

---

---

修士論文

LHC-ATLAS 実験における  
ハイレベルミュオントリガーの改良

---

---

東京工業大学 理学院 物理学系 物理学コース

福原 雄飛

指導教員 久世正弘 教授

2020年2月7日

## 概要

Large Hadron Collider(LHC) はスイスの欧州原子核機構にある大型陽子陽子衝突加速器である。衝突点の1つに ATLAS 検出器がある。ATLAS 検出器は、素粒子物理学における標準理論を超える物理現象の発見や標準理論で予言されている物理現象の精密測定を期待されている。2015年から2018年まで行われた Run2 の運転では重心系エネルギー 13TeV で陽子陽子衝突が行われ、 $139\text{fb}^{-1}$  の統計量を得た。2021年からの Run3、2026年からはルミノシティが格段に増加する高輝度 LHC が始まる予定である。

LHC では、25 nsec に1回という高頻度で陽子ビームのバンチ交差が起こるため、処理速度や記憶容量の制限から、興味のある事象のみに絞ってデータを記録するようシステム(トリガーシステム)を用いている。ATLAS 実験のトリガーシステムの多くは、ニュートリノ、電子、ミュオン、タウを終状態に含む事象を記録することを目的としている。特に、ミュオンを終状態に含む重要な物理過程として、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  が挙げられる。この物理過程では、終状態の二つのミュオンは近接することが多い。近接した二つのミュオンを、一つのミュオンとして誤って検出することなく、二つのミュオンとして個々の飛跡を正確に測定することが、この物理過程の測定には必要である。しかし、現行のハイレベルミュオントリガーでは、複数の近接したミュオンを終状態に含むような物理現象をトリガーすることが難しい。ハイレベルミュオントリガーの初段階では、トリガー効率を高く保つために、広い領域でミュオン検出器のヒット情報を集め、トリガーミュオンを再構成している。二つのミュオンがミュオン検出器で近接していると、再構成したトリガーミュオンが同一になってしまうことがある。その結果、二つの異なるトリガーミュオンを要求するようなトリガーでは、それらの事象は除去されてしまう。このように、近接した二つのミュオンを再構成することが難しいため、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  等の複数の近接したミュオンを終状態に含むような物理現象をトリガーすることができていない。そこで、本研究では、その問題を解決するために、従来のハイレベルミュオントリガーを改良した。内部飛跡検出器の情報をミュオン検出器の情報と組み合わせることにより、近接した二つのミュオンの分離を試み、Fast Tracker を用いた新しいハイレベルミュオントリガーと、Fast Track Finder を用いた新しいハイレベルミュオントリガーを開発した。それらの性能を評価することで、開発したどちらのトリガーも近接した複数のミュオンに対して、個々にトリガーミュオンを再構成する割合が従来のトリガーに比べて、飛躍的に向上することを確認した。

## Abstract

The Large Hadron Collider (LHC) is a large proton-proton collider at the European Organization of Nuclear Research in Switzerland. The ATLAS detector at one of the collision points is expected to discover the physics beyond the Standard Model and perform precise measurements of the physics predicted by the Standard Model as well.

In Run 2 operation from 2015 to 2018, the proton-proton collisions were performed at 13TeV the total collision energy, and data of  $139 \text{ fb}^{-1}$  were obtained by the ATLAS detector. The next operation called Run 3 is scheduled to begin in 2021, and HC-LHC, which is an upgrade plan where the luminosity increases dramatically, is scheduled to begin from 2026.

The proton beam bunches cross every 25ns. The LHC uses a trigger system to record only the events of interest because of the processing speed and storage capacity limitations. Most of triggers are designed to record events involving neutrino, electron, muon, and tau in their final states. In particular,  $B_s \rightarrow \mu\mu$  is one of important physical processes that includes muons in its final state. In this physical process, the two final state muons are often close to each other. It is necessary for the measurement of the physical process to accurately measure two muons without erroneously reconstructing two adjacent muons as one. However, with the current high level muon trigger, it is difficult to trigger physics process that includes collimated muons in the final state. In the initial stage of the high level muon trigger, the hit information of the muon detector is collected over a wide area to reconstruct the muon in order to achieve the trigger efficiency high. When two muons are close together at the muon detector, the reconstructed muon can be identical. As a result, a trigger that requires two different muons eliminates those events. Thus, as it is difficult to reconstruct two adjacent muons at the trigger, it is not easy to trigger a physics process that includes a pair of collimated muons in the final state, such as  $B_s \rightarrow \mu\mu$ . In order to solve this problem, we improved the current high level muon trigger. Combining inner track detector information with muon detector information together, new high level triggers with Fast Tracker and with Fast Track Finder were developed to aim to separate those muons from each one. In conclusion, we estimated that those triggers have better separation-ratio for the two muons than the current trigger.

# 目次

概要	1
1 序論	5
1.1 標準理論	5
1.2 LHC-ATLAS 実験が目標とする物理	5
2 LHC-ATLAS 実験	8
2.1 LHC	8
2.2 ATLAS 検出器	8
2.3 磁石	9
2.4 内部飛跡検出器	9
2.5 カロリメータ	11
2.6 ミューオン検出器	12
3 トリガーシステム	18
3.1 Level 1 ミューオントリガー (L1)	19
3.2 Stand Alone ミューオントリガー (L2MuonSA)	20
3.3 Combined ミューオントリガー (L2muComb)	27
3.4 Event Filter (EF)	28
3.5 Fast Track Finder (FTF)	29
3.6 Fast Tracker (FTK)	30
4 近接した複数ミューオンに対するハイレベルミューオントリガーの性能改良	33
4.1 FTK を用いたハイレベルミューオントリガー	33
4.2 FTK を用いたハイレベルミューオントリガーの評価	36
4.3 FTF を用いたハイレベルミューオントリガー	47
4.4 FTF を用いたハイレベルミューオントリガーの評価	49
5 結論と今後の展望	53
謝辞	57

# 1 序論

## 1.1 標準理論

素粒子物理学において、標準理論により素粒子の存在とそれらの相互作用が説明され、予言されているすべての素粒子は実験により発見されている。

表 1 と表 2 はそれぞれ標準理論における素粒子の内のフェルミオンとボソンである。フェルミオンにおいて、強い相互作用をするものはクォーク、しないものはレプトンと分類される。一方、ボソンはスピンの 1 であるゲージボソンとスピンが 0 であるスカラーボソンに分類される。

	世代			電荷	スピン
	1	2	3		
クォーク	u	c	t	+2/3	1/2
	d	s	b	-1/3	1/2
レプトン	e	$\mu$	$\tau$	-1	1/2
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	0	1/2

表 1: 標準理論におけるフェルミオン

		電荷	スピン	相互作用
ゲージボソン	g	0	1	強い力
	$W^\pm$	$\pm 1$	1	弱い力
	$Z^0$	0	1	
	$\gamma$	0	1	電磁気力
スカラーボソン	H	0	0	

表 2: 標準理論におけるボソン

レプトンは強い相互作用を行わない素粒子であり、電荷を持つ  $e, \mu, \tau$  は電磁相互作用と弱い相互作用を行い、電荷を持たない  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  は弱い相互作用のみを行う。標準理論では  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  は質量を持たないとされているが、実際には小さな質量を持つことが実験によりわかっている。

フェルミオンと異なり、標準理論におけるボソンは物質を構成せず、相互作用を媒介する。相互作用には強い力、弱い力、電磁気力、重力の 4 種類がある。強い力では g、弱い力では  $W^\pm, Z^0$ 、電磁気力では  $\gamma$  が相互作用を媒介する。重力を媒介するボソンであるグラビトンは標準理論の枠組みには入っておらず、いまだ発見されていない。

## 1.2 LHC-ATLAS 実験が目標とする物理

数多くの実験により標準理論の正しさが実証されているが、標準理論にはいくつかの問題点があることがわかっている。例えば、ダークマターの存在や、ニュートリノが質量を持つことは標準理論では説明することが出来ない。

標準理論を超える理論の1つとして超対称性理論が考えられている [1]。標準理論にはスピンの半整数値のフェルミオンが12種類、スピンの整数値のボソンが5種類考えられているが、超対称性理論ではそれぞれの素粒子にスピンの  $\frac{1}{2}$  だけずれた超対称性粒子のパートナーが存在するとしている。つまり、標準理論においてフェルミオンである素粒子にはパートナーのボソンが、標準理論においてボソンである素粒子にはパートナーのフェルミオンが存在すると予測されている。このような超対称性理論により、ダークマターの存在、ニュートリノ質量は説明される。

しかし、まだ超対称性理論は実験で実証されていない。そこで、超対称性理論のような標準理論を超える物理現象の探索が数多くの実験で行われている。その1つにLHC-ATLAS実験がある。LHC-ATLAS実験では世界最高の重心系エネルギーを誇る陽子陽子衝突を行っており、標準理論を超える物理現象の観測を目指している。また、標準理論で予測されている物理現象の精密測定もLHC-ATLAS実験の目標の1つである。

$B_s \rightarrow \mu\mu$

$B_s (= \bar{b}s)$  メソンは、質量  $5366.79 \pm 0.23 \text{ MeV}$ 、寿命  $(1.510 \pm 0.005) \times 10^{-12} \text{ sec}$  の粒子である。 $D_s^-$  メソンを含む終状態へ崩壊分岐比  $93 \pm 25\%$  で崩壊する。GIM機構による制限から、フレーバーを変えるような  $B_s \rightarrow \mu\mu$  への崩壊は一次近似 (図1) では禁止され、高次のループ過程 (図2) が必要となる。その崩壊分岐比は  $(3.66 \pm 0.23) \times 10^{-9} \text{ sec}$  と標準理論から計算され、標準理論においては起こりにくい物理過程となっている。CMS実験とLHCb実験では、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  の崩壊分岐比は  $2.8_{-0.6}^{+0.7} \times 10^{-9}$  と測定されている。標準理論では、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  は稀崩壊であるが、標準理論を超える物理では、図3のように、新粒子の存在により、標準理論とは異なる過程を経て、より大きい崩壊分岐比で崩壊が起こりうると予測されている。

$B_s \rightarrow \mu\mu$  という物理過程の測定は、標準理論における稀事象の検証、標準理論を超えた物理の探索という二つの点で重要であるが、この物理過程は運動学的に特徴を持つため、測定には工夫が必要である。 $B_s$  メソンは、質量が小さく、陽子陽子衝突によって、大きな運動量を持って生成されることが多い。そのため、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  の崩壊が起きると、二つのミュオンは真反対に飛び出るのではなく、近接して飛び出ることが多くなる。近接した二つのミュオンを、一つのミュオンとして誤って検出することなく、二つのミュオンとして個々の飛跡を正確に測定することが、この物理過程の測定には必要である。

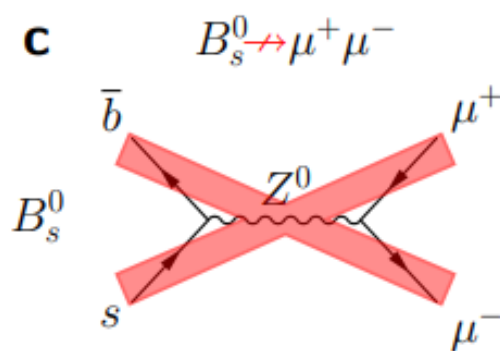


図1:  $B_s \rightarrow \mu\mu$  の一次近似での崩壊 [2]

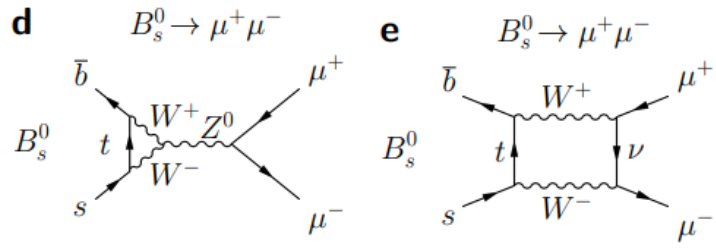


図 2:  $B_s \rightarrow \mu\mu$  の高次のループを含む崩壊 [2]

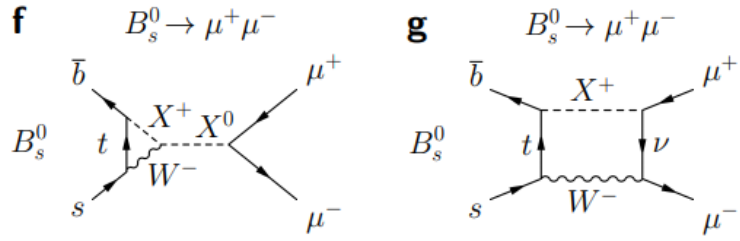


図 3: 標準理論を超えた物理によって予言される新粒子  $X_0, X^+$  の介在する  $B_s \rightarrow \mu\mu$  [2]

## 2 LHC-ATLAS 実験

この章では、LHC-ATLAS 実験と ATLAS 検出器の概要を述べる。

### 2.1 LHC

LHC(Large Hadron Collider) は、スイスのジュネーブ郊外にある陽子陽子衝突型円形加速器である。前段加速器で加速された陽子は、LHC のリングに入り、設計値では 7TeV まで加速される。  $1.15 \times 10^{11}$  個の陽子が 1 つのバンチを構成し、それらが 25ns に 1 回衝突点で衝突する。LHC の衝突点は 4 つあり、それぞれの衝突点で ATLAS, CMS, ALICE, LHCb が実験を行っている。ATLAS と CMS は、標準理論の精密測定や、標準理論を超えた物理現象の探索などの幅広い物理現象を対象にしている。ALICE は、重イオン衝突に特化し、LHCb は B 粒子に関する物理現象に特化している。

LHC は 2012 年までに Run1 の運転が終わり、2 年間のアップグレード期間を経て 2015 年から 2018 年まで Run2 が行われた。Run1 では重心系エネルギー 7 TeV, 8 TeV で陽子陽子衝突が行われた。Run2 では重心系エネルギー 13TeV で陽子陽子衝突が行われ、 $139\text{fb}^{-1}$  の統計量を得た。2021 年からの Run3 では重心系エネルギーが 14 TeV に上昇する予定であり、また、2026 年からはルミノシティが格段に増加する高輝度 LHC が始まる予定である。

### 2.2 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は、陽子陽子衝突により生成された粒子のエネルギー、運動量、電荷などの性質を測定することを目的としている。広い立体角を多い、様々な方向へ飛来した粒子の測定が可能となっている。

生成された粒子が検出器のどこの位置で測定されたかを表すために、図 4 で示される、ビーム軸方向  $z$ , 動径方向  $R$ , 極角  $\theta$ , 方位角  $\phi$  による円筒座標系を用いている。ベクトルの  $xy$  方向は横方向と呼ばれ、特に  $xy$  平面に射影した粒子の運動量は横運動量  $p_T$  と呼ばれる。また、極角  $\theta$  の代わりに、式 (1) で表される擬ラピディティ  $\eta$  を用いることがあり、 $|\eta| < 1.05$  をバレル部、 $|\eta| > 1.05$  をエンドキャップ部と呼ぶ。

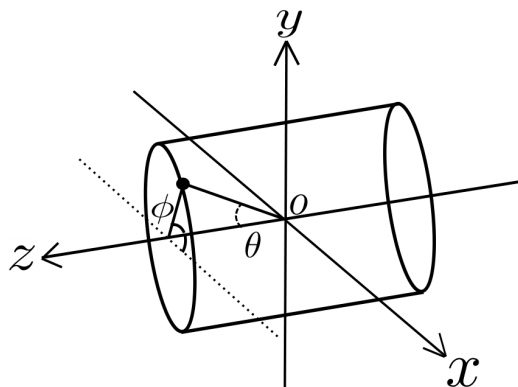


図 4: ATLAS 検出器での座標系

$$\eta = -\log\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

ATLAS 検出器では、様々な性質を持つ粒子を測定することが出来るように、性質の異なった測定器を何層にも渡って設置している。設置されている検出器は、衝突点に最も近い場所から、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、ミューオン検出器となっている。

## 2.3 磁石

内部飛跡検出器には、図 5 のような超伝導ソレノイド磁石によって Z 軸方向に約 2 T の磁場がかかっている。

ミューオン検出器には、図 6 のようなトロイド磁石によってビーム軸を中心とする同心円状に磁場がかかっている。バレル部とエンドキャップ部のどちらにおいても、トロイド磁石は 8 回対称になるように設置されている。磁場の強さは、バレル部では約 1 T、エンドキャップ部では約 0.5 T となっている。

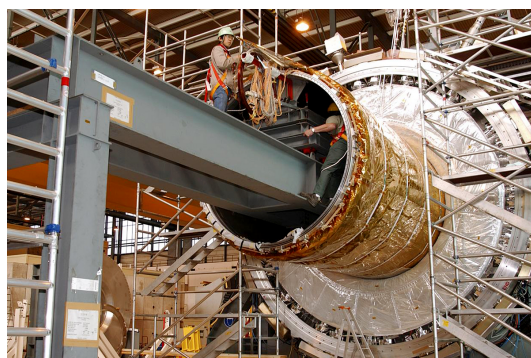


図 5: ソレノイド磁石 [3]。

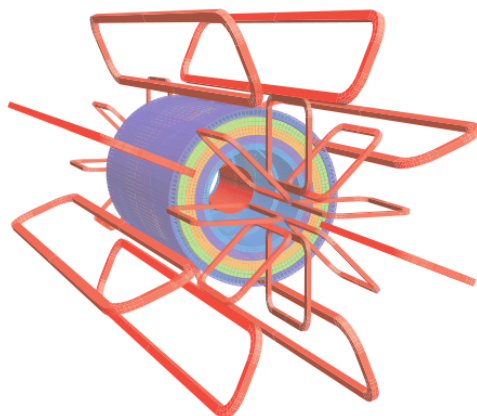


図 6: トロイド磁石 [4]。

## 2.4 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は、衝突点に最も近い位置に設置されている検出器であり、衝突点から飛来する多数の荷電粒子の飛跡を再構成する。内部飛跡検出器は、内側から順に、Insertable B Layer (IBL)、ピクセル検出器、シリコンストリップ検出器 (SCT)、遷移放射飛跡検出器 (TRT) からなる。

## IBL

IBL は Run1 が終わった後のシャットダウン期間中にインストールされたピクセル検出器であり、既存のピクセル検出器の最内層に設置されている。IBL はビームパイプから非常に近いところに設置され、飛跡とパーテックスの測定精度向上に重要な役割を担う。IBL の配置を図 7 に示す。

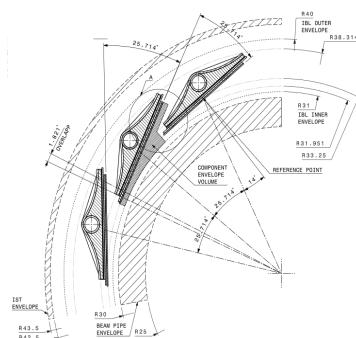


図 7: IBL の配置 [5]

## ピクセル検出器

ピクセル検出器はシリコン半導体検出器である。図 8 のように配置されている。最内層に設置され、高い位置分解能を持っている。バレル部では同心円状に配置してあり、エンドキャップ部ではビーム軸と垂直にディスク状のものが設置されている。バレル、エンドキャップ部それぞれ 3 層となっている。

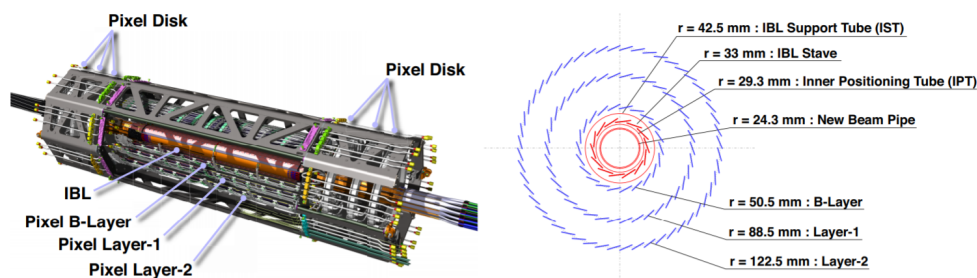


図 8: ピクセル検出器の配置 [6]

## シリコンストリップ検出器

シリコンストリップ検出器は、バレル部では円筒状に 4 層、エンドキャップ部ではディスク状に 9 層設置されたシリコンウエハーから構成され、位置分解能は  $R\phi$  平面では  $17 \mu\text{m}$ 、Z 軸方向には  $580 \mu\text{m}$  となっている。ただし、シリコンウエハーはストリップ状に切り出されたものが使用されている。

## 遷移放射飛跡検出器

遷移放射飛跡検出器は、内部飛跡検出器の最外層に設置されたドリフトチューブで構成される連続飛跡検出器である。遷移放射によって放出された光子を観測することで、電子の識別を行うことができる。バレル部で

はビーム軸に対して平行に、エンドキャップ部ではビーム軸に対して垂直に設置されている。Z方向の位置分解能は持たず、R- $\phi$ 方向の位置分解能を持つ。

## 2.5 カロリメータ

カロリメータでは、電子、光子、ハドロンエネルギーを測定することができ、電磁カロリメータとハドロンカロリメータの二つに分類される。ATLAS 実験では、物質量の大きい吸収層と物質量の小さい検出層を重ねたカロリメータが使われている。電磁カロリメータ (図 9) は鉛と液体アルゴンから構成される。鉛は吸収層として使用され、液体アルゴンは検出層として使用される。電子と光子が電磁シャワーを起こし、エネルギーを失って最終的には静止する。ハドロンカロリメータ (図 10) は、バレル部では鉄とタイル状のプラスチックシンチレータから構成され、エンドキャップ部では銅と液体アルゴンから構成される。放射線強度の高いフォワード部では、吸収層としてタングステンも用いられている。

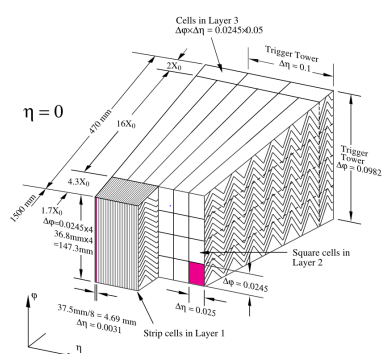


図 9: 電磁カロリメータ [4]

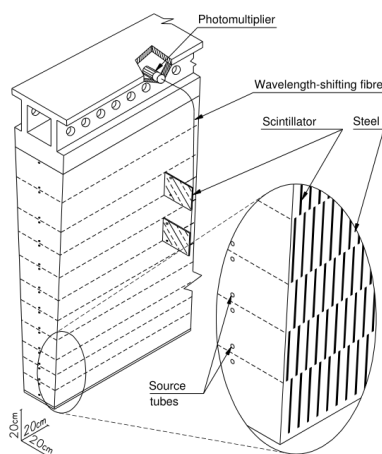


図 10: ハドロンカロリメータ [4]

## 2.6 ミューオン検出器

ミューオン検出器は ATLAS 検出器の最外層に設置されていて、4 つのガス検出器からなる。位置分解能に優れた Monitored Drift Tube (MDT) と Cathode Strip Chamber (CSC) は、精密測定のために使用され、時間分解能に優れた Thin Gap Chamber (TGC) と Resistive Plate Chamber (RPC) は、トリガーのために使用される。

ミューオン検出器は、磁場中に設置されているため、磁場によって曲げられたミューオンの飛跡から運動量を測定することができる。

図 11 に、ミューオン検出器のパレル部での  $xy$  平面断面図を示す。ミューオン検出器は、 $\phi$  方向に対して、8 分割されていて、Large セクターと Small セクターが互い違いに設置されている。Large セクターと Small セクターでは構造が異なる。Large セクターと Small セクターの RZ 平面断面図を図 12 と図 13 にそれぞれ示す。なお、パレル部において、検出器を支える足の部分 (図 11 の右図における 11, 12, 14, 15 番) は、通常の Large セクターと Small セクターとは構造が異なっており、この部分は Large Special セクター、Small Special セクターと呼ばれる。

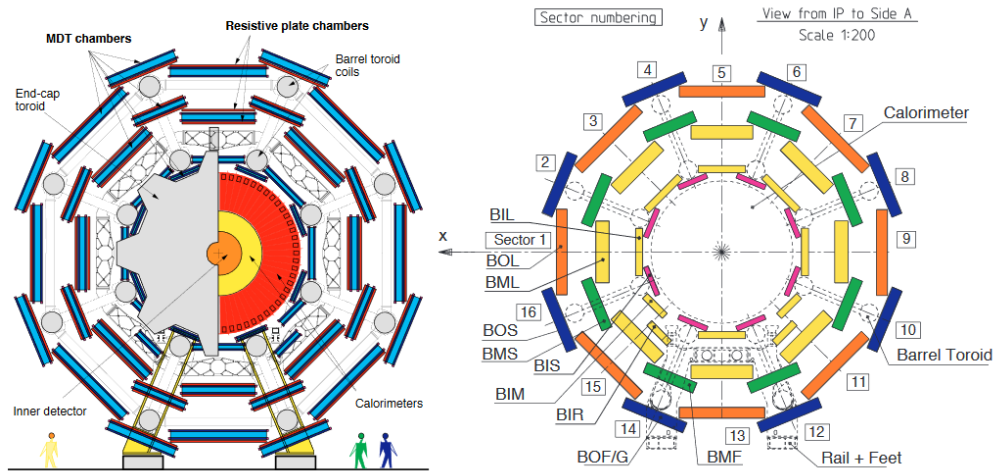


図 11: ミューオン検出器のパレル部での  $xy$  平面断面図。Large セクターと Small セクターが交互に設置されている [7]。

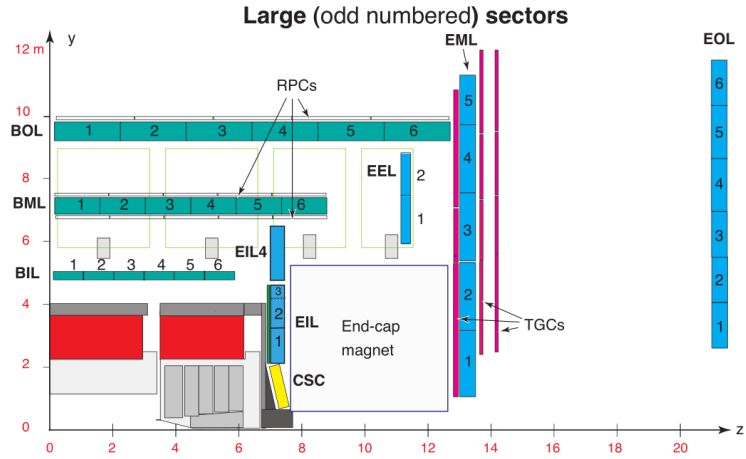


図 12: ミューオン検出器の Large セクターでの RZ 平面断面図 [7]。

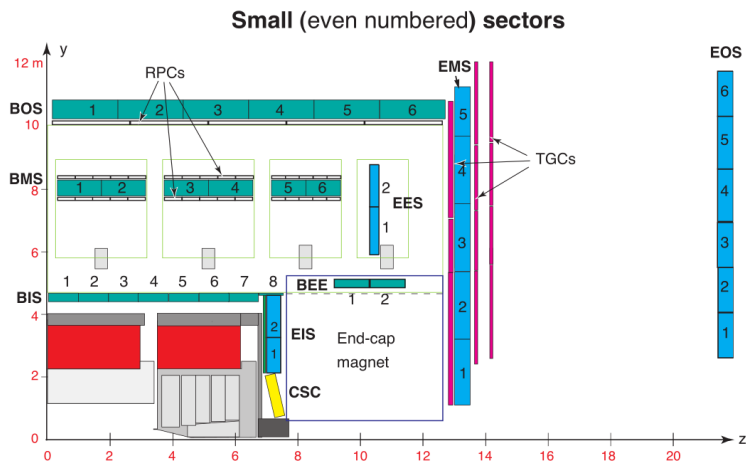


図 13: ミューオン検出器の Small セクターでの RZ 平面断面図 [7]。

## MDT

MDT は  $|\eta| < 2.7$  の範囲に設置されている。パレル部、エンドキャップ部ともに 3 層から構成され、内側から順にインナーステーション、ミドルステーション、アウトーステーションと呼ばれる。MDT の 1 つの層は Ar, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O が封入されたドリフトチューブ 3 層または 4 層から構成されている。チューブの中心はタングステンのワイヤーである。図 14 にチェンバーの構造を示し、図 15 にチューブの断面図を示す。各チューブの位置分解能は 80  $\mu\text{m}$  である。ドリフト時間は 700 ns と長く、これは初段トリガーシステムで MDT を用いることができない理由の一つとなっている。

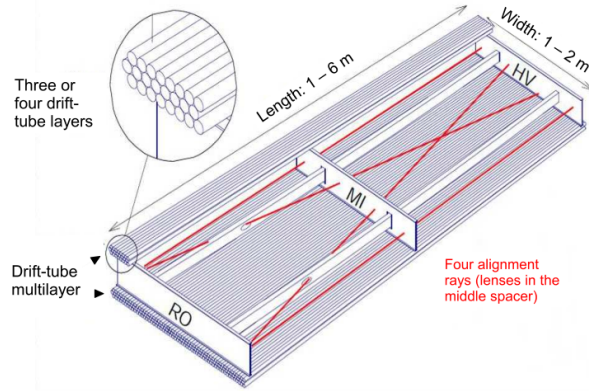


図 14: MDT チェンバー [4]。

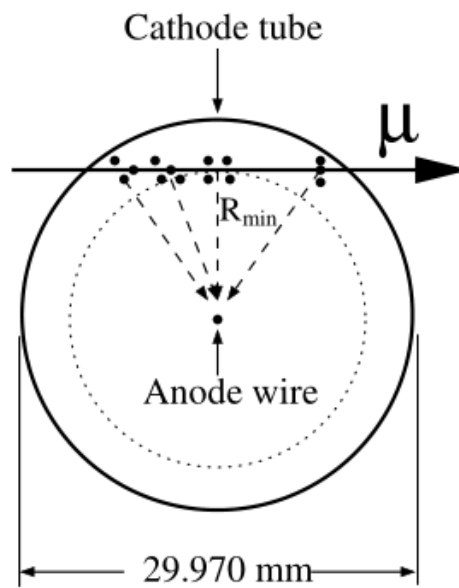


図 15: MDT のチューブの断面図 [4]。

MDT は、設置されている領域ごとに呼び名が異なる。例えば、BIL (Barrel, Inner, Large) は、バレル部における Large セクターのインナーステーションに設置されている MDT を指し、EOS (Endcap, Outer, Small) は、エンドキャップ部における Small セクターのアウターステーションに設置されている MDT を指す。

Large Special セクターと Small Special セクターは、検出器を支える足の部分であるため、MDT を設置することのできる領域が限られている。そのため、それらのセクターでは、特殊な形状の MDT を設置している。図 16 (a) にミュオン検出器の Large セクターと Small セクターの構造を示し、図 16 (b) にミュオン検出器の Large Special セクターと Small Special セクターの構造を示す。



に使用される昇降機がある。そのため、通常の BIL, BML, BOL が設置できない領域があったが、2014 年に BME と BOE と呼ばれる検出器が新たに設置された [10]。BOE は通常の MDT であるが、BME は sMDT である。

バレル部とエンドキャップ部の境界のトランジション部と呼ばれる領域には、エンドキャップエクストラチェンバー (EE チェンバー) と呼ばれる特殊な MDT が設置されている。

## CSC

CSC(図 17) は  $|\eta| > 2.0$  の領域に設置されている。CSC は Ar と  $\text{CO}_2$  が封入された MWPC から構成される。 $|\eta| > 2.0$  の領域では、粒子の飛来頻度が MDT の許容量を超えるため、読み出しの早い CSC を用いている。MDT が粒子を検出できる限界の頻度は  $150 \text{ Hz/cm}^2$  であるが、CSC の限界は  $1000 \text{ Hz/cm}^2$  となっている。R 軸方向と  $\phi$  方向にそれぞれ  $40 \mu\text{m}$ ,  $5 \text{ mm}$  の位置分解能で測定ができる。

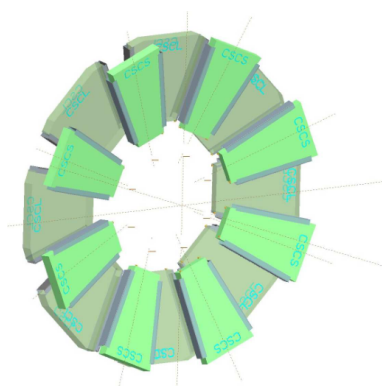


図 17: フォワード部における CSC の配置 [4]

## RPC

RPC はバレル部に設置されているトリガー用の検出器である。図 12, 図 13, 図 18 に示すように、ミドル層では MDT を挟むように 2 つ設置され、アウター層では MDT の外側に設置されている。2 つの resistive plate と呼ばれる抵抗板が  $2 \text{ mm}$  のガスギャップを挟んでいる。2 つの抵抗板には電圧がかかっていて、その間を通過したミューオンによって電離された粒子が起こす電子雪崩を測定することでミューオンを検出する。

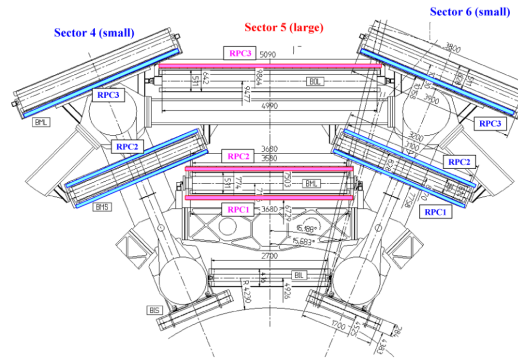


図 18: Large セクターと Small セクターにおける RPC の配置。ミドル層では MDT を挟むように 2 つ設置され、アウター層では MDT の外側に設置されている。[4]

### TGC

TGC は、図 12, 図 13 のように、エンドキャップ部に設置されているトリガー用の検出器である。エンドキャップ部の MDT のミドルステーションには 3 枚設置され、インナーステーションには 1 枚設置されている。CO<sub>2</sub> と n-pentane が封入され、印加電圧 2900 V の MWPC となっている。アノード電極とカソード電極の距離を短くすることにより、読み出しを素早くしている。R 軸方向と  $\phi$  方向の測定を行う。

### 3 トリガーシステム

ATLAS 実験では 25 nsec に 1 回という高頻度で陽子陽子衝突が起こるため、処理速度や記憶容量の制限から、興味のある事象のみに絞ってデータを記録するようシステム (トリガーシステム) を用いている。陽子陽子衝突では、大量の QCD ジェット事象が生じるが、QCD ジェット事象に比べて断面積が格段に低いような物理過程の観測を ATLAS 実験では調べる必要がある。そのため、QCD ジェットではないオブジェクトを最終状態に含む事象の測定が重要となっている。よって、ATLAS 実験のトリガーシステムの多くは、ニュートリノ、電子、ミュオン、タウを終状態に含む事象を記録することを目的としている。

トリガーシステムは、ハードウェアの情報を用いて高速にトリガー判定をする Level 1 (L1)、ソフトウェアにより L1 よりも精度よくトリガー判定を行う High Level Trigger (HLT) の二段階がある。L1 では、40MHz の頻度のイベントを 100kHz 程度まで削減し、HLT では、1kHz 程度まで削減する。

HLT を通過したイベントは記録され、記録されたイベントは、全ての検出器の情報を用いて精密に再構成される。これをオフライン再構成と呼ぶ。一方、トリガーシステムでの再構成は、オンライン再構成と呼ばれる。オンライン再構成はデータを取得しながら粒子を再構成するので、素早く再構成をする必要があるが、オフライン再構成ではデータを取得した後に再構成するので、時間をかけて正確に再構成をすることができる。

ミュオンのオフライン再構成には、例えばスタンドアロンミュオンとコンバインドミュオンという 2 種類のアルゴリズムがある。スタンドアロンミュオンでは、ミュオン検出器の情報のみを用いて再構成を行う。一方、コンバインドミュオンでは、内部飛跡検出器の情報も用いて再構成を行う。コンバインドミュオンの方が精度よく、ミュオンを再構成することが可能となっているが、内部飛跡検出器よりもミュオン検出器の方が衝突点を囲っている領域が大きいため、スタンドアロンミュオンの方が広い領域で再構成することができる。その他にも、カロリメータの検出情報を用いたカロミュオンなどのアルゴリズムがある。

トリガーシステムのうち、最終状態にミュオンを含むような事象を選別するトリガーをミュオントリガーと呼ぶ。ミュオントリガーでは、磁場によって曲げられたミュオンの飛跡から運動量を計算し、横運動量  $p_T$  について閾値を設け、それを超えているかどうかのトリガー判定を行う。ミュオントリガーも L1 と HLT の二つの段階で構成され、L1 では、RPC と TGC を用いてトリガー判定を行い、HLT では、RPC と TGC に加えて MDT と CSC を用いてトリガー判定を行う。HLT は更に、ミュオン検出器のみの情報を用いてトリガー判定を行う Standalone ミュオントリガー (L2MuonSA)、内部飛跡検出器の情報も併せてトリガー判定を行う Combined ミュオントリガー (L2muComb)、より精密なトリガー判定を行うことのできる Event Filter(EF) の 3 段階に分けられる。

実際のデータ取得時には L1 と HLT を組み合わせたトリガーを使用し、それをまとめてトリガーチェーンと呼ぶ。トリガーチェーンには例えば、HLT\_mu50\_L1MU20 といった名前が付けられ、このトリガーチェーンでは、L1 において  $p_T > 20$  GeV を要求し、HLT では  $p_T > 50$  GeV を要求する。解析したい目的によって、使われるトリガーチェーンは異なり、何種類ものトリガーチェーンが並行して稼働している。

以下では、各段階でどのようにトリガー判定を行うのかを説明する。また、内部飛跡検出器での飛跡情報を用いたオンライン再構成である Fast Track Finder (FTF) と、LHC の高輝度化に備えて新たに開発されてきた高速飛跡トリガーシステム (FTK) についても説明する。

### 3.1 Level 1 ミューオントリガー (L1)

L1 ミューオントリガーでは、RPC, TGC<sup>\*1</sup>を用いて高速なトリガー判定を行い、Region of Interest (RoI) という RPC と TGC のどの位置でトリガー判定が行われたかの情報を後段の HLT へと受け渡す。L1 での  $p_T$  閾値には 4, 6, 10, 11, 20, 21 GeV の 6 つがある。

L1 ミューオントリガーはバレル部とエンドキャップ部で用いる検出器が異なるため、バレル部とエンドキャップ部に分けて説明する。

#### バレル部における L1 ミューオントリガー

バレル部での L1 ミューオントリガーには RPC を用いる。L1 では、4, 6, 10, 11, 20, 21 GeV の  $p_T$  閾値が設けられ、4, 6, 10 GeV のような低い  $p_T$  閾値のトリガー判定では、図 19 における RPC1, RPC2 の情報を用いる。11, 20, 21 GeV のような高い  $p_T$  閾値のトリガー判定では、RPC1, RPC2 に加えて、RPC3 の情報も用いる。これは、高い  $p_T$  のミューオンは磁場により曲がりにくいため、RPC3 でのヒットを要求しても十分なトリガー効率を保てるからである。

図 19 における RPC2 のヒットがあることを要求し、ヒットがあった場合にのみ、ヒット周辺の領域 (ロード) に他のヒットがあるかを探索する。ロードは RPC2 のヒットと衝突点を結んだ直線を囲む範囲内と定義される。図 19 において、ロードは赤で示され、低い  $p_T$  のミューオンは大きく曲がるため、低い  $p_T$  閾値のトリガー判定を行う際には、ロードが広く定義され、高い  $p_T$  のミューオンはあまり曲がらないため、高い  $p_T$  閾値でのトリガー判定では、ロードが狭く定義される。低い  $p_T$  閾値でのトリガー判定では、RPC1 と RPC2 でのヒットが 3 層以上で見つかることを要求する。高い  $p_T$  閾値でのトリガー判定では、RPC1, RPC2 に加えて、図 19 における青の領域へと広げ、RPC3 でもヒットがあることを要求する。

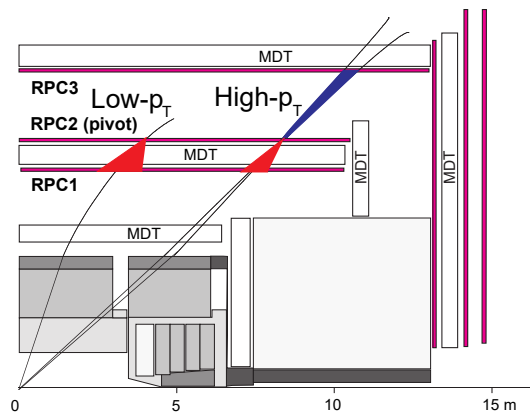


図 19: RPC による L1 ミューオントリガー [4]

#### エンドキャップ部における L1 ミューオントリガー

エンドキャップ部での L1 ミューオントリガーには TGC を用いる。TGC は、図 20 のように Middle には 3 層設置され、内側から M1, M2, M3 と呼ばれる。また、磁場の内側に設置された TGC をビーム軸から近い方から FI, EI と呼ぶ。エンドキャップ部のトリガー判定には、Middle の 3 層を用いる。FI と EI は磁場の

<sup>\*1</sup> Run2 の途中から、 $1.05 \leq |\eta| \leq 1.30$  の範囲では、タイルカロリメータの情報も用いるようになった。

外側にある Middle の 3 層の飛跡とのコインシデンスをとるために用いられる。ただし、Run2 の途中から、衝突点由来ではない粒子によるフェイクトリガーを削減するために、 $1.05 \leq |\eta| \leq 1.30$  の範囲では、タイルカロリメータと TGC のヒットコインシデンスもとる。

トリガー判定では、まず、M3 にヒットがあることを要求し、M3 のヒットと衝突点を直線で結ぶ。この直線と Middle の他の TGC で得られたヒットとの距離を計算し、事前に求めておいた距離と  $p_T$  の対応関係から  $p_T$  を見積もることができ、それによりトリガー判定を行う。ただし、低い  $p_T$  閾値のトリガーでは M2, M3 の 2 層、高い  $p_T$  閾値のトリガーでは M1, M2, M3 の 3 層でそれぞれ見積もられた  $p_T$  が閾値を超えているかの判定を行う。これは、高い  $p_T$  のミュオンは磁場により曲がりにくいため、M3 でのヒットを要求しても十分なトリガー効率を保てるからである。

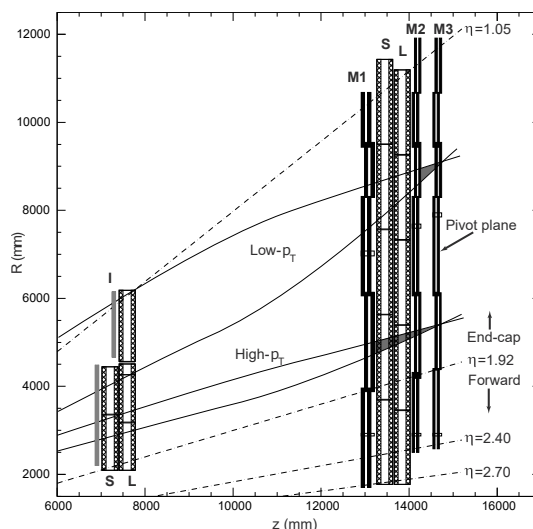


図 20: TGC による L1 ミューオントリガー [4]

### 3.2 Stand Alone ミューオントリガー (L2MuonSA)

Stand Alone ミューオントリガー (L2MuonSA) では、L1 から受け渡された RoI 近傍の領域に限定して、 $p_T$  を計算し、トリガー判定を行う。L2MuonSA は HLT の一段目であり、処理時間約 1ms の素早い計算アルゴリズムとなっている。L2MuonSA は、厳しい  $p_T$  閾値をかけて多くのミュオンを選別することよりも、L2MuonSA より飛跡再構成精度の高い後段の L2muComb, EF へのシードを渡すことを役割としている。そのため、L2MuonSA での  $p_T$  閾値には 4 GeV と 6 GeV という低いものしか設定されていない。最終的な  $p_T$  閾値が 4 GeV であるトリガーチェーン<sup>\*2</sup> でのみ L2MuonSA の  $p_T$  閾値は 4 GeV であり、それ以上の  $p_T$  閾値を持つトリガーチェーン<sup>\*3</sup>においては、L2MuonSA での  $p_T$  閾値は一律で 6 GeV となっている。

L2MuonSA の基本的な流れは、以下の通りである。

- ロードの計算。
- スーパーポイントの計算。
- $p_T$  と相関のあるパラメータの計算。

<sup>\*2</sup> HLT\_mu4 や HLT\_2mu4 など。

<sup>\*3</sup> HLT\_mu6, HLT\_mu20 や HLT\_mu50 など。

- 導出された  $p_T$  が閾値を超えているかのトリガー判定。

#### ロードの計算

まず、L1 から受け渡された RoI の情報からロードと呼ばれる直線を計算する。ただし、ここでのロードは L1 でのロードと異なる。ロードの計算方法はパレル部とエンドキャップ部によって異なるので、以下ではパレル部とエンドキャップ部に分けて説明する。

パレル部では、RoI 周辺の RPC のヒットからロードを求める。ミドルステーションでは、RPC のヒットを結んだ直線のうち、フィッティングにより最も確からしい直線をロードと定義する。アウトーステーションでは、RPC2, RPC3 のヒットから、ミドルステーションと同様にフィッティングをしてロードを求める。インナーステーションには RPC が設置されていないため、ミュオンがインナーステーションとミドルステーションの間の磁場で曲げられることを考慮して、ミドルステーションのロードからインナーステーションのロードを見積もる。ミドルステーションのロードと、ミドルステーションの RPC のヒットと原点を結ぶ直線からなる角の二等分線をインナーステーションのロードと定義する。

一方、エンドキャップ部では TGC のヒットからロードを求める。TGC のある領域では、RoI 周辺の TGC のヒットからロードを求め、TGC のないインナーステーションの一部とアウトーステーションでは、ミドルステーションのロードをインナーステーションまたはアウトーステーションまで外挿し、これをロードとする。

#### スーパーポイントの計算

次に、MDT の各ステーションにおけるミュオンの通過点、傾きを計算する。この通過点と傾きどちらも含んだ情報をスーパーポイントと呼ぶ。

まず、MDT のヒットがあったチューブとロードの距離を求め、その距離が小さいチューブを MDT の各層で選ぶ。選ばれたチューブのドリフトサークルの共通接線として最も確からしい直線<sup>\*4</sup>を求める。その直線と MDT の中心をとる直線との交点を図 21 のようにスーパーポイントと定義する。

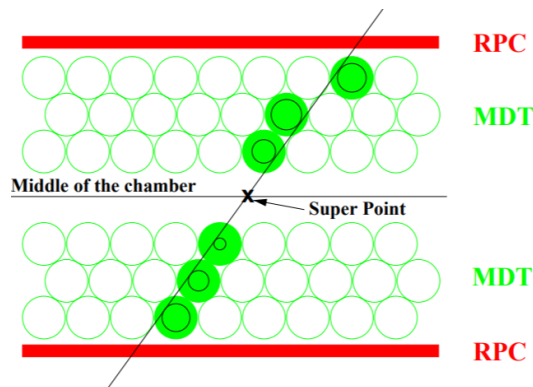


図 21: スーパーポイント (パレル部)[11]

<sup>\*4</sup> 直線を用いているのは、磁場中にある MDT ステーションも、その厚みは十分薄く、MDT ステーション内では曲がった飛跡も直線であると近似しているからである。

### $p_T$ と関連のあるパラメータの計算

各ステーションごとのスーパーポイントから、 $p_T$  と関連のあるパラメータを求め、そのパラメータの値と  $p_T$  の対応関係をあらかじめ定義しておくことにより、パラメータの値を  $p_T$  へと即座に変換することができる。この対応関係を保存したものを Look up table (LUT) と呼ぶ。 $p_T$  と関連のあるパラメータは、 $\alpha, \beta, \gamma, R, R_{EE}$  があり、領域ごとにどのパラメータが計算されるかは異なる。以下では、これらのパラメータの計算方法を説明する。ただし、 $\alpha$  と  $\beta$  の両方が計算されなかった場合は、TGC のミドルの 2 層から得られる位置の情報から  $\alpha$  を計算し、これを  $\alpha_{TGC}$  とする。

**$\alpha$  の計算方法**  $\alpha$  は、エンドキャップ部における  $p_T$  と関連のあるパラメータの 1 つであり、MDT のスーパーポイントから求められる。

図 22 のようにミドルステーションのスーパーポイントと衝突点を結んだ直線と、ミドルステーションとアウトーステーションのスーパーポイントを結んだ直線の成す角度が  $\alpha$  である。ただし、アウトーステーションでスーパーポイントが計算されなかった場合は、ミドルステーションのスーパーポイントと衝突点を結んだ直線と、ミドルステーションでのスーパーポイントが持つ角度の情報から得られる直線の成す角を  $\alpha$  とする。

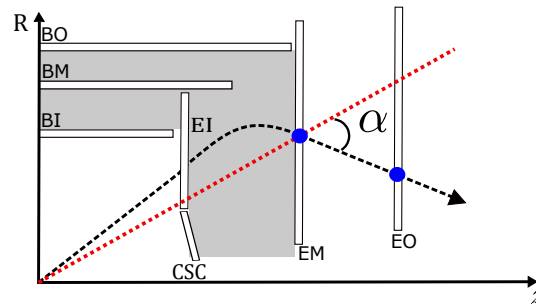


図 22:  $p_T$  と関連のあるパラメータである角度  $\alpha$ 。ミドルステーションのスーパーポイントと衝突点を結んだ直線と、ミドルステーションとアウトーステーションのスーパーポイントを結んだ直線の成す角度が  $\alpha$  である。

**$\beta$  の計算方法**  $\beta$  は、エンドキャップ部における  $p_T$  と関連のあるパラメータの 1 つであり、MDT のスーパーポイントから求められる。

図 23 のようにインナーステーションにおけるスーパーポイントの角度と、ミドルステーションとアウトーステーションのスーパーポイントを結んだ直線の角度差が  $\beta$  である。アウトーステーションにスーパーポイントが計算されなかった場合は、インナーステーションにおけるスーパーポイントの角度と、ミドルステーションのスーパーポイントが持つ位置と角度の情報から得られる直線の角度差を  $\beta$  とする。

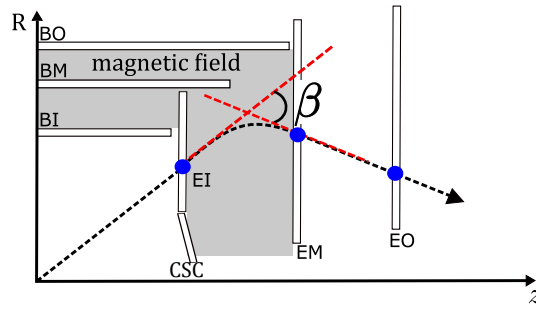


図 23:  $p_T$  と関連のあるパラメータである角度  $\beta$ 。インナーステーションにおけるスーパーポイントの角度と、ミドルステーションとアウトーステーションのスーパーポイントを結んだ直線の角度差が  $\beta$  である。

$\gamma$  の計算方法  $\gamma$  は、フォワード部 ( $2.0 < |\eta|$ ) における  $p_T$  と関連のあるパラメータの 1 つであり、CSC と MDT で得られる飛跡の情報から求められる。

図 24 のように CSC とミドルステーションでの飛跡の位置を結んだ直線と、ミドルステーションとアウトーステーションでの飛跡を結んだ直線の角度差が  $\gamma$  である。アウトーステーションで飛跡が再構成されなかった場合は、ミドルステーションでの飛跡が持つ位置と角度の情報から得られる直線を用いて  $\gamma$  を計算する。

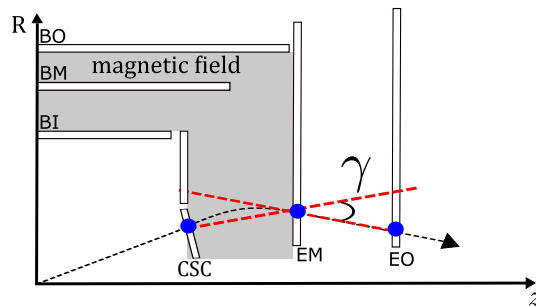


図 24:  $p_T$  と関連のあるパラメータである角度  $\gamma$ 。CSC とミドルステーションでの飛跡の位置を結んだ直線と、ミドルステーションとアウトーステーションでの飛跡を結んだ直線の角度差が  $\gamma$  である。

$R$  の計算方法  $R$  は、パレル部における  $p_T$  と関連のあるパラメータであり、MDT のスーパーポイントから求められる。

図 25 のように、インナーステーション、ミドルステーション、アウトーステーションでのそれぞれのスーパーポイント 3 点を通る円弧の半径が  $R$  である。

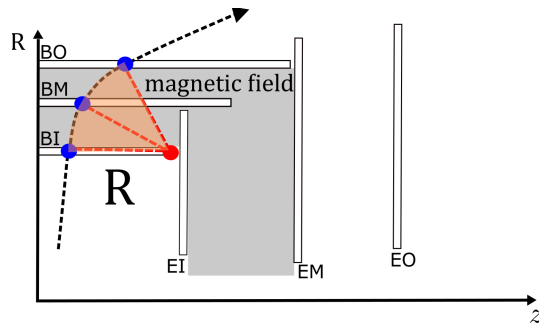


図 25:  $p_T$  と関連のあるパラメータである半径  $R$ 。インナーステーション、ミドルステーション、アウトーステーションでのそれぞれのスーパーポイント 3 点を通る円弧の半径が  $R$  である。

ただし、トランジション部 (バレル部とエンドキャップ部の境界付近) において、図 26 のようにバレル部とエンドキャップ部の両方の検出器を通過した場合のために、バレル部のミドルステーションかアウトーステーションにスーパーポイントがあり、更にエンドキャップ部のインナーステーションにもスーパーポイントがある場合、それら 2 点のスーパーポイントと原点を用いて  $R$  を計算する。エンドキャップ部のインナーステーション以外に既にバレル部でスーパーポイントが 2 点ある場合はエンドキャップ部のインナーステーションのスーパーポイントは使用せずに  $R$  を計算する。

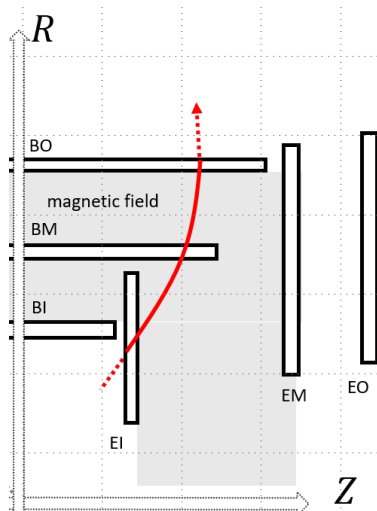


図 26: バレル部とエンドキャップ部の両方の検出器を通過した場合。

$R_{EE}$  の計算方法  $R_{EE}$  は、 $|\eta| \sim 1.05$  付近のトランジション部における  $p_T$  と関連のあるパラメータである。インナーステーションの MDT とミドルステーションの MDT の間に EE チェンバーという MDT チェンバーが設置されているが、これは Run2 から新しく設置されたチェンバーである。

図 27, 図 28 のように Large セクターと Small セクターでは R-Z 平面での構造が異なる。Large セクターでは、エンドキャップ部のインナーステーションとミドルステーションのスーパーポイントと、EE チェンバーのスーパーポイントの 3 点を通る円弧の半径が  $R_{EE}$  である。Small セクターでは、バレル部のインナーステーションとエンドキャップ部のミドルステーションのスーパーポイントと、EE チェンバーのスーパーポイントの 3 点を通る円弧の半径が  $R_{EE}$  である。

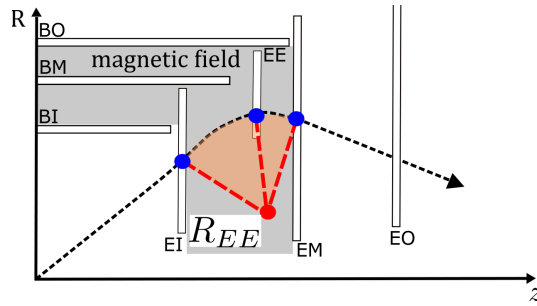


図 27:  $p_T$  と関連のあるパラメータである半径  $R_{EE}$  (Large セクター)。Large セクターでは、エンドキャップ部のインナーステーションとミドルステーションのスーパーポイントと、EE チェンバーのスーパーポイントの 3 点を通る円弧の半径が  $R_{EE}$  である。

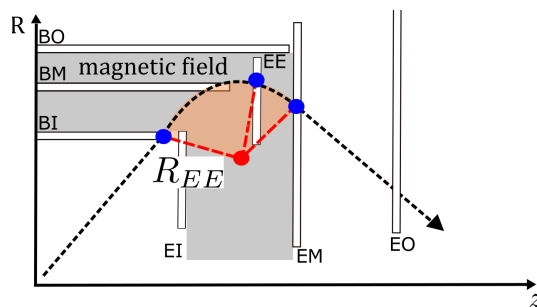


図 28:  $p_T$  と関連のあるパラメータである半径  $R_{EE}$  (Small セクター)。Small セクターでは、バレル部のインナーステーションとエンドキャップ部のミドルステーションのスーパーポイントと、EE チェンバーのスーパーポイントの 3 点を通る円弧の半径が  $R_{EE}$  である。

#### 導出された $p_T$ が閾値を超えているかのトリガー判定

計算された  $R$ ,  $R_{EE}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha_{TGC}$  から、Look up table を用いることにより、それぞれのパラメータから導出される横運動量  $p_T$  を求める。図 29, 図 30 に、例として  $p_T$  に対する  $\alpha, \beta$  の関係を示す。

$p_T$  は、バレル部では  $R$  のみから計算される  $p_T$  のみであるが、エンドキャップ部では  $\alpha, \beta, \alpha_{TGC}$  から計算される 3 種類の  $p_T$  がある。そこで、エンドキャップ部では、最終的な muonSA での  $p_T$  (トリガー判定に使用される  $p_T$ ) を決める際には、 $p_T$  精度が最良となるように定められている図 31 に従う。フォワード部では、 $\gamma$  が計算されたときはそれから導出される  $p_T$  を用い、 $\gamma$  が計算されなかったら、 $\alpha$  から導出される  $p_T$  を用いる。

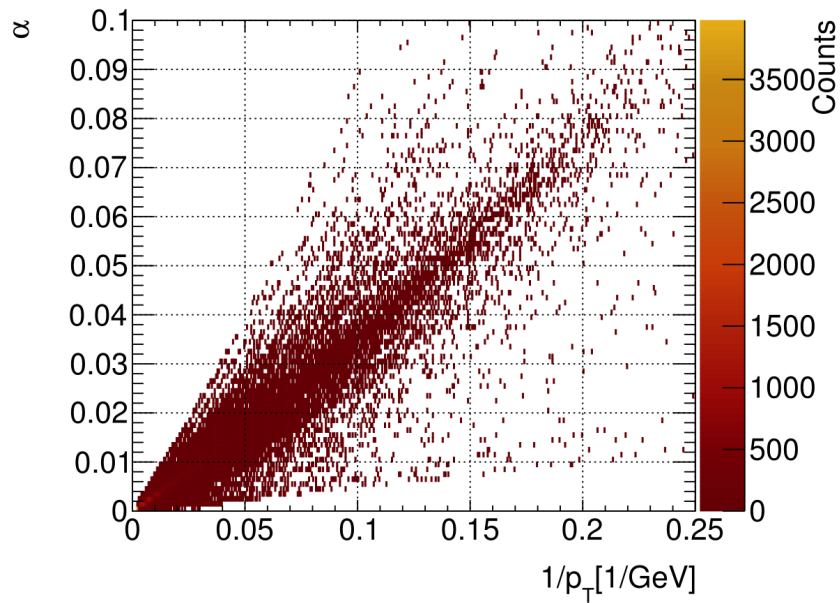


図 29: エンドキャップ部における  $1/p_T$  と  $\alpha$  の関係。線筋があるのは、領域によって  $1/p_T$  と  $\alpha$  の関係が異なるためである。

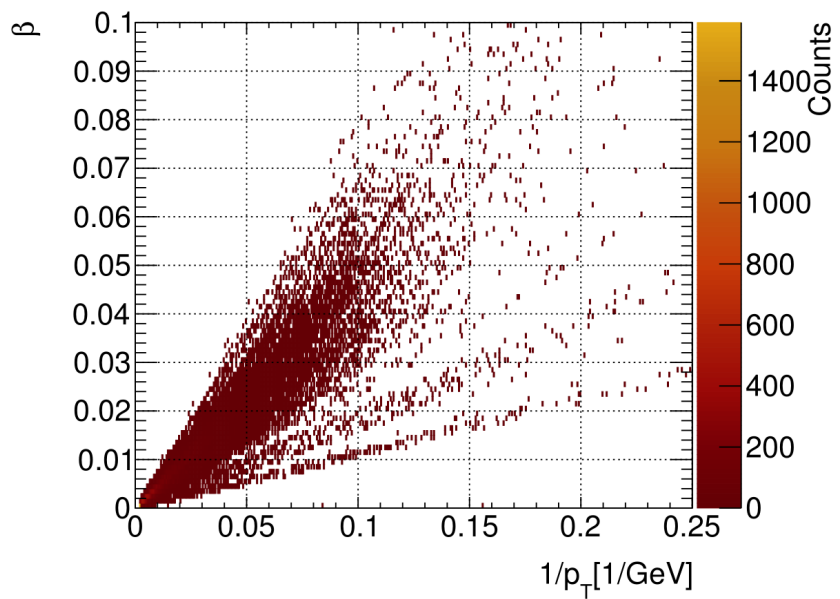


図 30: エンドキャップ部における  $1/p_T$  と  $\beta$  の関係。線筋があるのは、領域によって  $1/p_T$  と  $\beta$  の関係が異なるためである。

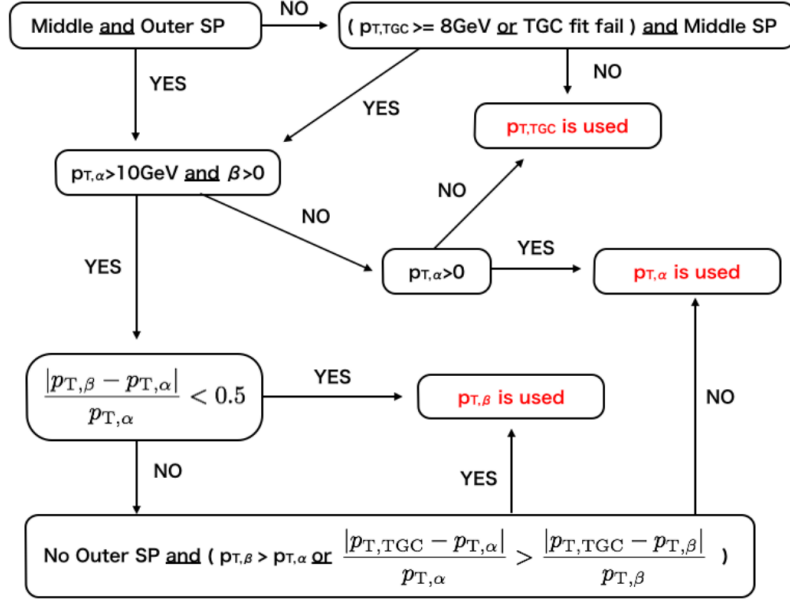


図 31: muonSA(エンドキャップ部)における  $p_{T,\alpha}$ ,  $p_{T,\beta}$ ,  $p_{T,TGC}$  の選択条件 [12]

### 3.3 Combined ミューオントリガー (L2muComb)

L2MuonSA では、ミューオン検出器の情報のみを用いてトリガー判定を行っていたが、L2muComb では、内部飛跡検出器の情報も組み合わせて、 $p_T$  を計算し、トリガー判定を行う。以下で、L2muComb での  $p_T$  の計算方法を説明する。L2muComb で使用する内部飛跡検出器の情報は、後述する FTF によって再構成された飛跡である。

L2MuonSA で計算したミューオンの飛跡を磁場とカロリメータでのエネルギー損失を考慮して衝突点まで外挿し、FTF のミューオン候補の飛跡と比較する。FTF は本物のミューオン以外の飛跡も多く含むので、L2MuonSA によるミューオンの飛跡と  $p_T, \eta, \phi$ , 電荷が最も近い FTF の飛跡を同一のミューオンであると判断する。 $p_{T,SA}$ ,  $p_{T,ID}$  をそれぞれ L2MuonSA と内部飛跡検出器で計算した  $p_T$  とすると、L2muComb での  $p_{T,CB}$  は次のような式で定められる。

$$\frac{1}{p_{T,CB}^2} = \frac{\sigma_{ID}^2 \cdot \frac{1}{p_{T,SA}} + \sigma_{SA}^2 \cdot \frac{1}{p_{T,ID}}}{\sigma_{ID}^2 + \sigma_{SA}^2} \quad (2)$$

ただし、 $\sigma_{ID}$ ,  $\sigma_{SA}$  は内部飛跡検出器と L2MuonSA で計算した  $p_T$  の精度を表す。 $p_{T,SA}$  と  $p_{T,ID}$  の精度の良い方 ( $\sigma$  が小さい方) が、より  $p_{T,CB}$  に寄与する。 $p_{T,SA}$  はカロリメータでのエネルギー損失の影響を受けるため、一般に、精度は  $p_{T,ID}$  の方が高い。しかし、衝突点から多量に生成されるハドロンとミューオンを FTF では分離することが難しいため、 $p_{T,ID}$  に  $p_{T,SA}$  を組み合わせることで、ミューオンの高い純度と  $p_T$  分解能を L2muComb では達成している。この L2MuonSA と FTF の組み合わせにより、L2muComb ではデータが大きく削減される。また、L2MuonSA の外挿には処理時間がかかるため、L2muComb の処理時間は約 20 ms となっている。

### 3.4 Event Filter (EF)

EF はミューオントリガーの最終段階のトリガーである。EF では、オフライン再構成で用いられるアルゴリズムと同程度の精度で  $p_T$  を計算することのできるアルゴリズムによって、 $p_T$  を計算するので、精度よくトリガー判定を行うことができる。EF を通過した事象のみがデータとして記録されることになる。EF は精度が L2MuonSA, L2muComb よりも精度が高いが、処理に約 1 s かかるため、EF へのインプットとなる L2muComb までにレートを削減しておくことが重要である。

図 32, 図 33 に、2017 年に取得された実データにおける HLT\_mu4, HLT\_mu50 の各トリガー段階の前段トリガー段階に対するトリガー効率の  $p_T$  依存性を示す。ただし、HLT\_mu4 と HLT\_mu50 は、それぞれ  $p_T$  閾値が 4GeV と 50GeV のミューオントリガーを指す。

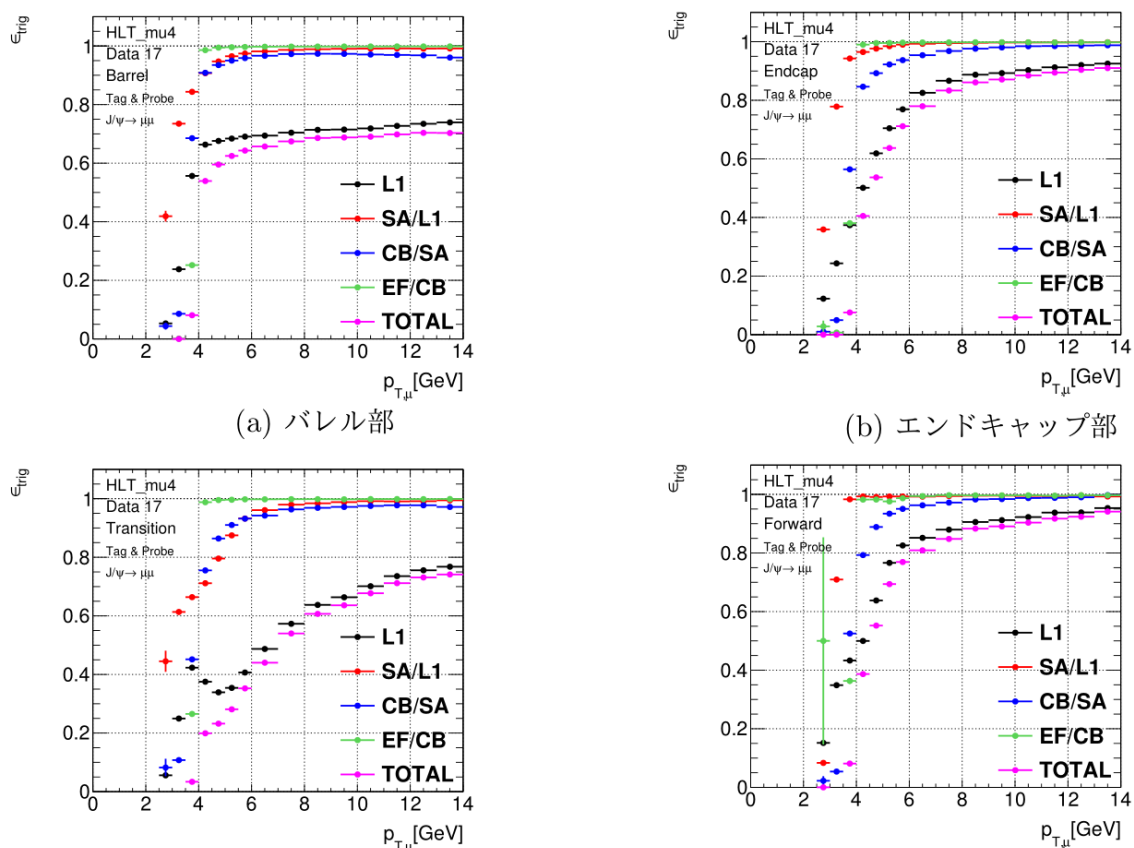


図 32: 2017 年に取得された実データにおける HLT\_mu4 のトリガー効率の  $p_T$  依存性。プロットの L1 はオフラインミューオンに対する L1 のトリガー効率、SA/L1 は L1 に対する L2muonSA のトリガー効率、CB/SA は L2MuonSA に対する L2muComb のトリガー効率、EF/CB は L2muComb に対する EF のトリガー効率、TOTAL はオフラインミューオンに対する EF のトリガー効率を示す。

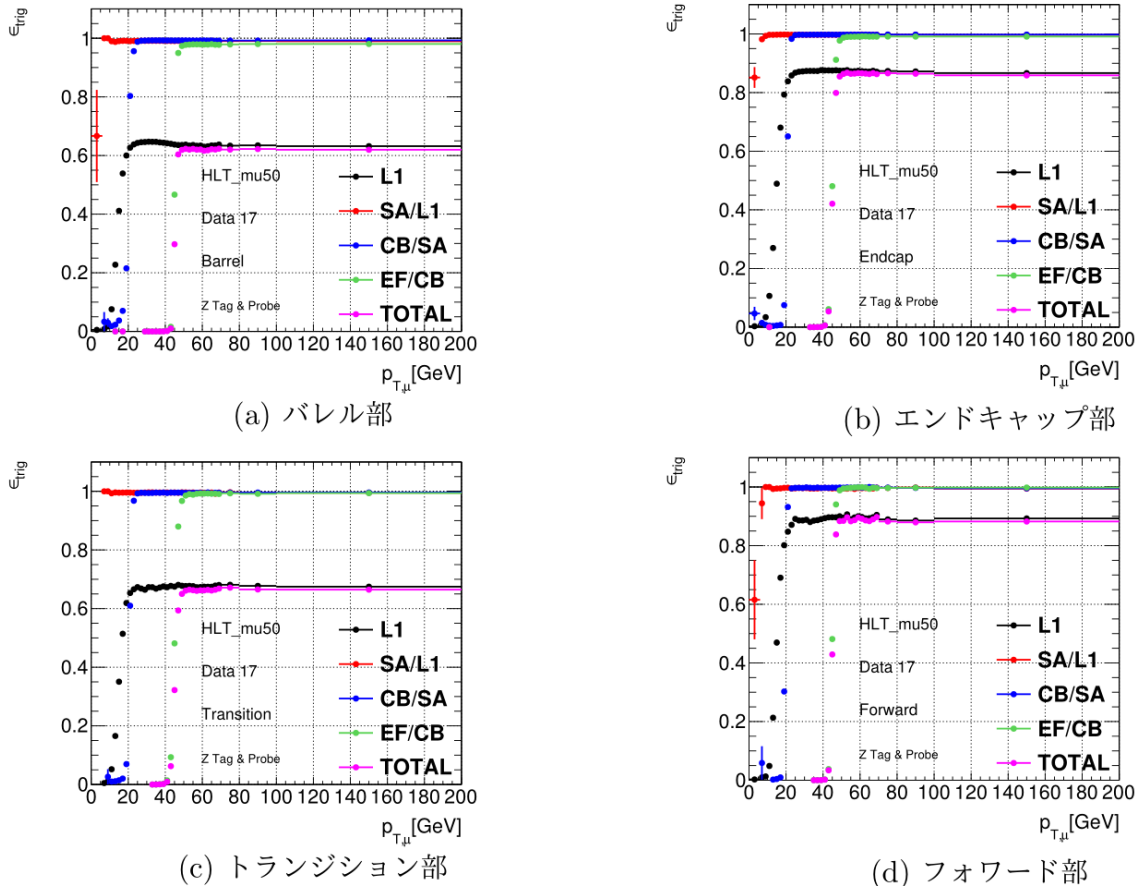


図 33: 2017 年に取得された実データにおける HLT\_mu50 のトリガー効率の  $p_T$  依存性。プロットの L1 はオフラインミュオンに対する L1 のトリガー効率、SA/L1 は L1 に対する L2muonSA のトリガー効率、CB/SA は L2MuonSA に対する L2muComb のトリガー効率、EF/CB は L2muComb に対する EF のトリガー効率、TOTAL はオフラインミュオンに対する EF のトリガー効率を示す。

### 3.5 Fast Track Finder (FTF)

FTF は、内部飛跡検出器に残されたヒットの内、RoI の中のものだけを用い、パターン認識を行うことにより、飛跡を再構成する。ただし、ミュオントリガーでは、L2MuonSA の処理の後に FTF が処理される。L2MuonSA の飛跡を衝突点まで外挿したものを中心として RoI を定義する。RoI 中にあるシリコン検出器とピクセル検出器のヒットからクラスターを作り、そのクラスターの中のヒットを用いて、カルマンフィルタと呼ばれるアルゴリズムにより、飛跡を再構成する。カルマンフィルタでは、測定されたヒットのパラメータを内層のヒット情報を基に再計算し、パラメータを補正しながら、内層から外挿へ向けて順にヒットの連なりをフィットして飛跡を再構成する。FTF では、可能な限り高速に飛跡を再構成することを目指している。Run2 の環境では、処理時間は 100 ms 以下である。FTF で再構成された飛跡は Precision Tracking (PT) というオフライン再構成に近い後段のアルゴリズムに渡される。図 34, 図 35 は、それぞれ  $\eta$ ,  $p_T$  に対する FTF と PT のトリガー効率である。

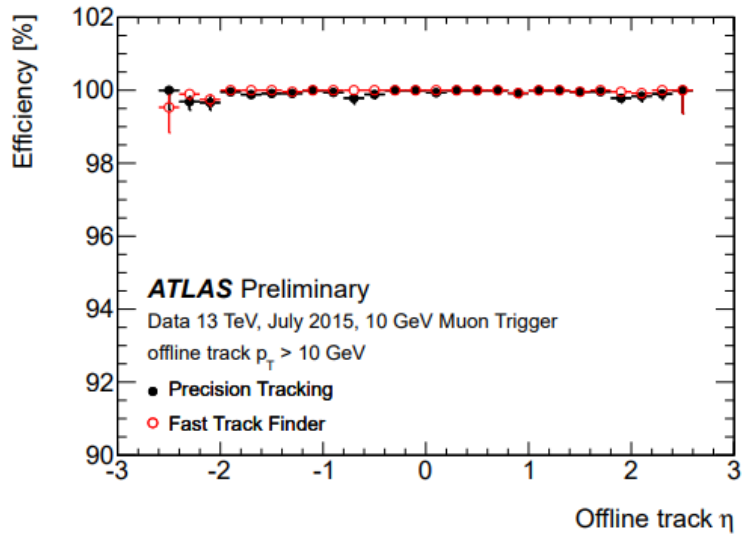


図 34:  $\eta$  に対する FTF(赤) と PT(黒) のトリガー効率 [13]

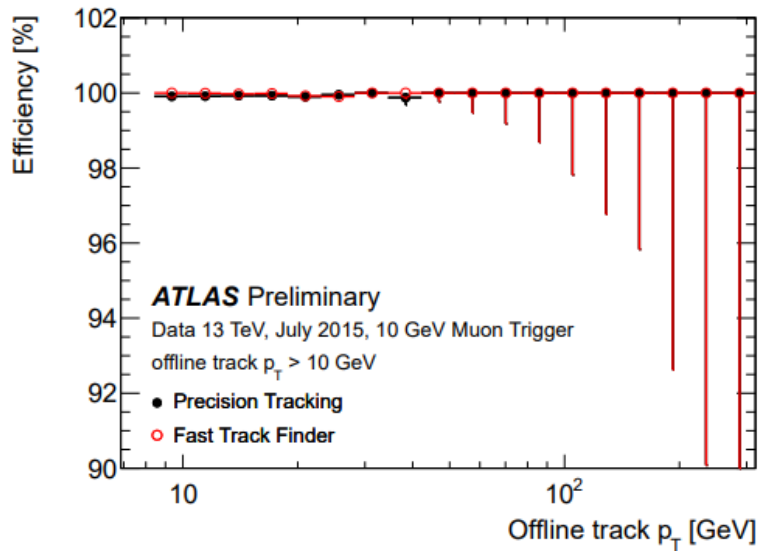


図 35:  $p_T$  に対する FTF(赤) と PT(黒) のトリガー効率 [13]

### 3.6 Fast Tracker (FTK)

LHC の高輝度化により、飛跡再構成の処理時間は膨大に増えると予想される。そのため、瞬時に内部飛跡を再構成可能であると期待されるハードウェアベースの高速飛跡トリガー (FTK) が開発されてきた。FTK のシステム概要とハードウェア構成は図 36、図 37 のようになっている。FPGA をカスケードにつないだ構造になっており、各 FPGA は図 36 に示される各機能を搭載している。図 37 に示される基板上のメモリチップにあらかじめ部分飛跡のパターンを保存し、パターンマッチングによりそれを高速に取り出すことで、飛跡再構成の高速化を実現している。FTK では、TRT を除く内部飛跡検出器のヒットから、L1 を通過した事象における 1GeV 以上の全飛跡のパラメータを求めることができる。それらの FTK によって再構成された飛跡は

HLT の再構成で利用することが可能である。

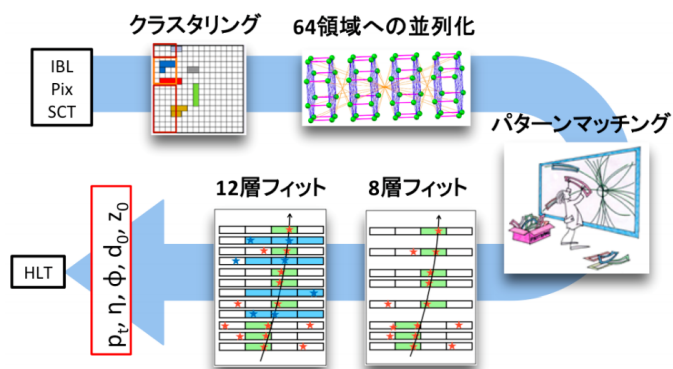


図 36: FTK のシステム概要 [14]

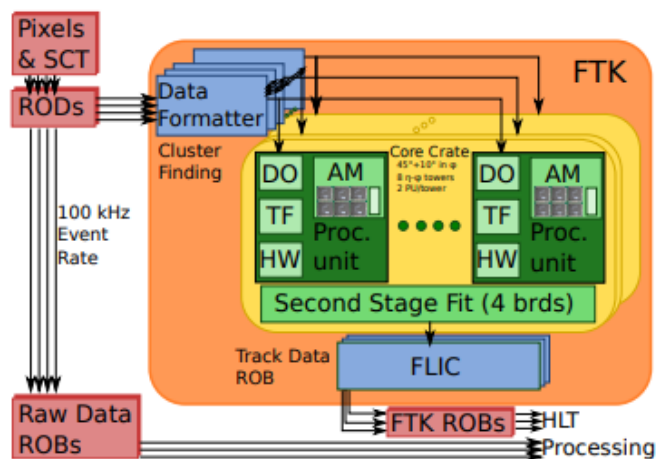


図 37: FTK のハードウェア構成 [15]

図 38 のように、FTK の処理時間は  $100 \mu\text{s}$  程度と期待される。また、飛跡再構成効率は図 39 のように、概ね 90% 以上と期待される。

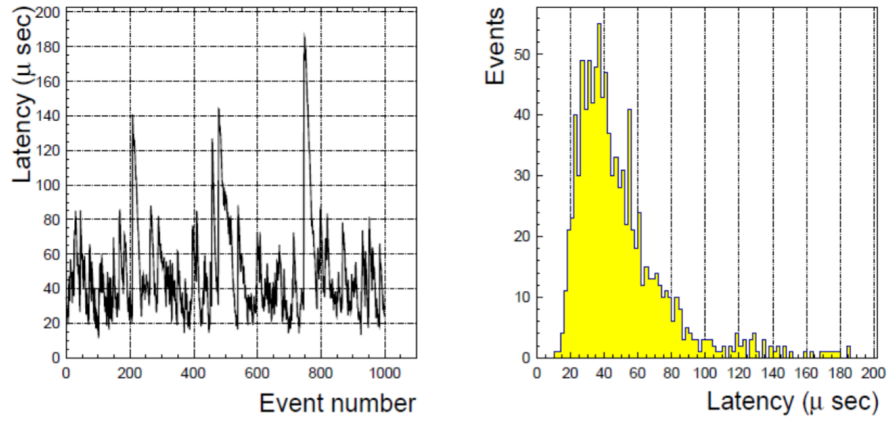


図 38:  $Z \rightarrow \mu\mu$  シミュレーション (パイルアップを含む) における FTK の処理時間 (Latency) 分布 [16]。左はイベントナンバー vs 処理時間、右は 1000 イベントの処理時間ヒストグラム。

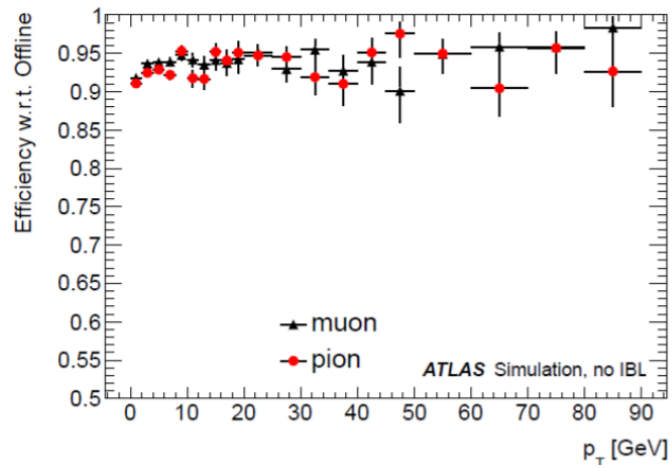


図 39: オフライン飛跡に対する FTK の飛跡再構成効率 [16]。黒がシングルミュオンシミュレーション、赤がシングルパイオンシミュレーション。

## 4 近接した複数ミュオンに対するハイレベルミュオントリガーの性能改良

現行のハイレベルミュオントリガーでは、二つのミュオンがミュオン検出器で近接している場合、同一のトリガーミュオンとして再構成してしまうことが多い。L2MuonSA ではトリガー効率を高めるため、ある程度広いロード内でミュオン検出器のヒット情報を集めるため、二つのミュオンが残したミュオン検出器のヒットが近接している場合、RPC ヒットのフィッティング、ロード内での MDT ヒットのフィッティングで同じものを用いてしまい、それにより同じフィッティング結果を出力しやすくなる。その場合、L2MuonSA での再構成結果は同一になりやすく、同一の L2MuonSA を用いて再構成される L2muComb も同一となってしまう。また、L2MuonSA で異なる再構成結果を出力しても、L2muComb で同じ FTF トラックにマッチングしてしまうこともある。これが、ハイレベルミュオントリガーで近接した二つのミュオンを再構成することが難しい理由となっている。近接した二つのミュオンを分離して再構成できない場合、マルチミュオントリガーでこのイベントを落としてしまう。マルチミュオントリガーとは、各トリガー段階でトリガーミュオンが二つ再構成されることを要求したトリガーチェーンである。このトリガーチェーンでは、再構成されたトリガーミュオンの  $p_T$  が二つともトリガーチェーンの閾値を超え、更に再構成された二つのトリガーミュオンが異なるトラックパラメータを持っている場合のみ、トリガー判定を行う。特に、二つのトリガーミュオンのトラックパラメータが同一の場合、その二つのトリガーミュオンをトリガーで除去することをオーバーラップリムーバルと呼ぶ。オーバーラップリムーバルは、隣り合う MDT 検出器が重なり合う領域にミュオンが飛んだ場合、複数の飛跡として再構成されることを防ぐために導入されている。

以上のように、近接した二つのミュオンをトリガーミュオンで再構成することが難しいため、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  等の複数の近接したミュオンを終状態に含むような物理現象を逃してしまっている。そこで、本研究では、その問題を解決するために、FTK を用いた新しいハイレベルミュオントリガーと、FTF を用いた新しいハイレベルミュオントリガーを開発し、バレル部で評価した。評価は、オフライン再構成されたミュオン（オフラインミュオン）に対して、トリガーミュオンが再構成されているかという基準に基づいて行った。また、評価を行ったトリガーチェーンは  $p_T$  閾値が 4GeV のトリガーチェーンである。サンプルは、二つのミュオンに崩壊する 0GeV から 400GeV までのフラットな  $p_T$  分布を持つ  $J/\psi$  を衝突点で生成したシミュレーション<sup>\*5</sup>を用いた。また、以下の FTK を用いたハイレベルミュオントリガーの評価には、Run2 の環境でのシミュレーションを、FTF を用いたハイレベルミュオントリガーの評価には、Run3 の環境でのシミュレーションを用いた。これは、2020 年 1 月現在、Run2 から Run3 へのアップグレード期間であり、使用するトリガーフレームワークを移行しなければならなかったためである。しかし、Run2 と Run3 では、シミュレーション自体には大きな違いは無いと期待されている。

### 4.1 FTK を用いたハイレベルミュオントリガー

この章では、FTK を用いた新しいハイレベルミュオントリガーについて述べる。FTK は、内部飛跡検出器の情報を用いて、L1 を通過した RoI 内での 1GeV 以上の飛跡を再構成する。その再構成された飛跡情報はソフトウェアにより再フィットされ、ハイレベルミュオントリガーで使用することができる。現行の L2MuonSA, L2muComb では、再フィットされた飛跡 (FTK トラック) を用いていないが、FTK トラックを

---

\*5 バイルアップを含む

用いることで、L2MuonSA において、ミュオン検出器の情報に加え、内部飛跡検出器の情報を用いて、従来よりも精度の高い再構成を行うことができると期待される。また、ハイレベルミュオントリガーの初段である L2MuonSA で内部飛跡検出器の情報を用いることにより、従来では後段の EF で除去していた衝突点由来ではないミュオンに対して、L2MuonSA で除去することができ、EF までにそのような粒子を除去し、EF の入力となるミュオン候補を削ることが出来ると考えられる。そして、後段の EF でより時間をかけた再構成を行うことができると期待される。

図 40 に、FTK を用いたハイレベルミュオントリガーの概略図を示す。まず、L1 によって RoI が定義され、RoI の範囲内で、従来の RPC を基にした L2MuonSA と、L2MuonSA に次いで L2muComb を走らせる。この流れで再構成されたトリガーマュオンを RPC L2Muon と呼ぶ。RPC L2Muon に加えて RoI の中にある FTK トラックの数だけ FTK を基にした L2MuonSA を走らせる。FTK を基にした L2MuonSA とは、図 41 のように、衝突点での FTK トラックの向きから、磁場を考慮してミュオン検出器まで FTK を外挿し、そこでの飛跡のパラメータからロードを定義する。ロードが各層で定義されたら、従来の L2MuonSA と同様の方法でスーパーポイントを作成する。スーパーポイントが一つでも作成されたら、そのミュオンのトリガー判定は FTK トラックの  $p_T$  を用いることができる。従来の L2MuonSA では、磁場中でのミュオンの飛跡の曲がり具合を測定するには、位置と向きを持ったヒットパラメータ二つ以上必要であるため、スーパーポイントが二つ以上再構成されないと  $p_T$  を計算できなかったが、FTK を基にした L2MuonSA では、ミュオン検出器での磁場の曲がり具合を測定できなくても、内部飛跡検出器での  $p_T$  から、トリガー判定を行うことができる。また、スーパーポイントが二つ以上作成されたら、Look-up-table により計算される  $p_T$  も用いることができる。FTK トラックの  $p_T$  が従来の Look-up-table による  $p_T$  のどちらを用いるかは後述する。このような FTK を基にして再構成されたミュオンを FTK L2Muon と呼ぶ。

この新しいアルゴリズムでは、図 42 のように、一つの RoI につき、複数のトリガーマュオンを再構成することができる。更に、ミュオン検出器でのロードが近接し、そのロードから作成されたスーパーポイントが同一であっても、シードとした FTK が異なれば、FTK のトラックパラメータから、それらのトリガーマュオンを区別することができる。このような現象は、図 43 のように、IP では離れていても、二つのミュオンの電荷が異なるために、磁場の影響でミュオン検出器で近接するような事象で起こりうる。そのようなミュオン検出器で近接した二つのミュオンそれぞれに対して、この新しいアルゴリズムでは、二つのトリガーマュオンを再構成できると期待される。

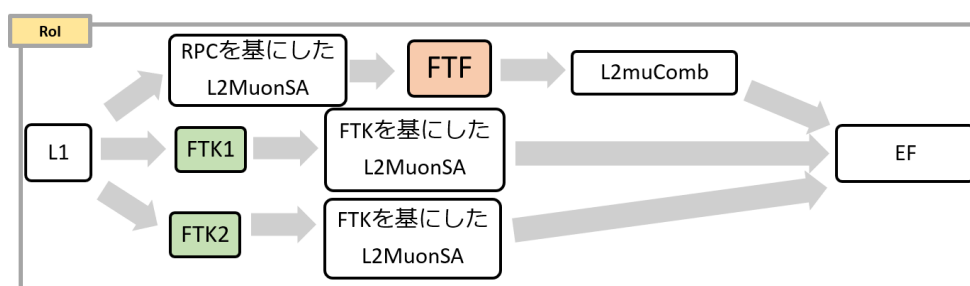


図 40: FTK を用いたハイレベルミュオントリガーの概略。RoI の中にある FTK トラックの数が二つの場合を示す。

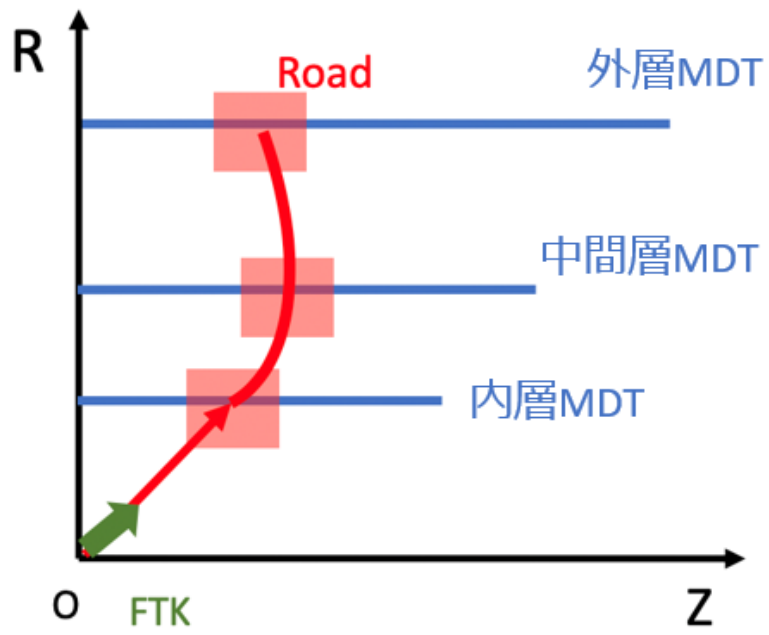


図 41: FTK を基にした L2MuonSA

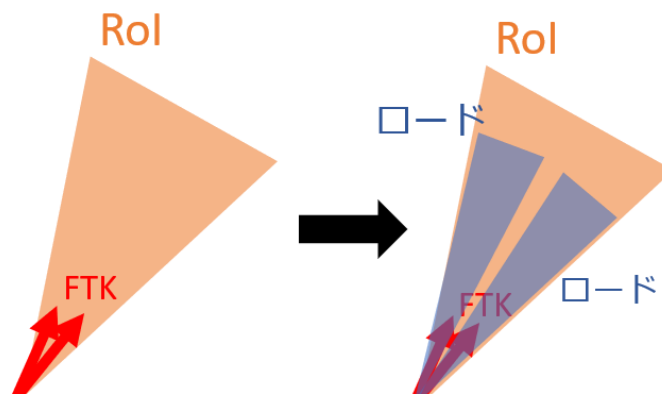


図 42: RoI 中にある複数の FTK トラックをシード。

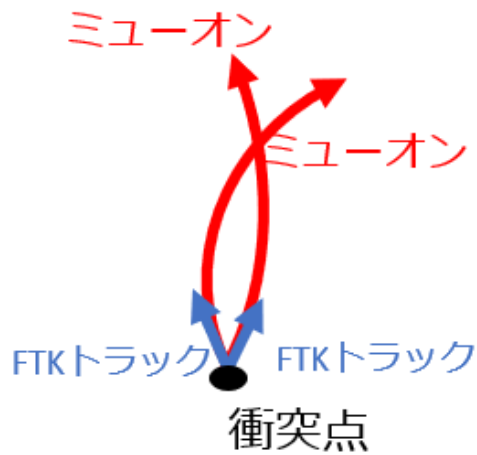


図 43: 衝突点では離れていた二つのミューオンがミューオン検出器で近接した場合。

## 4.2 FTK を用いたハイレベルミューオントリガーの評価

FTK を用いた新たなハイレベルミューオントリガーの評価を行う。まず、内部飛跡のミューオン検出器への外挿によるトリガーミューオン再構成ができていないかを調べる。ここでは、単独のミューオンに対する再構成を評価するため、近接した二つのミューオンではなく、ある程度二つのミューオンが離れていることを要求する。そのために、二つのオフラインミューオンのミューオン検出器での  $\Delta R = \sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^{2*6}}$  が  $\Delta R > 0.2$  を満たすことをイベントに要求する。図 44 に、二つのオフラインミューオンの  $\Delta R$  を示す。また、図 45 に、衝突点での  $\Delta R$  とミューオン検出器での  $\Delta R$  の関係を示す。

\*6  $\Delta\eta, \Delta\phi$  は、二つのオフラインミューオンのパレルミドルステーションでの位置情報  $\eta, \phi$  の差である。

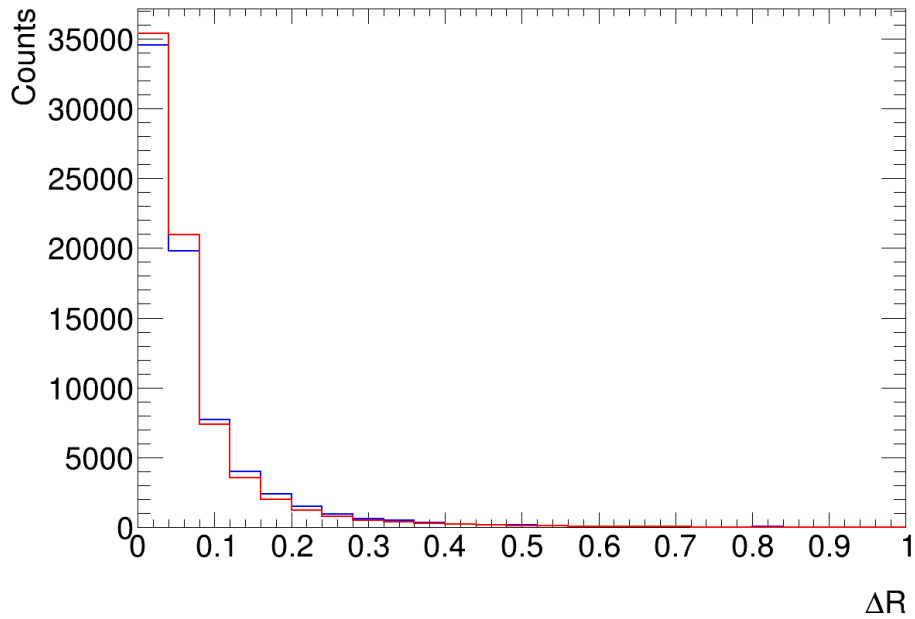


図 44: 二つのオフラインミュオンの  $\Delta R$ 。赤は衝突点での  $\Delta R$ 、青はミュオン検出器での  $\Delta R$  を示す。

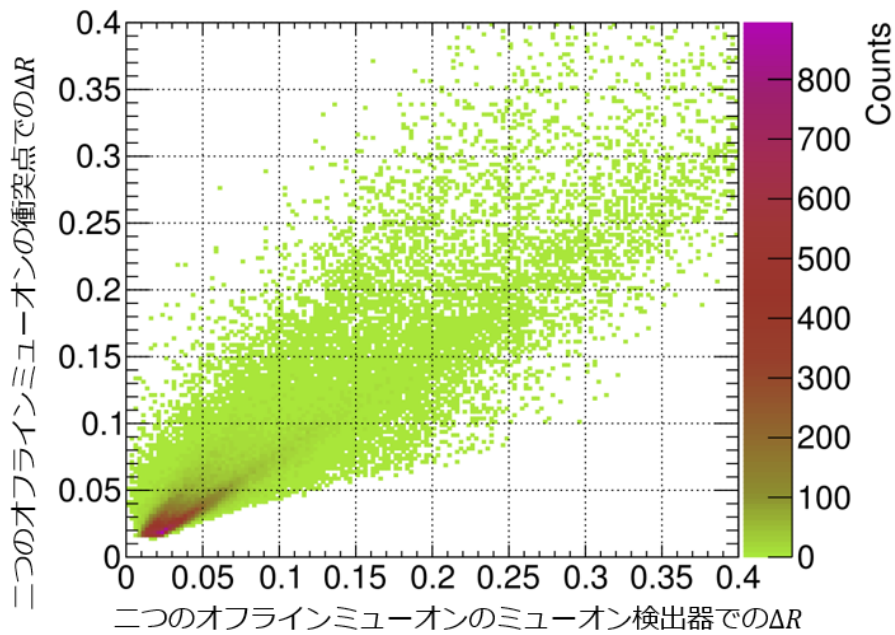


図 45: 二つのオフラインミュオンのミュオン検出器での  $\Delta R$  と衝突点での  $\Delta R$  の関係。

$\Delta R > 0.2$  を満たす二つのオフラインミュオンが存在するイベントにおいて、二体の不変質量が  $J/\psi$  の質量付近である電荷の異なる二つのオフラインミュオンに対して、それぞれにトリガーミュオンをマッチングさせる。まず、次の条件を満たす L1 RoI をオフラインミュオンにマッチさせる。

- L1 での RoI の位置とオフラインミュオンが通過したミュオン検出器の位置の距離  $\Delta R_{\text{RoI}}$  が式 (3)

を満たす。<sup>\*7</sup>

$$\Delta R_{\text{RoI}} < \begin{cases} -0.01 \times p_{T,\text{offline}} + 0.18 & (p_{T,\text{offline}} < 10 \text{ GeV}) \\ 0.08 & (p_{T,\text{offline}} > 10 \text{ GeV}) \end{cases} \quad (3)$$

$\Delta R > 0.2$  の条件により、これらの L1 RoI は異なるものがマッチされている。

図 46 に、二つのオフラインミュオンから計算した不変質量を示す。 $J/\psi$  の質量は  $3.09\text{GeV}$  であるため、二つのオフラインミュオンから計算した不変質量が  $(3.09 - 0.5)\text{GeV}$  から  $(3.09 + 0.5)\text{GeV}$  の範囲であれば、その二つのオフラインミュオンが  $J/\psi$  の崩壊によるものであるとする。

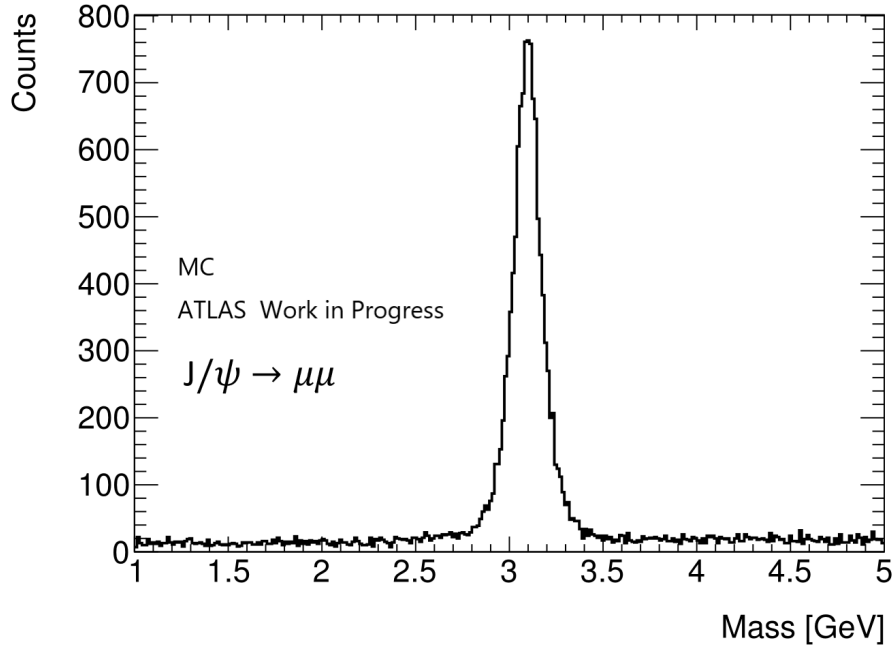


図 46: 二つのオフラインミュオンから計算された不変質量分布。

通常、一つの RoI につき、再構成されるトリガーミュオンは一つであるため、オフラインミュオンと RoI がマッチしたら、オフラインミュオンとその RoI 由来の L2MuonSA, L2muComb, EF でのトリガーミュオンとをマッチすることができる。しかし、新しいアルゴリズムでは、一つの RoI につき、複数のトリガーミュオンが再構成されることがある。その場合はオフラインミュオンと最も  $\Delta R$  が小さくなるようなトリガーミュオンをオフラインミュオンとマッチする。このようにして、オフラインミュオンとマッチしたトリガーミュオンを比較することにより、トリガーの性能を調べることができる。

まず、新しいアルゴリズムにより、再構成されるトリガーミュオンがどのくらい増えるかを調べた。トリガーミュオンの数が増えると、それに伴いミュオントリガーの処理時間も増えるため、トリガーミュオンの数を調べることは重要である。オフラインミュオンに対して、オフラインミュオンとマッチした RoI の中にある FTK トラックの数の割合を図 47 に示す。ただし、フェイクミュオンが多い  $p_T \leq 3\text{GeV}$  の FTK トラックは図 47 には含めていない<sup>\*8</sup>。図 47 によると、FTK の数は二つか三つである場合が大多数を占める。これにより、処理時間は膨大には増えないと期待される。ところで、オフラインミュオン

<sup>\*7</sup>  $\Delta R_{\text{RoI}}$  の満たす条件は、オフライン再構成されたミュオンの  $p_T$  である  $p_{T,\text{offline}}$  の値によって、異なったものを用いている。 $p_T$  が小さいほど、ミュオンが大きく曲がるので、 $p_T$  の低いミュオンには、緩い制限をかけている。

<sup>\*8</sup> ミュオントリガーの  $p_T$  閾値は低くとも  $4\text{GeV}$  であるため、 $3\text{GeV}$  程度以下の FTK トラックは除去する。

$p_T \lesssim 10\text{GeV}$  では、FTK トラックの数が少なくなっている。これはトリガーチェーンとして、L1 RoI の領域にある FTK トラックを L2MuonSA のインプットとして渡すが、L1 RoI の領域にあるという判定は、FTK トラックの位置情報が RoI の位置情報の範囲内であるかを用いている。しかし、L1 RoI はミュオン検出器の位置情報で指定されるが、FTK トラックは衝突点での位置情報を持っている。低い  $p_T$  を持つミュオンは磁場により良く曲がるため、衝突点とミュオン検出器の位置情報のずれは大きくなりやすい。そのため、低い  $p_T$  を持つミュオンに対しては、本来 FTK トラックがある範囲ではなく、ずれた範囲の FTK トラックを L2MuonSA のインプットとして用いてしまう。そのため、FTK トラックの数が少なくなっている。しかし、高い  $p_T (\gtrsim 10\text{GeV})$  では、FTK トラックの数は問題ないと考えられる。

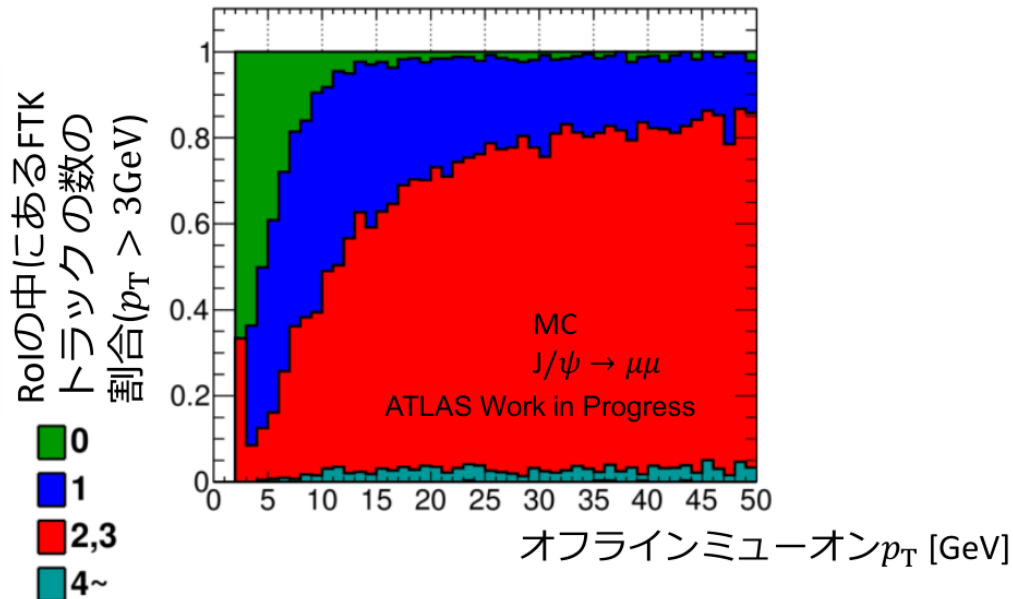


図 47: オフラインミュオンとマッチングした RoI の中にある FTK トラックの数 ( $p_T > 3\text{GeV}$ ) の割合。

次に、FTK トラックの外挿によるロード (FTK ロード) と、従来の RPC フィットによって作られたロード (RPC ロード) を比較した。図 48, 図 49, 図 50 は、バレル部の MDT 内層、中間層、外層におけるオフラインミュオンの部分飛跡とロードの中心線の距離を示している。FTK ロードは、RPC ロードに比べて、内層ではオフラインミュオンの部分飛跡に対する精度が良い。内層で RPC ロードの精度が悪いのは、RPC がバレル部の中間層と外層にはあって、内層にはないため、内層では中間層と外層のロードから推定しているが、その推定が悪いためと考えられる。中間層、外層で RPC ロードに比べて、FTK ロードの精度は良くないのは、FTK トラックの外挿において、カロリメータでのエネルギー損失の不定性により磁場での曲がり具合の推定が悪くなっているためであると考えられる。FTK L2Muon では、スーパーポイントが各層で一つでも作成できた場合、そのトリガーミュオンの  $p_T$  として、FTK トラックの  $p_T$  を用いることができる。そのため、中間層、外層で FTK ロードの精度が悪くても、内層でスーパーポイントを作成できていれば、問題はないと考えられる。

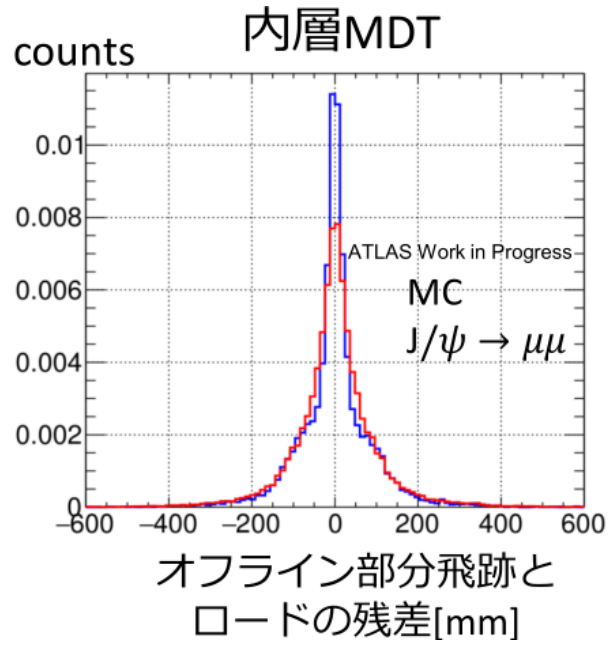


図 48: バレル内層 MDT におけるオフラインセグメントとロードの距離。赤:RPC ロード、青:FTK ロード。

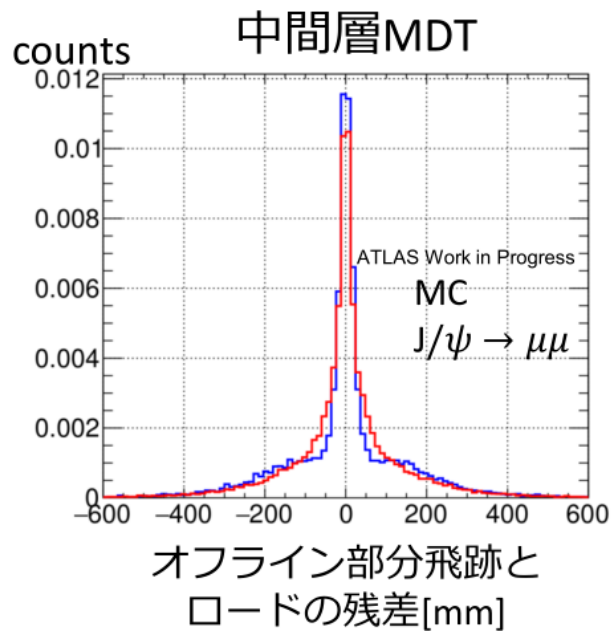


図 49: バレル中間層 MDT におけるオフラインセグメントとロードの距離。赤:RPC ロード、青:FTK ロード。

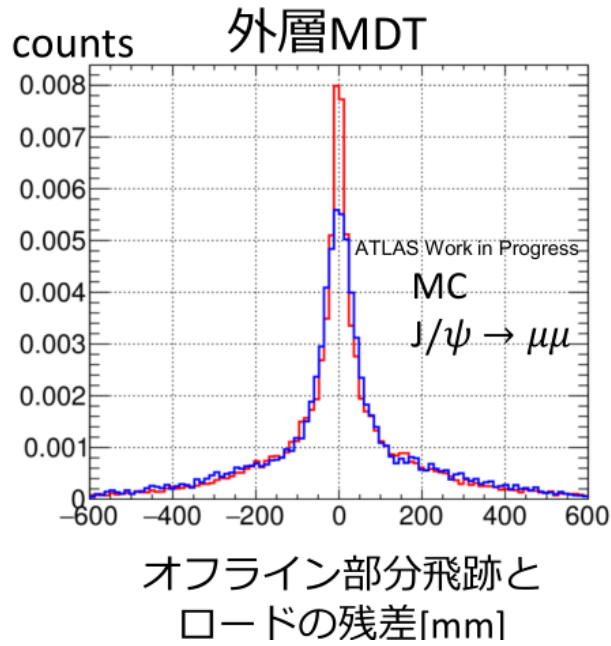


図 50: バレル外層 MDT におけるオフラインセグメントとロードの距離。赤:RPC ロード、青:FTK ロード。

新しいアルゴリズムによってどれだけスーパーポイントが作成されたかを調べるために、オフラインミュオンとマッチした L2MuonSA の再構成されたスーパーポイントの数の割合をオフラインミュオンの  $p_T$  に対して計算した。図 51 は、FTK ロードと RPC ロードを用いた場合であり、図 52 は、RPC ロードを用いた場合である。FTK ロードでは、RPC ロードに比べて、内層の精度が良く、中間層、外層の精度が悪いため、スーパーポイントの総数は少なくなっている。FTK トラックの外挿精度が悪いので、FTK トラックの  $p_T$  に応じて、ロードの大きさを RPC ロードとは別のものを用いるなどすることが必要であり、ロードの大きさの最適化は今後の課題である。

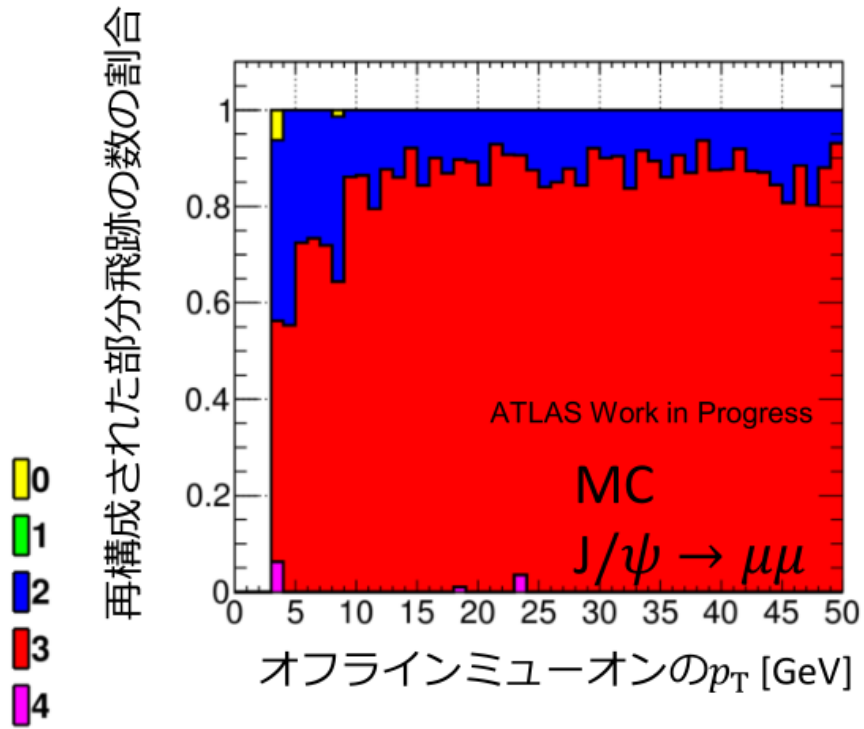


図 51: オフラインミュオンとマッチした FTK ロードと RPC ロードによるトリガーミュオンの持つスーパーポイントの数の割合。

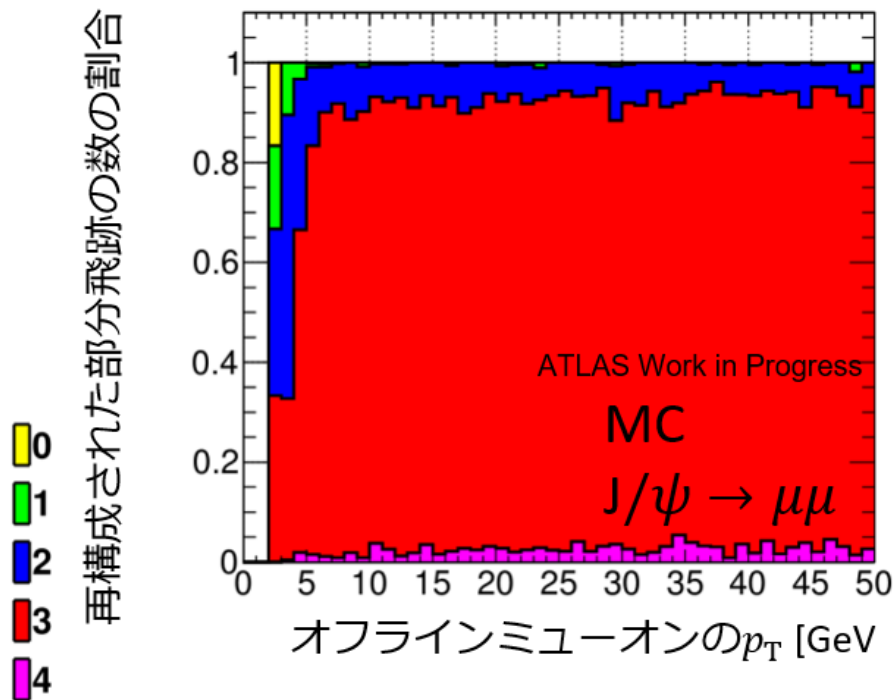


図 52: オフラインミュオンとマッチした RPC ロードによるトリガーミュオンの持つスーパーポイントの数の割合。

FTK ロードの場合、スーパーポイントが一つであればFTKトラックの  $p_T$  をトリガー判定に用いることができる一方で、スーパーポイントが二つ以上あれば、従来の Look-up-table を用いて  $p_T$  を計算することができる。マッチしたオフラインミュオンの  $p_T$  に対して、どちらが精度よく計算されているかを調べるために、以下の  $p_T$  residual を測定した。

$$p_T \text{ residual} = \frac{1/p_{T,\text{offline}} - 1/p_{T,\text{trig}}}{1/p_{T,\text{offline}}} \quad (4)$$

ここで、 $p_{T,\text{offline}}$  はオフラインミュオンの  $p_T$  であり、 $p_{T,\text{trig}}$  は比較するトリガーで計算された  $p_T$  である。

式 (4) により、FTK L2Muon と RPC L2Muon において、どちらもスーパーポイントが二つ以上あり、Look-up-table から計算した  $p_T$  をオフラインミュオンの  $p_T$  と比較した  $p_T$  residual は図 53 のようになった。FTK L2Muon はスーパーポイントの精度が悪いため、Look-up-table から計算される  $p_T$  も RPC L2Muon に比べて、 $p_T$  の精度が悪いことがわかる。一方、FTK L2Muon において、スーパーポイントが一つであればFTKトラックの  $p_T$  を FTK L2Muon の  $p_T$  とした場合、図 54 のようになった。FTKトラックはソフトウェアにより再フィットされた飛跡であり、 $p_T$  分解能に優れているので、FTKトラックの  $p_T$  を FTK L2Muon の  $p_T$  とすると、RPC L2Muon よりも  $p_T$  residual が良くなることがわかる。

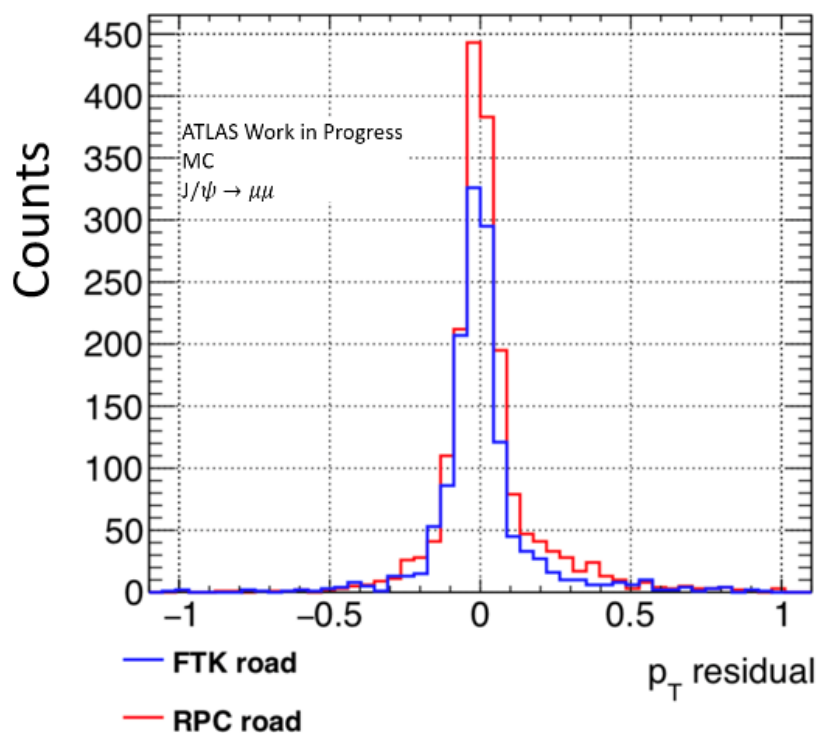


図 53: 青:FTK ロードを用いてスーパーポイントが二つ以上再構成された場合の  $p_T$  residual。ただし、 $p_T$  には Look-up-table の  $p_T$  を用いている。赤:RPC ロードを用いた場合の  $p_T$  residual。

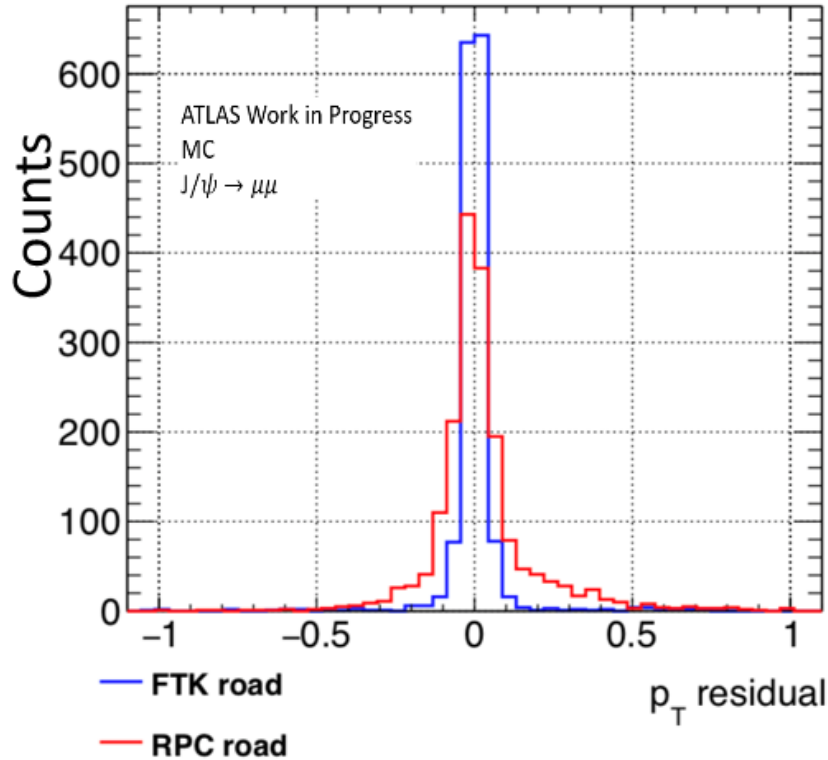


図 54: 青:FTK ロードを用いた場合の  $p_T$  residual。ただし、 $p_T$  には FTK トラックの  $p_T$  を用いている。赤:RPC ロードを用いた場合の  $p_T$  residual。

次に、FTK を用いたハイレベルミュオントリガーのシングルミュオントリガーチェーンでのトリガー効率を調べた。図 55 に、シングルミュオントリガーチェーンにおける L1 をパスしたミュオンに対するハイレベルミュオントリガーの効率を示す。ただし、FTK ロードによるトリガーミュオン (FTK L2Muon) と RPC ロードによるトリガーミュオン (RPC L2Muon) の両方をトリガー判定に用いた場合、FTK L2Muon のみをトリガー判定に用いた場合、RPC L2Muon のみをトリガー判定に用いた場合の 3 種類を比較している。また、FTK L2Muon と RPC L2Muon の両方をトリガー判定に用いた場合では、オフラインミュオンとの  $\Delta R$  が最も小さくなるようなものがトリガーの  $p_T$  閾値を超えているかをトリガー判定とする。RPC のみを使用した従来の場合に比べて、FTK L2Muon と RPC L2Muon の両方をトリガー判定に用いた場合では、5GeV 付近でトリガー効率が少し上がっていることがわかる。これは、RPC ロードではスーパーポイントが一つしか再構成することができなかったミュオンに対して、FTK ロードではスーパーポイントが一つしかなくても再構成できるため、FTK ロードにより、今までトリガーで落としていたミュオンを取得できているからであると考えられる。ただし、従来の RPC ロードのトリガー効率は既に 1 に近く、FTK ロードを加えて使用しても、シングルミュオンに対しては効果が小さいことがわかる。一方で、FTK L2Muon のみの場合は、RPC ロードのみの場合に比べて、 $p_T \lesssim 10\text{GeV}$  でトリガー効率が落ちている。図 47 で示されるように、 $p_T \lesssim 10\text{GeV}$  ではハイレベルミュオントリガーで使用することのできる FTK トラックの数が少ないため、この領域では、これらのミュオンをトリガーできていないと考えられる。

以上から、シングルミュオンに対しては、FTK ロード単体ではトリガー効率が従来よりも落ち、FTK ロードと RPC ロードの両方を使った場合は、トリガー効率がわずかに回復したことがわかった。

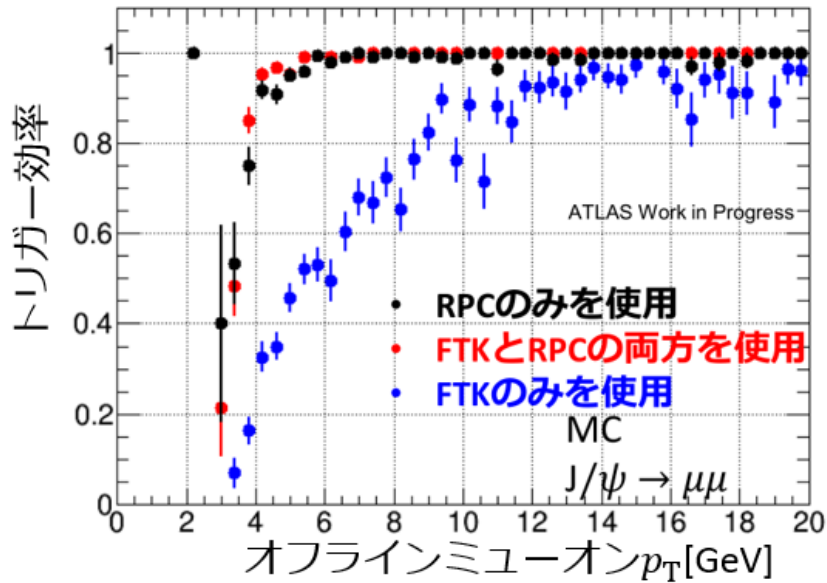


図 55: 閾値 4GeV のミュオントリガーの L1 に対するハイレベルミュオントリガーのトリガー効率。赤は RPC L2Muon のみ、青は FTK L2Muon のみ、黒は RPC L2Muon と FTK L2Muon の両方をトリガー判定に用いた場合を示す。

次に、マルチミュオンに対する FTK を用いたハイレベルミュオントリガーの評価を行う。なお、ここでは、二つのオフラインミュオンのミュオン検出器での  $\Delta R$  が  $\Delta R > 0.2$  を満たすことを要求しない。まず、 $J/\psi$  由来の二つのオフラインミュオンに対し、それぞれ L1 RoI をマッチングさせる。その二つの L1 RoI が L1 閾値を超えていることを要求し、二つのオフラインミュオンと最も  $\Delta R$  が小さくなるような L2Muon をそれぞれマッチさせる。そのようにして、選んだ二つの L2Muon のうち、それぞれのトラックパラメータが異なり、トリガー閾値を超えている割合を分離率とする。FTK L2Muon と RPC L2Muon の両方をオフラインミュオンとのマッチングに用いた場合の分離率を二つのオフラインミュオンのミュオン検出器での  $\Delta R$  に対して測定すると、図 56 のようになった。ここで、 $\Delta R$  は二つのオフラインミュオンがパレルミドルステーションでどれだけ近接しているかを表し、 $\Delta R$  が小さいほど近接していることを示す。また、分離率の計算においては、図 55 で示されるように、 $p_T \lesssim 10\text{GeV}$  では、FTK L2Muon のトリガー効率が RPC L2Muon に比べて悪いので、分離率の計算においてはオフラインミュオンの  $p_T$  が 10GeVであることを要求した。図 56 のように、従来のアルゴリズムでは、 $\Delta R \lesssim 0.15$  において、二つの L2Muon を分離することができていなかった。一方、新しいアルゴリズムでは、90% 以上で分離をすることができた。これは、ミュオン検出器で二つのミュオンが近接していても、内部飛跡検出器での飛跡を分離することができれば、二つのミュオンをトリガーでそれぞれ再構成できることを示している。また、図 57 にオフラインミュオンに FTK L2Muon のみをマッチさせた場合の分離率を示す。FTK トラックの再構成割合が 90% 程度であること、FTK ロードの精度が悪いことにより、RPC L2Muon と FTK L2Muon の両方を用いた場合よりも、この場合の方が分離率が落ちていると考えられる。

以上のようにマルチミュオンに対する新しい FTK を用いた L2Muon の評価を行い、その結果、FTK L2Muon と RPC L2Muon を組み合わせた新しいアルゴリズムでは、ミュオン検出器で近接した二つのミュオンを分離し、トリガーすることができることがわかった。

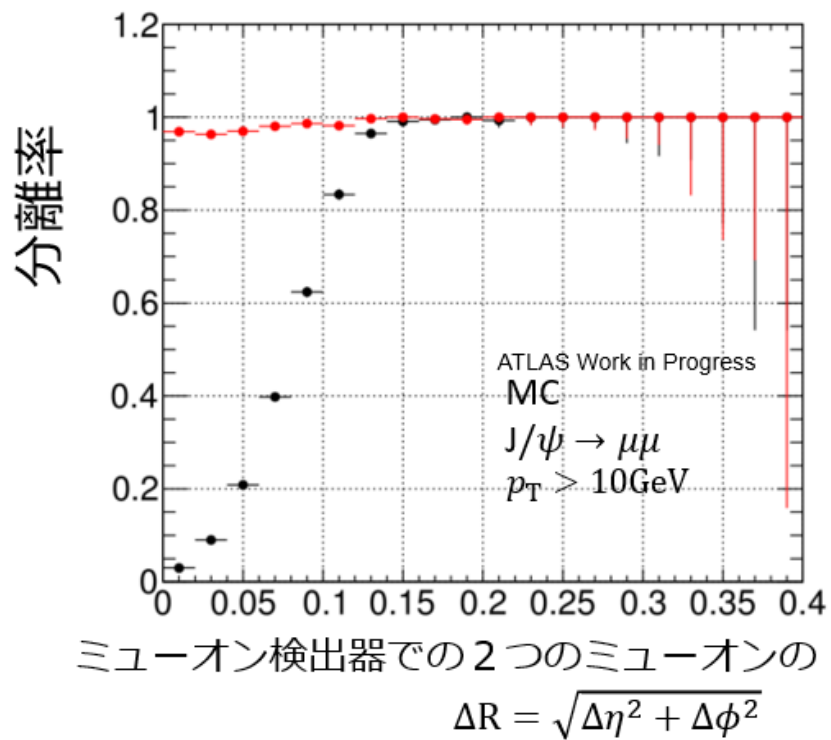


図 56: ミュオン検出器での二つのオフラインミュオンの  $\Delta R$  に対する二つの L2Muon の分離率。黒は従来のアルゴリズム、赤は FTK L2Muon と RPC L2Muon を用いた場合を示す。

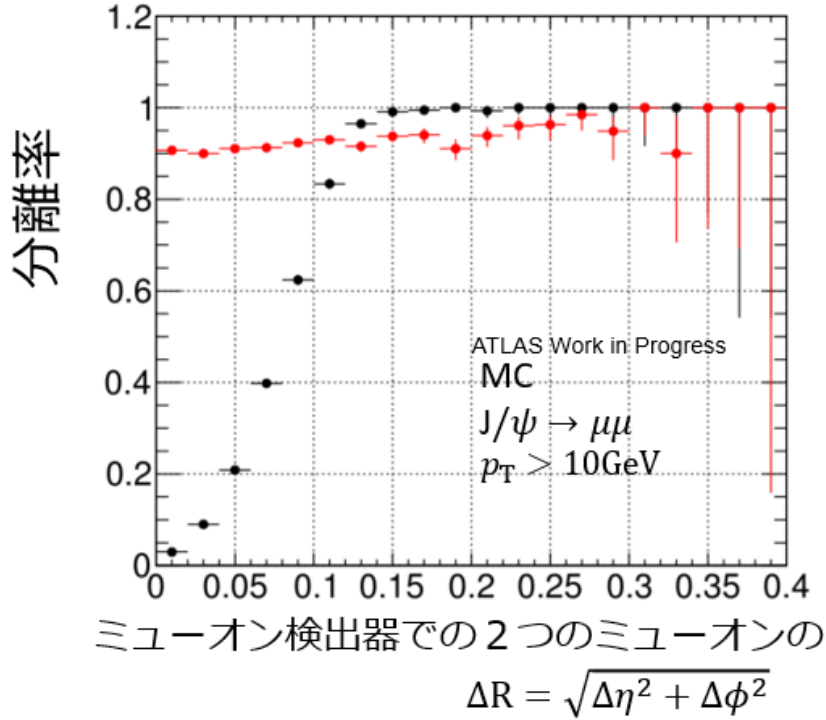


図 57: ミューオン検出器での二つのオフラインミューオンの  $\Delta R$  に対する二つの FTK L2Muon の分離率。黒は従来のアルゴリズムの場合、赤は FTK L2Muon を用いた場合を示す。

### 4.3 FTF を用いたハイレベルミューオントリガー

この章では、FTF を用いた新しいハイレベルミューオントリガーについて述べる。FTF は、内部飛跡検出器の情報を用いて、L1 を通過した RoI 内での飛跡をソフトウェアにより再構成する。FTF は処理に時間がかかるため、従来のハイレベルミューオントリガーでは、L2MuonSA において FTF を使用せず、L2muComb において FTF を使用している。図 40 における FTK L2Muon のように、ハイレベルミューオントリガーの初めからミューオン検出器への FTF の外挿によるトリガーミューオン再構成を走らせることができない。しかし、FTK に比べて、FTF の再構成効率は高いので、FTF の外挿を用いることによって、FTK を用いたハイレベルミューオントリガーよりも高い分離率を達成できると考えられる。さらに、L2MuonSA の後に FTF トラックの再構成を行うことで、3.5 で説明したように L2MuonSA の飛跡を衝突点まで外挿したものを中心とした領域で FTF トラックを再構成することができる。したがって、図 47 のような低い  $p_T$  で内部飛跡の数が少なくなるような現象を防ぐことができる。

図 58 に、FTF を用いたハイレベルミューオントリガーの概略図を示す。まず、L1 によって RoI が定義され、RoI の範囲内で、従来の RPC を基にした L2MuonSA (RPC L2Muon) と、それに次いで L2MuonSA のオーバーラップリムーバルを走らせる。オーバーラップリムーバルを通過したら、L2MuonSA の飛跡を衝突点まで外挿したものを中心とした領域を RoI として、RoI の中で FTF トラックを再構成する。そして、RoI の中にある FTF トラックの数だけ FTF を基にした L2MuonSA (FTF L2Muon) を走らせる。FTF L2Muon の再構成方法は FTK L2Muon と同様に、FTF ロードを平行部の MDT 各層で定義して、スーパーポイントの作成を試みる。スーパーポイントが一つでも作成されたら、その FTF L2Muon の閾値判定に

は FTF トラックの  $p_T$  を用いる。FTK L2Muon と同様に、FTF L2Muon では、ミュオン検出器で近接している二つのミュオンに対して、それぞれ二つのミュオンを再構成できると考えられる。

図 55 で示されるように、シングルミュオントリガーチェーンに対しては、既に RPC L2Muon で高いトリガー効率を達成しているため、この FTF を用いたハイレベルミュオントリガーは、マルチミュオントリガーチェーンのみで用いることとする。ただし、並行して走っている通常のシングルミュオントリガーチェーンで再構成された FTF を、このマルチミュオントリガーチェーンで使用することができる。そのため、このトリガーでは、FTF トラック自体の再構成をする必要がない。従来のマルチミュオントリガーと比較して、FTF トラックのミュオン検出器への外挿と FTF ロード内での MDT ヒットのフィッティングの時間は余分にかかると考えられる。

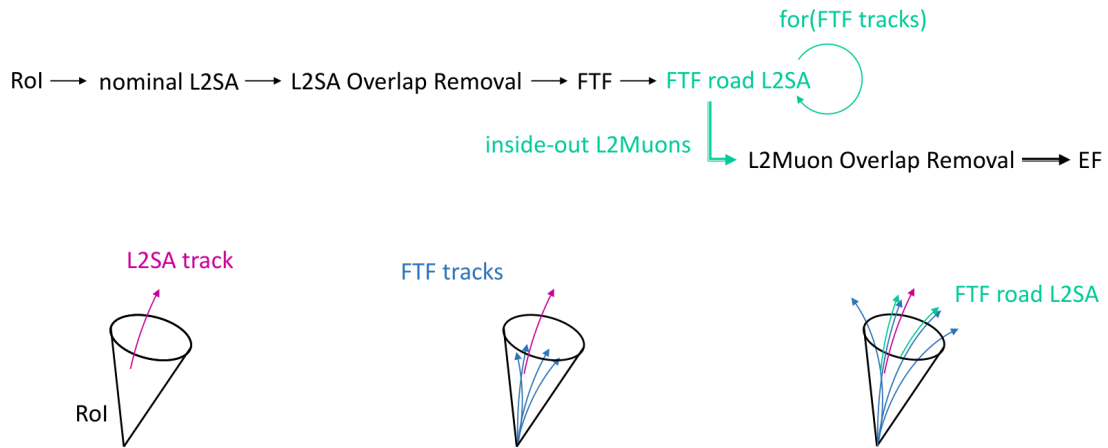


図 58: FTF を用いたハイレベルミュオントリガーの概略。

マルチミュオンに対しての FTF を用いたハイレベルミュオントリガーの評価を行う。なお、ここでは、二つのオフラインミュオンのミュオン検出器での  $\Delta R$  が  $\Delta R > 0.2$  を満たすことを要求しない。FTK の場合と同様に、二つのオフラインミュオンを選択し、それぞれに各トリガー段階のトリガーミュオンをマッチングさせる。L1, L2MuonSA でのマッチングは FTK を同様の方法を用いる。オフラインミュオンとマッチさせる FTF L2Muon には、オフラインミュオンと最も  $\Delta R$  が小さくなるような FTF トラックをシードとした FTF L2Muon を用いる。マッチした FTF L2Muon が持つスーパーポイントの数が一つ以上あり、シードとした FTF トラックの  $p_T$  がトリガー閾値を超えている場合、トリガー判定を行う。

FTF を用いたハイレベルミュオントリガーはマルチミュオントリガーチェーンのみに用いることを想定し、FTK を用いたハイレベルミュオントリガーとは、トリガー段階の順序が異なるので、FTK の場合とは分離率の計算が異なる。一般的に、マルチミュオントリガーでは、L1 の段階で二つの RoI が異なる場合のみトリガー判定を行っている。よって、図 58 の RPC L2MuonSA には、二つの異なる RoI がインプットされる。それぞれの RoI で RPC L2MuonSA が再構成される。ここで再構成された二つの RPC L2MuonSA は同一であってもよい。再構成された RPC L2MuonSA の  $p_T$  が閾値を超えていれば、FTF トラックの数だけ FTF L2Muon が再構成される。再構成された FTF トラックのうち、どれか二つでも  $p_T$  閾値を超え、異なるトリガーミュオンとして再構成されていれば、トリガー判定をする。

#### 4.4 FTF を用いたハイレベルミュオントリガーの評価

二つのオフラインミュオンにマッチしたそれぞれの L1 RoI が  $p_T$  閾値を超えたうえで異なり、マッチしたそれぞれの L2MuonSA が閾値を超えていることを要求する。そのような二つのオフラインミュオンに対して、衝突点での  $\Delta R$  が最も小さくなるような FTF トラックをそれぞれにマッチさせる。それらの FTF トラックがミュオン検出器でスーパーポイントの一つ以上再構成した場合において、二つのオフラインミュオンそれぞれにマッチした FTF トラックが異なれば、FTF L2MuonSA によって、それらのオフラインミュオンは分離されたと評価することができる。このようにして異なる二つの L1 RoI に対する FTF L2Muon の分離率を求めたのが図 59 である。FTF L2Muon により、異なる二つの RoI を分離できたことがわかった。図 57 の FTK L2Muon を用いた場合の二つの L1 RoI に対する分離率に比べて、図 59 の FTF L2Muon の方が分離率が高いのは、FTF L2Muon は異なる二つの L1 RoI を入力としたトリガーチェーンであることと、FTF の方が FTK よりも再構成精度が高いことが寄与していると考えられる。図 60 に、RPC L2Muon と FTF L2Muon のオフラインミュオンに対する  $p_T$  residual を示す。FTK L2Muon と同様に、従来の RPC L2Muon に比べて、FTF L2Muon は、オフラインミュオンに対する  $p_T$  の精度が良いことがわかる。

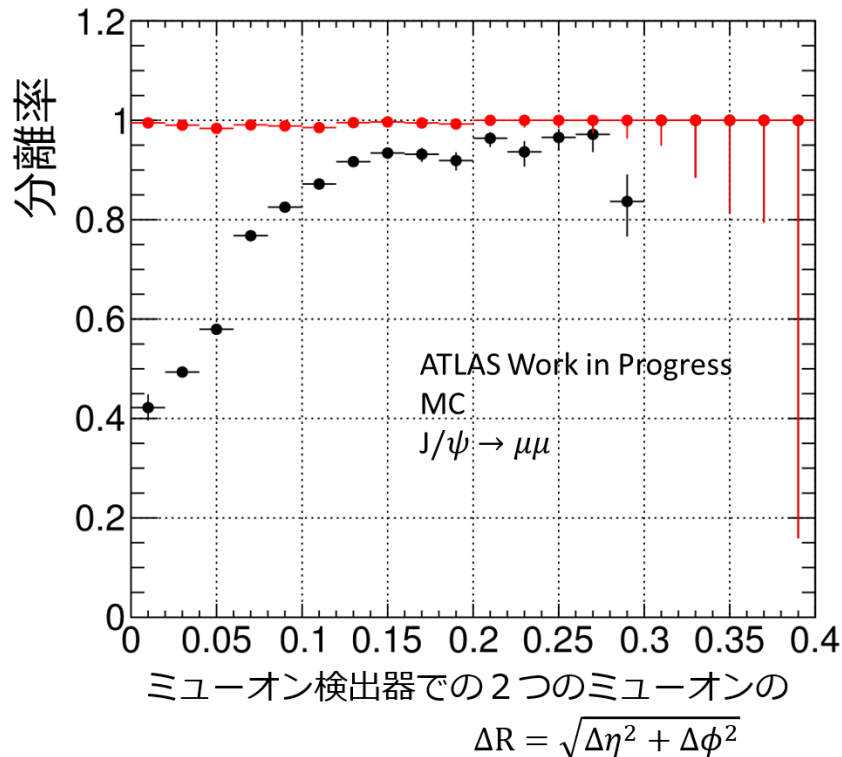


図 59: ミュオン検出器での二つのオフラインミュオンの  $\Delta R$  に対する二つの FTF L2Muon の分離率。黒は RPC L2Muon、赤は FTF L2Muon を用いた場合を示す。ここでは、二つの L1 RoI が異なる場合を示している。

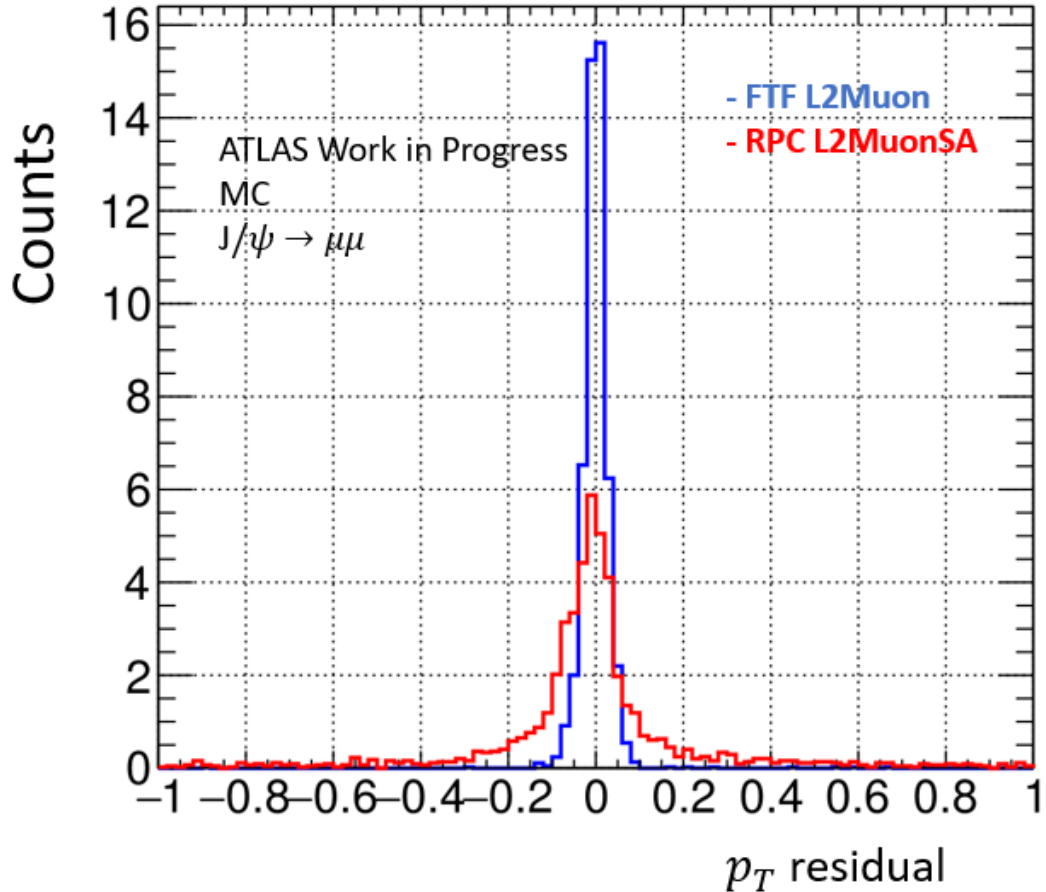


図 60: 青:FTF ロードを用いた場合の  $p_T$  residual. 赤: RPC L2Muon の  $p_T$  residual.

オフラインミュオンとマッチした L1 RoI 中にある FTF トラック ( $p_T > 3\text{GeV}$ ) の数は図 61 のようになった。図 47 と比べると、FTF の方が RoI 中にある FTF トラックの数は多い。これは、FTK の場合は、上述の衝突点とミュオン検出器の位置の差によるものと、FTF の方が FTK よりも再構成精度が高いことによると考えられる。この新しい FTF を用いたハイレベルミュオントリガーの処理時間を測定し、処理時間がトリガー全体での要求を超える場合は、RoI 中にある FTF トラック全てをシードとして L2Muon を再構成するのではなく、どの FTF トラックをシードとするかに条件をかけて再構成することが必要となってくる。オフラインミュオンを中心とした  $\Delta R < 0.1$  の範囲にある FTF トラックの数を図 62 に示す。 $\Delta R < 0.1$  の範囲に絞れば、FTF トラックの数は少なくなる。このように、ある範囲に入っている FTF トラックだけを FTF L2Muon 再構成のシードとすることによって、処理時間の削減を達成できると考えられる。例えば、衝突点での L2MuonSA の飛跡と FTF トラックの  $\Delta R$  を計算し、 $\Delta R$  がある値以下であれば、それを FTF L2Muon のシードとすることが一つの条件として考えられる。このような FTF トラックの選別条件を評価し定めるのは今後の課題である。

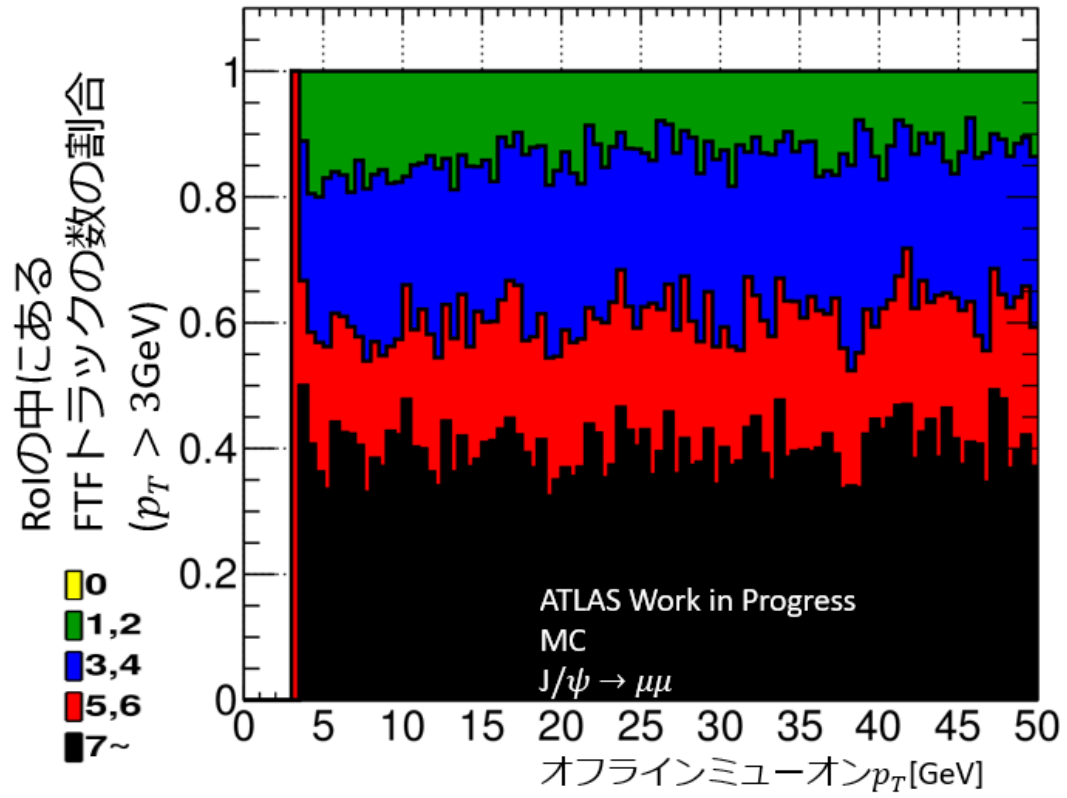


図 61: オフラインミュオンとマッチングした RoI 中にある FTF トラックの数 ( $p_T > 3\text{GeV}$ ) の割合。

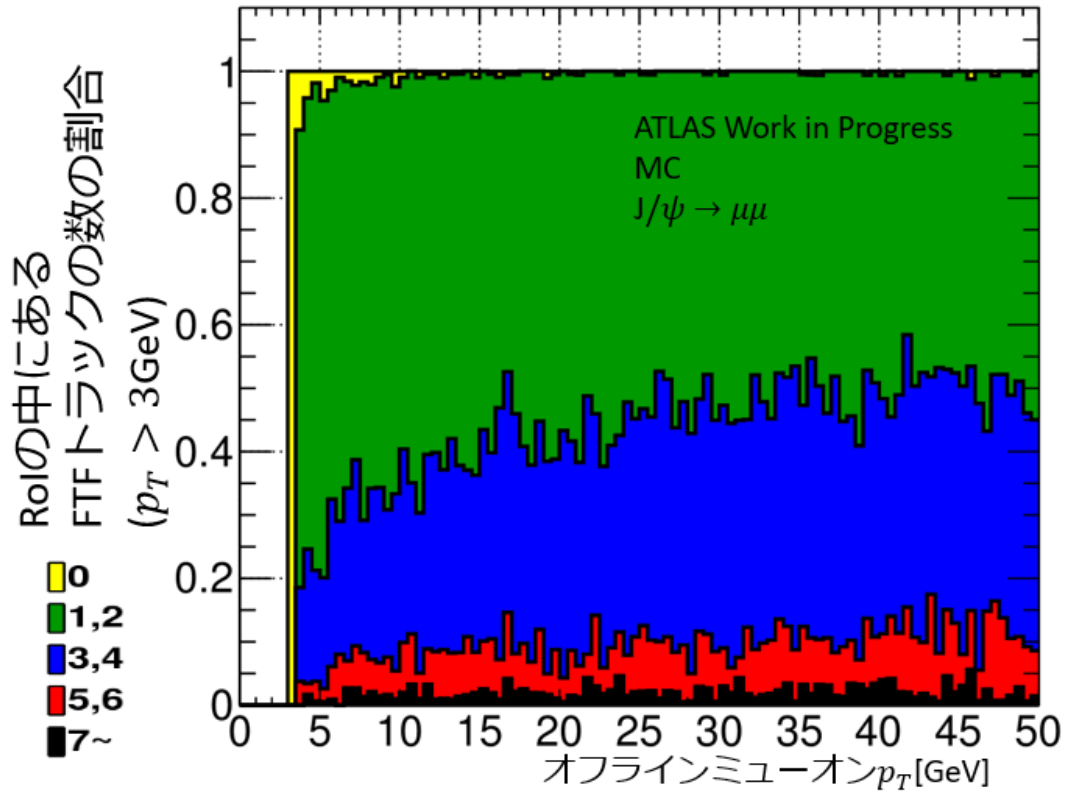


図 62: オフラインミューオンの  $\Delta R < 0.1$  の範囲にある FTF トラックの数 ( $p_T > 3\text{GeV}$ ) の割合。

## 5 結論と今後の展望

LHC(Large Hadron Collider) は、スイスのジュネーブ郊外にある陽子陽子衝突型円形加速器である。ATLAS 実験は、標準理論の精密測定や、標準理論を超えた物理現象の探索などの幅広い物理現象を対象にしている。

LHC は 2012 年までに Run1 の運転が終わり、2 年間のアップグレード期間を経て 2015 年から 2018 年まで Run2 が行われた。Run1 では重心系エネルギー 7 TeV, 8 TeV で陽子陽子衝突が行われた。Run2 では重心系エネルギー 13TeV で陽子陽子衝突が行われ、 $139\text{fb}^{-1}$  の統計量を得た。2021 年からの Run3 では重心系エネルギーが 14 TeV に上昇する予定であり、また、2026 年からはルミノシティが格段に増加する高輝度 LHC が始まる予定である。

LHC では、25 nsec に 1 回という高頻度で陽子陽子衝突が起こるため、処理速度や記憶容量の制限から、興味のある事象のみに絞ってデータを記録するようシステム (トリガーシステム) を用いている。陽子陽子衝突では、大量の QCD ジェット事象が生じるが、QCD ジェット事象に比べて断面積が格段に低いような物理過程の観測を LHC-ATLAS 実験では調べる必要がある。そのため、QCD ジェットではないオブジェクトを終状態に含む事象の測定が重要となっている。よって、ATLAS 実験のトリガーシステムの多くは、ニュートリノ、電子、ミューオン、タウを終状態に含む事象を記録することを目的としている。

特に、ミューオンを終状態に含む重要な物理過程として、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  が挙げられる。 $B_s \rightarrow \mu\mu$  という物理過程の測定は、標準理論における稀事象の検証、標準理論を超えた物理の探索という二つの点で重要である。この物理過程は運動学的に特徴を持つ。 $B_s$  メソンは、質量が小さく、陽子陽子衝突によって、大きな運動量を持って生成されることが多い。そのため、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  の崩壊が起きると、二つのミューオンは近接して飛び出ることが多くなる。近接した二つのミューオンを、一つのミューオンとして誤って検出することなく、二つのミューオンとして個々の飛跡を正確に測定することが、この物理過程の測定には必要である。

しかし、現行のハイレベルミューオントリガーでは、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  等の複数の近接したミューオンを終状態に含むような物理現象を逃してしまっている。ハイレベルミューオントリガーの初段階である L2MuonSA では、トリガー効率を高く保つために、広い領域でミューオン検出器のヒット情報を集め、トリガーミューオンを再構成している。二つのミューオンがミューオン検出器で近接していると、L2MuonSA での再構成において、同じようなヒット情報を用いてしまうことによって、再構成したトリガーミューオンが同一になってしまうことがある。同一のトリガーミューオンを L2MuonSA で再構成すると、後段の L2muComb における内部飛跡とのマッチングにおいても、同一のトリガーミューオンを再構成してしまう。その結果、オーバーラップリムールによって、この事象は除去されてしまう。このように、近接した二つのミューオンをトリガーミューオンで再構成することが難しいため、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  等の複数の近接したミューオンを終状態に含むような物理現象をトリガーすることができていない。そこで、本研究では、その問題を解決するために、(a)FTK を用いた新しいハイレベルミューオントリガーと、(b)FTF を用いた新しいハイレベルミューオントリガーを開発し、パレル部で評価した。

(a) FTK を用いた新しいハイレベルミューオントリガーを開発した。FTK は高速に内部飛跡を再構成するハードウェアベースのトリガーであり、L1 RoI をシードにして、FTK トラックを再構成する。再構成された FTK トラックはハイレベルミューオントリガーの初めから使用することができる。開発したハイレベルミューオントリガーでは、従来の RPC L2MuonSA に加えて、FTK トラックの数だけ FTK L2MuonSA によってミューオンを再構成する。FTK L2MuonSA は FTK トラックをミューオン検出器まで外挿し、外挿した領域のミューオン検出器のヒット情報を用いて、ミューオン検出器での飛跡を再構成する。ミューオン

検出器の全層でスーパーポイントが再構成されなくても、シードとした FTK トラックの  $p_T$  をトリガー判定に用いることで、外挿の精度の悪さを補うことができる。更に、ミュオン検出器で近接した二つのミュオンに対して、シードしたそれぞれの FTK トラックが異なれば、その二つのトリガーミュオンを分離することができる。近接した二つのミュオンを含むシミュレーションサンプルを用いて、この FTK を用いた新しいハイレベルミュオントリガーの評価を行った。すると、シングルミュオントリガーでは、従来の RPC L2Muon のみの場合よりも、FTK L2Muon を組み合わせた方がトリガー効率がわずかに上昇することがわかった。一方、ハイレベルミュオントリガーで使用することのできる FTK トラックは、L1 RoI というミュオン検出器の位置で定義された範囲にあるものだけであるため、衝突点での  $\eta, \phi$  とミュオン検出器での  $\eta, \phi$  のずれが大きいような低い  $p_T$  を持つミュオンに対しては、FTK L2Muon ではトリガーすることが難しいことがわかった。マルチミュオントリガーでは、二つのオフラインミュオンがミュオン検出器で近接した場合 ( $\Delta R \lesssim 0.1$ )、トリガーミュオンを分離することができていなかったが、この FTK を用いた新しいハイレベルミュオントリガーによって、90% 以上の割合で分離できることがわかった。

(b) FTF を用いた新しいハイレベルミュオントリガーを開発した。FTF は高速に内部飛跡を再構成するソフトウェアベースのトリガーである。FTF トラックの再構成にはある程度時間がかかるため、ハイレベルミュオントリガーの初めから FTK トラックを使用することができない。そのため、新しいハイレベルミュオントリガーでは、L2MuonSA を走らせた後に、L2MuonSA の衝突点周りの FTF トラックをミュオン検出器まで外挿してトリガーミュオンを再構成する FTF L2Muon を走らせる。そうすることによって、FTK で見られた低い  $p_T$  に対してトリガーすることができなくなる問題を回避することが確認された。また、FTK を用いたハイレベルミュオントリガーでは、RPC L2Muon と FTK L2Muon の組み合わせによって、ミュオン検出器で近接した二つのミュオンに対する高い分離率を達成していたが、FTF を用いたハイレベルミュオントリガーでは、FTF L2Muon のみによって高い分離率を達成できたことがわかった。

今後の展望を議論する。LHC-ATLAS 実験として、FTK 自体の導入は見送られたため、FTK を用いたハイレベルミュオントリガーの実装は不可能となった。しかし、FTK を用いた新しいハイレベルミュオントリガーよりも FTF を用いた新しいハイレベルミュオントリガーの方が分離率が高いことがわかったので、この FTF を用いた新しいハイレベルミュオントリガーの実装を進めていく見通しとなっている。そのためには、以下を評価することが必要となってくる。

- ( $\alpha$ ) 実際のデータを使用しての性能評価
- ( $\beta$ ) Run3 の環境でのトリガーの処理時間推定
- ( $\gamma$ ) EF への入力最適化

( $\alpha$ ) 本研究では、シミュレーションサンプルを用いて分離率を評価したが、実際のデータでは、バックグラウンドがより多いことが予想される。そのため、フェイクミュオンと本物のミュオンを区別してトリガーミュオンを再構成することができるかを実際に取得されたデータを用いて評価することが重要である。フェイクミュオンを誤ってトリガーミュオンとして再構成してしまうことが多いとわかれば、FTF ロードの広さを狭くするか、外挿の精度を高めることが必要となってくる。

( $\beta$ ) FTF トラックの数だけ FTF L2Muon を再構成するが、FTF トラックの数に対して、トリガー全体の処理にどのぐらいの時間がかかるかを調べる必要がある。処理時間が HLT に要求される処理時間を満たしているかを評価し、処理時間が長いことがわかったら、シードとする FTF トラックに  $p_T, \eta, \phi$  の条件をかけることや、外挿の簡略化を行うことが必要となってくる。外挿の簡略化には、Look-up-table を用いることが考えられる。FTF トラックの衝突点での  $p_T, \eta, \phi$  に対応するミュオン検出器での位置を予め計算し、その対応関係を保存しておくことで、外挿の時間を簡略化することができると考えられる。また、Run3 から、

LHC-ATLAS 実験の新たなソフトウェアフレームワーク AthenaMT[17] が使用される。AthenaMT はソフトウェアの処理をマルチスレッドにすることで、トリガーの処理時間、使用メモリを削減することを目的としている。2020 年 1 月現在、AthenaMT は Run3 に向けて、開発が進んでいる。FTF を使用したハイレベルミュオントリガーを Run3 で使用するためには、Run3 で使用される AthenaMT の環境上で処理時間を測定することが重要である。

( $\gamma$ ) 本研究においては、従来の L2MuonSA, L2muComb の改良を試みたが、L2MuonSA, L2muComb の後段である EF での開発もハイレベルミュオントリガーとして重要である。FTF L2Muon では、精度良く二つの近接したミュオンを分離することができることがわかったので、FTF L2Muon でトリガー判定をされたイベントに対しては、EF を走らせなくてもよいことも考えられる。しかし、トリガー判定を出すイベントの数を測定し、それが多すぎる場合には更に EF で選別することも必要となってくる。その場合、複数再構成された FTF L2Muon のどれを EF への入力とするかを評価しなければならない。EF への入力としては、複数の FTF L2Muon の中で最も  $p_T$  が高い FTF L2Muon と次に  $p_T$  が高い FTF L2Muon の二つや、対象とする物理過程に応じたミュオンの運動学的特徴を持った二つなどが考えられる。

以上の ( $\alpha$ ), ( $\beta$ ), ( $\gamma$ ) を評価し、適切な処置を施すことにより、本研究で改良したミュオントリガーを実際のトリガーシステムに組み込むことが期待される。また、トリガーによって、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  の取得される統計量が増え、標準理論における稀事象の検証、標準理論を超えた物理の探索に進展がもたらされることが期待される。

## 謝辞

多くの方々のおかげで修士論文の執筆まで行うことができました。ありがとうございました。

指導教員である久世正弘教授には、三年間を通し、研究テーマの考案、研究に関する助言、修士論文の較正など研究全般にわたってご指導いただきました。久世研究室助教である山口洋平氏には、研究の全ての場面においてご指導いただきました。研究の方針、手法、考察から、研究発表まで常に相談に乗って頂きました。久世研究室特任助教であった兼田充氏には、ソフトウェアの使い方等で助言を頂きました。

久世研究室的メンバーである中野健一氏、吉田朋世氏、ルカスベルンス氏、賀雲剣氏、泉山将大氏、佐島伊紗雄氏、金山周平氏、藤上俊介氏には研究生活で多くのお世話になりました。久世研究室的の卒業生である田中雅大氏、河口怜志氏、矢澤友貴孝氏、関根達侑氏、森川晴也氏にも、研究生活で多くのお世話になりました。特に、田中雅大氏、矢澤友貴孝氏には、研究に関して多くの助言を頂きました。

ATLAS 日本ハイレベルミュオントリガーグループの方々には、研究を進めていく上での多くの助言をミーティングなどで頂きました。特に、京都大学の野口陽平氏には、研究を進めるにあたって多くの技術的な手助けをして頂きました。神戸大学の山崎祐司教授、山下和樹氏、名古屋大学の林田翔太氏には、ミーティング等で助言を多く頂きました。

最後に、様々な面でお世話になっている家族、友人にお礼を申し上げます。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] S. Dimopoulos, S. Raby, and F. Wilczek, “Supersymmetry and the Scale of Unification,” *Phys. Rev.*, vol. D24, pp. 1681–1683, 1981.
- [2] V. Khachatryan *et al.*, “Observation of the rare  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  decay from the combined analysis of CMS and LHCb data,” *Nature*, vol. 522, pp. 68–72, 2015.
- [3] “Magnet system,” <https://atlas.cern/discover/detector/magnet-system>.
- [4] G. Aad *et al.*, “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider,” *JINST*, vol. 3, p. S08003, 2008.
- [5] M. Capeans *et al.*, “ATLAS Insertable B-Layer Technical Design Report,” Sep 2010.
- [6] H. Pernegger, “The pixel detector of the ATLAS experiment for LHC run-2,” *Journal of Instrumentation*, vol. 10, pp. C06012–C06012, June 2015.
- [7] J. Wotschack, “ATLAS Muon Chamber Construction Parameters for CSC, MDT, and RPC chambers,” Apr 2008.
- [8] “ATLAS muon spectrometer: Technical Design Report,” 1997. CERN-LHCC-97-022.
- [9] Kortner *et al.*, “Precision muon tracking detectors and read-out electronics for operation at very high background rates at future colliders,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 824, p. 556558, Jul 2016.
- [10] G. Aielli *et al.*, “Proposal for the Upgrade of the Elevator Regions in the ATLAS Barrel Muon Spectrometer,” *ATLAS Internal Report*, ATL-MUON-INT-001, 2014.
- [11] A. Nisati, “A muon trigger algorithm for Level-2 feature extraction,” no. ATL-DAQ-2000-036, 2000.
- [12] 田中雅大, LHC-ATLAS 実験 Run2 データを用いたミュオントリガーにおける横運動量再構成方法の改良, 東京工業大学修士論文, 2016.
- [13] C. Kilby *et al.*, “The design and performance of the ATLAS Inner Detector trigger for Run 2,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 762, p. 012029, oct 2016.
- [14] 奥村健人, LHC-ATLAS 実験における FTK 初期データ評価と安定運用に向けた最適化, 早稲田大学修士論文, 2019.
- [15] M. Shochet *et al.*, “Fast TracKer (FTK) Technical Design Report,” 2013. CERN-LHCC-2013-007, ATLAS-TDR-021.
- [16] N. Kimura *et al.*, “ATLAS FTK a - very complex - custom super computer,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 762, p. 012005, oct 2016.
- [17] Leggett *et al.*, “AthenaMT: Upgrading the ATLAS Software Framework for the Many-Core World with Multi-Threading,” Oct 2016.

## 図目次

1	$B_s \rightarrow \mu\mu$ の一次近似での崩壊 [2]	6
2	$B_s \rightarrow \mu\mu$ の高次のループを含む崩壊 [2]	7

3	標準理論を超えた物理によって予言される新粒子 $X_0, X^+$ の介在する $B_s \rightarrow \mu\mu$ [2] . . . . .	7
4	ATLAS 検出器での座標系 . . . . .	8
5	ソレノイド磁石 [3]。 . . . .	9
6	トロイド磁石 [4]。 . . . .	9
7	IBL の配置 [5] . . . . .	10
8	ピクセル検出器の配置 [6] . . . . .	10
9	電磁カロリメータ [4] . . . . .	11
10	ハドロンカロリメータ [4] . . . . .	11
11	ミュオン検出器のパレル部での xy 平面断面図。Large セクターと Small セクターが交互 に設置されている [7]。 . . . .	12
12	ミュオン検出器の Large セクターでの RZ 平面断面図 [7]。 . . . .	13
13	ミュオン検出器の Small セクターでの RZ 平面断面図 [7]。 . . . .	13
14	MDT チェンバー [4]。 . . . .	14
15	MDT のチューブの断面図 [4]。 . . . .	14
16	パレル部でのミュオン検出器の構造 (xy 平面断面図) [8]。 . . . .	15
17	フォワード部における CSC の配置 [4] . . . . .	16
18	Large セクターと Small セクターにおける RPC の配置。ミドル層では MDT を挟むように 2 つ設置され、アウター層では MDT の外側に設置されている。 [4] . . . . .	17
19	RPC による L1 ミュオントリガー [4] . . . . .	19
20	TGC による L1 ミュオントリガー [4] . . . . .	20
21	スーパーポイント (パレル部)[11] . . . . .	21
22	$p_T$ と関連のあるパラメータである角度 $\alpha$ 。ミドルステーションのスーパーポイントと衝突点 を結んだ直線と、ミドルステーションとアウターステーションのスーパーポイントを結んだ 直線の成す角度が $\alpha$ である。 . . . . .	22
23	$p_T$ と関連のあるパラメータである角度 $\beta$ 。インナーステーションにおけるスーパーポイント の角度と、ミドルステーションとアウターステーションのスーパーポイントを結んだ直線の 角度差が $\beta$ である。 . . . . .	23
24	$p_T$ と関連のあるパラメータである角度 $\gamma$ 。CSC とミドルステーションでの飛跡の位置を結 んだ直線と、ミドルステーションとアウターステーションでの飛跡を結んだ直線の角度差が $\gamma$ である。 . . . . .	23
25	$p_T$ と関連のあるパラメータである半径 $R$ 。インナーステーション、ミドルステーション、ア ウターステーションでのそれぞれのスーパーポイント 3 点を通る円弧の半径が $R$ である。 . . . .	24
26	パレル部とエンドキャップ部の両方の検出器を通過した場合。 . . . .	24
27	$p_T$ と関連のあるパラメータである半径 $R_{EE}$ (Large セクター)。Large セクターでは、エン ドキャップ部のインナーステーションとミドルステーションのスーパーポイントと、EE チェ ンバーのスーパーポイントの 3 点を通る円弧の半径が $R_{EE}$ である。 . . . . .	25
28	$p_T$ と関連のあるパラメータである半径 $R_{EE}$ (Small セクター)。Small セクターでは、パレ ル部のインナーステーションとエンドキャップ部のミドルステーションのスーパーポイント と、EE チェンバーのスーパーポイントの 3 点を通る円弧の半径が $R_{EE}$ である。 . . . . .	25
29	エンドキャップ部における $1/p_T$ と $\alpha$ の関係。線筋があるのは、領域によって $1/p_T$ と $\alpha$ の 関係が異なるためである。 . . . . .	26

30	エンドキャップ部における $1/p_T$ と $\beta$ の関係。線筋があるのは、領域によって $1/p_T$ と $\beta$ の関係が異なるためである。 . . . . .	26
31	muonSA(エンドキャップ部) における $p_T\alpha$ , $p_T\beta$ , $p_T\text{TGC}$ の選択条件 [12] . . . . .	27
32	2017 年に取得された実データにおける HLT_mu4 のトリガー効率の $p_T$ 依存性。プロットの L1 はオフラインミュオンに対する L1 のトリガー効率、SA/L1 は L1 に対する L2muonSA のトリガー効率、CB/SA は L2MuonSA に対する L2muComb のトリガー効率、EF/CB は L2muComb に対する EF のトリガー効率、TOTAL はオフラインミュオンに対する EF のトリガー効率を示す。 . . . . .	28
33	2017 年に取得された実データにおける HLT_mu50 のトリガー効率の $p_T$ 依存性。プロットの L1 はオフラインミュオンに対する L1 のトリガー効率、SA/L1 は L1 に対する L2muonSA のトリガー効率、CB/SA は L2MuonSA に対する L2muComb のトリガー効率、EF/CB は L2muComb に対する EF のトリガー効率、TOTAL はオフラインミュオンに対する EF のトリガー効率を示す。 . . . . .	29
34	$\eta$ に対する FTF(赤) と PT(黒) のトリガー効率 [13] . . . . .	30
35	$p_T$ に対する FTF(赤) と PT(黒) のトリガー効率 [13] . . . . .	30
36	FTK のシステム概要 [14] . . . . .	31
37	FTK のハードウェア構成 [15] . . . . .	31
38	$Z \rightarrow \mu\mu$ シミュレーション (パイルアップを含む) における FTK の処理時間 (Latency) 分布 [16]。左はイベントナンバー vs 処理時間、右は 1000 イベントの処理時間ヒストグラム。 . . . .	32
39	オフライン飛跡に対する FTK の飛跡再構成効率 [16]。黒がシングルミュオンシミュレーション、赤がシングルパイオンシミュレーション。 . . . . .	32
40	FTK を用いたハイレベルミュオントリガーの概略。RoI 中にある FTK トラックの数が二つの場合を示す。 . . . . .	34
41	FTK を基にした L2MuonSA . . . . .	35
42	RoI 中にある複数の FTK トラックをシード。 . . . . .	35
43	衝突点では離れていた二つのミュオンがミュオン検出器で近接した場合。 . . . . .	36
44	二つのオフラインミュオンの $\Delta R$ 。赤は衝突点での $\Delta R$ 、青はミュオン検出器での $\Delta R$ を示す。 . . . . .	37
45	二つのオフラインミュオンのミュオン検出器での $\Delta R$ と衝突点での $\Delta R$ の関係。 . . . . .	37
46	二つのオフラインミュオンから計算された不変質量分布。 . . . . .	38
47	オフラインミュオンとマッチングした RoI 中にある FTK トラックの数 ( $p_T > 3\text{GeV}$ ) の割合。 . . . . .	39
48	バレル内層 MDT におけるオフラインセグメントとロードの距離。赤:RPC ロード、青:FTK ロード。 . . . . .	40
49	バレル中間層 MDT におけるオフラインセグメントとロードの距離。赤:RPC ロード、青:FTK ロード。 . . . . .	40
50	バレル外層 MDT におけるオフラインセグメントとロードの距離。赤:RPC ロード、青:FTK ロード。 . . . . .	41
51	オフラインミュオンとマッチした FTK ロードと RPC ロードによるトリガーミュオンの持つスーパーポイントの数の割合。 . . . . .	42

52	オフラインミュオンとマッチした RPC ロードによるトリガミュオンの持つスーパーポイントの数の割合。 . . . . .	42
53	青:FTK ロードを用いてスーパーポイントが二つ以上再構成された場合の $p_T$ residual。ただし、 $p_T$ には Look-up-table の $p_T$ を用いている。赤:RPC ロードを用いた場合の $p_T$ residual。 . . . . .	43
54	青:FTK ロードを用いた場合の $p_T$ residual。ただし、 $p_T$ には FTK トラックの $p_T$ を用いている。赤:RPC ロードを用いた場合の $p_T$ residual。 . . . . .	44
55	閾値 4GeV のミュオントリガーの L1 に対するハイレベルミュオントリガーのトリガー効率。赤は RPC L2Muon のみ、青は FTK L2Muon のみ、黒は RPC L2Muon と FTK L2Muon の両方をトリガー判定に用いた場合を示す。 . . . . .	45
56	ミュオン検出器での二つのオフラインミュオンの $\Delta R$ に対する二つの L2Muon の分離率。黒は従来のアルゴリズム、赤は FTK L2Muon と RPC L2Muon を用いた場合を示す。 . . . . .	46
57	ミュオン検出器での二つのオフラインミュオンの $\Delta R$ に対する二つの FTK L2Muon の分離率。黒は従来のアルゴリズムの場合、赤は FTK L2Muon を用いた場合を示す。 . . . . .	47
58	FTF を用いたハイレベルミュオントリガーの概略。 . . . . .	48
59	ミュオン検出器での二つのオフラインミュオンの $\Delta R$ に対する二つの FTF L2Muon の分離率。黒は RPC L2Muon、赤は FTF L2Muon を用いた場合を示す。ここでは、二つの L1 RoI が異なる場合を示している。 . . . . .	49
60	青:FTF ロードを用いた場合の $p_T$ residual。赤: RPC L2Muon の $p_T$ residual。 . . . . .	50
61	オフラインミュオンとマッチングした RoI 中にある FTF トラックの数 ( $p_T > 3\text{GeV}$ ) の割合。 . . . . .	51
62	オフラインミュオンの $\Delta R < 0.1$ の範囲にある FTF トラックの数 ( $p_T > 3\text{GeV}$ ) の割合。 . . . . .	52

## 表目次

1	標準理論におけるフェルミオン . . . . .	5
2	標準理論におけるボソン . . . . .	5