1 で $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 1 つ要求するトリガーの効率 (赤) と, 2 つ要求するトリガーの効率 (黒) の $\Delta R_{\mu\mu}$ 分布

に対して L1 のトリガーが発行された場合 (76% × 76%) に, L1 を通過したとして分子の事象数に含めているためである。

この L1 1 ミューオントリガーを通過した事象に対して, mtSA で $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求した場合のトリガー効率を図 5.5 にて赤色で示す。また, L1 2 ミューオントリガーを通過した事象に対して, MuonSA で $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求する既存の 2 ミューオントリガーの効率を黒色で示す。この図から, $\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.2 よりも大きく, 2 ミューオンが充分に離れている領域では, mtSA と MuonSA のトリガー効率がほぼ同じである。2 ミューオンが離れている場合は, 各ミューオンに対してそれぞれ RoI が発行される。mtSA にて 1 ミューオン事象に対して 1 つの飛跡を再構成できる割合は 97% であるため, 1 ミューオンに対して発行された RoI につき, 誤って mtSA で 2 つ以上のミューオンを再構成する事象は少ない。従って, L1 で片方のミューオンに対してのみ RoI が発行された事象の場合は mtSA でも 1 つの飛跡のみ再構成する事象が多く, このとき 2 ミューオンを要求する mtSA のトリガーを通過しない。そのため, L1 で 2 つのミューオンを見つけられた場合 (76% × 76%) に mtSA でも 2 つのミューオンを見つけられることが多く, 従来の 2 ミューオントリガーの効率に近くなる。

また, $\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.2 よりも小さい領域で, $\Delta R_{\mu\mu}$ が小さくなるにつれて mtSA のトリガー効率が増加していることが分かる。$\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.2 よりも小さい領域では, 1 つの Pad に 2 つのミューオンが入り, 1 つの RoI のみが発行される事象だが, 2 ミューオンが比較的離れている図 5.6 のような事象が $\Delta R_{\mu\mu}$ がより小さい領域に比べて多い。このとき, 図のように mtSA における RPC ヒットの探索範囲外に片方のミューオンによる RPC ヒットが存在するため, このミューオンに対して mtSA で RPC ヒットの取得ができず, mtSA の 2 ミューオントリガーの非効率となる。そのため, 2 つのミューオンの距離が小さくなるにつれて, 第 4.3.2 節にて評価したとおり, 2 つの飛跡を再構成できる割合の 85% に近づく。

以上から, L1 1 ミューオントリガーに mtSA を組み合わせたことにより $\Delta R < 0.2$ で 2 ミューオントリガーの効率の改善が見られる。極近接 2 ミューオン事象における改善の度合いを評価するため, オフラインミューオン間の

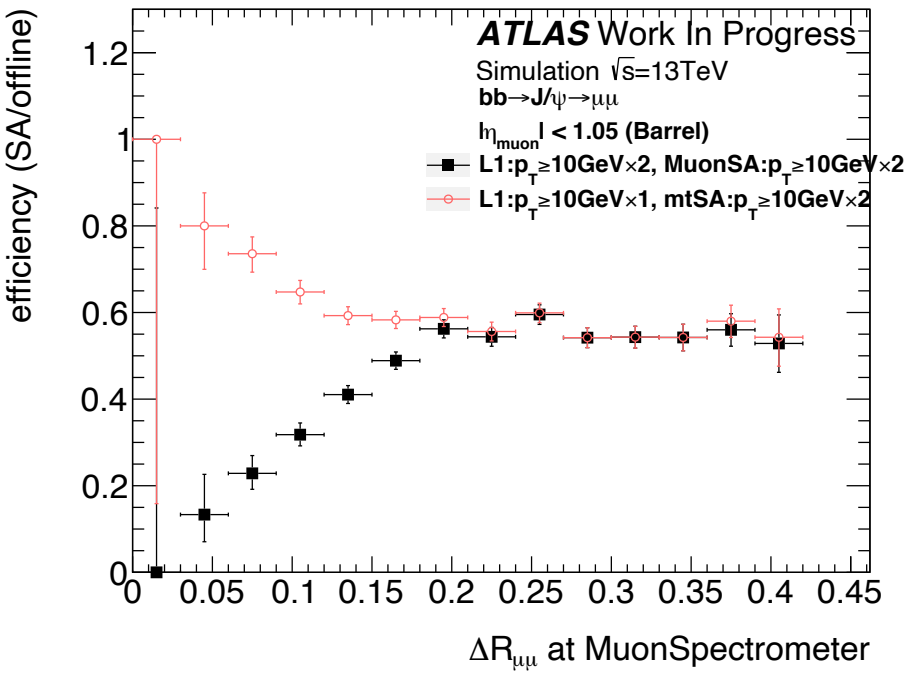


図 5.5: L1 で $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 1 つ要求し, mtSA で $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求した場合のトリガー効率 (赤) と, L1 で 2 つのミューオンを要求し, MuonSA でも 2 ミューオンを要求する既存のトリガーの効率 (黒)。

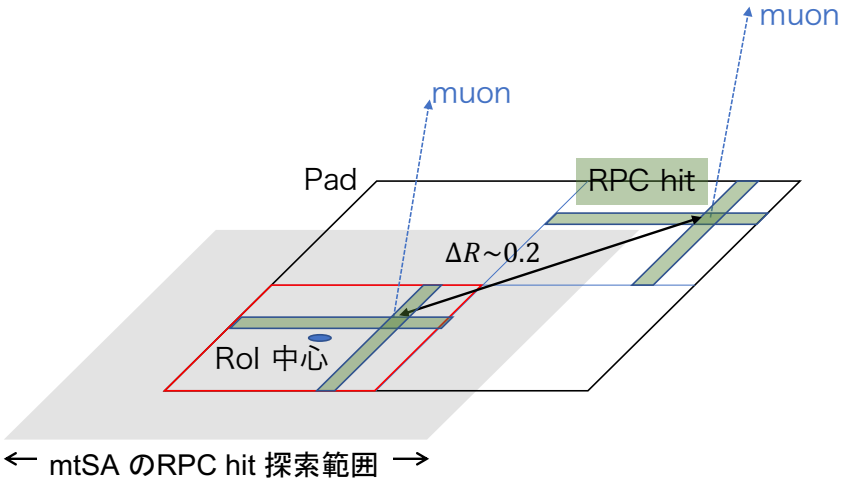


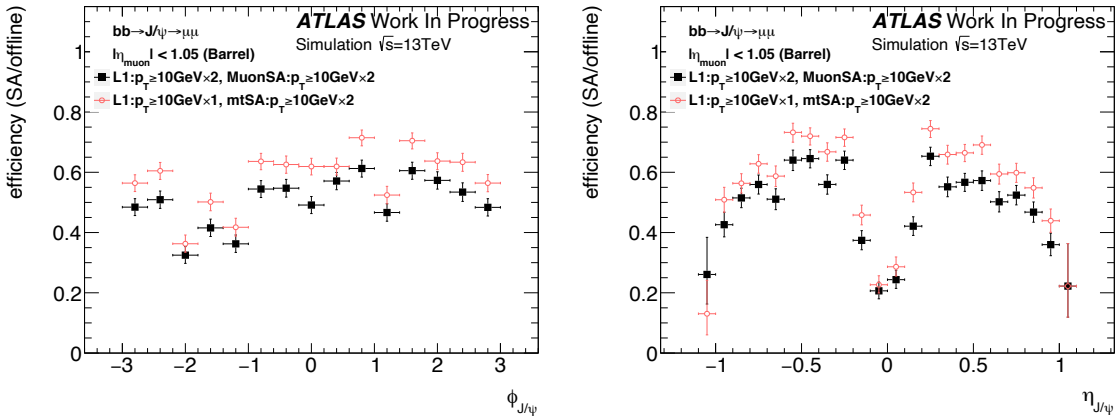
図 5.6: 1 つの Pad に 2 つのミューオンが入り, かつ $\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.2 程度の場合における, mtSA での RPC ヒット探索範囲 (グレーの領域) の概念図。

トリガー	MuonSA or mtSA
mtSA を用いた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガー	60.6%
既存の $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガー	43.2%

表 5.1: オフラインミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.2 未満である事象のうち, mtSA または MuonSA を通過した事象の割合。

$\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.2 未満である事象の内, mtSA を通過した事象の割合と, 従来の 2 ミューオントリガーにおける MuonSA を通過した割合を百分率で表 5.1 に示した。この表から, $\Delta R_{\mu\mu} < 0.2$ の場合, トリガーを通過する事象の割合が 17% 程度向上していることが分かる。

また, 効率の J/ψ の ϕ 依存性を図 5.7a に, η 依存性を図 5.7b に示す。図 5.7a から, いずれのトリガーともに $-2.5 < \phi < -1$ あたりの効率が低いことが分かる。バレル部のミューオン検出器において, $-2.16 < \phi < -1.77$ と $-1.37 < \phi < -0.98$ の範囲はフィートセクターに該当する。フィートセクターにはトロイド磁石の構造を支える足があることにより, 不感領域が存在するため, この領域の検出効率は低い。また, $\eta \sim 0$ あたりも検出器が存在しない不感領域であることから, 両トリガーともに効率が低くなっている。バレル-エンドキャップの境界付近である $|\eta| \sim 1.05$ ではミューオンペアの片方がエンドキャップ部に飛跡を残す場合があるため, mtSA を用いたトリガーによる効率の改善が小さい。一方で他のどのバレル部領域でもよいトリガー効率の改善が見られる。



(a) mtSA(MuonSA) のトリガー効率の ϕ 依存性　　**(b)** mtSA(MuonSA) のトリガー効率の η 依存性

図 5.7: 既存の $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオン用トリガー (黒) と mtSA を用いた 2 ミューオン用トリガー (赤) のトリガー効率の ϕ 依存性と η 依存性

5.2.2　L1 のトリガー頻度

第 5.2 節にて, $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 1 つ要求する L1 トリガーに mtSA を組み合わせた場合のトリガー効率を評価した。しかし実際のデータ取得において, L1 で低い p_T のミューオン 1 つを要求した場合はトリガー発行頻度が高く, L1 全体で許容されているトリガー頻度の最大値である 100 kHz を超えるため, トリガーを通過した事象全てを取得することは不可能である。そのため, L1 の 1 ミューオントリガーによるデータの取得の際は, トリガー頻度が低く, 物理的に重要な高いしきい値のトリガーを除いて, トリガーが発行された事象を間引いて後段トリガーに送ることで許容トリガー頻度まで抑えている。Run2 での, L1 のトリガー発行数を間引かなかった場合の推定トリガー頻度を表 5.2 に示す。

これらのうち, $p_T \geq 20\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 1 つ要求するトリガー以外の 1 ミューオントリガー全てと,

L1 トリガー	トリガー頻度
$p_T \geq 6\,\mathrm{GeV} \times 1$	425 kHz
$p_T \geq 10\,\mathrm{GeV} \times 1$	192 kHz
$p_T \geq 11\,\mathrm{GeV} \times 1$	66.0 kHz
$p_T \geq 20\,\mathrm{GeV} \times 1$	15.7 kHz
$p_T \geq 6\,\mathrm{GeV} \times 2$	7.6 kHz
$p_T \geq 10\,\mathrm{GeV} \times 2$	2.2 kHz

表 5.2: Run2 における L1 の推定トリガー頻度。L1 トリガーは, p_T しきい値と要求するミューオンの数で表した。ルミノシティは $2.0 \times 10^{34}\,\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ を仮定している。

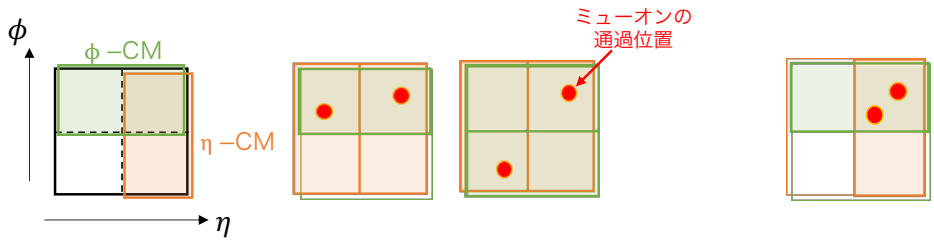
$p_T \geq 6\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーに対して間引きが行われていた。そのため, L1 の 1 ミューオントリガーに mtSA を組み合わせて, 2 ミューオン事象の取得に利用することは, 間引いたトリガーでは効率が上がらないことと, レートが高いトリガーの実装はできないことから困難である。従って, 既存の L1 トリガーにさらなる条件を加えることでトリガー頻度を削減することが望まれる。

そこで, mtSA と組み合わせるための L1 トリガーに要求する新たな条件として, RPC L1 ハードウェアに備わっている近接 2 ミューオン事象かどうかをある程度識別することができる「L1 近接 2 ミューオンフラグ」を用いることを試みる。このフラグを用いたときのトリガー頻度と, このフラグを用いた L1 トリガーに mtSA を組み合わせたときのトリガー効率を以下で述べる。

5.3　L1 で近接 2 ミューオンを判定するフラグを利用した場合

5.3.1　L1 近接 2 ミューオンフラグ

第 3.1.1 節で説明したとおり, バレル部の L1 トリガーは η-CM, ϕ-CM それぞれ 2 枚から構成される Pad が単一ミューオンを見つけることのできる最小単位であり, RPC ヒットの存在する η-CM と ϕ-CM が重なる領域を RoI として定義している (図 3.2)。そのため図 5.8 の 3 つのパターンのような極近接 2 ミューオン事象は, 1 つの RoI のみが定義され, L1 の 2 ミューオントリガーを通過しない。そこで, Pad を構成する η-CM または ϕ-CM が 2 つと



(a) L1 近接 2 ミューオンフラグ が立つ事象　　**(b)** L1 近接 2 ミューオンフラグ が立たない事象

図 5.8: L1 近接 2 ミューオンフラグ を用いることで識別することの可能な 2 ミューオン事象と, 不可能な事象

も鳴っている場合, 2 つミューオンが通過したと判定する flag “L1 近接 2 ミューオンフラグ” が Run3 から用いることが可能である。依然として 1 つの Pad からは 1 つの RoI のみが発行されるが, この flag の判定を見ることで図 5.8a のような事象は 2 ミューオンを高い確率で識別できる可能性がある。図 5.8b の場合は η-CM, ϕ-CM ともに 1 つのみが鳴っているため, 単一ミューオンと区別がつかず, L1 近接 2 ミューオンフラグによる識別はできない。

5.3.2　L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた場合の L1 トリガー頻度

ここでは, L1 近接 2 ミューオンフラグがどの程度 L1 でトリガー頻度を抑制できるかを見積もり, トリガー頻度の観点から適切な p_T しきい値について議論する。Run2 の実データを用いて, L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた場合の推定トリガー頻度を表 5.3 に示す。具体的には, (1) 既存の L1 トリガーが発行した RoI のうち, L1 近接 2 ミューオンフラグ が立っている事象数の割合を求め, (2) ルミノシティ $2.0 \times 10^{34}\,\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ における L1 トリガーのトリガー頻度にその割合を乗算することでトリガー頻度を推定した。(1) の結果を表の「L1 近接 2 ミューオンフラグ が立っている割合」の列に示し, (2) の結果を「推定トリガー頻度」の列に示す。

L1 トリガー	**L1 トリガー頻度**	**L1 近接 2 ミューオンフラグ が立っている割合**	**推定トリガー頻度**
$p_T \geq 6\,\mathrm{GeV} \times 1$	425 kHz	2.7%	12 kHz
$p_T \geq 10\,\mathrm{GeV} \times 1$	192 kHz	3.6%	6.9 kHz
$p_T \geq 11\,\mathrm{GeV} \times 1$	66.0 kHz	0.72%	0.48 kHz
$p_T \geq 20\,\mathrm{GeV} \times 1$	15.7 kHz	1.4%	0.22 kHz

表 5.3: L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた場合の推定トリガー頻度

この表から, L1 の p_T しきい値を 11 GeV 以上にした場合に, 11 GeV 未満に比べて L1 近接 2 ミューオンフラグが立っている割合が大きく低下していることが分かる。これは, Run2 の期間では p_T しきい値が 11 GeV 以上のトリガーで RPC1, RPC2, RPC3 の 3 層を用いてトリガー判定を行っていたため, L1 トリガーを通過した全事象に対してバレル部の事象の占める割合が低かったことが理由である。Run2 において間引きが行われていなかった L1 の 2 ミューオントリガーの p_T しきい値は 10 GeV であり, そのトリガー頻度は 2.2 kHz であった。これに比べ, $p_T \geq 11\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 1 つ要求し, L1 近接 2 ミューオンフラグの判定を加えた L1 トリガーの頻度は 0.48 kHz と充分に小さい。そのため, 3 層の RPC を用いてトリガー判定を行う L1 トリガーに L1 近接 2 ミューオンフラグを適用すれば, 頻度も許容範囲内にまで抑えられると考えられる。

Run3 では, p_T しきい値が 10 GeV 以上の L1 トリガーで RPC1, RPC2, RPC3 層を用いてトリガー判定が行われる予定である。そのため, 以降のトリガー効率の評価には, L1 近接 2 ミューオンフラグを適用した $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ 用の L1 1 ミューオントリガーに mtSA を組み合わせる。このときのトリガーの流れを図 5.9 に示す。

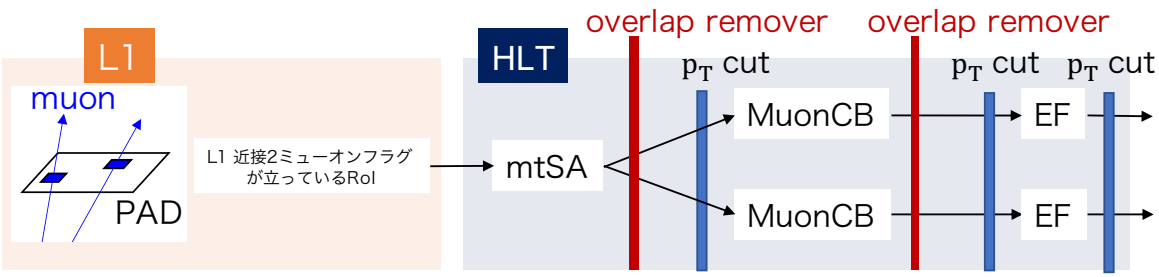


図 5.9: L1 近接 2 ミューオンフラグを用いたトリガーと mtSA を組み合わせたときのトリガーの流れ。

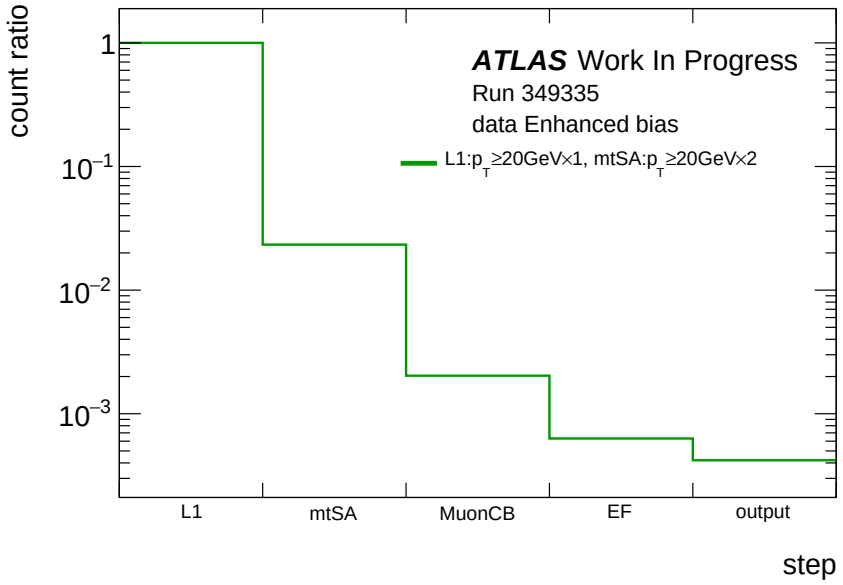


図 5.10: p_T しきい値が 20 GeV の L1 1 ミューオントリガーに mtSA を組み合わせ, HLT にて 2 つの $p_T \geq 20$ GeV のミューオンを要求した場合における各トリガー発行数の割合。

5.3.3　mtSA におけるトリガー頻度

$p_T \geq 10$ GeV の 2 ミューオン事象のための mtSA 用トリガーは, 従来の同じ p_T しきい値の 2 ミューオントリガーに新しく加わるものである。従って, 従来の 2 ミューオントリガーにて EF を呼び出す回数に, 新たに mtSA 用トリガーから呼び出す EF の回数が上乗せされる。mtSA 用トリガーによって増加する EF の実行回数を, mtSA と MuonCB でどの程度削減できるかを評価する。

L1 近接 2 ミューオンフラグを適用した $p_T \geq 11$ GeV 用の L1 1 ミューオントリガーに mtSA を組み合わせた場合での mtSA のトリガー頻度を見積もり, 既存の $p_T \geq 10$ GeV の 2 ミューオントリガー頻度と比較する。そのために, L1 のトリガー発行数に対する mtSA のトリガー発行数の割合を, Run2 の実データを使って求める。実データには L1 の 1 ミューオントリガーとして p_T しきい値が 20 GeV のもののみが充分な統計で取得できている。MuonSA における p_T しきい値は, $p_T \geq 11$ GeV 用のトリガーと $p_T \geq 20$ GeV 用のトリガーで同じ値を用いており, mtSA でも同様に p_T しきい値を定義している。そのため, $p_T \geq 11$ GeV の代わりに mtSA でも $p_T \geq 20$ GeV のミューオンを 2 つ要求し, それを通過した事象を計数することで割合を計算する。L1 を通過した事象に対する各 HLT ステップにおけるトリガー発行数の割合を図 5.10 に示す。mtSA, MuonCB, EF と示されている項目が, それぞれ L1 を通過した事象に対して各トリガーステップを通過した事象の割合である。この図より, L1 の 1 ミューオントリガーを通過した事象に対して mtSA を通過する事象の割合は約 2% と低く, ほとんどの事象を落とせていることが分かる。

この割合に, L1 近接 2 ミューオンフラグを使った $p_T \geq 11$ GeV 用の L1 トリガー頻度を乗算することで, この L1 トリガーを mtSA に組み合わせた場合の mtSA におけるトリガー頻度を見積もる。その結果を図 5.11 に緑色の実線で示す。比較のため, L1, HLT ともに 2 つの $p_T \geq 10$ GeV のミューオンを要求する従来のトリガー発行頻度を黒色の点線で示す。

結果として, L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を用いた $p_T \geq 11$ GeV の 2 ミューオン用トリガーにおける, mtSA のトリガー頻度は 0.01 kHz であった。これは, L1, HLT ともに $p_T \geq 10$ GeV の 2 ミューオンを要求する既

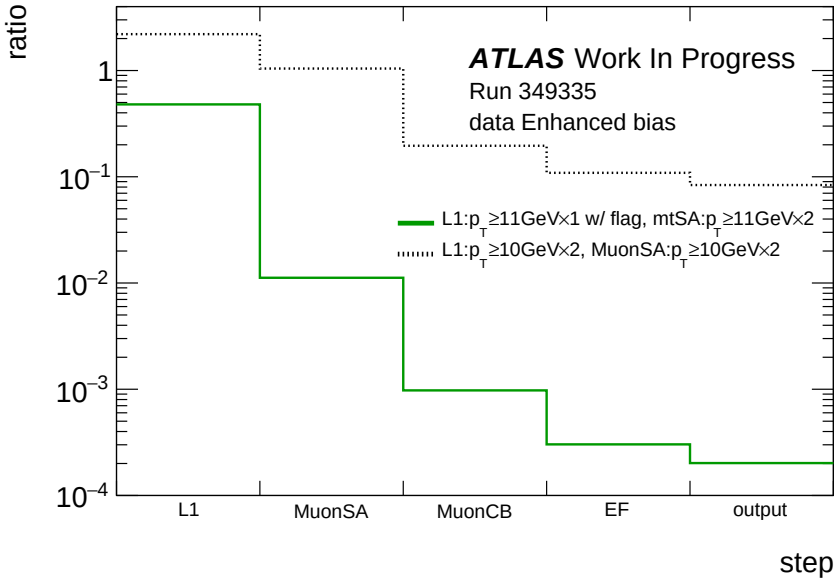


図 5.11: L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を組み合わせた $p_T \geq 11\,\mathrm{GeV}$ 用の 2 ミューオントリガーの頻度 (緑実線) と, L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求する既存の 2 ミューオントリガーの頻度 (黒点線)。

存の 2 ミューオントリガーにおける MuonSA のトリガー頻度 (1.0 kHz) と比べて充分に小さい。 このことから, L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を組み合わせた新しいトリガーを加えることによるレートの増加は, 既存の 1 ミューオン, 2 ミューオントリガーと比べて小さく抑えられていることがわかった。

5.3.4　L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた mtSA トリガー効率の評価

本節では, L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた L1 トリガーに, mtSA を組み合わせたトリガーの効率を評価する。サンプルには, 第 3.3.2 節で説明した, $b, \bar{b}$ クオークの崩壊により J/ψ が生成し, その後 $J/\psi \to \mu\mu$ へと崩壊するシミュレーションサンプルを用いた。初めに, L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた L1 のトリガー効率を示し, 次にこの L1 に mtSA をつなげた場合のトリガー効率を示す。

L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた場合の L1 トリガーの効率

バレル部に $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンが 2 つ存在するオフライン事象に対して, L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ 用の L1 トリガーの効率を図 5.12 に赤色で示す。比較のため, 既存の $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の L1 2 ミューオントリガーのトリガー効率を黒色で示している。また, 2 ミューオントリガー全体としてどの程度効率が回復するかを見るため, 2 つのトリガーの論理和 を取った場合の効率を青色で示す。

図 5.12 から, $\Delta R_{\mu\mu} \leq 0.2$ の範囲で L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ 用トリガー による 2 ミューオントリガー取得効率の大きな向上がみられる。ただし, $\Delta R_{\mu\mu} < 0.05$ では L1 近接 2 ミューオンフラグのトリガーもトリガー取得効率が低下している。これは, L1 近接 2 ミューオンフラグが立つ事象は 1 つの Pad の異なる RoI 領域に 2 ミューオンが入ったときのみ (図 5.8) であり, 1 つの RoI 領域に入った場合は 1 ミューオンが通過したときとの区別がつかないためである。

一方で, $\Delta R_{\mu\mu} > 0.2$ の範囲でも L1 近接 2 ミューオンフラグを用いたトリガーのトリガー効率が 0 ではないため, L1 近接 2 ミューオンフラグが 1 ミューオン事象に対しても立っている事象があることが分かる。単一ミューオンが Pad 内に入った事象にも関わらず, L1 近接 2 ミューオンフラグ が立っている場合のイベントディスプレイを

図 5.13 に示す。このイベントディスプレイから, RPC2 の RPC η hit が 4 層に渡って存在する様子が分かる。これは図 5.14 のように, 1 つの Pad を構成する 2 つの η-CM の境界をミューオンが通過したことを示している。このような場合, 2 つの η-CM ともに RPC ヒットを持つことになるため, L1 近接 2 ミューオンフラグ が立つ。

単一ミューオンが 1 つの Pad に入ったにも関わらず flag が立つ事象のうち, 2 つの η, または ϕ-CM が RPC ヒットを持っている事象がどの程度の割合を占めているかを確認した。その結果を図 5.15 に示す。サンプルは $Z \to \mu\mu$ のシミュレーションサンプルを用いた。また, CM の境界に単一ミューオンが入った場合が全体に占める割合を計算した結果 93% であったことから, これが L1 近接 2 ミューオンフラグ が立つ主な原因であることが分かる。

L1 近接 2 ミューオン判定フラグのトリガーと組み合わせた mtSA トリガーの効率

L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のためのトリガーと, $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求する mtSA を組み合わせたトリガーの, オフライン事象に対する mtSA のトリガー効率を図 5.16 に示した。mtSA における $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンに対する p_T しきい値は, 既存の 2 ミューオントリガーにおける MuonSA と同様に, バレル部のミューオンに対して 5.17 GeV とした。また, 既存の $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ 用 2 ミューオントリガーとの論理和 を取った場合の効率を青色で表示した。分母となるオフラインミューオンの情報を用いた事象選別では, バレル部に $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンが 2 つ存在することを要求している。これから分かるように, $\Delta R_{\mu\mu} < 0.2$ の領域で L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた L1 トリガーと, mtSA を組み合わせたトリガーによる効率の改善が見られる。また, mtSA に続くトリガーである MuonCB, EF を加えて要求した場合のトリガー効率を同様に示し, 最終的な 2 ミューオン事象の取得効率がどの程度向上するかを評価する。mtSA 用のトリガーでの MuonCB と EF の段階の効率を, 既存の $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガーにおける同ステップでの効率と, 2 つの 2 ミューオントリガーの論理和を取った場合の効率とともに図 5.17 に示す。

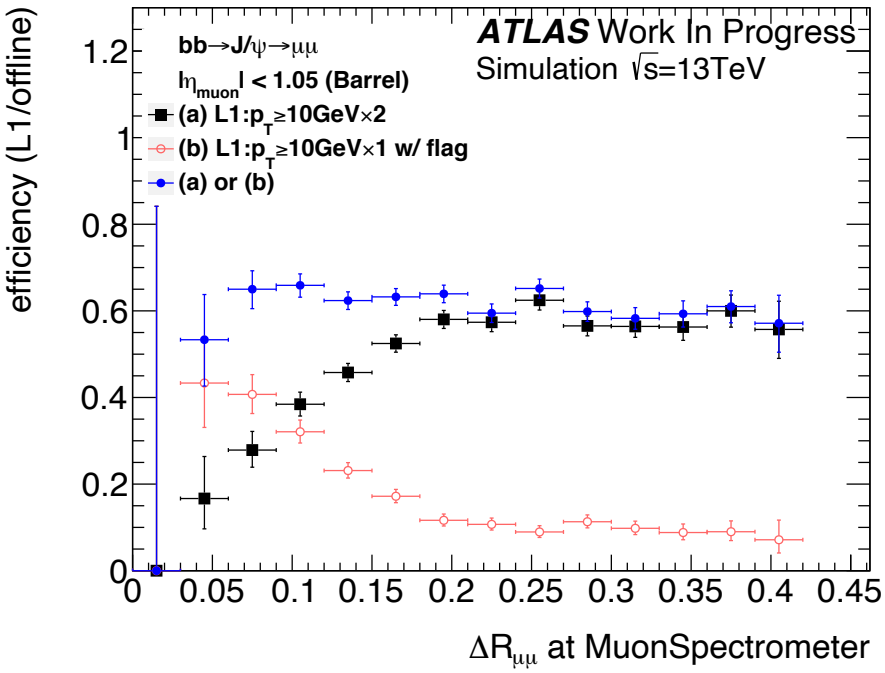


図 5.12: バレル部に $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンが 2 つ存在する事象に対する, L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ 用トリガーのトリガー効率 (赤) と既存の $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオン用 L1 トリガーの効率 (黒)。全体の 2 ミューオン取得効率の向上を見るため, 2 つの OR を取った効率を青色で示す。

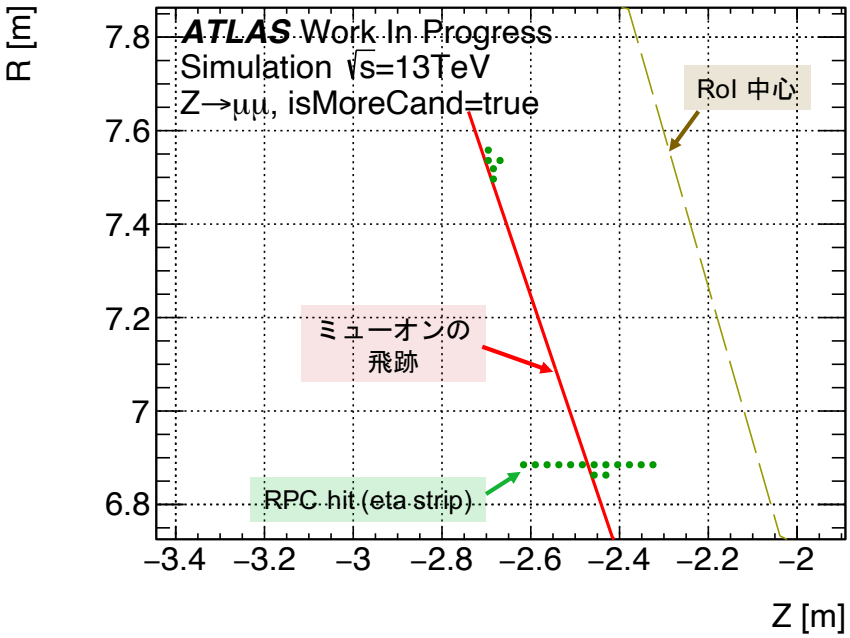


図 5.13: 単一ミューオンが 1 つの Pad に入ったにもかかわらず, L1 近接 2 ミューオンフラグ が立っているときのイベントディスプレイ。ミドルステーションにおけるミューオンの飛跡 (赤) と RoI 中心の方向 (黄), MuonSA で取得した RPC η hit (緑) を示す。

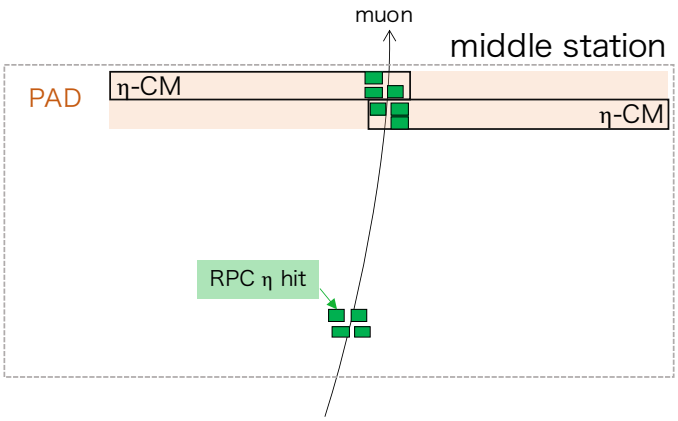


図 5.14: 単一ミューオン事象で L1 近接 2 ミューオンフラグ が立つ原因。

定量的に近接 2 ミューオン事象に対するトリガー効率の改善度合いを評価するため, L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を組み合わせた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガーと L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーの論理和を取った場合と, L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーのみの効率を比較する。そのために, $\Delta R_{\mu\mu} < 0.2$ であるオフライン事象に対する, 各トリガーステップを通過した割合を表 5.4 に示し, その割合をグラフで図 5.18 に示す。 これらから $\Delta R_{\mu\mu} < 0.2$ の範囲では, L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を組み合わせた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガーによって, バレル部における $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオン事象を取得できる効率が, 既存の $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガーのみの場合と比べて, mtSA の段階にて 25% 増加することが分かる。また, 従来の 2 ミューオントリガーと比べて, L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた L1 に mtSA を組み合わせたトリガーの方が, MuonCB にてトリガー効率の低下がみられる。この原因については, 付録 A にて説明する。

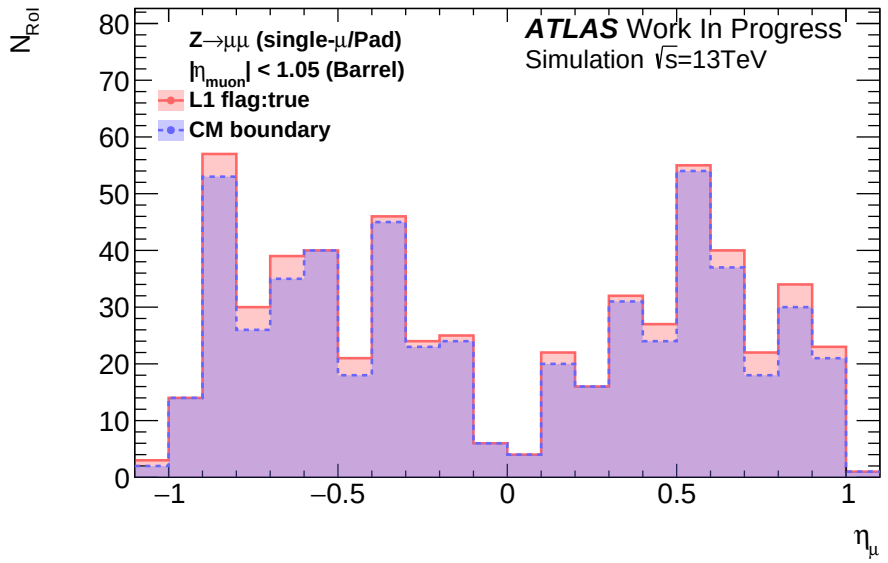


図 5.15: 単一ミューオン事象にて L1 近接 2 ミューオンフラグが立った事象の数 (赤) と, そのうち 2 つの η−CM, または ϕ−CM が RPC ヒットを持ってる事象の数 (青)。横軸はオフラインミューオンの η ごとに表している。

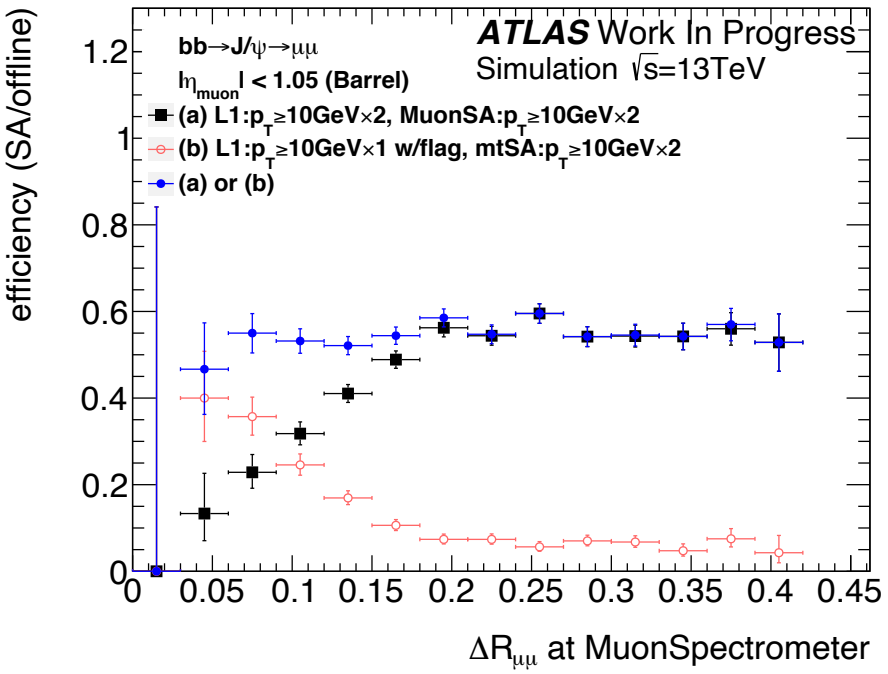
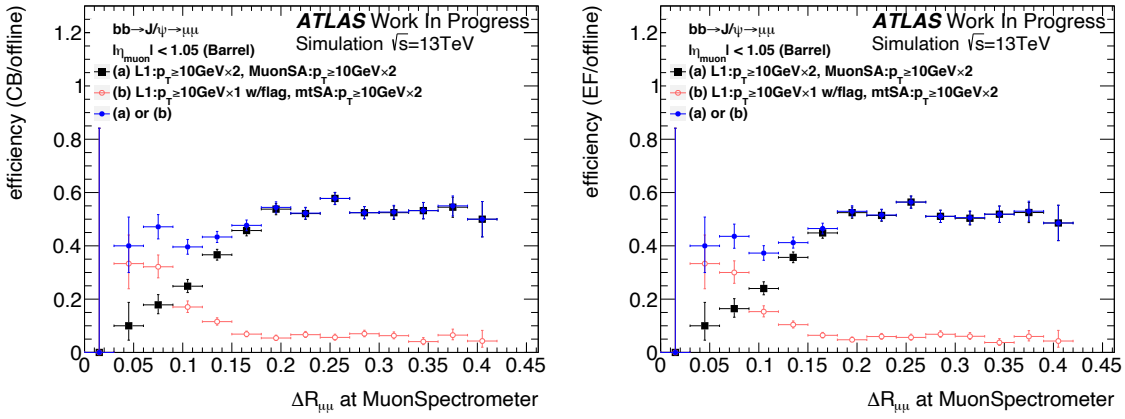


図 5.16: L1 近接 2 ミューオンフラグを用いた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のためのトリガーに, mtSA にて $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオンを要求した場合のトリガー効率 (赤) と, 既存の $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガーにおける MuonSA の効率 (黒)。2 つのトリガーの論理和を取った場合の効率を青色で示す。



(a) MuonCB のトリガー効率　　**(b)** EF のトリガー効率

図 5.17: L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を組み合わせた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガー (赤) のトリガー効率の $\Delta R_{\mu\mu}$ 依存性。比較のため, L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーの効率を黒色で示した。また, 全体的な 2 ミューオントリガーの効率 (青) を, 2 つのトリガーの論理和を取ることで評価した。図 5.17a が MuonCB まで, 図 5.17b が EF までのトリガー効率。

トリガー	L1	MuonSA or mtSA	MuonCB	EF
L1:$p_T \geq 10\,\mathrm{GeV} \times 1$ w/ flag, mtSA:$p_T \geq 10\,\mathrm{GeV} \times 2$ or L1:$p_T \geq 10\,\mathrm{GeV} \times 2$, MuonSA:$p_T \geq 10\,\mathrm{GeV} \times 2$	63.2%	54.0%	46.2%	44.3%
L1:$p_T \geq 10\,\mathrm{GeV} \times 2$, MuonSA:$p_T \geq 10\,\mathrm{GeV} \times 2$	47.3%	43.2%	39.2%	38.1%

表 5.4: $\Delta R_{\mu\mu} < 0.2$ のオフライン事象に対する, 各トリガーの取得率。L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を組み合わせた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガーと L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーの論理和を取った場合と, L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーのみの場合を測定した。

以上の評価には $J/\psi \to \mu\mu$ を用いて行ったが, J/ψ よりも更に不変質量が小さい粒子が 2 つのミューオンに崩壊する場合は 2 ミューオンがブーストされるため, $\Delta R_{\mu\mu}$ が小さい事象がより多くなる。そのため, そのような粒子の場合は更に 2 ミューオンを取得できる効率の向上が期待できる。

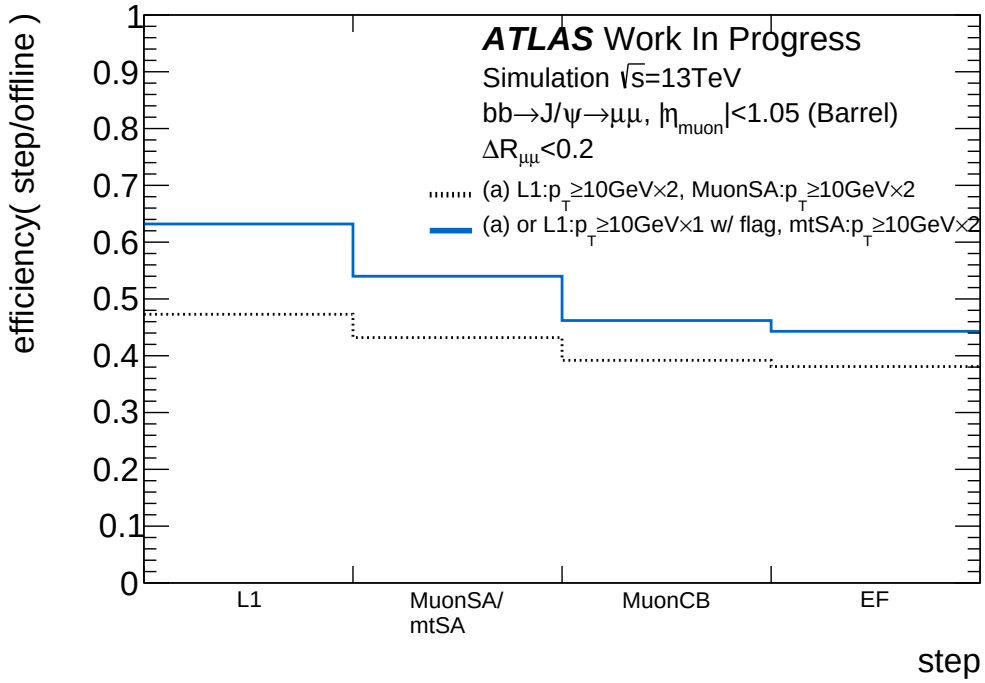


図 5.18: L1 近接 2 ミューオンフラグと mtSA を組み合わせた $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 2 ミューオントリガーと L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーの論理和を取った場合と, L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーのみの場合の各トリガーステップにおける効率。ミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ が 0.2 未満の事象のみを評価した。

第 6 章

結論

本研究では, ATLAS 検出器において, 2 ミューオンが近接している場合の 2 ミューオントリガーの非効率の改善を行った。

2 ミューオンが近接している場合, L1 で 2 つのミューオンが 1 つに見えてしまうことでトリガー取得効率が低下する問題があった。HLT の初段である MuonSA は, L1 で見つけたミューオンに対して飛跡が 1 本であることを仮定して再構成を行うアルゴリズムであるため, L1 で 1 つのミューオンしか見つけられなかった場合は, MuonSA でも 1 つの飛跡のみを再構成する。そのため, HLT でももう 1 つのミューオンを見つけることができなかった。

このような問題を解決するために, L1 で 1 つのミューオンしか見つけられない事象に対して, ミューオントリガー用のストリップ型検出器である Resistive Plate Chamber(RPC) のヒットパターンから, 複数の飛跡を再構成することができる新たな MuonSA アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムにより, L1 で 1 ミューオンのみが見つかる事象に対して 85% の割合で 2 ミューオンを見つける性能があることを示した。また, 1 ミューオン事象の際に誤って 2 ミューオン以上を再構成する確率は 3% と低く, 粒子数との対応がよいことが分かった。さらに, この新たなアルゴリズムで求めたミューオンの p_T の精度は従来の MuonSA と同程度であることが分かった。

また, 開発したアルゴリズムを近接 2 ミューオン事象用の新しいトリガーとして利用するために, トリガー頻度の制約からどのような L1 トリガーを組み合わせることが適切かを議論した。単に L1 の 1 ミューオントリガーにこのアルゴリズムを組み合わせるだけでは L1 のトリガー頻度が高いため, 他の条件を L1 トリガーに加えることで頻度を抑制する必要がある。そこで今後実装予定の, L1 で近接した 2 ミューオンの有無を見分けることができる信号を L1 トリガーの条件として加えることで, トリガーの頻度が許容範囲内に収まることを示した。

この信号を条件に加えた L1 トリガーに開発したアルゴリズムを組み合わせたトリガーによって, トリガーの頻度を充分に低く抑えつつ, 従来の 2 ミューオントリガーのみでは取得できなかった近接 2 ミューオン事象の取得効率を 25% 向上することに成功した。このトリガーを用いることによって, 今後開始されるデータ取得期間からは更に統計が増え, J/ψ よりも低い質量の粒子のミューオン対崩壊に対する感度がより向上する。

付録 A

Overlap remover の mtSA 用トリガー効率への影響

SA または CB の overlap remover を要求した場合と, しなかった場合について, 既存の 2 ミューオントリガーの効率と mtSA 用トリガーの効率を図 A.1 に示す。mtSA 用のトリガーでは, L1 にて $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ の 1 ミューオンと L1 近接 2 ミューオンフラグを要求し, mtSA にて 2 つの $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを要求する。各図にて青色で示した分布が overlap remover を要求しなかった場合の効率であり, 赤色で示した分布が要求した場合のトリガー効率である。4 つの図の上側に L1, HLT ともに $p_T \geq 10\,\mathrm{GeV}$ のミューオンを 2 つ要求するトリガーにおける MuonSA (左側), MuonCB(右側) のトリガー効率を, 4 つの図の下側に mtSA 用トリガーにおける mtSA (左側), MuonCB(右側) のトリガー効率を示す。

図 A.1 から, 既存の 2 ミューオントリガーに比べて mtSA 用のトリガーにて, MuonCB に overlap remover を要求した場合に最もトリガー効率が落ちていることがわかる。この主な原因は, mtSA ミューオンの飛跡と, 内部飛跡検出器 (ID) の飛跡とのマッチングを行う際, 複数の mtSA ミューオンが同じ ID の飛跡にマッチしてしまうことである。このとき, MuonCB にて再構成したミューオンの η, ϕ は内部飛跡検出器の飛跡の η, ϕ がそのまま用いられるため, 同じ ID の飛跡とマッチした場合は複数の MuonCB ミューオンが同じ η, ϕ の値を持つことになる。このため, CB overlap remover で落ちることが多くなる。mtSA を活用したトリガーにて, MuonCB overlap remover で落ちた事象の $\Delta R_{\mu\mu}$ 分布と, そのうち複数の mtSA ミューオンが同じ ID の飛跡にマッチしている事象の $\Delta R_{\mu\mu}$ 分布を重ねて図 A.2 に示す。ここから, MuonCB overlap remover で落ちる事象のほぼ全てが, 同じ ID の飛跡にマッチしていることが分かる。この原因について考察するため, mtSA 用トリガーにおいてどのような場合に mtSA の飛跡が同じ ID の飛跡にマッチするかを $\eta - \phi$ 平面のイベントディスプレイにて確認した。イベントディスプレイの例を図 A.3 に示す。図 A.3a が MuonCB でのマッチングに成功した例であり, 図 A.3b~A.3d が失敗した例である。

図 A.3b は, 2 つのオフラインミューオンに重なるように ID の飛跡が存在するにもかかわらず, 2 つの mtSA の飛跡が同じ ID の飛跡にマッチしている例である。これは, 緑色の mtSA の飛跡が 11.05 GeV のオフラインミューオンよりも 10.75 GeV のミューオンに近いことが原因である。2 つの mtSA ミューオンの p_T はオフラインミューオンの p_T に近い値を計算できていることから, mtSA において計算したミューオンの η, ϕ が精度よく計算できていないことがわかる。

図 A.3c は, 赤色の mtSA の飛跡が, 32.98 GeV のオフラインミューオン (図内上側) に対応する ID の飛跡に近いように見えるが, 実際には 10.52 GeV のオフラインミューオン (図内下側) に対応する ID の飛跡にマッチしている例である。このとき, 図内上側のオフラインミューオンに対応する ID ミューオンの p_T は 34.18 GeV であった。赤色の mtSA ミューオンの p_T は 13.04 GeV であるため, 図内下側のオフラインミューオンの p_T に近い。従って, mtSA の p_T がうまく計算できていないことが原因である。

図 A.3d は, 赤色の mtSA の飛跡が 27.15 GeV のオフラインミューオン (図内下側) に近く, p_T も近い値を計算で

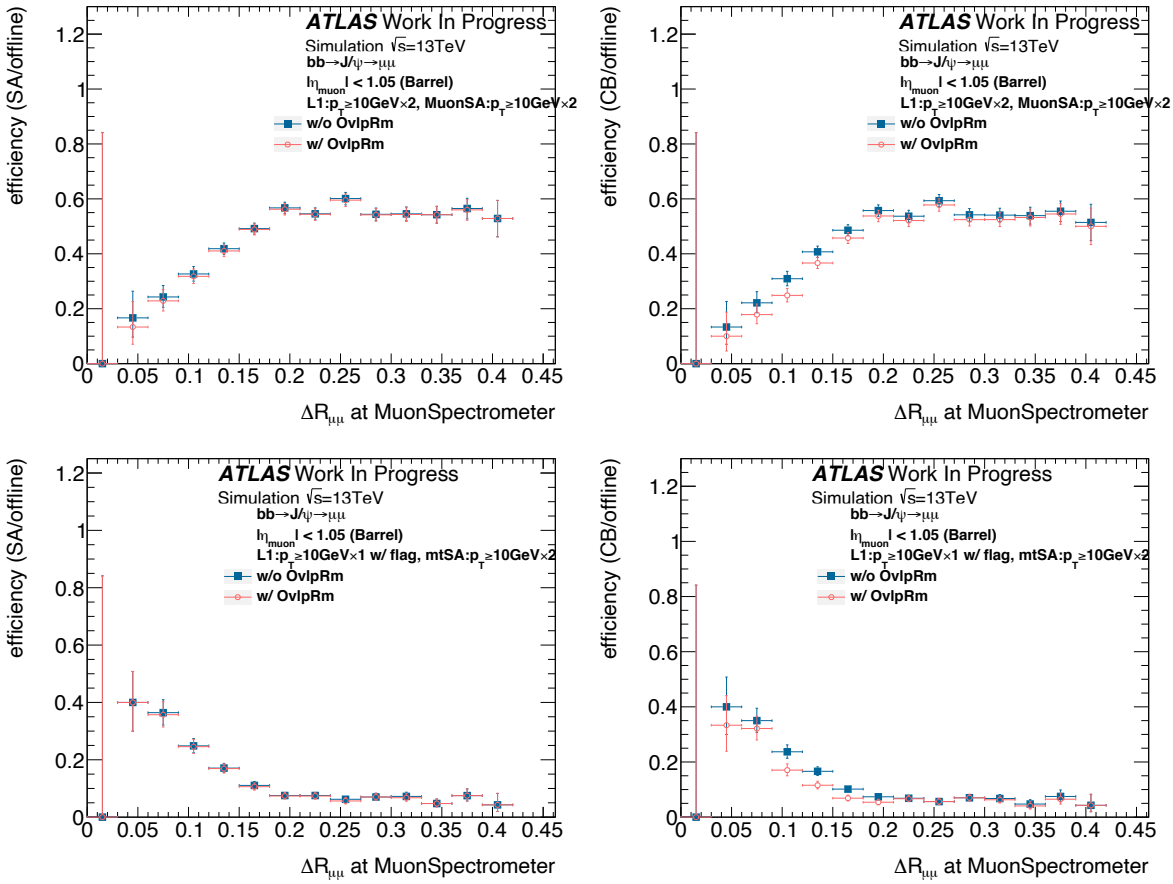


図 A.1: 既存の 2 ミューオントリガーと mtSA 用の 2 ミューオントリガーにおいて, MuonSA(mtSA) と MuonCB の overlap remoover を要求しなかった場合のトリガー効率 (青) と要求した場合の効率 (赤)。既存の 2 ミューオントリガーを図上側, mtSA 用の 2 ミューオントリガーを図下側, 図左側が MuonSA または mtSA ステップ, 図右側が MuonCB ステップにおけるトリガー効率。

きているが, そのオフラインミューオンに対応する ID の飛跡がないため, 18.59 GeV のオフラインミューオン (図内上側) に対応する ID の飛跡にマッチした例である。

以上から, mtSA 用トリガーの MuonCB overlap remover において, トリガー非効率の原因は同じ ID の飛跡にマッチすることであり, そのようになる場合は主に mtSA ミューオンの p_T, η, ϕ が精度がよく計算できていないときである。mtSA 用トリガーでは MuonCB overlap remover を要求しないことでこのトリガー非効率は回避できるが, その場合, 単一ミューオン事象に対して mtSA で誤って 2 つ以上のミューオンを再構成した場合に, MuonCB を通過してしまう恐れがある。そのような事象をどれだけ MuonCB overlap remover で落としているかを評価し, mtSA 用のトリガーにおける MuonCB overlap remover の必要性を確認した。単一ミューオン事象にも関わらず mtSA にて 2 つのミューオンを再構成し, かつ通過した事象のうち, MuonCB を通過した事象の数を表 A.1 に示す。表中央に示す値が MuonCB の overlap remover を要求しなかった場合, 表右側の値が overlap remover を要求した場合に MuonCB を通過した事象の数である。

この表から, MuonCB の overlap remover を要求した場合, mtSA にて誤って 2 つのミューオンを再構成し, かつ通過した事象を全て落とすことができていることが分かる。

以上のことをまとめると, mtSA 用のトリガーでは MuonCB の overlap remover で大きくトリガー効率が低下していることがわかり, その原因は主に mtSA において再構成したミューオンの p_T, η, ϕ が精度よく計算できていな

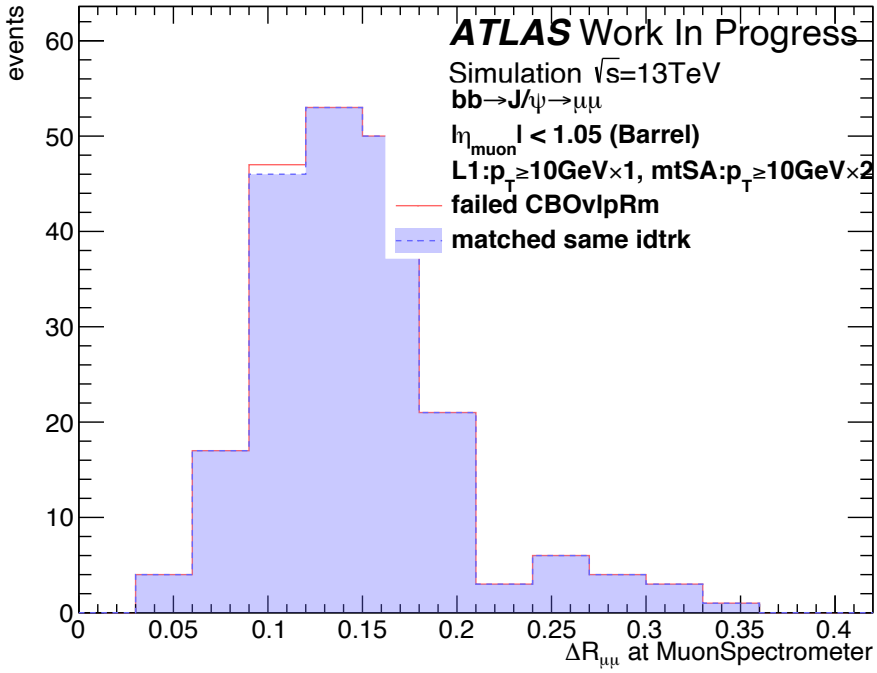
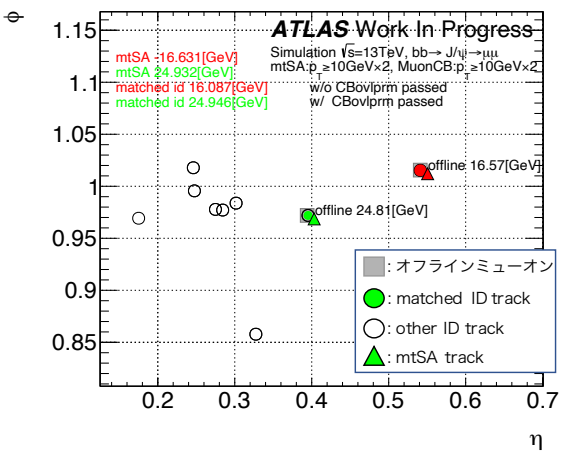


図 A.2: mtSA 用トリガーの MuonCB overlap remover で落ちている事象の数 (赤) と, そのうち同じ内部飛跡検出器の飛跡にマッチしている事象の数 (青) の分布。

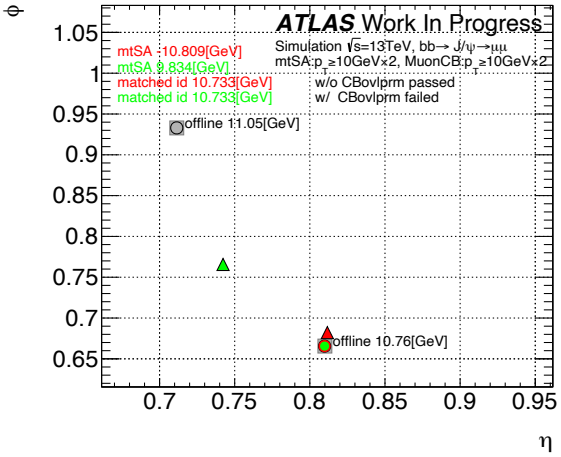
オフラインミューオンの数	overlap remover を要求しなかった場合に MuonCB を通過した事象数	overlap remover を要求した場合に の MuonCB を通過した事象数
23558	348	0

表 A.1: 1 ミューオン事象に対する mtSA 用の 2 ミューオントリガーにて, overlap remover を要求しなかった場合に MuonCB を通過した事象の数と, 要求した場合の MuonCB を通過した事象数。

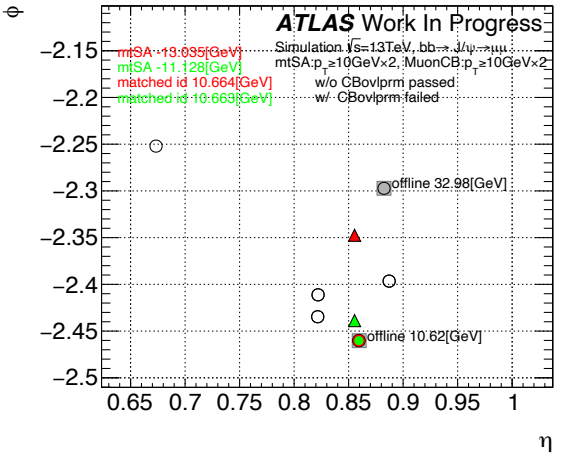
いことにより, 同じ ID の飛跡にマッチすることであった。ただし, 単一ミューオン事象に対して mtSA で誤って 2 つの飛跡を再構成した事象を MuonCB overlap remver で全て落とすことができるため, mtSA 用のトリガーにて MuonCB overlap remover は必要である。



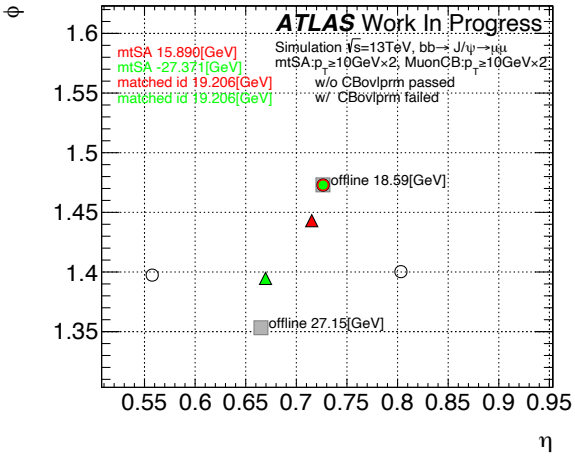
(a) マッチングに成功した例



(b) マッチングに失敗した例 (mtSA ミューオンの η, ϕ の精度)



(c) マッチングに失敗した例 (mtSA ミューオンの p_T の精度)



(d) マッチングに失敗した例 (ID ミューオンが無い)

図 A.3: MuonCB のマッチングの際の $\eta - \phi$ 平面でのイベントディスプレイ。オフラインミューオンを灰色の四角形 (■), 内部飛跡検出器まで外挿した mtSA ミューオンを色付きの三角形 (▲), mtSA ミューオンにマッチした ID の飛跡を色付きの丸 (●) で表している。マッチした mtSA と ID のペアを同じ色で表し, 図の左上に mtSA, ID ミューオンの p_T を示した。マッチしなかった ID の飛跡は穴抜きの丸 (◯) で示す。

付録 B

NSW のための MuonSA アルゴリズムの動作検証

Run3 から, エンドキャップ部のインナーステーションに配置されていた TGC, MDT, CSC に代わり, 第 2.2.4 節にて説明した NSW 検出器が新たに $1.3 < |\eta| < 2.42$ の領域に配置される。

これに伴い, MuonSA でも NSW の検出器ヒットを考慮した飛跡再構成ができるように, アルゴリズムの更新が行われている。従来のエンドキャップ部 MuonSA における飛跡再構成アルゴリズムは,

1. TGC ヒットを用いてインナー・ミドル・アウターステーションそれぞれにロードを定義。
2. ロード内の MDT(CSC) を用いて, 各ステーションに superpoint を作成する。
3. superpoint からミューオンの p_T と相関のあるパラメータを計算し, p_T を求める。

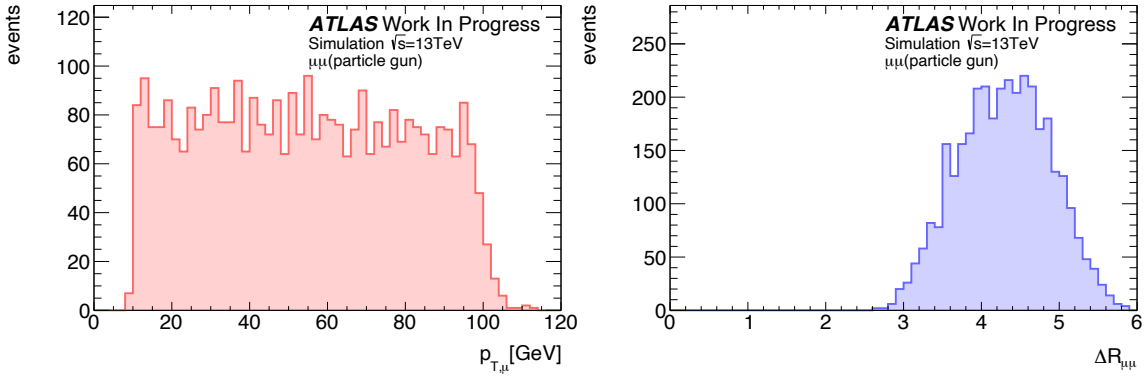
のような流れで行われているが, エンドキャップインナーステーションの MDT, CSC が NSW に置き換わることにより, エンドキャップインナーの superpoint を NSW から作成して，バックグランド識別能力を高める予定である。そのためのアルゴリズムとして, 2021 年 1 月の時点では

1. RoI 周辺の Micromegas, sTGC 検出器ヒットを取得。
2. エンドキャップインナーのロード内にある sTGC, Micromegas ヒットを選ぶ。ロードの範囲は後述する。
3. sTGC ヒットの座標の重心をとり, superpoint とする (Micromegas ヒットは用いない)。

という簡易的な superpoint 作成アルゴリズムが実装されている。今後 Run3 に向けて, 背景事象による検出器ヒットを考慮した, より精密な superpoint 作成アルゴリズム [17] に更新される予定である。Run3 において NSW を用いた MuonSA アルゴリズムが意図した動作を行うことを保証するために, 現段階でその動作を逐次確認し, 不具合が見られた場合にはその原因の特定・対処を行う必要がある (バリデーション)。そこで, MuonSA アルゴリズムの確認・評価を行うためのツールを開発した。以下で, このツールを用いて, 現在実装されている簡易的なアルゴリズムを確認した結果を示す。

アルゴリズム確認用サンプルには, 各イベントごとに 2 つのミューオンをそれぞれ A-side, C-side のエンドキャップ部に打ち込むシミュレーションサンプルを用いる。本サンプルの基本的なパラメータを図 B.1 に示す。NSW は, その開発状況によって, A-side のみ (Asymmetry), または A-side と C-side の両方 (Symmetry) に導入されるかが現在検討されている。本サンプルは, NSW が A-side のみに配置された場合のジオメトリを設定している。$z - r$ 平面での sTGC ヒット, Micromegas ヒットの分布をそれぞれ図 B.2, B.3 に示す。

このサンプルを用いて, 現在実装されている簡易的なアルゴリズムを確認する。初めに, sTGC, Micromegas の選別に用いる, エンドキャップインナーのロードの範囲が適切かどうかを見る。簡易的なアルゴリズムにて定義されているロードの範囲を, 表 B.1 に示す。sTGC はストリップ, ワイヤー, パッドの三種類があり, それぞれ r 方向, ϕ 方



(a) ミューオンの p_T 分布　　**(b)** ミューオン間の $\Delta R_{\mu\mu}$ 分布

図 B.1: NSW のための MuonSA アルゴリズムの確認に用いるサンプル。2 ミューオンをそれぞれエンドキャップの A-side, C-side に打ち込む。

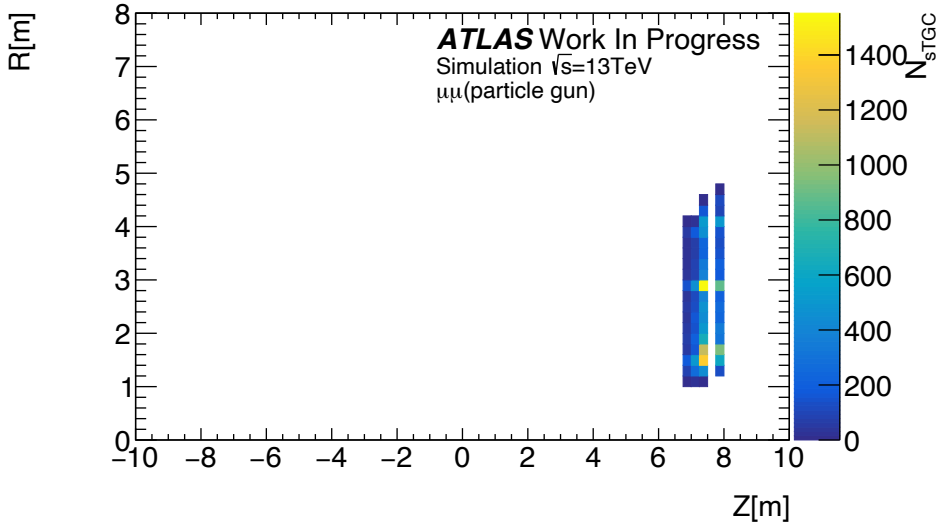


図 B.2: $z-r$ 平面における, sTGC のヒット分布

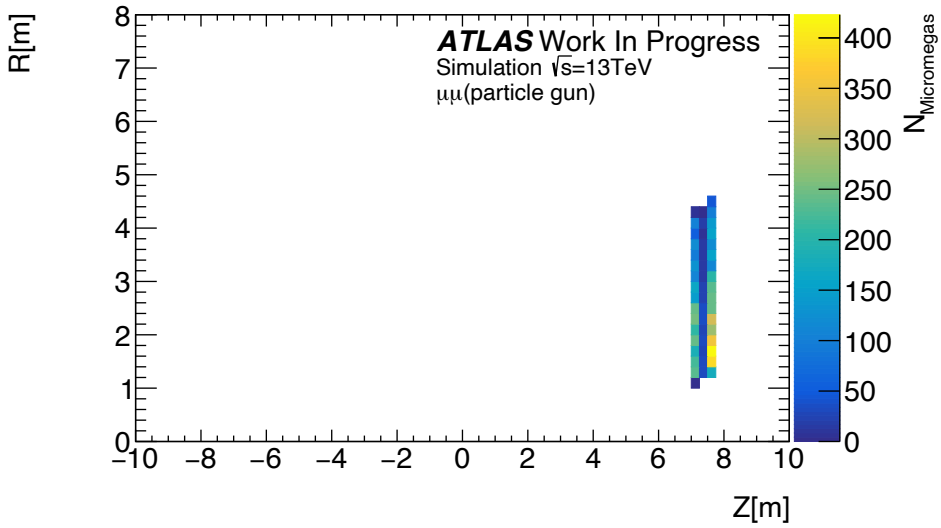
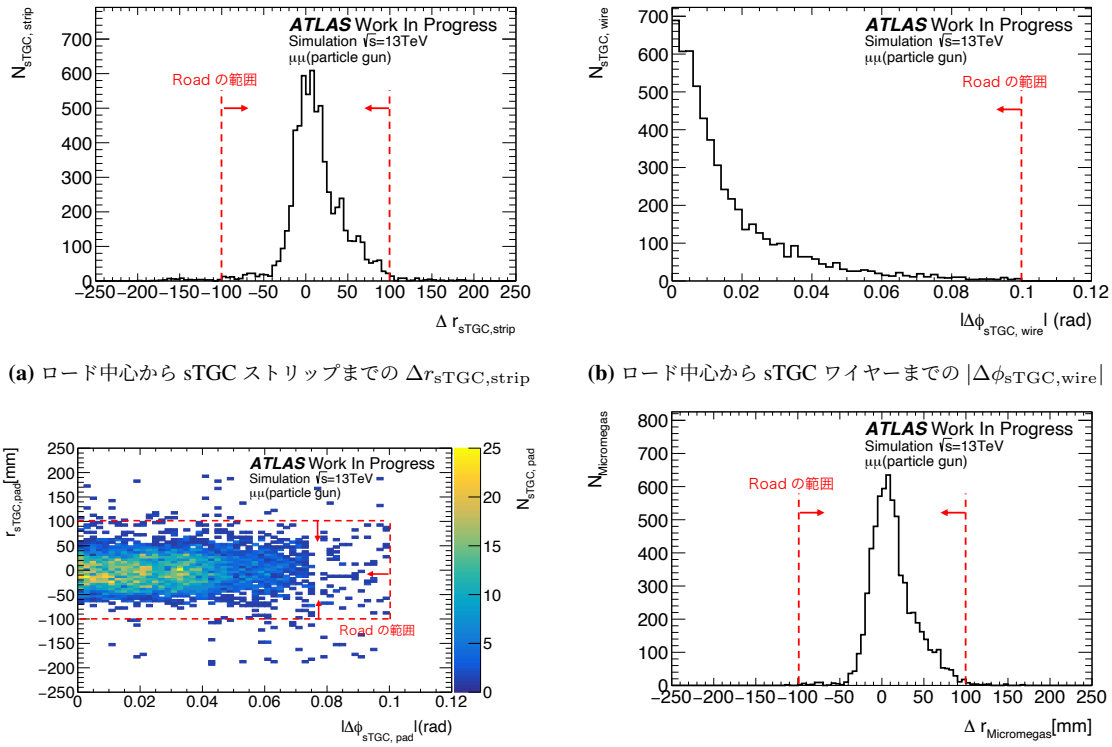


図 B.3: $z-r$ 平面における, Micromegas のヒット分布

検出器	ロードの範囲
sTGC (strip)	$\lvert\Delta r\rvert \leq 100\,\mathrm{mm}$
sTGC (wire)	$\lvert\Delta\phi\rvert \leq 0.1\mathrm{rad}$
sTGC (pad)	$\lvert\Delta r\rvert \leq 100\,\mathrm{mm}, \lvert\Delta\phi\rvert \leq 0.1\mathrm{rad}$
Micromegas	$\lvert\Delta r\rvert \leq 100\,\mathrm{mm}$

表 B.1: 各検出器に対するロードの範囲。ロード中心からの最短距離で表している。

向, r と ϕ 方向にロード中心からの最短距離を求め, ロードの範囲内かどうかを見ることにより選別している。また, Micromegas は r 方向の距離を求めて選別している。ロードの範囲の妥当性を見るために, これらと同じ方向にロード中心から各検出器までの最短距離の分布を図 B.4 に示す。例として, sTGC のストリップヒットの場合であれば $\Delta r_{\mathrm{stgc,strip}} = r_{\mathrm{road}} - r_{\mathrm{stgc,strip}}$ として計算する。これらの結果から, 検出器ヒットの大半は現在用いているロードの範囲内に収まっており, ロードを用いた選別によって検出器ヒットの取りこぼしが少ないことがわかる。



(a) ロード中心から sTGC ストリップまでの $\Delta r_{\mathrm{sTGC,strip}}$

(b) ロード中心から sTGC ワイヤーまでの $\lvert\Delta\phi_{\mathrm{sTGC,wire}}\rvert$

(c) ロード中心から sTGC パッドまでの $\Delta r_{\mathrm{sTGC,pad}}$ と $\lvert\Delta\phi_{\mathrm{sTGC,pad}}\rvert$

(d) ロード中心から Micromegas までの $\Delta r_{\mathrm{Micromegas}}$

図 B.4: ロード中心から NSW の各検出器までの最短距離。それぞれ, ロードの範囲を赤破線で示す。

次に, sTGC ヒットの重心を取ることにより作成した, エンドキャップ部インナーステーションの superpoint を見る。そのために, インナーステーションにおけるオフラインミューオンの飛跡と, インナーの superpoint のなす角 $\Delta\theta$ を $\Delta\theta = \theta_{\mathrm{offline}} - \theta_{\mathrm{innSP}}$ で定義する。ここで, $\theta_{\mathrm{offline}}$ は, オフラインミューオンの飛跡と z 軸とのなす角であり, θ_{innSA} はインナーの superpoint の z 軸となす角である。その結果を図 B.5 に示す。この図から, $\lvert\Delta\theta\rvert \leq 0.01$ にほとんどの分布が収まっていることが確認できる。

以上のように, 今後実装される予定の精密な superpoint 再構成アルゴリズムについて, 今回開発したツールを用い

てバリデーションを行うことができる。

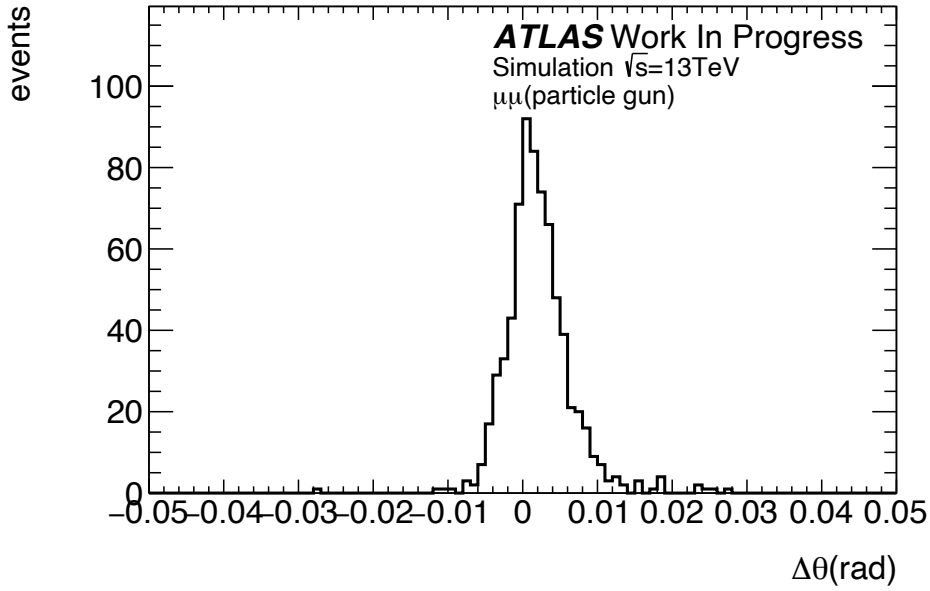


図 B.5: インナーステーションにおけるオフラインミューオンの飛跡と, インナーの superpoint がなす角の分布。

付録 C

Run3 に向けた MuonSA の整備

第 2 章にて述べたように, LHC では, 2022 年から 2024 年まで Run3 と呼ばれるデータ取得期間が開始される。その後, シャットダウン期間に入った後, 2027 年以降に HL-LHC が始まる予定である。Run3 における陽子バンチ交差あたりの平均衝突回数が 50~60 であるのに対し, HL-LHC では 150~200 程度になると見積もられている。それに対応して, ATLAS 実験におけるソフトウェアトリガーのために CPU 資源とメモリを $O(10)$ 倍に増強する必要がある [18]。しかしこれには膨大な費用がかかるため, 大きな課題となっている。

そのため, 今後の HL-LHC に向けて, ATLAS 実験ではマルチスレッド技術をソフトウェアトリガーに導入することにより, メモリ使用量の削減に取り組んでいる。従来のソフトウェアトリガーでは事象ごとに独立にメモリを確保していたが, 複数の事象でメモリを共有する。このことにより, 50% 以上のメモリ使用量削減が期待されている [19]。

MuonSA も, マルチスレッドの環境で安全に動作を行う (thread-safe) ために, プログラムの整備が求められた。具体的には, MuonSA の処理が完了する前に, 再度 MuonSA のプログラムが実行されたとしても安全である (re-entrant) ようにする。re-entrant なコードとして求められるのは,

- 静的変数やグローバル変数を保持しない。
- 自身のコードを書き換えない。
- re-entrant ではないプログラムやサブルーチンを呼び出さない。

である。そこで, MuonSA の re-entrant 化を担当し, 上記の要請を満たすように MuonSA 内のプログラムを 1036 行変更した。

参考文献

[1] https://pdg.lbl.gov/2020/tables/rpp2020-tab-mesons-bottom-strange.pdf, P.A. Zylaet al.(Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys.2020, 083C01 (2020), pp.6

[2] CMS Collaboration, "A search for pair production of new light bosons decaying into muons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13\mathrm{TeV}$",Physics Letters B, Volume 791, 2019, pp.1

[3] The ATLAS Collaboration "Search for Higgs boson decays to beyond-the-Standard-Model light bosons in four-lepton events with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 13\mathrm{TeV}$", JHEP 06 (2018) 166, pp.24

[4] ATLAS Collaboration.High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): TechnicalDesign Report V. 0.1. CERN Yellow Reports: Monographs. CERN, Geneva, 2017.

[5] ATLAS Collabolation, "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider", JINST 3 S08003, pp.4-13, 53-59, 110-117, 164-173, 178-184

[6] https://cds.cern.ch/record/1505342

[7] ATLAS Collaboretion, "ATLAS Insertable B-Layer Technical Design Report", CERN-LHCC-2010-013 ; ATLAS-TDR-19, pp.18

[8] Joerg Wotschack (CERN), "ATLAS Muon Chamber Construction Parameters for CSC, MDT,and RPC chambers", ATL-MUON-PUB-2008-006, pp.1-2

[9] ATLAS collaboration, "Muon spectrometer technical design report", CERN-LHCC-97-022

[10] M. Bianco, on behalf of the ATLAS Muon Collaboration, "Micromegas detectors forthe muon spectrometer upgrade of the ATLAS experiment", Nuclear Instrumentsand Methods in Physics Research A 824 (2016) 496-500, pp.4

[11] ATLAS Collaboration, "ATLAS New Small Wheel Technical Design Report", Tech. Rep.CERN-LHCC-2013-006. ATLAS-TDR-020, CERN, Geneva, Jun, 2013, pp.37, 46

[12] The ATLAS Collabolation, "The Level-1 Trigger Barrel System of the ATLAS Experiment at CERN", JINST 4 (2009) P04010, pp.5

[13] The ATLAS collaboration, "Performance of the ATLAS muon triggers in Run 2", G. Aad et al 2020 JINST15 P09015, pp.28-32

[14] Arantxa Ruiz Martínez on behalf of the ATLAS Collaboration, "The ATLAS Run-2 Trigger Menu for Higher Luminosities: Design,Performance and Operational Aspects", EPJ Web of Conferences 182, 02083 (2018), pp.4

[15] Di Mattia, "Online Muon Reconstruction in the ATLAS Level-2 trigger system", ATL-DAQ-CONF-2005-013(2004)

[16] 山下 和輝,「LHC-ATLAS 実験における近接 2 ミューオントリガーアルゴリズムの改良」, 神戸大学修士論文, pp.46-51

[17] 熊岡 卓哉,「LHC-ATLAS 実験 Run-3 における NSW 検出器を用いた後段ミューオントリガーの開発および

性能評価」, 信州大学修士論文, pp.18-50

[18] 脇田 萌,「LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けたマルチスレッド対応ミューオントリガーの性能評価」, 日本物理学会 2020 年次大会 18pG21-1, pp.4-5

[19] "Multi-threaded software framework development for the ATLAS experiment", G A Stewart et al 2016 J. Phys.: Conf. Ser.762 012024, pp.4

謝辞

本論文の執筆に当たり, 多くの方々にご支援いただきました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

指導教員である山崎祐司先生には, ATLAS 実験についてはもちろん, 様々な点でお世話になりました。修士 1 年の初めに HLT-J グループに受け入れて頂いて以来, 研究・開発の方針や方法について多くのご指導をいただきました。研究で行き詰まることがあるたびにアドバイスを求めてお尋ねしましたが, いかなる状況でも丁寧に対応してくださり, 一歩一歩着実に研究を進めることができました。時には私の研究や資料の作成が思うように進まず, 休日にも関わらず添削や相談のために連絡をすることもありましたが, そのようなときでも私のために貴重な時間を割いて対応してくださりました。学会発表や本論文でも, 私の曖昧な論理を展開しがちで話の流れがわからない文章を細部まで修正・コメントいただきました。また研究以外でも, 山崎先生との普段の会話では豊富な知識と経験を感じることができ, 大変興味深いものでした。大変手のかかる学生だったと思いますが, 最後までご指導いただけたことを心の底から感謝いたします。

神戸大学 ATLAS グループの藏重久弥先生, 越智敦彦先生, 前田順平先生には, 毎週のミーティングの際に, 私の拙い発表にも関わらず多角的なアドバイスを多くいただいたことを感謝いたします。特に前田先生には, 主に HLT に関する研究を行っていた私が L1 について取り組む場面で, ためになる方針やアドバイスを沢山いただきました。また, 普段も学生部屋に来られ, ATLAS 実験の俯瞰的な現状から自宅のマンションの間取りまで, その都度幅広く興味深いお話を聞くことができ, 大変楽しく研究室での生活を送ることができました。

HLT-J グループの皆様にも大変お世話になりました。特に東工大の山口洋平先生には, ATLAS 独自のフレームワークを研究で利用するためのノウハウなど, わからない点があった際に多くの質問をさせてただきました。また, HLT-J ミーティングでは私の拙い発表にも関わらず的確なご指摘・アドバイスをいただき, 研究を前に進めることができました。1 対 1 での研究の相談の時間までも設けてくださり, 今後の研究の方針についてや TrigL2MuonSA パッケージ関連の作業についてなど多くの議論ができたおかげで, そこから方針を明確にすることができたり, 様々なことを学ぶことができました。加えて, login.icepp 上の山口先生のディレクトリ内のコードからも多くを学びました。勝手にディレクトリ内を覗いていたことをここに謝罪します。同じく東工大の福原雄飛さんには, 私が HLT-J グループに所属した初めの頃, 全くどこから手をつけてよいのか分からないときに CalcEffTool の使い方や EventDisplay の作り方を教えていただいたおかげで, 研究のスタートを順調に切ることができました。ここで言うことではないですが, 他の点でも login.icepp の福原さんのディレクトリに侵入してコードの書き方を参考にしようと企んでいましたが, パーミッションの設定が厳しく, 侵入できずに悔しい思いをしました。名古屋大の林田翔太さんにも研究について多くの助言をいただきました。学会発表のスライドでも伝え方のアドバイスを頂き, 大変参考になりました。また, CERN へ出張した際は生活面, 研究面共に分からない点を教えてくださったり, 食事などの際に車を出してくださったおかげで CERN での生活が充実したものになりました。ただ 1 つ, 謝らないといけないことがあります。一度林田さんが大阪に来られ, 神戸大の ATLAS グループと飲みに行った際, 終電を逃した私に泊まれるホテルを提示してくださったのにも関わらず, ちゃんとしたお礼ができていないように思います。申し訳ありません, ありがとうございました。また飲みに行けたら幸いです。

神戸 ATLAS グループの先輩である竹田康亮さん, 日比宏明さんには, 研究についての相談や普段の研究生活にて

大変お世話になりました。CERN の竹田さんの部屋で毎週行われた飲み会では毎回手のひらサイズの地獄を見ましたが, それでもまたやりたいと思ってしまう自分がいます。休日にはブルゴーニュを案内してくださったり, 一緒に食事をしたりと, 本当に笑いが絶えず, 楽しい日々でした。日比さんとは, 研究でわからないことや日頃の悩みを聞いていただいたり, 神戸牛をごちそうしてくださったり, マーダーミステリーをやってみたり, 夜ふかしが嫌すぎて帰ろうとする私を無理やり連行したり, 沢山の思い出がありここには書ききれないですが, その全てが楽しく, 貴重な日々でした。日比さんがいたからこそ, 研究生活が楽しかったと胸を張って言えます。本当にありがとうございました。関東でみんなと待っています。

研究室の遥か先輩である石飛由介さん, 杉本太郎さん, 宮辺裕樹さんには, 私が研究室配属に悩んでいた学部 3 年生の頃から「粒子物理研究室とはいかなる場所か」ということを教えていただきました。研究室に入ってからは, 歴史を刻めや行きつけのバーに連れて行ってくださったり, 修士課程からどの実験グループに入るかという相談に乗っていただいたりと, とても頼りになる先輩方でした。今, 当時の先輩方と同じ立場になりましたが, 人格的, キャラの濃さ的に先輩方に全く追いついていない気がしています。

研究室の HLT-J 直属の先輩である山下和輝さんには, 研究について様々なことを教わりました。私が右も左も分からないときに手助けをしてくださったり, 解析手法や ATLAS の専門用語など分からないことをどんなときでも解説してくださいました。また, youtube でのあのコアなチャンネルについて面白いと共感し合えたのは山下さんだけです。研究でも日常でも, ありがとうございました。

そして何より, 神戸大学 ATLAS グループの同期のおかげで学生生活を楽しく過ごせたことに深く感謝します。特に M1 研究経過報告や学会発表の直前や就活など, 共に戦っている感じがして楽しかったです。塩見崇宏くん, 辛そうな状況になっても決して表には出さず, どんなときでも話しかけやすい様子は, 私にはまだまだ足りない姿勢だなと思っています。たまに謎の行動力を発揮する一面にはいつも笑わせてもらいました。同じ実験に参加し, 研究について教えあったり, 時には塩見くんの背中を見て私も最後まで研究を頑張ることができました。本当にありがとうございました。角源一郎くん, 学部 4 年の実験からお世話になりました。角くんの「まあいいや, とりあえずこうやってみよう」という姿勢は, 焦るとテンパって訳がわからなくなる私に欠けていることで, いつも魅力的でした。同じ ATLAS 実験で HLT ミーティングに出ている角くんは, HLT-J グループ全体で同期がいなくて不安だった私にとって, とても心強い存在でした。社会にでたら, ひょっとしたら会うかもしれませんね。その時を楽しみにしています。末田皓介くん, 修士になって間もない頃の春の学校でアレしたアレを僕はまだ正しい用途で使っています。いつの間にか学年を追い抜いて先に卒業することになりましたが, 社会に出てもソレを見るたびにコレを思い出す気がします。「真面目すぎる」と私に言ってくれていましたが, アレのようなクレイジーなことはハチャメチャに楽しかったです。これからは, もうちょっと末田くんを見習って自分に素直になれたらいいなぁと思います。

神戸 ATLAS グループの後輩である池森隆太郎くん, 安部草太くん, 寺村七都くん, 野口健太くんは真摯に研究に取り組み, こちらからの無駄な雑談でも笑いながら接してくれました。本当にありがとうございました。池森くん, またギターボーカル教えて下さい。安部くん, ヴァイオレット・エヴァーガーデンを一緒に見に行けて本当に良かったです。寺村くん, 酔った時のポテンシャルはとんでもないです。HLT-J の後輩でもある野口健太くんは, 疑問に思ったことを明確にしようとし, そのためにどうすればいいかをちゃんと考えられる頼もしい後輩です。詳細までしっかり追わず, ざっくりとした理解で先々進もうとする私にとって, その姿は見習わないといけないなと思っていました。その姿勢から, いろんなことを学ばせてもらいました。ありがとうございました。ただ, 飲みに行ったときに私の考え方をすぐに見抜かれたのは今でも恐ろしく思います。ですが, また飲みに行きましょう。

最後に, 私に教育を受ける機会を与えてくれた家族に感謝します。私の CERN での研究に携わるという夢は, ひとえに家族の理解と協力があったからこそ叶えられたものでした。今まで散々迷惑をかけましたが, これからはすこしは恩返しができると思います。これからも, 何かとよろしくお願いします。