

<修士論文 2015 年度>  
ATLAS 実験における  
フェイク 2 ミューオンの除去による  
高効率・低バックグラウンドな  
ミューオントリガーアルゴリズムの研究

京都大学 大学院 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻  
物理学第二教室 素粒子物理学研究室  
門田 隆太郎

2016 年 1 月 27 日

# 概要

欧州原子核研究機構 ( CERN ) に設置されている、大型陽子衝突型加速器 ( Large Hadron Collider, LHC ) は、2012 年まで重心系エネルギー 8 TeV で運転を行い ( RUN-1 )、アップグレードのためのシャットダウンを経て、2015 年 5 月に重心系エネルギー 13 TeV で運転を再開した ( RUN-2 )。

本研究では、ATLAS 検出器のハードウェアミュオントリガーの改良をおこなった。

ミュオントリガーに用いられている検出器には、各部分 ( トリガーセクター ) の検出器が物理的に重なっている部分がある ( “オーバーラップ領域” と呼ぶ)。このオーバーラップ領域にミュオンが入射した場合、オーバーラップ領域の両方でトリガーが発行される。このとき、実際には 1 つのミュオンが 2 つのトリガーセクターを通過しただけであるのに、誤って 2 つのミュオンが通過したというトリガー ( 2 ミュートリガー ) を発行してしまう。このようなプロセスで発生する “偽者の” 2 ミュートリガーのことをフェイク 2 ミュートリガーと呼ぶ。

現在、このフェイク 2 ミュートリガーを発行してしまうことで 2 ミュートリガーのレートが有意に高くなり、レベル 1 トリガー全体で 100 kHz という限られたバンド幅を無用に専有している状況にある。2 ミュートリガーは B の物理や新粒子探索 ( 複数のミュオンが出てくるもの ) において非常に重要なトリガーとなっている。もし閾値をあげてトリガーレートを下げると、信号事象に対するアクセプタンスを大きく失うことになる。そこで私は、閾値を低く保ったままフェイク 2 ミュオンを取り除く手法 ( オーバーラップリムーバル ) について研究した。

本研究では、フェイク 2 ミュオンの発生状況を調査し、それを除去するためのロジック ( オーバーラップリムーバルロジック ) を開発した。このオーバーラップリムーバルロジックは、2 本のミュオンの横方向運動量 (  $p_T$  ) が 6 GeV/c 以下の限られた範囲について適用していたが、これを、 $p_T$  の全域に渡って導入した場合のレート削減効果と、本来取得すべき信号事象を余計に排除してしまう影響について研究した。その結果、2 本のミュオンに対する  $p_T$  閾値がいずれも 4 GeV/c のトリガーで 14 %、6 GeV/c のトリガーで 24 %、10 GeV/c のトリガーで 36 % のレート削減が期待できることを RUN-2 の実データを用いて算出した。その一方で、2 ミュオントリガーでとらえる物理解析対象の事象である  $J/\psi$  が 2 つのミュオンに崩壊する事象のうち、オーバーラップリムーバルにより排除するものは約 1 % に抑えられると見積もった。

# 目次

概要	i
第 1 章 導入	1
第 2 章 LHC および ATLAS 実験 の全体像	3
2.1 LHC	3
2.2 ATLAS 検出器	4
2.2.1 ATLAS 検出器の全体像	4
2.2.2 ATLAS 座標系	6
2.2.3 ミューオンスペクトロメーター	7
2.2.4 マグネット	8
2.3 ATLAS トリガーシステム	9
2.3.1 トリガー全体像	9
2.3.2 レベル 1 トリガー	10
2.3.3 ハイレベルトリガー	12
第 3 章 レベル 1 ミューオントリガーに用いる検出器およびトリガーシステムについて	13
3.1 TGC	13
3.1.1 TGC の構造	13
3.1.2 TGC の動作原理	15
3.1.3 TGC の分類	15
3.1.4 TGC の配置	16
3.1.5 トリガーセクター	18
3.1.6 トリガースキーム	19
3.1.7 読み出し回路	21
3.2 RPC	22
3.2.1 RPC の全体像	22
3.2.2 RPC の動作原理	23
3.2.3 トリガーセクター	23
3.3 MUCTPi	24
第 4 章 フェイク 2 ミューオントリガー削減のためのオーバーラップリムーバルトリガーアルゴリズムの開発	27

---

4.1	エンドキャップ部・フォワード部 . . . . .	30
4.1.1	オーバーラップリムーバルのロジック (エンドキャップ部) . . . . .	30
4.1.2	オーバーラップリムーバルのロジック (フォワード部) . . . . .	31
4.1.3	オーバーラップリムーバルのロジック (エンドキャップ部とフォワード部の間)	32
4.1.4	オーバーラップリムーバルによるトリガーレート削減 (エンドキャップ部・フォワード部) . . . . .	34
4.1.5	オーバーラップリムーバルによる物理解析対象となる事象への影響 (エンドキャップ部・フォワード部) . . . . .	35
4.2	バレル部 . . . . .	37
4.2.1	バレル部におけるオーバーラップリムーバルのロジック . . . . .	37
4.2.2	オーバーラップリムーバルによるトリガーレート削減 (バレル部) . . . . .	39
4.2.3	オーバーラップリムーバルによる物理解析の対象となる事象への影響 (バレル部)	41
第 5 章	まとめ	44
	謝辞	45
	参考文献	46

# 図目次

2.1	LHC の概観 [8] . . . . .	3
2.2	ATLAS 検出器の全体像 [9] . . . . .	4
2.3	ID の全体像 [3] . . . . .	5
2.4	カロリメーターの全体像 [8] . . . . .	5
2.5	ATLAS 座標系 [6] . . . . .	6
2.6	ミュオンスペクトロメーターの全体像 [8] . . . . .	7
2.7	MDT のドリフトチューブ 1 本の模式図 [1] . . . . .	8
2.8	MDT ドリフトチェンバーの模式図 [1] . . . . .	8
2.9	マグネットの全体像 [1] . . . . .	9
2.10	ATLAS トリガーシステムの全体像 [2] . . . . .	10
2.11	レベル 1 トリガーの概要 [1] . . . . .	11
3.1	ミュオンスペクトロメーターの断面図 [10] . . . . .	13
3.2	TGC ( ビッグウィール ) の概観写真 [8] . . . . .	14
3.3	TGC の構造 ( 模式図 ) [7] . . . . .	14
3.4	TGC の断面図 [1] . . . . .	15
3.5	電子雪崩の様子。a $\rightarrow$ e へと時間発展している。 [4] . . . . .	16
3.6	TGC の構造。左 : triplet、右 : doublet [1] . . . . .	16
3.7	TGC の配置 . . . . .	17
3.8	TGC ( ビッグウィール ) の全体説明 [8] から編集 . . . . .	18
3.9	TGC のトリガーセクター [1] . . . . .	19
3.10	$p_T$ 算出方法の概要 [1] . . . . .	20
3.11	$p_T$ と ( $\Delta R, \Delta\phi$ ) の対応 [5] . . . . .	21
3.12	TGC ヒット情報の流れ [1] . . . . .	22
3.13	RPC の配置 [1] . . . . .	23
3.14	RPC の トリガーセクターおよび RoI の配置図。円柱の側面を $\phi = \pi$ の部分で切り開いた形である。横軸が $\eta$ 、縦軸が $\phi$ であり、図中の小さな長方形が RoI を表す。RoI には、ひとつひとつナンバリングされている。 . . . . .	24
3.15	MIOCT ボード [11] . . . . .	25
3.16	MUCTPi の全体構成図 . . . . .	25
4.1	TGC トリガーセクターのオーバーラップの様子 [8] . . . . .	28
4.2	フェイク 2 ミュオントリガーのイメージ図 . . . . .	28

4.3	エンドキャップ部・フォワード部の RoI . . . . .	29
4.4	左：エンドキャップ部 RoI（一部）の概略図、右：隣り合ったトリガーセクターで2つのミューオントリガーを出したときの2つの RoI 番号の差。ただし、縦軸は対数目盛りになっている。 . . . . .	30
4.5	左：フォワード部 RoI（一部）の概略図、右：隣り合ったトリガーセクターで2つのミューオントリガーを出したときの2つの RoI 番号の差。ただし、縦軸は対数目盛りになっている。 . . . . .	31
4.6	エンドキャップ部のトリガーセクターとフォワード部のトリガーセクター . . . . .	32
4.7	F の RoI 番号と E1 の RoI 番号の関係 . . . . .	33
4.8	F の RoI 番号と E1 の RoI 番号の拡大図 . . . . .	33
4.9	オーバーラップリムーバルを適用させる PT 領域の拡大 . . . . .	34
4.10	エンドキャップ部・フォワード部における、2ミューオントリガーが出された2ミューオン（電荷が正のものとの負のものとの組み合わせ）の不変質量（上）および、そのうちオーバーラップリムーバルにより逃してしまう2ミューオンの不変質量（下）。ただし、縦軸は対数目盛りになっている。 . . . . .	36
4.11	エンドキャップ部・フォワード部における、 $J/\psi$ からの2ミューオンによる2ミュートリガーの、オーバーラップリムーバルにより排除してしまう割合の、 $p_T$ 依存 . . . . .	37
4.12	エンドキャップ部・フォワード部における、 $J/\psi$ からの2ミューオンによる2ミュートリガーが発行された RoI の $dR$ と $J/\psi$ の $p_T$ の関係。上が $J/\psi$ についてのヒストグラムで、下が上のうちオーバーラップリムーバルにより排除されるもの . . . . .	38
4.13	A サイドのバレルトリガーセクター8番と9番それぞれに1つずつのトリガーが発行されたときの RoI 分布 . . . . .	39
4.14	バレル部における、2ミューオントリガーが出された2ミューオン（電荷が正のものとの負のものとの組み合わせ）の不変質量（上）および、そのうちオーバーラップリムーバルにより逃してしまう2ミューオンの不変質量（下）。ただし、縦軸は対数目盛りになっている。 . . . . .	41
4.15	バレル部における、 $J/\psi$ からの2ミューオンによる2ミュートリガーの、オーバーラップリムーバルにより排除してしまう割合の、 $p_T$ 依存 . . . . .	42
4.16	バレル部における、 $J/\psi$ からの2ミューオンによる2ミュートリガーが発行された RoI の $dR$ と $J/\psi$ の $p_T$ の関係。上が $J/\psi$ についてのヒストグラムで、下が上のうちオーバーラップリムーバルにより排除されるもの . . . . .	43

# 第 1 章

## 導入

大型ハドロン衝突型加速器 ( Large Hadron Collider, LHC ) は欧州原子核研究機構 ( CERN ) に建設された世界最高エネルギーの陽子衝突型加速器である。LHC は 2010 年から 2013 年までのラン ( RUN-1 ) において、当時の世界最高重心系エネルギー 8 TeV、最高瞬間ルミノシティ  $0.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、を達成した。その後、アップグレードのためのシャットダウンを経て、2015 年 5 月、世界最高エネルギーを更新し、重心系エネルギー 13 TeV で運転を再開した。

ATLAS 検出器は LHC の衝突点の 1 つに設置されており、高エネルギー領域での物理事象を精密に測定することを目的としている。ATLAS 実験の主な目的はヒッグス粒子の性質解明、超対称性粒子などの重い新粒子の探索、および、高エネルギー領域での素粒子標準模型の精密検証である。

陽子衝突によって生じる膨大なデータの中から物理解析に有用なデータを効率的に選び出すため、ATLAS 実験では、ハードウェア処理のレベル 1 トリガー、ソフトウェア処理のハイレベルトリガーの 2 段階のトリガーシステムを用いている。本研究では、このうちレベル 1 トリガーについての開発を行った。レベル 1 トリガーの判定に使える時間は  $2 \mu\text{sec}$  と非常に短く、そのために専用のハードウェアを開発・運用している。本研究の主題は、Thin Gap Chamber ( TGC ) および Resistive Plate Chamber ( RPC ) というミュオン検出器において発行される、レベル 1 ミュオントリガーの改良である。

エンドキャップ部のミュオントリガーには、TGC が用いられている。TGC は多線式比例計数チェンバー ( MWPC ) を円盤状に並べ、2 層または 3 層を重ねた構造となっている。バレル部のミュオントリガーには、RPC が用いられている。RPC は 2 枚の平行板を用いたガス検出器が、円筒状に並べられた構造となっている。レベル 1 ミュオントリガーシステムでは、まず、各層でのミュオンヒット位置情報からミュオンのトラックを再構成する。荷電粒子はトロイド磁場により曲げられるので、このトラックは曲線を描くが、粒子の運動量が大きいほど曲率は小さくなる。この性質を利用してミュオンの横運動量 (  $p_T$  ) を見積もり、この  $p_T$  が閾値を超えていればトリガーを発行する。

レベル 1 トリガーには様々な種類のトリガーがあるが、その中の 1 つに“2 ミュオントリガー”というものがある。2 ミュオントリガーは、ミュオンスペクトロメーターに 2 つ以上のミュオンの通過があり、それらのミュオンの  $p_T$  が閾値をこえている場合に発行されるトリガーである。この 2 ミュオントリガーは B の物理やエキゾチックな新粒子探索 ( 複数のミュオンが出てくるもの ) において非常に重要なトリガーとなっている。

レベル 1 トリガーに用いられるミュオン検出器には、各部分 ( トリガーセクター ) の検出器が物理的に重なっている部分がある ( “オーバーラップ領域” と呼ぶ )。このオーバーラップ領域に、閾値を超えた運動量をもつミュオンが入射した場合、オーバーラップ領域の両方でトリガーを発行してしまう。このとき、実際には 1 つのミュオンが 2 つのトリガーセクターを通過しただけであるのに、誤って 2 つの

ミューオンが通過したというトリガー（2 ミュートリガー）を発行してしまう。このようなプロセスで発生する“偽者の”2 ミュートリガーのことをフェイク2 ミュートリガーと呼ぶ。

このフェイク2 ミュートリガーの影響により、レベル1 トリガーレートが高い値をとってしまうが、閾値をあげてトリガーレートを下げるという方法で物理事象に対するアクセプタンスを減らすと、実験の効率を大きく下げてしまう。そこで私は、閾値を低く保ったまま、フェイク2 ミューオンを取り除く手法（オーバーラップリムーバル）について研究した。

本研究では、フェイク2 ミューオンの発生状況を調査し、それを除去するためのロジック（オーバーラップリムーバルロジック）を開発した。このオーバーラップリムーバルロジックは、2 本の横方向運動量（ $p_T$ ）が 6 GeV/c 以下の限られた範囲に対して運用していたが、これを、 $p_T$  の全域に渡って導入したとき、2 ミュートリガーをどれほど削減することができるのか、RUN-2 の実データを用いて算出した。その一方で、2 ミューオントリガーでとらえる物理解析の対象となる事象である  $J/\psi$  が2つのミューオンに崩壊する事象のうち、オーバーラップリムーバルにより排除してしまうものがどれほどあるのか評価した。

この章の最後に、本論文の構成を説明する。第 2 章で、LHC および ATLAS 実験の全体像の概要を説明する。第 3 章では、レベル1 ミューオントリガーに用いる検出器やトリガーシステムについて述べる。そして、本論であるオーバーラップリムーバルについて第 4 章で論述する。まとめとして第 5 章を用意した。



## 第 2 章

# LHC および ATLAS 実験の全体像

ATLAS 実験は、CERN 研究所（スイス）に建設された LHC 加速器を用いて行われている。本章では、この LHC 加速器および ATLAS 実験の概要について説明する。

### 2.1 LHC

大型ハドロン衝突型加速器（Large Hadron Collider, LHC）は、CERN 研究所（スイス）に建設された世界最高エネルギーの陽子衝突型加速器である。2010 年から 2013 年までのラン（RUN-1）において、当時の世界最高重心系エネルギー 8 TeV、最高瞬間ルミノシティ  $7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を達成した。その後、アップグレードのためのシャットダウンを経て、2015 年 5 月、自らのもつ世界記録を更新し、重心系エネルギー 13 TeV で運転を再開し、瞬間ルミノシティは  $5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  に達した。バンチ衝突頻度は 40 MHz である。図 2.1 に LHC の概観を示した。LHC 加速器は、スイスとフランスの国境

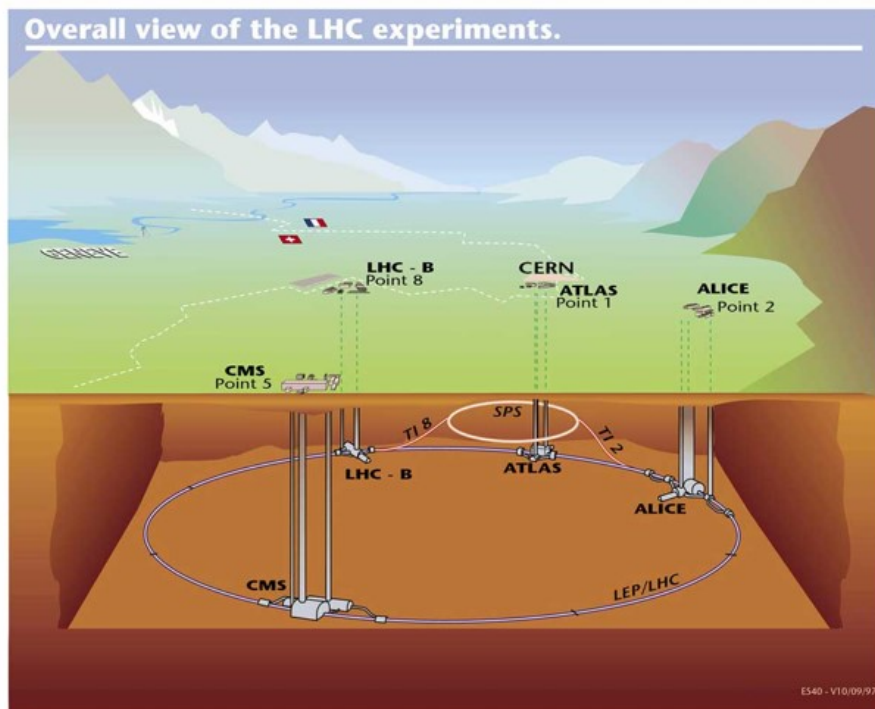


図 2.1 LHC の概観 [8]

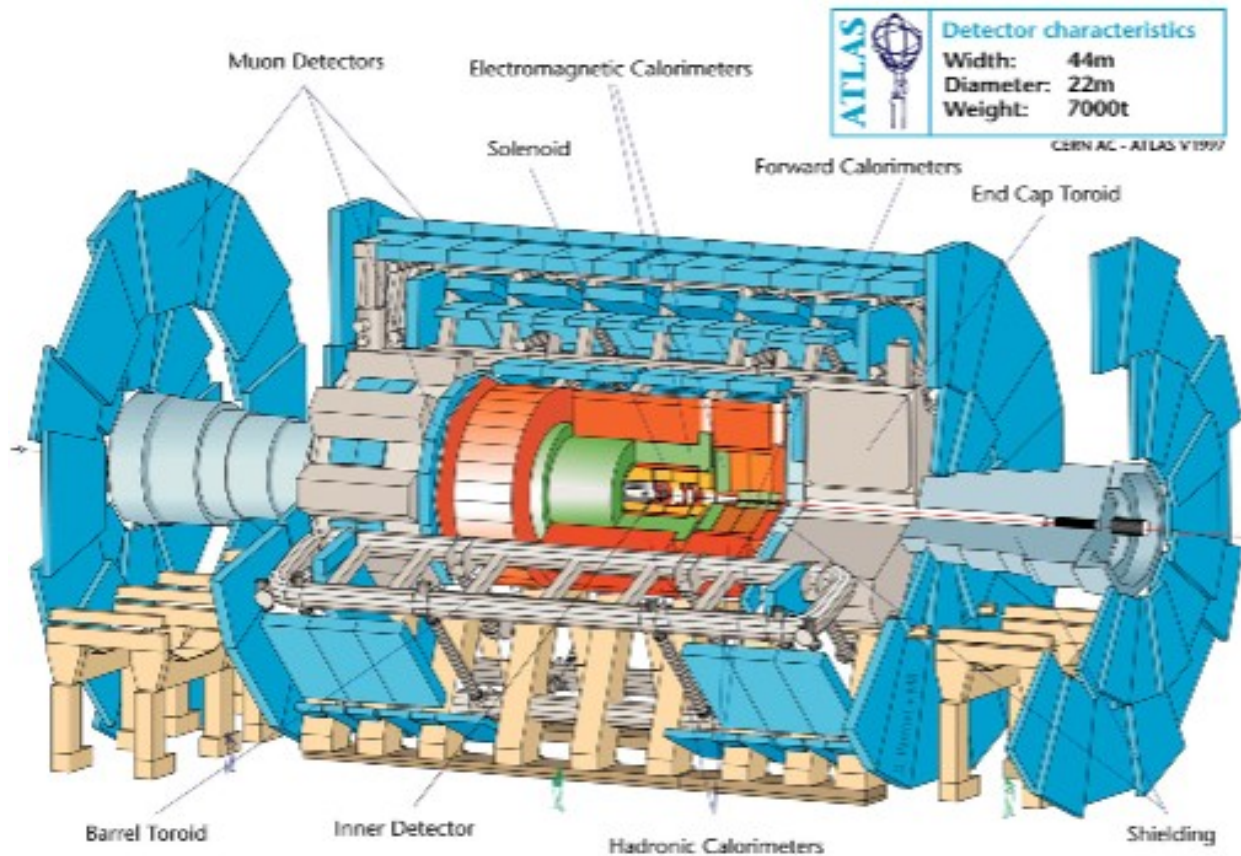


図 2.2 ATLAS 検出器の全体像 [9]

を超えてまたがる周長約 27 km の陽子衝突型加速器である。円周上にある衝突点うちの 1 つに ATLAS 検出器が設置されている。

## 2.2 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は、直径約 26.7 m、長さ約 44 m の円筒形の大規模検出器である（総重量約 7000 t）。本節では、検出器の全体像を説明する。その後、各検出器について詳しく説明する。

### 2.2.1 ATLAS 検出器の全体像

ATLAS 検出器の全体像を図 2.2 に示した。内側から順に、内部飛跡検出器、電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーター、ミューオンスペクトロメーターが配置されている。

検出器の最内層にあるのが、内部飛跡検出器（Inner Detector, ID）である。図 2.3 に ID の全体像を示した。ID では、ソレノイド磁場で曲げられた荷電粒子を検出し、飛跡の再構成を行い、横運動量を測定する。ID には、ピクセル検出器、シリコンストリップ検出器、Transition Radiation Tracker（TRT）の 3 種類がある。ピクセル検出器は、シリコンピクセルを用いた高分解能位置検出器である。ピクセルの大きさは  $50 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$  である。シリコンストリップ検出器は、シリコンマイクロストリップを用いた位置検出器である。ストリップの大きさは  $80 \mu\text{m} \times 12.8 \text{ cm}$  である。TRT は、ストローチューブ検出器と、遷移放射物質としてポリプロピレンファイバーが互いに重なり合った構造をしていて、ポリプロピレンからの X 線をストローチューブ検出器が捉えている。

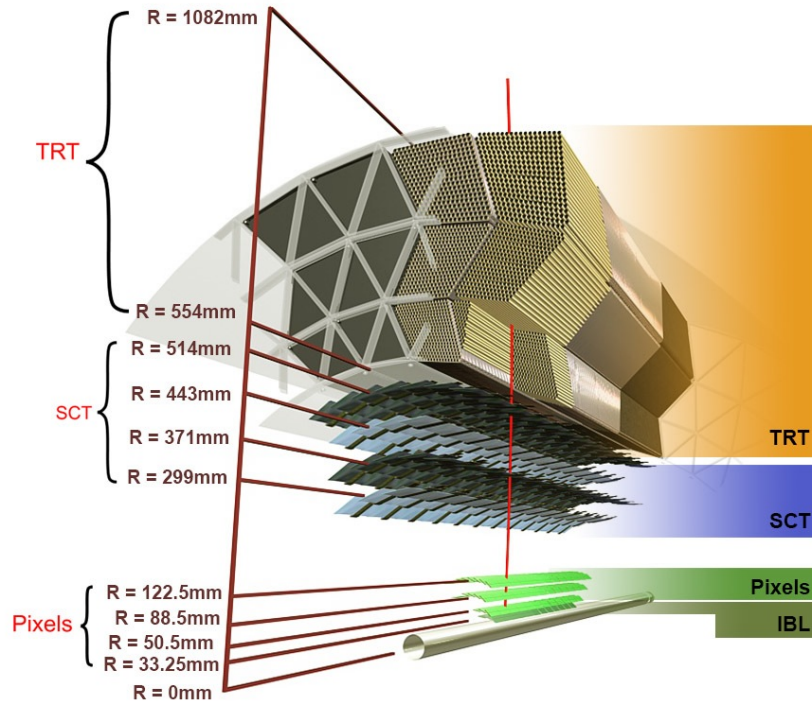


図 2.3 ID の全体像 [3]

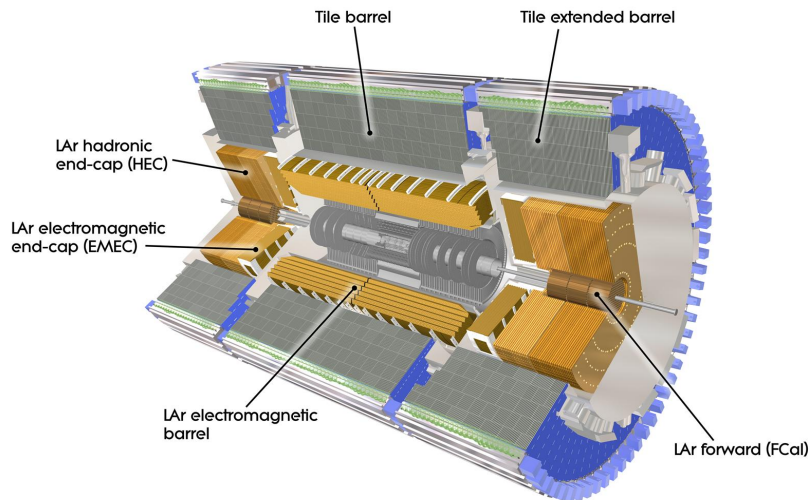


図 2.4 カロリーメーターの全体像 [8]

続いて、カロリーメーターについて説明する。図 2.4 にカロリーメーターの全体像を示した。

ID の外側にあるのが電磁カロリーメーターである。液体アルゴン ( LAr ) を使用したサンプリングカロリーメーターであり、吸収体には鉛を使用している。電磁カロリーメーターでは、電磁シャワーを起こさせ、このシャワー中の電子や陽電子が LAr 中でエネルギーを損失するときに発生する電子の信号を取り出すことで、電子および光子のエネルギーを測定する。アコーディオン構造をとることで、 $\phi$  方向の不感領域がなくなるように設計されている。バレル電磁カロリーメーターは  $|\eta| < 1.48$  をカバーし、エンドキャップ電磁カロリーメーターは  $1.38 < |\eta| < 3.2$  をカバーする。

電磁カロリーメーターの外側にあるのがハドロンカロリーメーターである。バレル部 ( $|\eta| < 1.7$ ) に

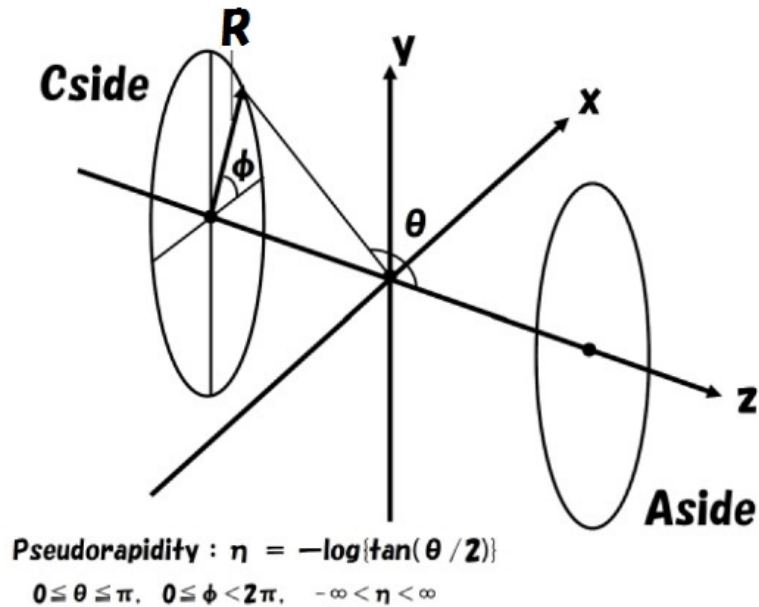


図 2.5 ATLAS 座標系 [6]

は、鉄の吸収体とタイル上のシンチレーターがサンドイッチ構造になったタイルカロリメーターが使用されている。ハドロンカロリメーターでは、鉄中でシャワーが発生する。シャワーを構成する粒子はシンチレーターを通過し、これを検出する。エンドキャップ部 ( $1.5 < |\eta| < 3.2$ ) には、銅の吸収体と LAr で構成されたハドリックエンドキャップカロリメーター (Hadronic Endcap Calorimeter, HEC) が使用されている。

最外層のミュオンスペクトロメーターでは、ミュオンの運動量を測定する。ミュオンスペクトロメーターについての詳細は後述する。

なお ATLAS 検出器は、トロイド磁石を設置することでミュオンスペクトロメーター単独で運動量を測定できるようになっていることが特徴である。

### 2.2.2 ATLAS 座標系

ATLAS 実験で用いられる座標系は図 2.5 のとおりである。

1 つは直交座標系である。原点を衝突点にとり、x 軸を LHC リングの中心向き、y 軸を鉛直上向き、z 軸を LHC ビーム軸の向きにとったものである。z > 0 側を A サイド、z < 0 側を C サイドと呼ぶ。

もう 1 つは、円筒座標系である。円筒の動径を R、方位角を  $\phi$ 、ビーム軸を z としている。

また、天頂角を  $\theta$  として、擬ラピディティ  $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$  を定義する。この擬ラピディティは、エネルギーを E、運動量を P とする粒子のラピディティ  $y = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{E+P \cos \theta}{E-P \cos \theta}\right)$  の高エネルギー極限となっている。この論文でも  $\eta - \phi$  座標系を多く用いる。

2 つのミュオンの TGC や RPC を通過した位置がどれくらい離れているのかを示す値として、dR を用いる。dR の定義は 2 つのミュオンがそれぞれ  $(\eta_1, \phi_2), (\eta_2, \phi_2)$  の位置を通過したとすると、 $dR = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$  である。

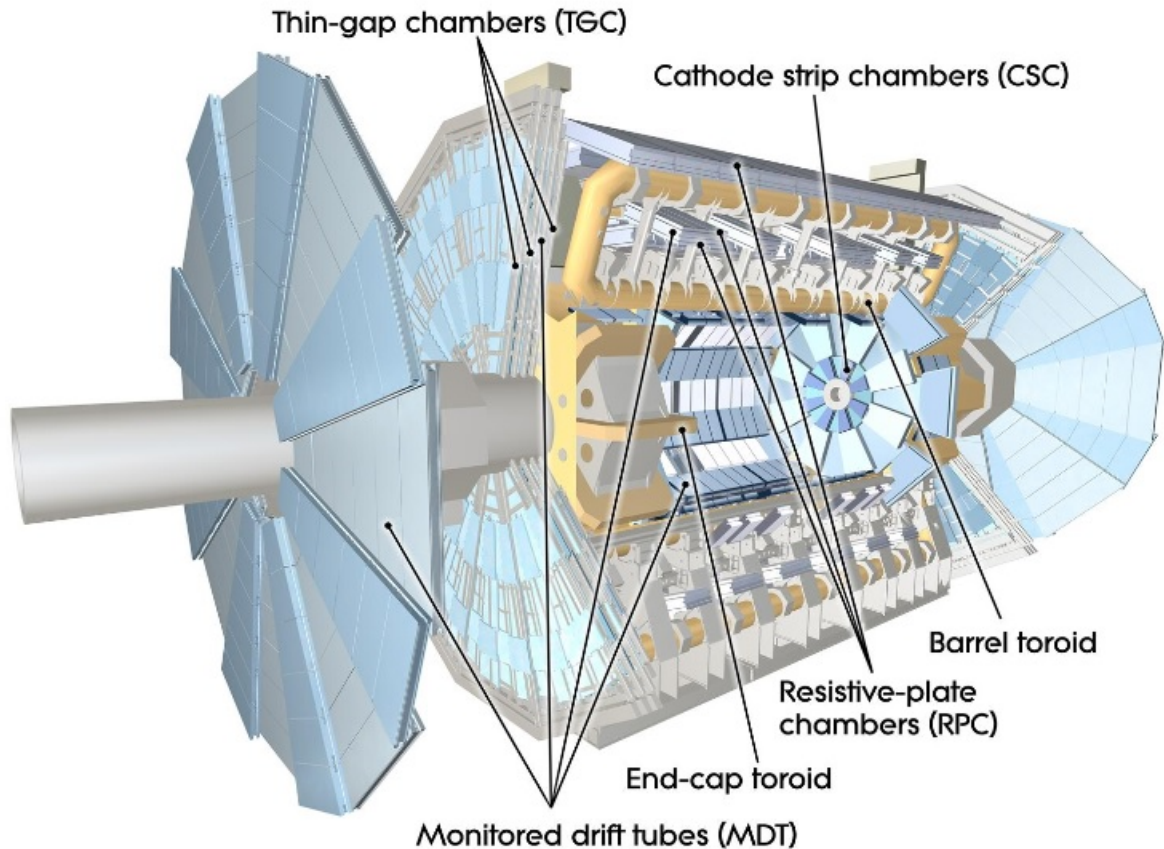


図 2.6 ミューオンスペクトロメーターの全体像 [8]

### 2.2.3 ミューオンスペクトロメーター

ミューオンスペクトロメーターの全体像を図 2.6 に示した。図に示されているとおり、ミューオンスペクトロメーターは最も外側に配置されている。ミューオンは電磁相互作用によってのみエネルギー損失し、さらに電子に比べて制動放射によるエネルギー損失が小さく物質に対する透過力が大きいのである。

ミューオンスペクトロメーターは、トリガー用検出器である Thin Gap Chamber ( TGC ) および Resistive Plate Chamber ( RPC ) と、精密位置測定用の Monitored Drift Tubes ( MDT ) および Cathode Strip Chamber ( CSC ) からなる。

本論文で重要となるトリガー用検出器について詳しく説明する。トリガー用検出器は、エンドキャップ部分に TGC を用い、バレル部分に RPC を用いている。

TGC は多線式比例計数チェンバー ( MWPC ) を円盤状に並べ、2 層または 3 層を重ねた構造となっている。ワイヤ間の間隔 ( 1.8 mm ) よりも、ワイヤ・ストリップ間の距離 ( 1.4 mm ) の方が短いのが特徴的である。

RPC は 2 枚の平行板を用いたガス検出器が、円筒状に並べられた構造となっている。互いに直行するストリップを用いて  $z-\phi$  2 次元読み出しを可能にしている。

TGC および RPC の構造や動作原理などについては、第 3 章でさらに詳しく説明する。

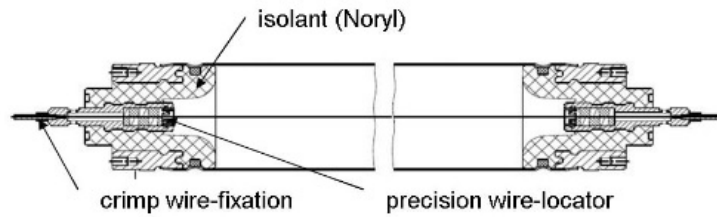


図 2.7 MDT のドリフトチューブ1本の模式図 [1]

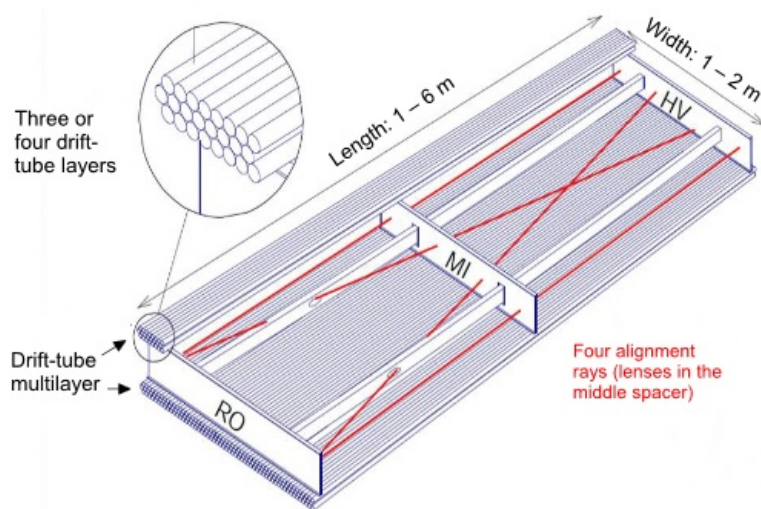


図 2.8 MDT ドリフトチェンバーの模式図 [1]

続いて、精密位置測定用の MDT および CSC についても説明する。MDT はドリフトチューブを並べた構造をとっており、バレル部においては  $z$  を精密に測定し、エンドキャップ部では  $R$  を精密に測定している。この、バレル部の  $z$ 、エンドキャップ部の  $R$  というのは、それぞれのトロイド磁石により荷電粒子が曲げられる方向であり、これによって  $p_T$  を高精度で測定できる。図 2.7 が MDT のドリフトチューブ1本の模式図である。直径 30 mm のカソードチューブの中心に直径 50  $\mu\text{m}$  のアノードワイヤーが通されている。位置分解能は 80  $\mu\text{m}$  である。このドリフトチューブを、図 2.8 のように、3 層もしくは 4 層をエポキシ樹脂で固め、アルミフレームの両面に設置し、チェンバーを構成している。

CSC は、 $2.0 < |\eta| < 2.7$  の領域に設置されている運動量測定用の MWPC であり、ストリップの信号を読み出す。ワイヤ間隔は 2.54 mm で、ストリップ間隔は 5.1 mm である。信号の大きさの重心を求めて粒子の通過位置を算出している。

## 2.2.4 マグネット

ATLAS 実験では、ソレノイド磁石に加えて、トロイド磁石を用いている。図 2.9 に、マグネットの全体像を示す。

ソレノイド磁石は、ID とバレル部の電磁カロリメーターとの間に設置されている。ビーム軸と平行

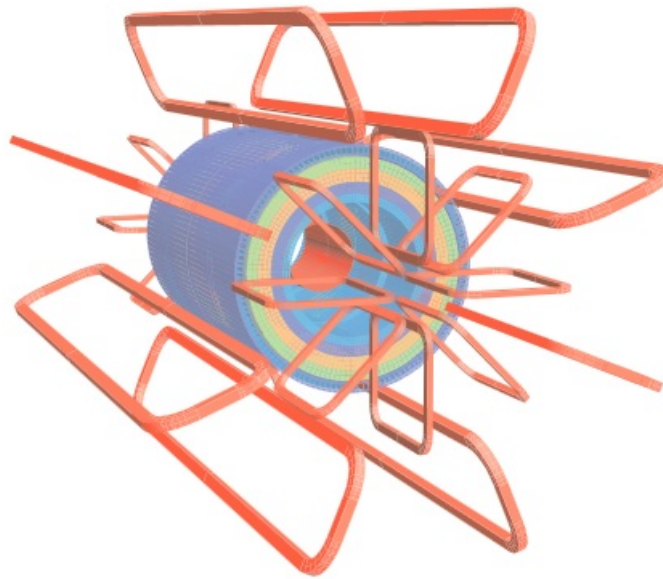


図 2.9 マグネットの全体像 [1]

な方向に、磁束密度 2 T の磁場をかけている。これにより、ID 内の荷電粒子は  $\phi$  方向に曲げられる。その曲率半径から  $p_T$  を測定している。

トロイド磁石は、エンドキャップ部およびバレル部に設置されている。エンドキャップトロイド磁石は長さ 5 m であり、 $\phi$  方向に 8 回対称となるように設置されている。主に  $\phi$  方向に、磁束密度 1 T の磁場をかけている。これにより、ミューオンは  $\eta$  方向に曲げられる。その曲げられた角度から TGC で  $p_T$  を測定し、トリガー判定に利用している。バレルトロイド磁石は長さ 25 m であり、カロリメーターの外側に設置されている。主に  $\phi$  方向に、磁束密度 0.5 T の磁場をかけている。これにより、ミューオンは  $\eta$  方向に曲げられる。その曲率半径から RPC で  $p_T$  を測定し、トリガー判定に利用している。

## 2.3 ATLAS トリガーシステム

ATLAS 実験は、陽子陽子衝突型コライダー実験であり、陽子の構成要素であるクォークやグルーオン同士の非弾性散乱の断面積が、目的とする物理事象の反応断面積よりも 10 桁以上大きくなっている。よって、興味のある物理事象を効率よく取得して記録するために、トリガーシステムとデータ収集システム (DAQ: Data Acquisition) の性能が重要である。本節では、ATLAS 実験におけるトリガーおよびデータ収集システム (TDAQ: Trigger and DAQ) について説明する。

### 2.3.1 トリガー全体像

LHC 加速器では、25 ns の間隔で陽子ビームのバンチ同士が衝突点で交差している。このとき、陽子を構成するクォークやグルーオンによる衝突反応が 1 回あたり平均約 25 個起こる。したがって、毎秒 10 億もの物理反応が起こる。これらのすべての反応について各検出器が観測するデータを記録することは、通信のバンド幅やデータ記録容量の観点から不可能であるし、そもそもすべてを記録することは不要である。また、反応で得られる膨大なデータのうち、物理解析の対象となる事象はごくわずかである。

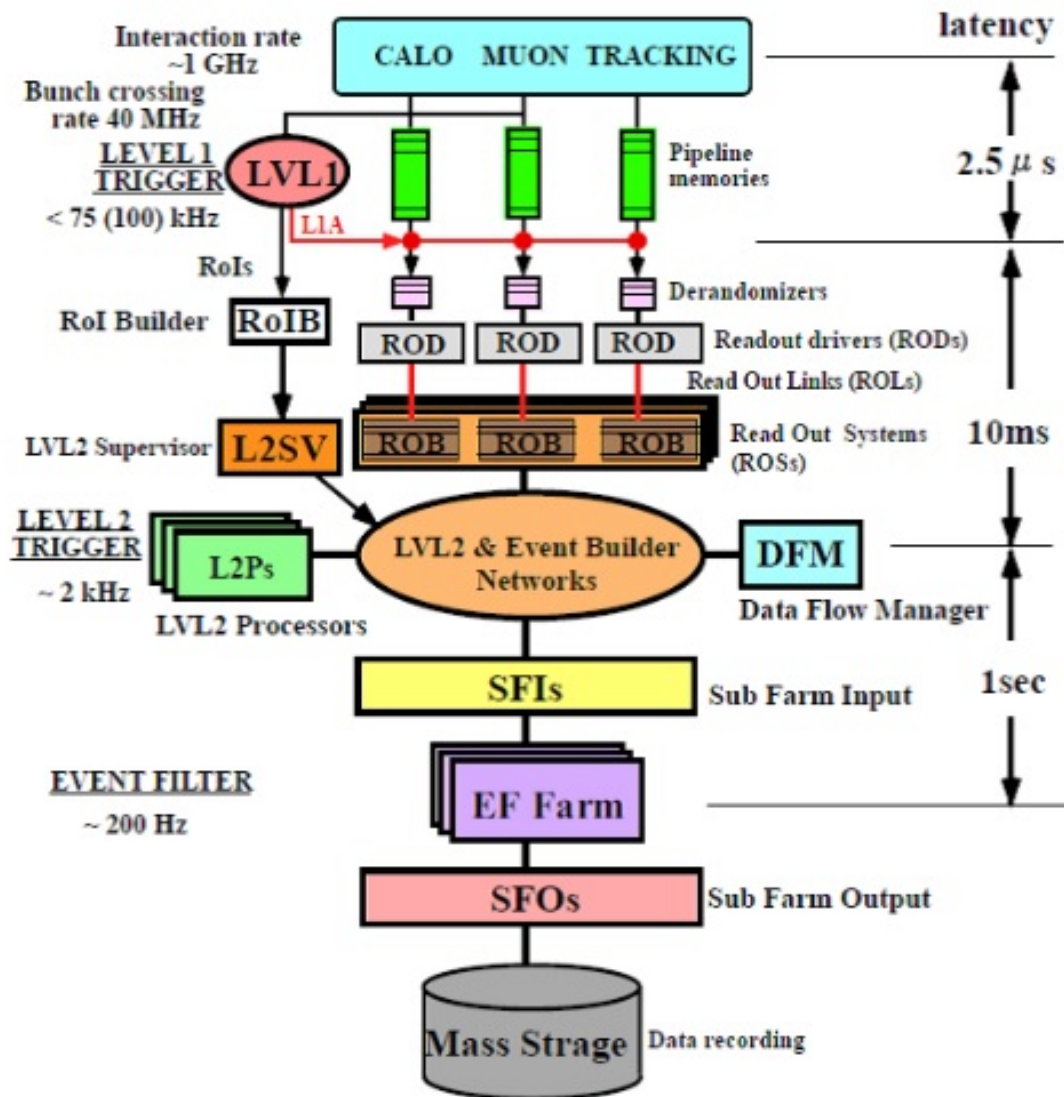


図 2.10 ATLAS トリガーシステムの全体像 [2]

よって、トリガーシステムにより解析の対象となるイベントだけを効率よく選び出す必要がある。

ATLAS トリガーシステムの全体像を図 2.10 に示した。レベル1トリガーとハイレベルトリガーの2段階となっている。ハイレベルトリガーは、レベル2トリガーとイベントフィルターに区分される。レベル1トリガーはハードウェアで処理を行う高速トリガーであり、ハイレベルトリガーはCPUを用いてソフトウェアで処理を行う。

### 2.3.2 レベル1トリガー

ATLAS 実験において、最初の事象選択を行うのが、レベル1トリガーである。図 2.11 にレベル1トリガーの概要を示した。レベル1トリガーは、ミューオンスペクトロメーターおよびカロリメーターの情報により発行される。ミューオンスペクトロメーターから得られる情報としては、ミューオンの  $p_T$  と方向があり、カロリメーターから得られる情報としては、電子や光子、ジェットなどのエネルギーがある。



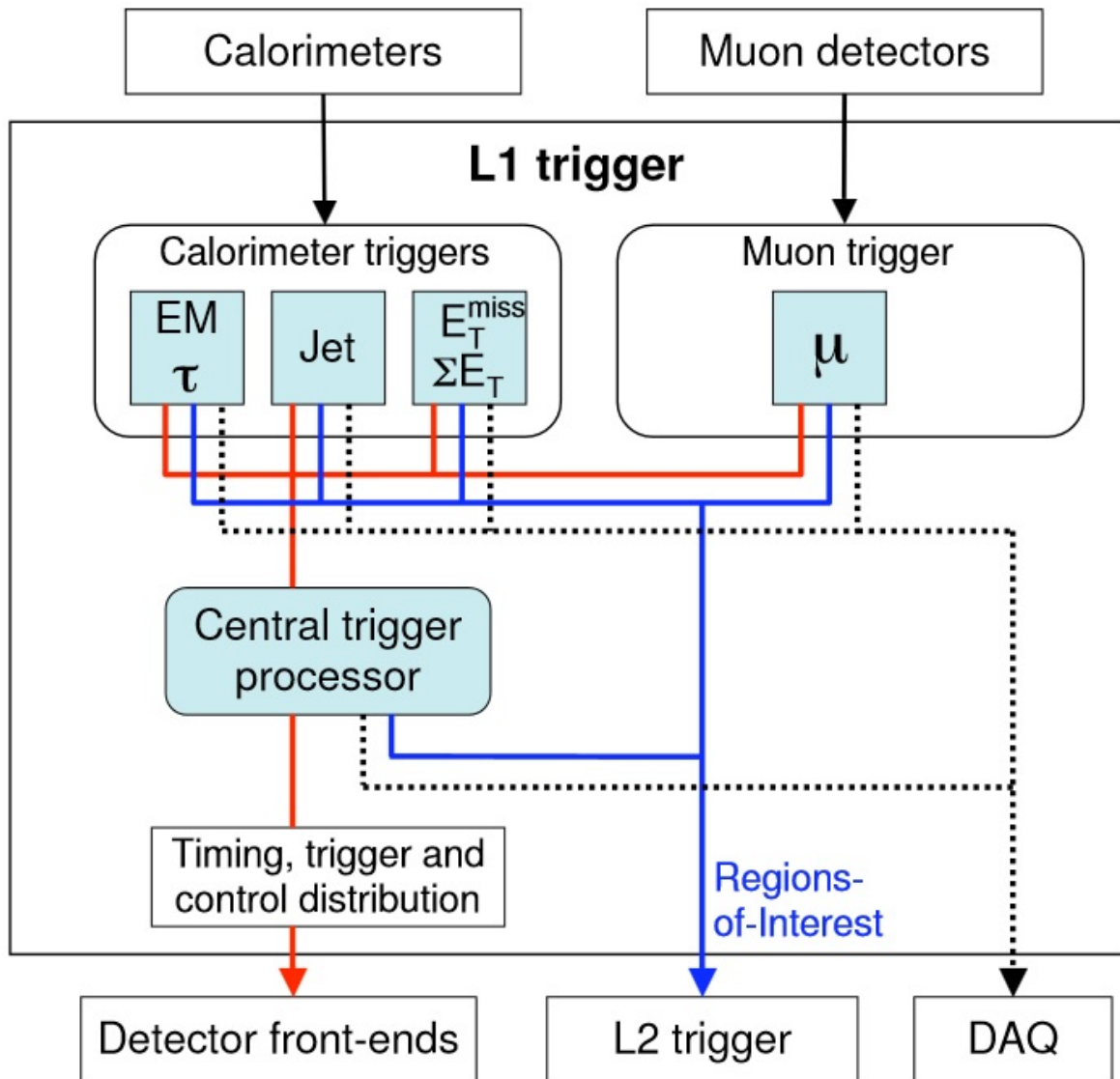


図 2.11 レベル1トリガーの概要 [1]

本研究の主題であるレベル1 ミューオントリガーについて詳しく説明する。レベル1 ミューオントリガーは、TGC (エンドキャップ領域) および RPC (バレル領域) を通過したミューオンのうち、閾値以上の  $p_T$  をもったミューオンを含むイベントに対して発行される。 $p_T$  の閾値は6段階に設定されている (“PT1” から “PT6”)。表 2.1 に TGC および RPC の閾値一覧を示した。

TGC および RPC で測定されたミューオンの  $p_T$  情報 (およびカロリメーターで測定されたエネルギー情報) は、Central Trigger Processor (CTP) に送られる。CTP では、ミューオンスペクトロメーターやカロリメーターからの情報を統合してトリガー判定を行う。MU (muon)、EM (electromagnetic)、J (jet) などのトリガーメニューが用意されていて、いずれかの基準を満たした場合に、トリガー発行を意味する Level 1 Accept (L1A) 信号が出される。

表 2.1 TGC および RPC における  $p_T$  別の閾値一覧。なお、TGC では、PT3 は使用していない。

PT	TGC の $p_T$ 閾値 [GeV / c]	RPC の $p_T$ 閾値 [GeV / c]
PT1	4	4
PT2	6	6
PT3	***	10
PT4	11	11
PT5	15	15
PT6	20	20

## 2 ミューオントリガー

先述のように、レベル1 ミューオントリガーは TGC および RPC を通過したミューオンのうち閾値以上の  $p_T$  をもったミューオンを含むイベントに対して発行される。そのレベル1 ミューオントリガーの中でも、本研究の主題となるのは、2 つ以上のレベル1 ミューオントリガーが同時に発行される、2 ミューオントリガーである。レベル1 の2 ミューオントリガーは、L1\_2MU4、L1\_2MU6、L1\_2MU10 などのように名前がつけられている。L1\_2MU4 は 4 GeV/c 以上の  $p_T$  をもったミューオンが TGC または RPC に 2 つ以上通過した場合に発行されるトリガーである。L1\_2MU6 は 6 GeV/c 以上の  $p_T$ 、L1\_2MU10 は 10 GeV/c 以上の  $p_T$  をもったミューオンが TGC または RPC を 2 つ以上通過した場合に発行されるトリガーである。この2 ミューオントリガーは、多くの物理で利用されている。一例を挙げると、B の物理において、 $J/\psi$  の崩壊により生じるミューオン 2 つをとらえるのに重要な役割を果たしている。また新粒子探索においても複数のミューオンが出てくるものがあり、この2 ミューオントリガーが利用されている。

### 2.3.3 ハイレベルトリガー

先述のように、ハイレベルトリガーは、レベル2トリガーとイベントフィルターからなる。なお、この分類は RUN-1 時のものであり、RUN-2 ではレベル2トリガーとイベントフィルターを統合してハイレベルトリガーと呼んでいる。本論文では説明の都合上、レベル2トリガーとイベントフィルターに分けて論述を行う。

レベル2トリガーでは、トリガー用検出器だけでなく、その他の検出器も用いることにより、レベル1トリガーよりも精度よくトリガー判定を行う。ミューオントリガーを例に挙げると、MDT、CSC、ID などからの高精度な位置情報を用いて  $p_T$  を測定し、トリガー判定を行っている。効率よくトリガー判定をするために、レベル2トリガーでは、レベル1でトリガーがあった RoI とその付近の情報を用いてトリガー判定を行う。

イベントフィルターでは、全検出器の情報からトリガーを判定している。トリガー判定には複数の PC で並列処理を行う。処理時間は 1 イベントに対して約 1 秒である。イベントフィルターで  $p_T$  等がトリガー条件を満たすと、最終的なデータ取得が行われる。

## 第 3 章

# レベル 1 ミューオントリガーに用いる検出器およびトリガーシステムについて

前章で述べたように、レベル 1 ミューオントリガーでは TGC ( エンドキャップ部 ) および RPC ( バレル部 ) が用いられている。本章では、これらの検出器の概要、トリガースキーム、読み出し回路などのエレクトロニクスについて説明する。

### 3.1 TGC

本節では、エンドキャップ部のトリガー用検出器である TGC について記述する。

#### 3.1.1 TGC の構造

TGC は、多線式比例計数チェンバー ( Multi Wire Proportional Chamber, MWPC ) を円盤状に並べ、2 層または 3 層を重ねた構造で 1 枚単位としている。この 1 枚単位をどのように配置しているかについて詳しくは本章内で後述する。図 3.1 に、TGC を含むミューオンスペクトロメーターの断面図 ( 検出器の

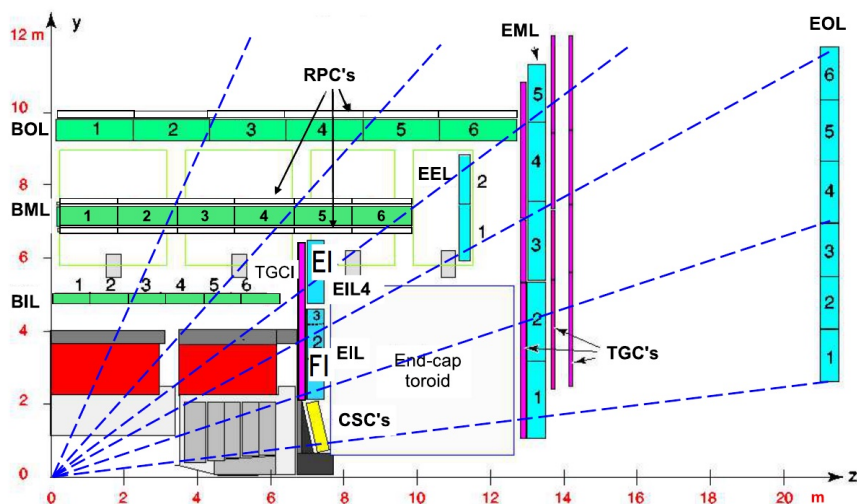


図 3.1 ミューオンスペクトロメーターの断面図 [10]

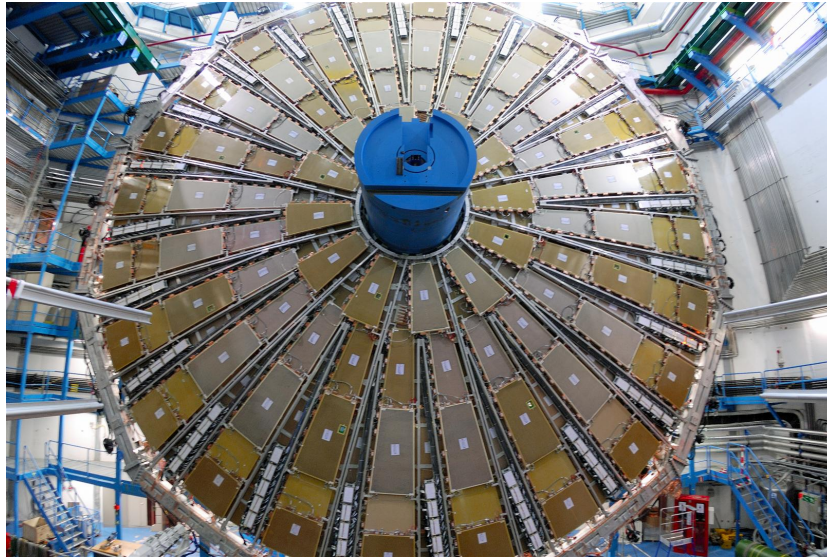


図 3.2 TGC (ビッグウィール) の概観写真 [8]

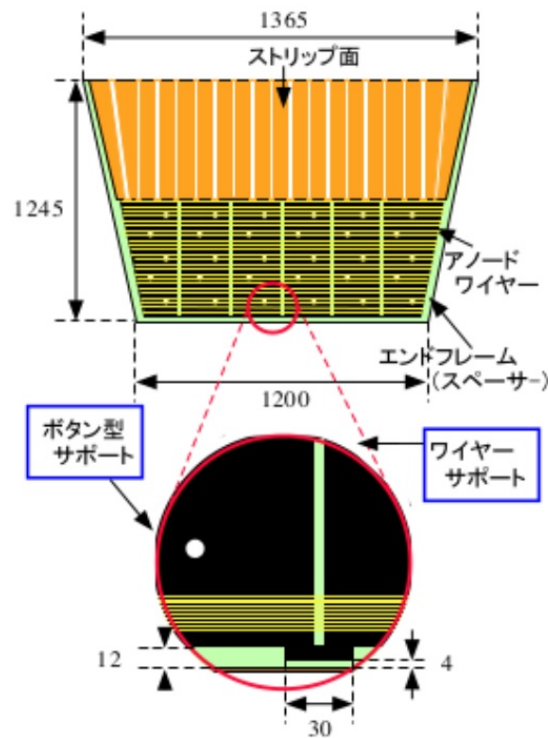


図 3.3 TGC の構造 (模式図) [7]

1/4 図) を示した。TGC は、 $|z| = 7.4 \text{ m}$  および  $|z| = 7.0 \text{ m}$  の位置にある EI, FI と、 $|z| = 13.4 \text{ m}$ ,  $|z| = 14.6 \text{ m}$  および  $|z| = 15.2 \text{ m}$  の位置にある ビッグウィールに分けられる。図 3.2 にビッグウィールの概観写真を示した。写真のように、TGC は円形のエンドキャップ領域を覆っている。円形領域をカバーするため、TGC の一つ一つは図 3.3 に示すように大きさの異なる (R 方向に 1 m ~ 2.4 m) 台形である。アノードワイヤーとカソードストリップが直交していて、2次元読み出しが可能になっている。図 3.4 に示すように、ワイヤー間の距離は 1.8 mm で、ワイヤーとストリップ間の距離は 1.4 mm である。

アノードとして直径  $50 \mu\text{m}$  の金メッキタングステンワイヤーが図 3.3 のように台形の上底、下底に平

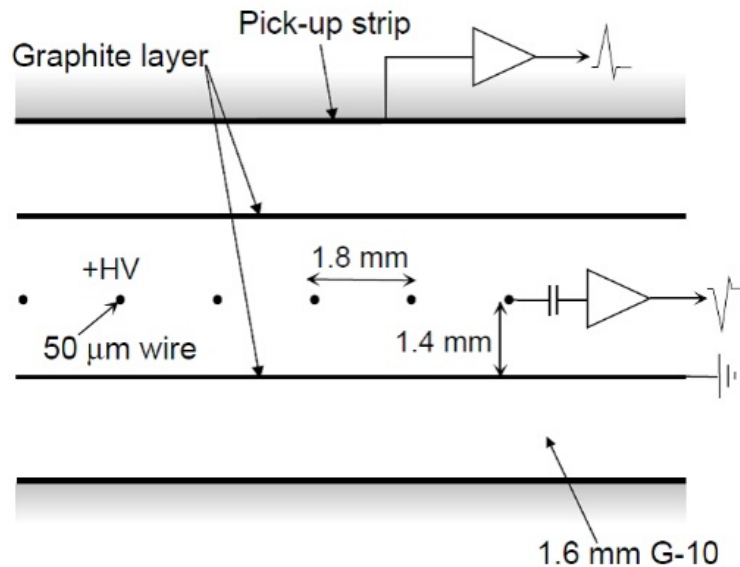


図 3.4 TGC の断面図 [1]

行に張られている。カソードには、ガラスエポキシ板に表面抵抗  $1 \text{ M}\Omega$  のカーボン塗布したものを用いている。カーボン塗布面の反対側には銅で出来たストリップがワイヤーに直交するように張られている。ワイヤーのたるみを減らすための工夫として、ワイヤーサポートが  $30 \text{ cm}$  毎に設置されている。その影響により、局所的に不感領域が存在する。ワイヤーは  $6 \sim 20$  本をまとめて 1 チャンネルとして読み出している。ストリップは 1 本を 1 つのチャンネルとして読み出している。

### 3.1.2 TGC の動作原理

TGC のワイヤーとストリップの配置は図 3.4 の通りである。印加電圧  $2.8 \text{ kV}$  のアノードワイヤーをカソード面で挟んだコンデンサー構造である。内部は、 $\text{CO}_2$  と  $n$ -ペンタンの混合ガス ( $55:45$ ) で充填されている。荷電粒子、例えば衝突点からのミューオンがこのチェンバーを通過すると、その飛跡上のガス分子を電離して電子とイオンが発生する (1 次電離)。このとき出てくる電子を 1 次電子と呼ぶ。この 1 次電子が印加電圧によってワイヤー側に加速され、ガス分子の電離エネルギーを超えると 2 次電子が生成される。ワイヤー付近は電場が大きいので、2 次電離が雪崩的に起こり、ワイヤーの周囲に図 3.5 のようなカスケード (雪崩) ができる。雪崩により生成された電子は  $1 \text{ ns}$  以内にワイヤーに吸収される。一方で、雪崩により生成されたガスイオンは電子よりも重いので、ゆっくりとカソード面へ移動する。コンデンサー構造をしているので、ガスイオンの電荷移動によりワイヤーに電圧が誘起される。ワイヤーでその時間微分の成分を読み出す。カーボン面にも電圧が誘起され、ストリップにも電圧が誘起される。ストリップではこの誘起された電圧を読み出す。

### 3.1.3 TGC の分類

ATLAS 実験では、TGC を 2 種類の方法で利用している。2 枚重ねた状態 (ダブルレット) と 3 枚重ねた状態 (トリプレット) である (図 3.6)。ダブルレットでは、2 枚それぞれのワイヤーおよびストリッ

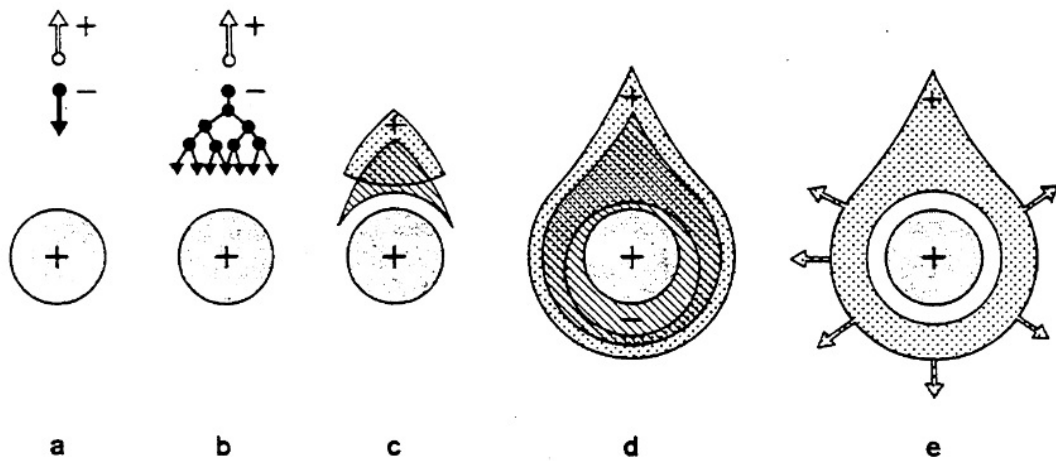


図 3.5 電子雪崩の様子。a → e へと時間発展している。[4]

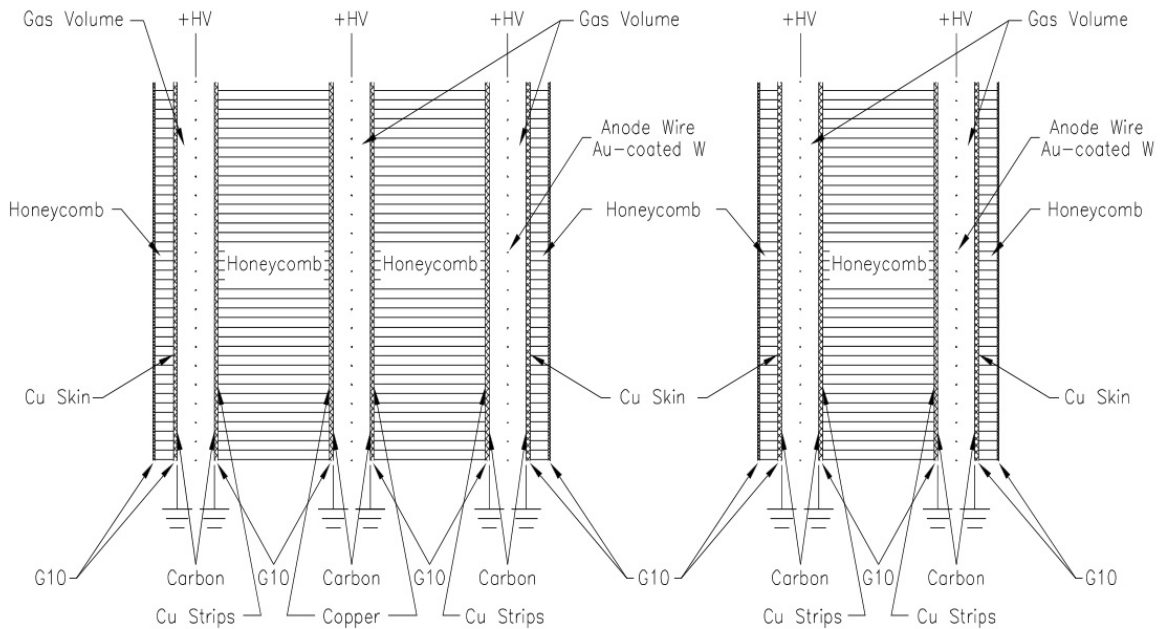


図 3.6 TGC の構造。左 : triplet、右 : doublet[1]

プで読み出しを行っている。トリプレットでは、2 枚目にストリップが存在せず、3 層のワイヤーと 2 層のストリップで読み出しを行っている。これら複数枚の情報でコインシデンスをとり、バックグラウンドを減らしている。また、各層の不感領域が重ならないように配置することで、トリガーシステム全体でみたときの不感領域を減らすようにデザインしている。

### 3.1.4 TGC の配置

TGC がどのように配置されているかについて述べる。図 3.1 のミューオンスペクトロメーター断面図において、 $|z| = 7.4 \text{ m}$  および  $|z| = 7.1 \text{ m}$  の位置に EI, FI が設置されており、 $|z| = 13.4 \text{ m}$ ,  $|z| = 14.6 \text{ m}$  および  $|z| = 15.2 \text{ m}$  の位置にビッグウィールが設置されている。図 3.7 に TGC の配置を示し

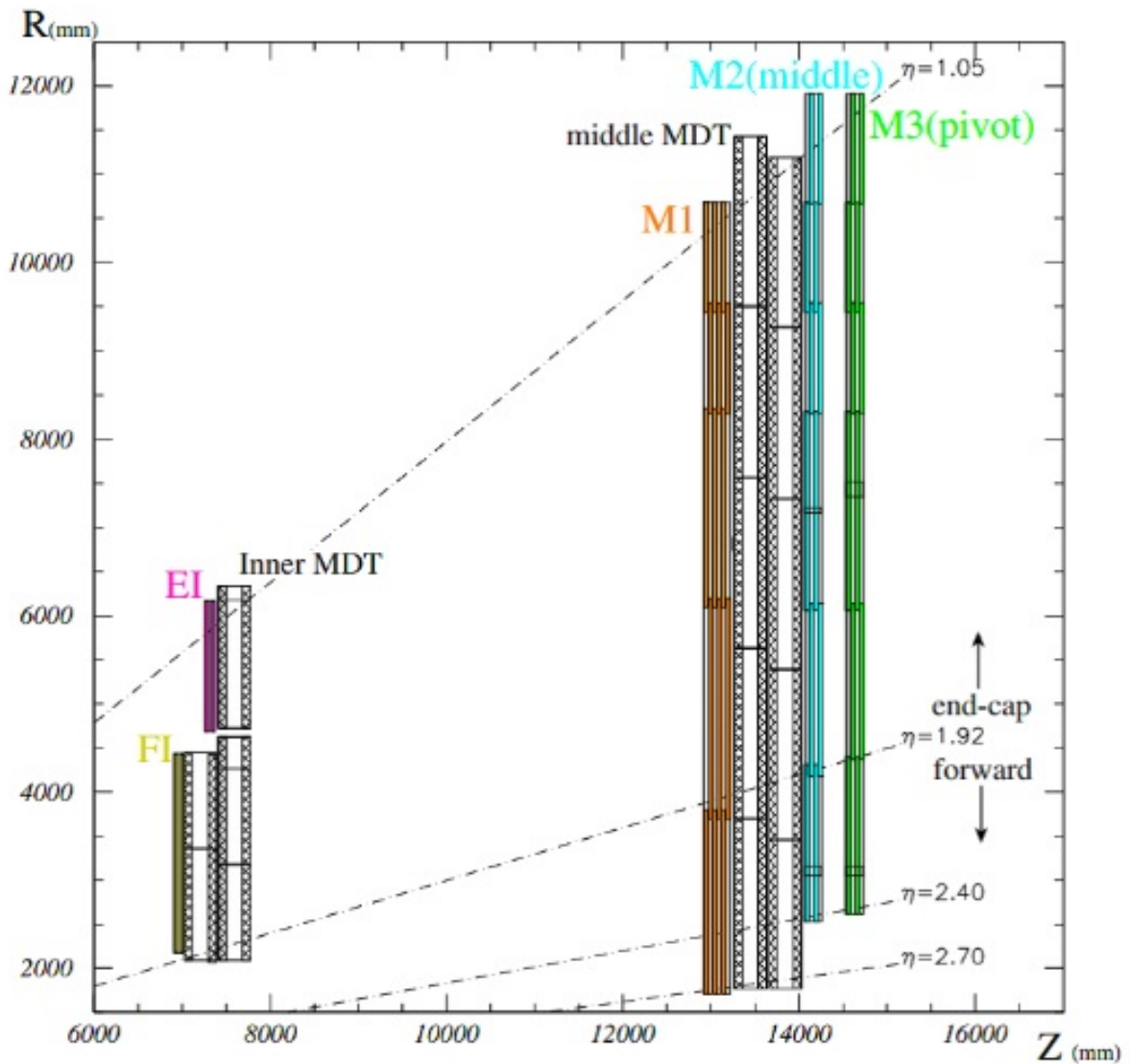


図 3.7 TGC の配置

た。ビッグウィールのうち  $|z| = 13.4$  m にあるものを M1 と呼び、  $|z| = 14.6$  m にあるものを M2、  $|z| = 15.2$  m にあるものを M3 と呼ぶ。M1 はトリプレットであり、 M2, M3, EI, FI はダブルレットである。図 3.8 にビッグウィールの全体説明図を示した。

ビッグウィールは、  $1.0 < |\eta| < 2.4$  の領域をカバーしている。このうち、図 3.8 に示すように、  $1.0 < |\eta| < 1.9$  の領域をエンドキャップと呼び、  $1.9 < |\eta| < 2.4$  の領域をフォワードと呼ぶ。  $\phi$  方向の分割には、トリガーセクターという単位が用いられる。エンドキャップ領域では  $\phi$  方向に 48 分割した単位がトリガーセクターであり、フォワード領域では  $\phi$  方向に 24 分割した単位がトリガーセクターである。トリガー判定はこのトリガーセクター単位で行われる。トリガーセクターについては、次節で詳しく説明する。一方、データ読み出しは  $\phi$  方向に 1/12 分割したものを単位として処理される。

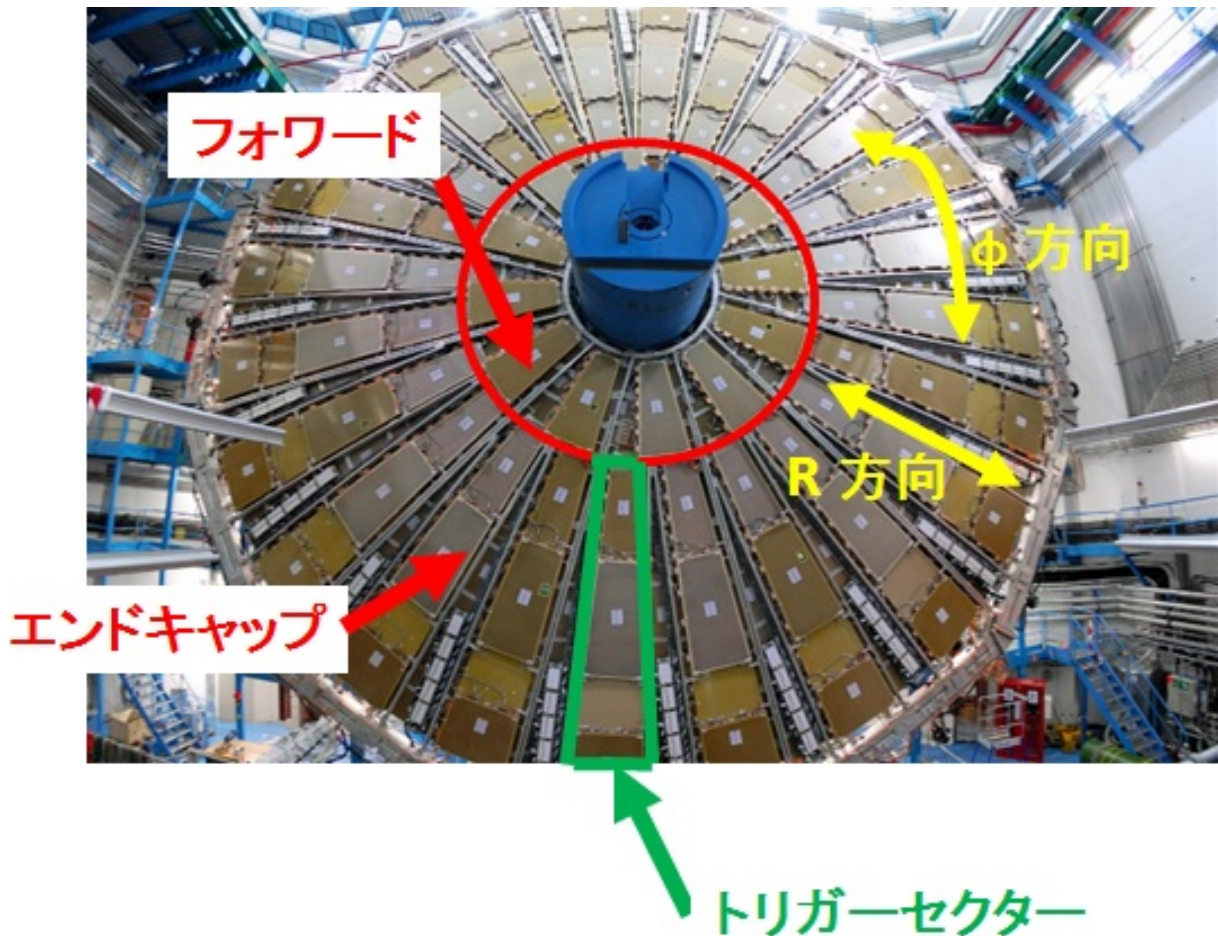


図 3.8 TGC (ビッグウィール) の全体説明 [8] から編集

### 3.1.5 トリガーセクター

上述のように、TGC のデータ読み出しは  $\phi$  方向に 1/12 分割したものを単位として処理される。一方、トリガー判定はこれよりも細かいトリガーセクターという単位で行われる。図 3.9 がトリガーセクターを図示したものである。エンドキャップ領域では、1 つのトリガーセクターは  $\eta$  方向に並んだ 4 枚 (M1) または 5 枚 (M2、M3) のチェンバーからなっている。

トリガーセクターはエンドキャップ領域では  $\phi$  方向に 48 セクターあるので、ビッグウィールには M1 で 192 枚、M2、M3 はそれぞれ 240 枚のチェンバーを用いている。M1 がトリプレット、M2、M3 がダブルレットで、エンドキャップ領域の片サイドには、1536 枚のチェンバーを並べている。

フォワード領域では、1 トリガーセクターあたり 1 枚のチェンバーからなっている。トリガーセクターは、フォワード領域では  $\phi$  方向に 24 セクターあるので、M1、M2、M3 それぞれ 24 枚のチェンバーを用いている。M1 がトリプレット、M2、M3 がダブルレットで、エンドキャップ領域の片サイドには、168 枚のチェンバーを並べている。

以上のように、A サイドおよび C サイド合わせて 3408 枚のチェンバーをトリガーセクターという単位に分割して、データ読み出しを行っている。

トリガーセクターは、さらに Region of Interest (RoI) に分割される。エンドキャップ領域では、1



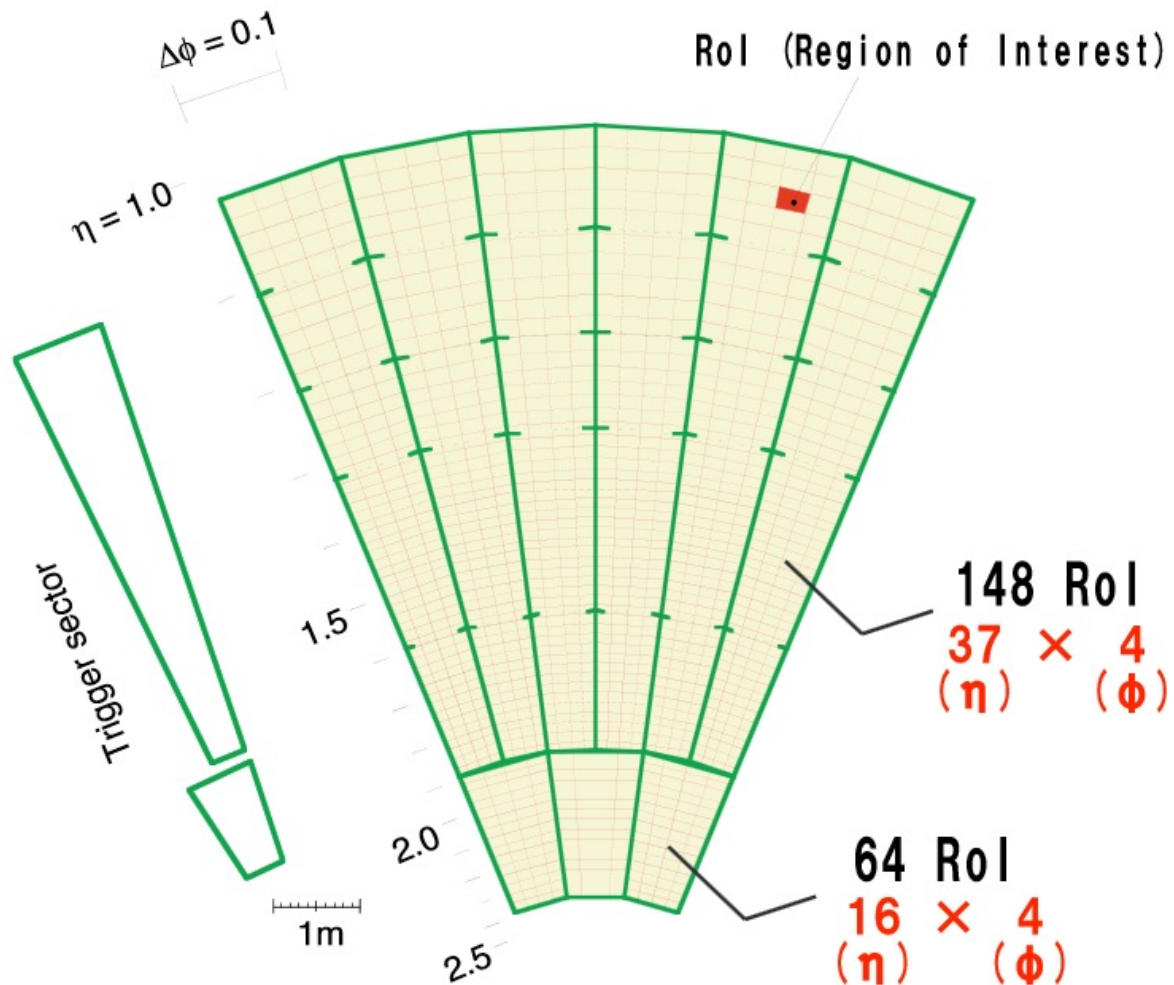


図 3.9 TGC のトリガーセクター [1]

トリガーセクターを、R 方向に 37 分割、 $\phi$  方向に 4 分割し、合計 148 の RoI に分割している。フォワード領域では、1 トリガーセクターを、R 方向に 16 分割、 $\phi$  方向に 4 分割し、合計 64 の RoI に分割している。この RoI がトリガー判定の最小単位である。

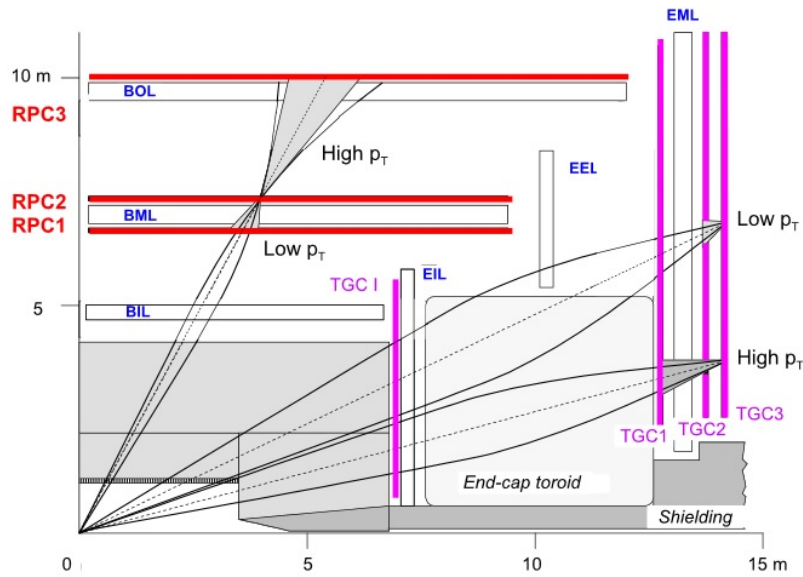
### 3.1.6 トリガースキーム

TGC では、ミューオンの  $p_T$  を算出し、この算出された  $p_T$  が閾値以上であればトリガーを発行する。

TGC での  $p_T$  算出方法について説明する。まず、衝突点付近でミューオンが生成される。ミューオンが生成される反応としては例えば、 $W^-$  ボソンが生成され、それが、 $W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$  に崩壊する過程がある。

このようにして生成されたミューオンは、ビッグウィールに到達するまでの間にトロイド磁場により曲げられる。トロイド磁場で曲げられたミューオンは、TGC ビッグウィールを M1、M2、M3 の順に通過する。このとき、それぞれの通過点において TGC が生成した信号をフロントエレクトロニクスが処理し、位置情報 R および  $\phi$  が生成される。トリガーは、R と  $\phi$  で独立に処理されている。

ここで、もしミューオンが無限大の運動量を持っていると仮定すると、そのミューオンの飛跡は衝突点と M3 のヒットポイントを結ぶ直線となる。このようにして得られる直線と実際の飛跡とのズレ ( $\Delta R$ ,

図 3.10  $p_T$  算出方法の概要 [1]

$\Delta\phi$ ) から  $p_T$  を算出している。

この算出方法の概要が図 3.10 である。ここまでの計算は、 $R$  と  $\phi$  で独立に行っている。このあと最後に  $R$  と  $\phi$  のコインシデンスをとる。

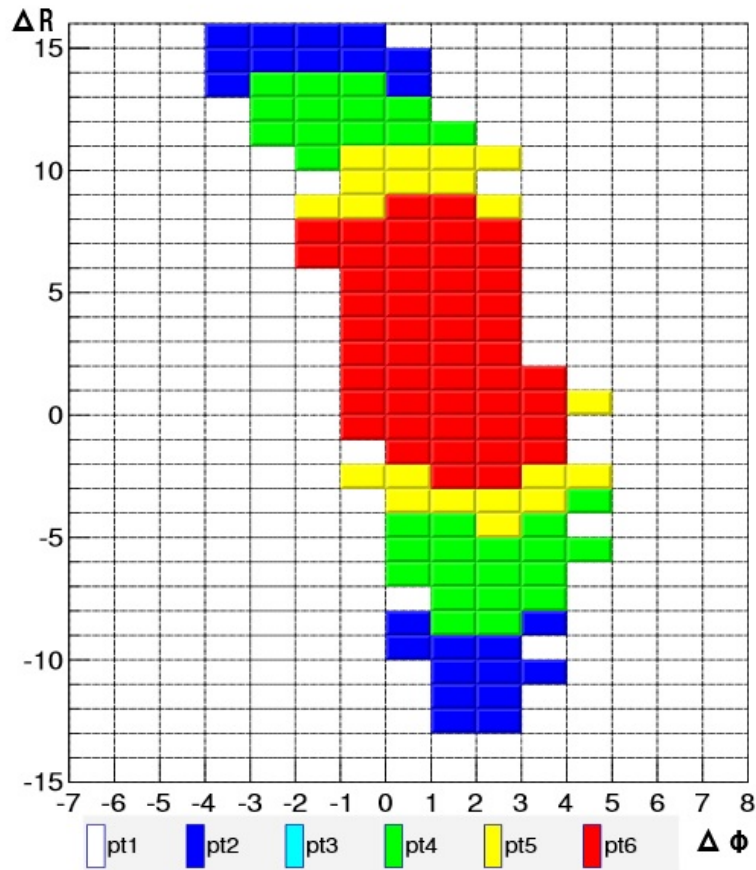
このコインシデンスの際に、図 3.11 にある表を用いて、 $p_T$  を算出する。図 3.11 は、モンテカルロシミュレーションを用いて  $p_T$  と  $(\Delta R, \Delta\phi)$  の関係を求めたものである。pt1 はコインシデンスウィンドウ内、pt2 は  $p_T > 6$  GeV、pt4 は  $p_T > 10$  GeV、pt5 は  $p_T > 15$  GeV、pt6 は  $p_T > 20$  GeV を意味する。なお、pt3 は TGC では使用していない。

この  $p_T$  算出方法が、どのように実装されているのかについて述べる。

図 3.12 のように、コインシデンスを段階的に行い、トリガー判定に必要な情報を統合していく。図中の赤色の矢印はトリガー系の信号処理を表し、青色の矢印はリードアウト系の信号処理を表している。このうち、トリガー系の処理について説明する。

TGC からのアナログ信号は、まず Amplifier Shaper Discriminator (ASD) に送られる。ASD は、チェンバー側面に設置されている。この ASD において、インプット信号は増幅、整形、デジタル化され、そのアウトプットは Patch Panel (PP) へと送られる。PP では、インプット信号に 16 チャンネル単位で異なるディレイをかけている。これにより粒子の飛行時間やケーブル長による時間差を解消している。このようにしてタイミングをそろえた信号を LHC の基準クロックに同期させてバンチ識別を行い、その結果を Slave Board (SLB) にアウトプットする。

SLB において、トリプレット・ダブレット内でのコインシデンスを行う。4 種類の SLB があり、それぞれが、ダブレットのワイヤ/ストリップ (WD / SD)、トリプレットのワイヤ/ストリップ (WT / ST) の処理を行っている。WD および SD では、4 層中 3 層以上にヒットがあることを要求している。WT では、3 層中 2 層以上にヒットがあることを要求し、ST では、2 層中 1 層以上にヒットがあることを要求している。SLB でコインシデンスをとった信号は、High-pT ボードへ送られる。この High-pT ボードでは、トリプレットとダブレットとの間でのコインシデンスを要求する。2 種類の High-pT ボードがあり、それぞれがワイヤおよびストリップの処理を行っている。コインシデンスが要求された結果は G-Link 信号に変換され、光ファイバーでセクターロジックへと送られる。

図 3.11  $p_T$  と  $(\Delta R, \Delta\phi)$  の対応 [5]

実際にトリガー判定を行うのがセクターロジック (図 3.12 中の Sector logic) である。図 3.11 の  $p_T$  -  $(\Delta R, \Delta\phi)$  対応関係にしたがって、 $p_T$  を算出する。なお、この  $p_T$  と  $(\Delta R, \Delta\phi)$  の対応関係は、RoI ごとに異なるものであり、あらかじめ用意されていて、検出器のアライメント (理想的な位置からのずれ) の補正も取り込まれている。

こうして算出された  $p_T$  が閾値以上であればトリガーを発行する。このトリガー判定結果は、MUon CTP interface (MUCTPi) へと送られて、CTP でのレベル1トリガー判定に利用される。

### 3.1.7 読み出し回路

ここでは、トリガー発行後に行う TGC の情報読み出し処理について述べる。

セクターロジックでのレベル1 ミューオントリガーの判定結果は、MUCTPi を介して CTP へと送られる。CTP では、TGC, RPC, カロリーメーターからの情報を統合して、複数 (Run-2 では約 500 種類) あるトリガー条件と照らし合わせる。このときに、インプットがトリガー条件のどれかを満たしていた場合、レベル1トリガー、Level-1 Accept (L1A) 信号を発行する。このように CTP で発行された L1A 信号は ATLAS 検出器を構成するすべての測定器システムに伝えられる。TGC を例に挙げると、SLB がこの信号を受け取る。この SLB は、128 BC 分の長い FIFO をもっている。SLB は、信号を受け取ると、L1A 信号が発行されたバンチとその前後 1 バンチの計 3 バンチ分のデータを Star SWitch (SSW) に送る。なお、2015 年の後半では前バンチのデータは送らずに、2 バンチ分のデータを送る設

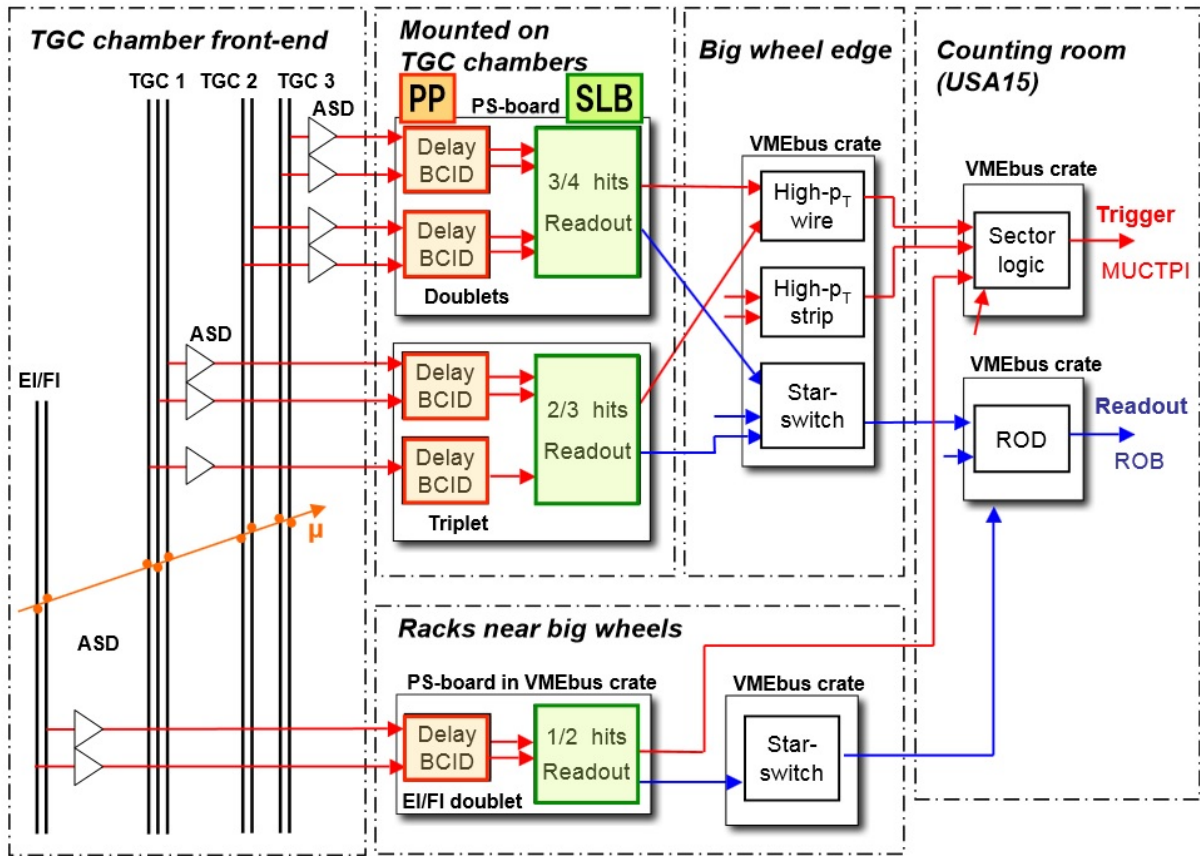


図 3.12 TGC ヒット情報の流れ [1]

定に変更した。SSW では各 SLB のデータを収集し、圧縮して、それを Read Out Driver ( ROD ) へと送る。ROD ではイベントの整合性を確認して、PC ベースの Read Out System ( ROS ) へ送る。

## 3.2 RPC

本節では、バレル部のトリガー用検出器である RPC ( Resistive Plate Chamber ) について記述する。

### 3.2.1 RPC の全体像

バレル部のトリガーシステムは、ビーム軸を中心とした円筒の半径が異なる 3 層からなる。図 3.13 に RPC の配置を示した。また、大きさの異なるセクター ( small, large ) が  $\phi$  方向に交互に並んでいる。

各ステーション ( RPC1, RPC2, RPC3 ) は、 $\eta$ 、 $\phi$  それぞれを測定する 2 層構造になっている。よって、ミューオンが 3 ステーションすべてを通ると、 $\eta$ 、 $\phi$  それぞれについて 6 つの測定値が得られる。低い  $p_T$  のトリガー ( RPC1, RPC2 を用いる ) については、4 層中 3 層以上で検出するというコインシデンスを要求している。高い  $p_T$  のトリガー ( RPC3 を用いる ) については、2 層中 1 層以上で (つまりどちらか一方) で検出するというコインシデンスを要求している。このコインシデンススキームにより、チェンバー全体の検出効率を保っている。TGC と同様に、セクターロジックまでは  $\eta$  と  $\phi$  は独立で処理が進む。

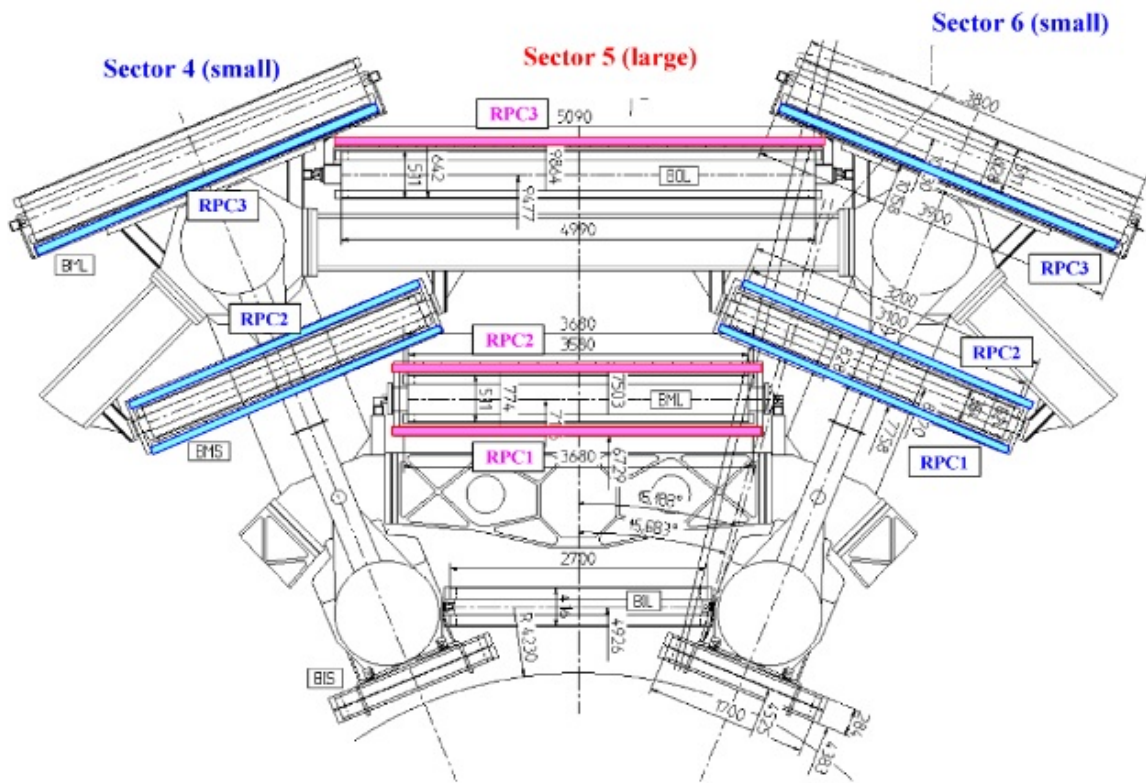


図 3.13 RPC の配置 [1]

### 3.2.2 RPC の動作原理

RPC はガス平行平板電極検出器で、ワイヤーは無い。メラミンフェノール樹脂のプラスチック積層でできた2枚の抵抗板が、2 mm 間隔で並べられている。プレート間の電場は約 4.9 kV/mm で、電離した飛跡がアノードへ向かうときにアバランシェ増幅を起こす。30 mm 間隔で張られたストリップに誘起された信号を読み出す。使用しているガスは、 $C_2H_2F$  が 94.7 %、 $iso-C_4H_{10}$  が 5 %、 $SF_6$  が 0.3 % の混合ガスである。この混合ガスは、 $SF_6$  濃度が低く、比較的低電圧でも増幅性能が十分であり、不燃性であり、コストも低い。

### 3.2.3 トリガーセクター

RPC のトリガー判定も、トリガーセクターという単位で行われる。RPC では  $\phi$  方向に 32 分割した単位をトリガーセクターとしている。なお、先述のように、RPC のチェンバーには大きいものと小さいものがあるので、それぞれのトリガーセクターがカバーする  $\phi$  領域の広さは異なっている。トリガーセクターはさらに Region of Interest (RoI) に分割される。図 3.14 に示したように、バレル領域では、スペクトロメーターの  $\eta$  方向のサイズが、トリガーセクターにより異なっている。よって、1 トリガーセクターあたりの RoI の数はトリガーセクターごとに異なっている。1 トリガーセクターを  $\phi$  方向に 2 分割、 $\eta$  方向に 8 ~ 14 分割することにより、1 トリガーセクターあたり 16 ~ 28 個の RoI になる。この RoI がトリガー判定の最小単位である。なお、RPC の RoI は、TGC の RoI に比べて約 9 倍の大

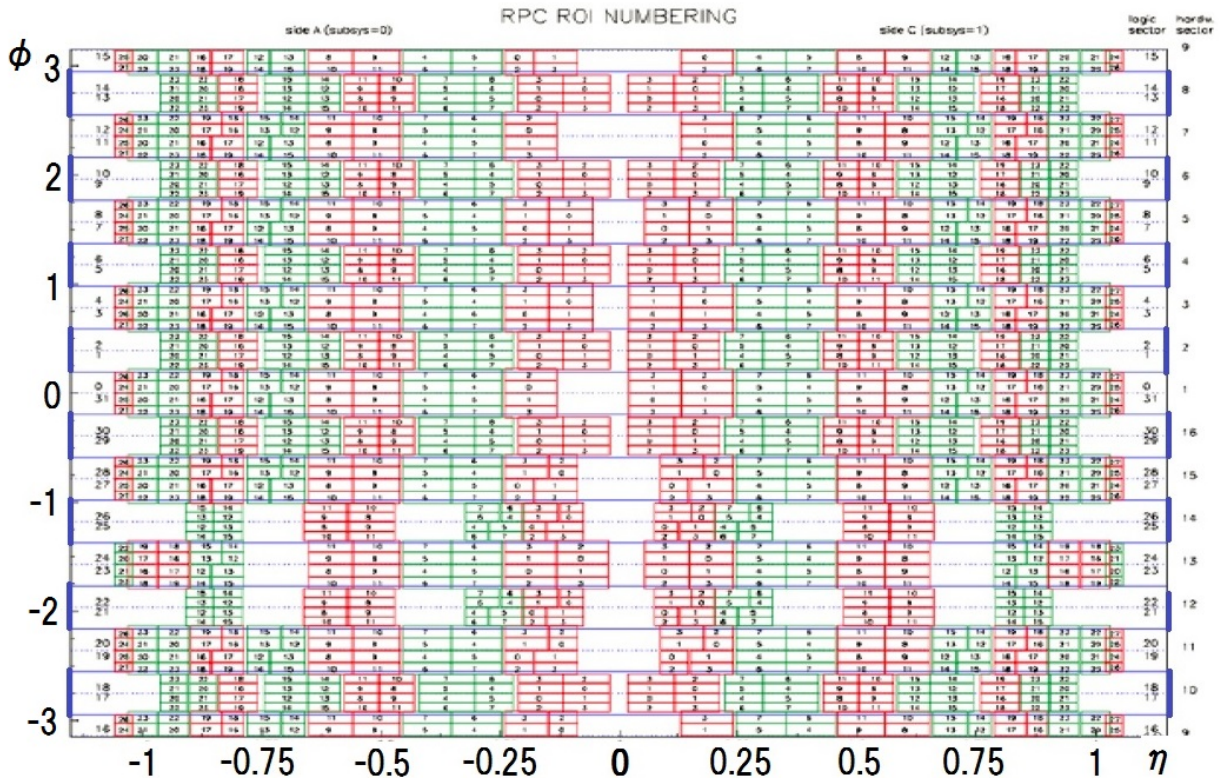


図 3.14 RPC のトリガーセクターおよび RoI の配置図。円柱の側面を  $\phi = \pi$  の部分で切り開いた形である。横軸が  $\eta$ 、縦軸が  $\phi$  であり、図中の小さな長方形が RoI を表す。RoI には、ひとつひとつナンバリングされている。

きさとなっている。

### 3.3 MUCTPi

トリガー処理の過程で登場した MUon CTP interface ( MUCTPi ) について説明する。MUCTPi は、TGC および RPC のセクターロジックから信号を受け取る。このとき受け取るのは、TGC および RPC のトリガーセクター単位でのトリガー候補である。この候補は、 $p_T$  の大きいほうから最大 2 つである。MUCTPi では、すべてのトリガーセクターからのトリガー候補を集め、最終的なミューオントラックの情報を CTP に送っている。MUCTPi で本研究の主題であるオーバーラップリムーバルを行っている。オーバーラップリムーバルについては第 4 章で説明する。実際にセクターロジックからの信号を受け取りオーバーラップリムーバルを行っているのが MIOCT ボードである。図 3.15 は MIOCT ボードの実物写真である。

図 3.16 の MUCTPi 全体構成図にあるように、A サイドおよび C サイドからの信号を各 8 分割し、計 16 分割して入力信号を受けているのが MIOCT ボードである。各サイド 8 枚、計 16 枚の MIOCT ボードで TGC および RPC の全トリガーセクターをカバーしている。エンドキャップ部の片側には、48 個のトリガーセクターがあるので、1 枚の MIOCT ボードが 6 個のトリガーセクターを担当している。フォワード部の片側はトリガーセクターが 24 個なので、1 枚の MIOCT ボードが 3 個のトリガーセクターを担当する。バレル部の片側では 32 個のトリガーセクターがあるので、1 枚の MIOCT ボードは 4 個のトリガーセクターを担当している。以上のように、MIOCT ボード 1 枚はエンドキャップ部 6 個、

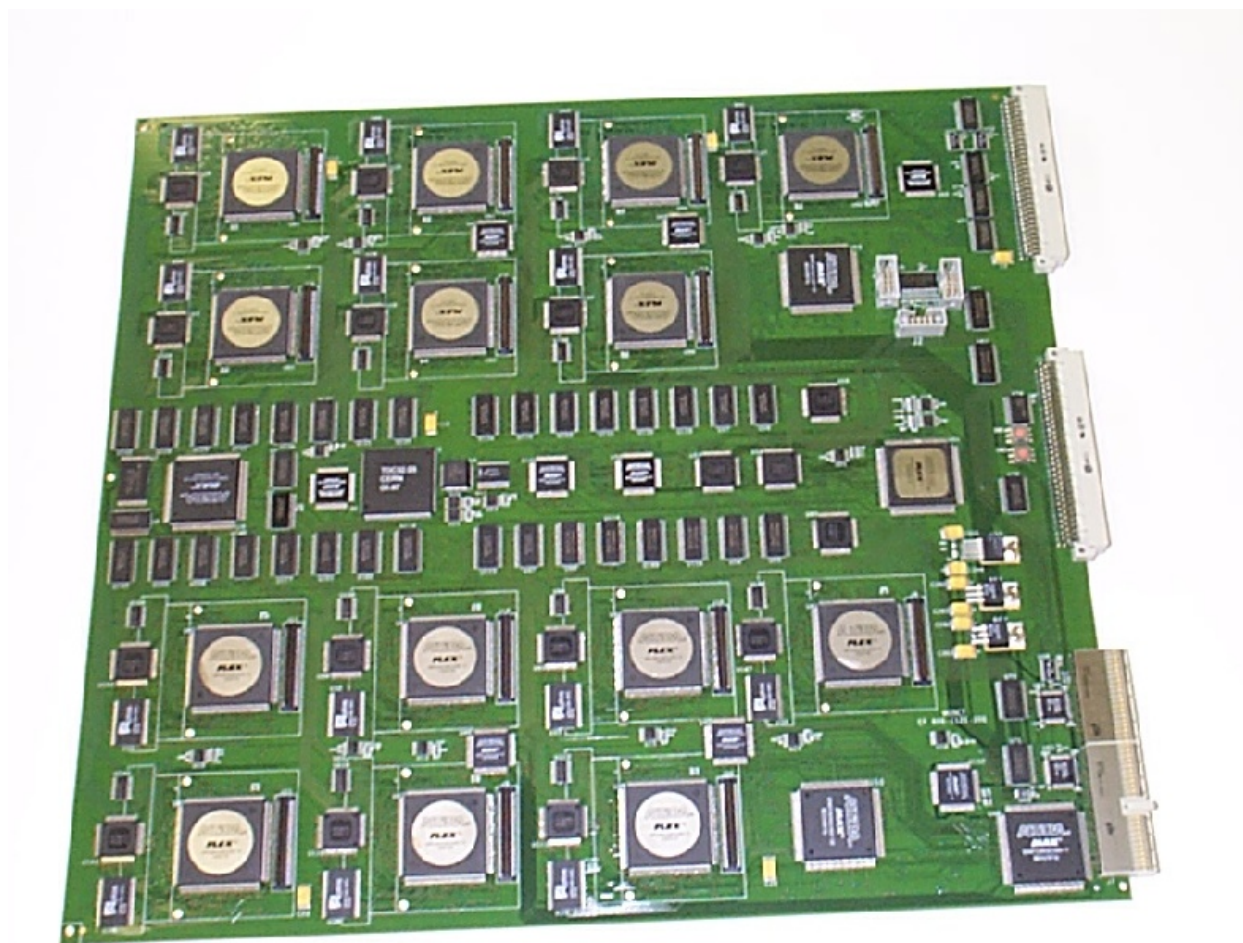


図 3.15 MIOCT ボード [11]

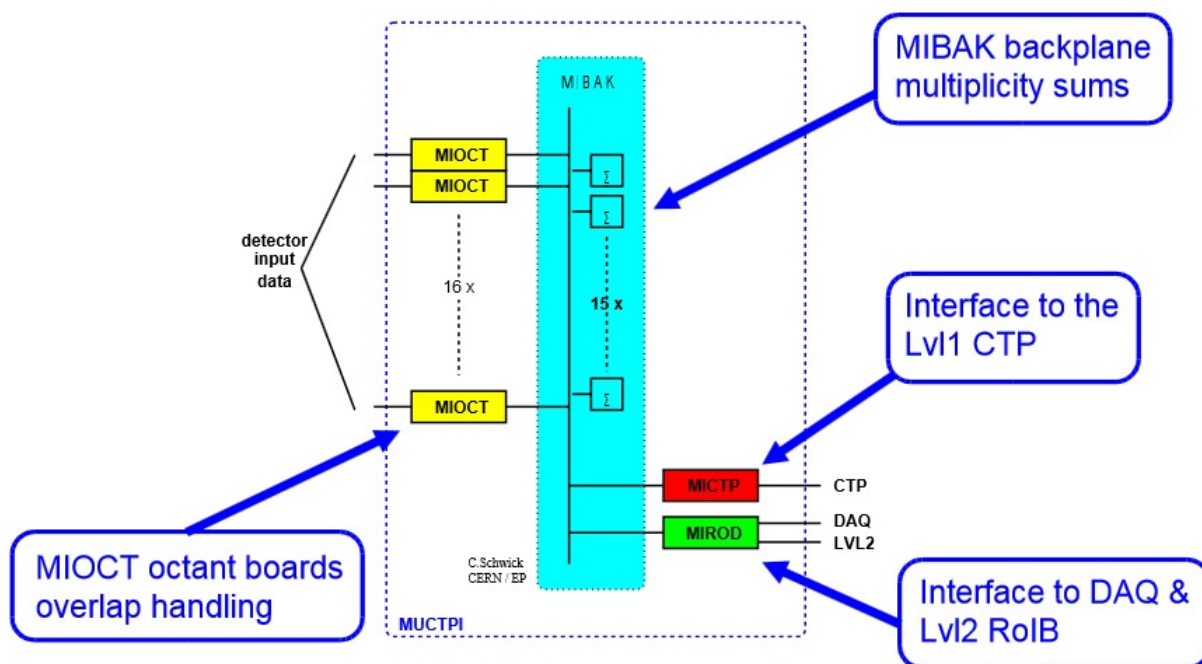


図 3.16 MUCTPi の全体構成図

フォワード部 3 個、 バレル部 4 個のトリガーセクターからの信号を受け取っている。



## 第 4 章

# フェイク 2 ミューオントリガー削減のためのオーバーラップリムーバルトリガーアルゴリズムの開発

本研究の主題であるフェイク 2 ミューオントリガー削減のためのオーバーラップリムーバルトリガーアルゴリズムの開発について述べる。

図 4.1 にエンドキャップ部の例を示した。各トリガーセクター間の継ぎ目の部分は物理的に重なっている。このオーバーラップしている領域を 1 つのミューオンが通過した場合を考える。このとき、重なっているトリガーセクターの両方でトリガーが発行される。ゆえに、実際は 1 つのミューオンしか通過していないのに、2 つのミューオンが通過したというトリガーを出してしまう。これをフェイク 2 ミューオントリガーと呼ぶ。図 4.2 にフェイク 2 ミューオントリガーのイメージ図を示した。

先述のように、ミューオンスペクトロメーターは、バレル部、エンドキャップ部、フォワード部に分けられる。ATLAS 検出器全体を円柱とみなしたとき、側面に当たる部分がバレル部であり、RPC で覆われている。底面に当たる部分は TGC で覆われており、TGC の外周部 ( $1.0 < |\eta| < 1.9$ ) をエンドキャップ部、中心部 ( $1.9 < |\eta| < 2.4$ ) をフォワード部と呼ぶ。A サイド C サイドともに、バレル部は 32 個、エンドキャップ部は 48 個、フォワード部は 24 個のトリガーセクターという単位に分けられ、この単位でトリガー判定が行われる。トリガーセクターはエンドキャップ部 148 個、フォワード部 64 個、バレル部は 44 個程度 (場所により異なり 32 ~ 52 個) の RoI というトリガーの最小単位に分けられる。図 4.3 にエンドキャップ部・フォワード部の RoI の概略図を示した。RoI のナンバリングは図 4.3 のようになっており、トリガーセクターの端に位置する RoI の一部が隣のトリガーセクターの端に位置する RoI の一部とオーバーラップする。つまり、オーバーラップしているのは、0,4,8,... 番および 3,7,11,... 番の RoI である。

ここからは、エンドキャップ部・フォワード部とバレル部に分けて論述する。まず、オーバーラップによるフェイク 2 ミューオントリガーを削減するためのリムーバルアルゴリズムについて説明する。その後、これによりどれだけのトリガーレートの削減が見込まれるか、さらに、物理解析の対象となる事象を誤って過剰に排除してしまうことがないかについて論述する。

なお、解析にはレベル 1 トリガーのみを用いて取得したデータを用いた。

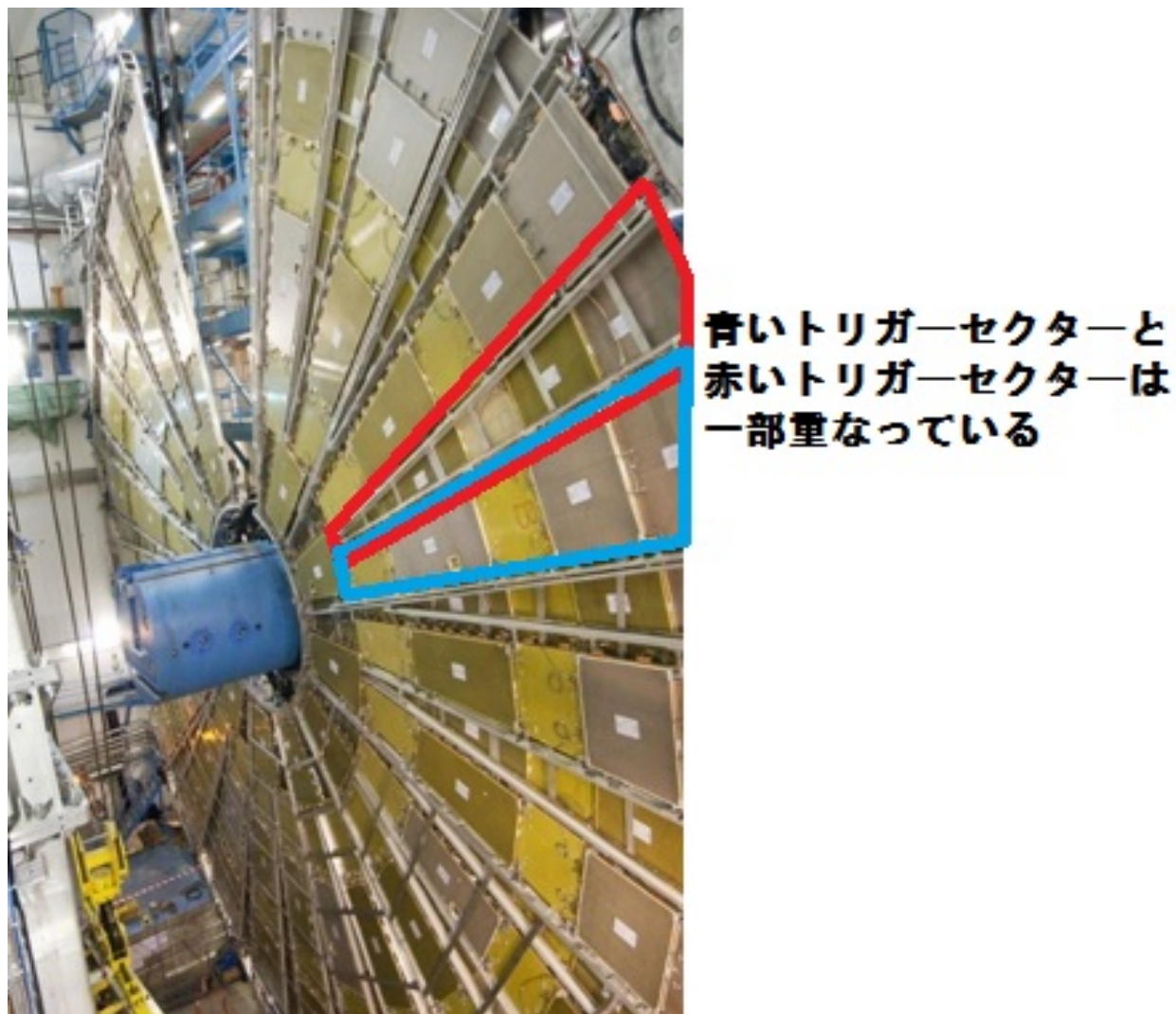


図 4.1 TGC トリガーセクターのオーバーラップの様子 [8]

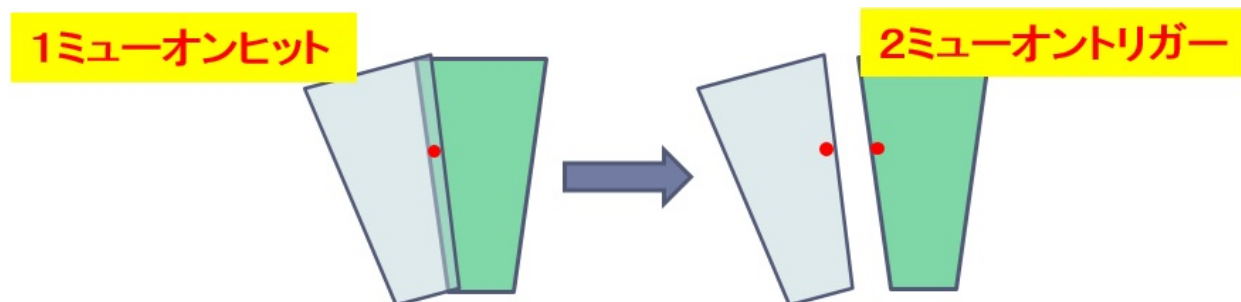


図 4.2 フェイク2ミューオントリガーのイメージ図



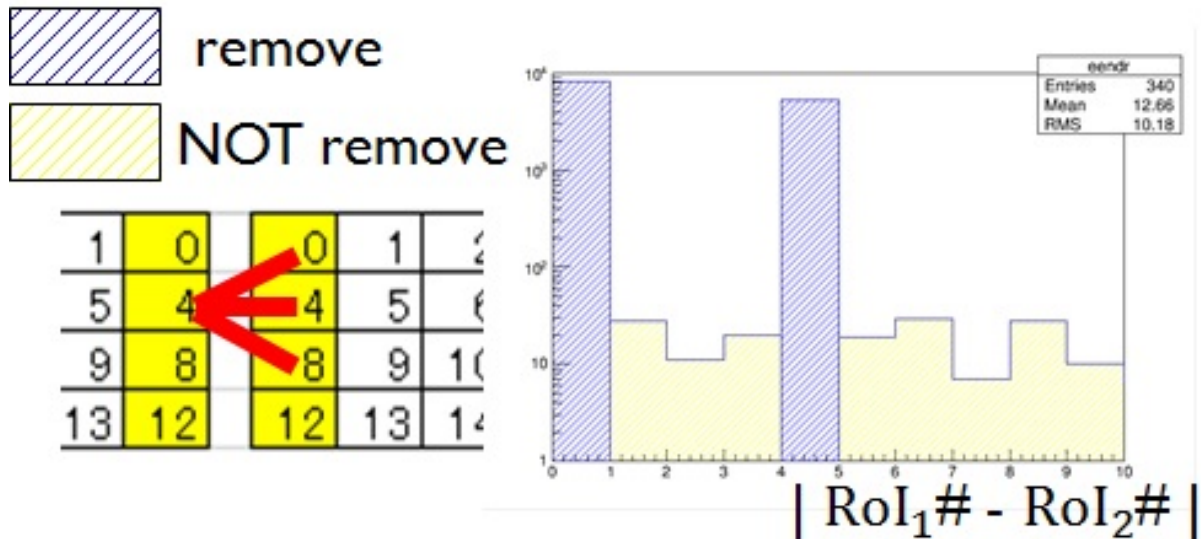


図 4.4 左：エンドキャップ部 RoI（一部）の概略図、右：隣り合ったトリガーセクターで2つのミューオントリガーを出したときの2つの RoI 番号の差。ただし、縦軸は対数目盛りになっている。

## 4.1 エンドキャップ部・フォワード部

まず、エンドキャップ部について論述する。上述のように、最初のセクションでオーバーラップリムーバルのロジックを説明する。その後のセクションで、オーバーラップリムーバルによるレート削減や物理解析の対象となる事象を過剰に殺していることがないかを論述する。

### 4.1.1 オーバーラップリムーバルのロジック（エンドキャップ部）

まずはじめに、エンドキャップ部のオーバーラップリムーバルのロジックを説明する。

図 4.4 左にエンドキャップ部 RoI（一部）の概略図を示した。図中の黄色い部分の一部が物理的に重なっている（オーバーラップしている）。ミューオンスペクトロメーターおよび ID で再構成されたミューオン（オフラインミューオン）が1本であるにもかかわらず、隣り合ったトリガーセクターで2つのミューオントリガーが発行された事象を集め、そのときの2つの RoI 番号の差をヒストグラムにしたものが、図 4.4 右である。このヒストグラムを見ればわかるように、RoI 番号の差が0または4となっているものがその他に比べて約1000倍多い。この RoI 番号の差が0または4である事象のほとんどがフェイク2ミューオンである。このことは、図 4.4 左の RoI の配置図からも明らかである。0は真横、4は斜め上または斜め下であるが、いずれも物理的な重なりが存在していて結果は妥当である。

よって、

- 1 イベントに2つのミューオンのトリガーがある。
- そのトリガーが隣り合ったトリガーセクターで出されたものである。
- トリガーセクターの端（図 4.4 左の黄色い部分）に位置し、RoI 番号の差が0または4である。

以上の条件を満たしたときは2ミューオントリガーを出さないようにする。こうようにして、フェイク2ミューオンを削減する。

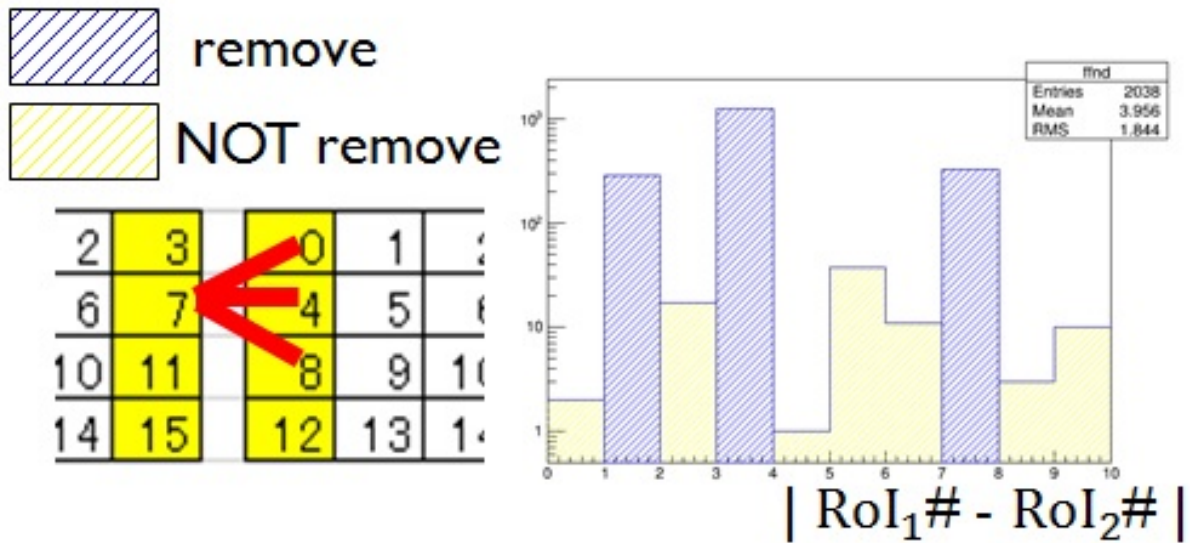


図 4.5 左：フォワード部 RoI（一部）の概略図、右：隣り合ったトリガーセクターで2つのミューオントリガーを出したときの2つの RoI 番号の差。ただし、縦軸は対数目盛りになっている。

#### 4.1.2 オーバーラップリムーバルのロジック（フォワード部）

続いて、フォワード部のオーバーラップリムーバルのロジックを説明する。基本的な考え方は、エンドキャップ部と同じであるが、フォワード部においては、TGC の RoI のナンバリングがエンドキャップ部と異なっているため、注意が必要である。

図 4.5 左にフォワード部 RoI（一部）の概略図を示した。エンドキャップ部とは、RoI ナンバリングが異なっている。エンドキャップ部と同様に、図中の黄色い部分の一部が物理的に重なっている（オーバーラップしている）。ミューオンスペクトロメーターおよび ID で再構成されたミューオン（オフラインミューオン）が1本であるにもかかわらず、隣り合ったトリガーセクターで2つのミューオントリガーが発行された事象を集め、そのときの2つの RoI 番号の差をヒストグラムにしたものが、図 4.5 右である。RoI ナンバリングの違いにより、エンドキャップとは値が異なっており、RoI 番号の差が1, 3 または7となっているものがその他に比べて約1000倍多い。この RoI 番号の差が1, 3 または7となっている事象のほとんどがフェイク2ミューオンである。このことは、図 4.5 左の RoI の配置図からも明らかである。1は斜め下、3は真横、7は斜め上であるが、いずれも物理的な重なりが存在していて結果は妥当である。

よって、

- 1 イベントに2つのミューオンのトリガーがある。
- そのトリガーが隣り合ったトリガーセクターで出されたものである。
- トリガーセクターの端（図 4.4 左の黄色い部分）に位置し、RoI 番号の差が1, 3 または7である。

以上の条件を満たしたときは2ミューオントリガーを出さないようにする。こうようにして、フェイク2ミューオンを削減する。

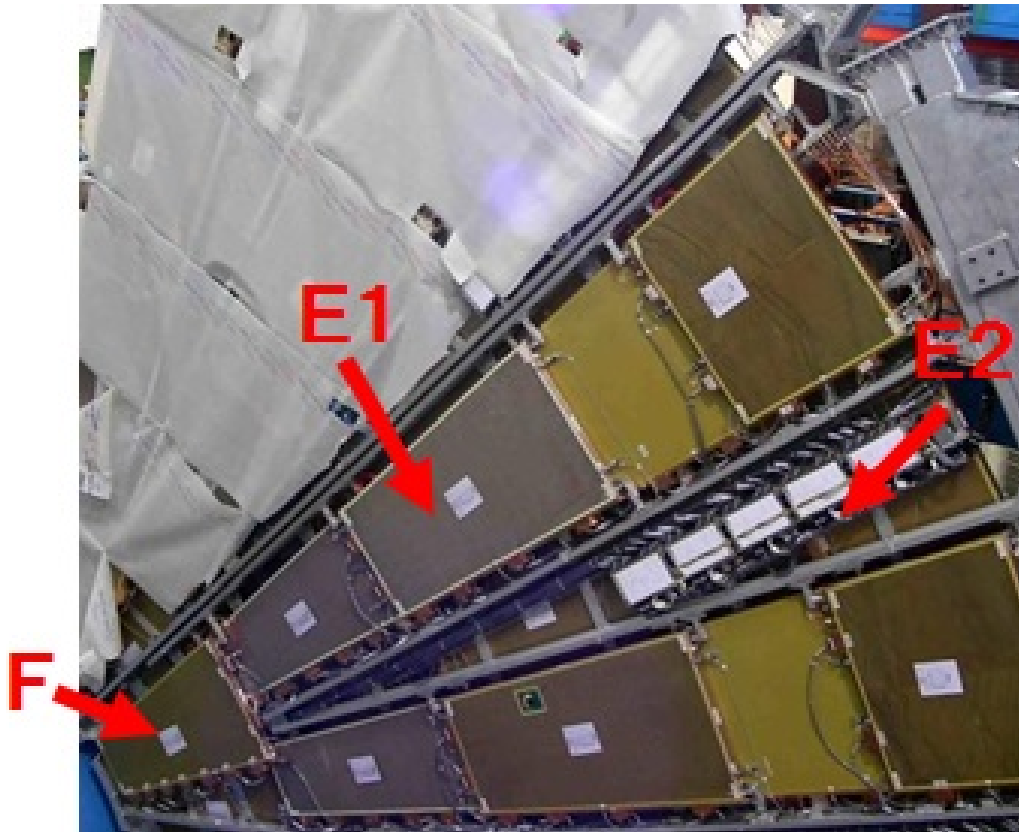


図 4.6 エンドキャップ部のトリガーセクターとフォワード部のトリガーセクター

#### 4.1.3 オーバーラップリムーバルのロジック（エンドキャップ部とフォワード部の間）

エンドキャップ領域とフォワード領域の間においても、オーバーラップは存在し、それが原因でフェイク2 ミューオントリガーは発生している。このような、エンドキャップ部とフォワード部の間におけるオーバーラップリムーバルのロジックを説明する。

図 4.6 にエンドキャップ部のトリガーセクターとフォワード部のトリガーセクターの写真を載せた。先述のように、A サイドおよびC サイドそれぞれ、エンドキャップ部のトリガーセクターは48個、フォワード部のトリガーセクターは24個である。よって、エンドキャップ部のトリガーセクター2個にフォワード部のトリガーセクター1個が相当する。フォワード部のあるトリガーセクターをFと名づけ、エンドキャップ部のトリガーセクターをE1, E2と名付ける(図 4.6)。ここで、ミューオンスペクトロメーターおよびIDで再構成されたミューオン(オフラインミューオン)が1本であるにもかかわらず、FとE1でトリガーが発行されたときの、RoI分布を見る。図 4.7が、オフラインで再構成されたミューオンが1本であるにもかかわらず、FとE1でトリガーが発行されたとき、縦軸にFのRoI番号を、横軸にE1のRoI番号をとったものである。オーバーラップにより2ミュートリガーを発行したと考えられるRoIの組み合わせ(図 4.7のヒストグラムにおいて黒枠で囲ったもの)を表 4.1に示した。このことは、図 4.8のFのRoI番号とE1のRoI番号の図における関係と一致している。

FとE2についても同様に考え、表 4.2を得た。

よって、

- 1 イベントに2つのミューオンのトリガーがある。

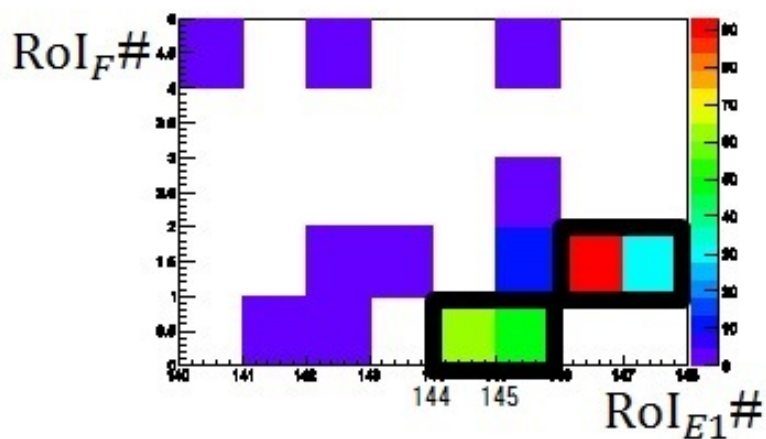


図 4.7 F の RoI 番号と E1 の RoI 番号の関係

表 4.1 F と E1 の間におけるオーバーラップリムーバルのターゲット

F	E1
0	144
0	145
1	146
1	147

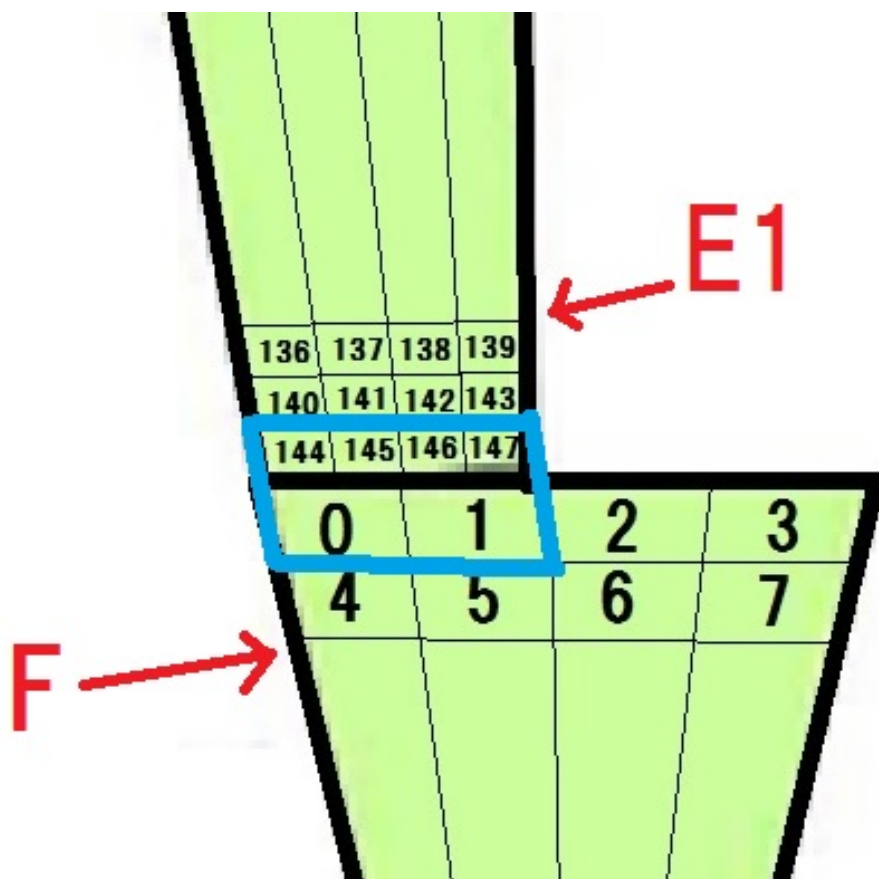


図 4.8 F の RoI 番号と E1 の RoI 番号の拡大図

表 4.2 F と E2 の間におけるオーバーラップリムーバルのターゲット

F	E1
2	142
2	143
2	146
2	147
3	140
3	141
3	144
3	145

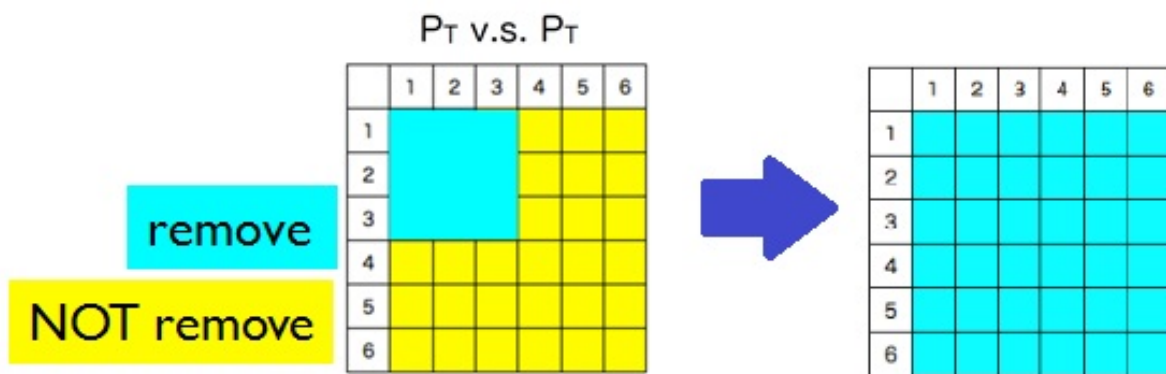


図 4.9 オーバーラップリムーバルを適用させる PT 領域の拡大

- そのトリガーが隣り合ったエンドキャップ部およびフォワード部のトリガーセクターで出されたものである。
- RoI 番号の組み合わせが表 4.1 または 表 4.2 の通りである。

以上の条件を満たしたときはトリガーを出さないようにする。こうようにして、フェイク2 ミューオンを削減する。

#### 4.1.4 オーバーラップリムーバルによるトリガーレート削減（エンドキャップ部・フォワード部）

オーバーラップリムーバルは低い pT 閾値 ( PT1, PT2, PT3 ) の組合せに対してはすでに ATLAS 実験に導入されている。図 4.9 にイメージを示したように、ここからさらに高い pT 閾値も含め、全 PT の組合せに対してオーバーラップリムーバルを導入することを考える。なお、PT の示す閾値については、表 2.1 の示す通りである。このとき、どの程度のレートを削減できるのかを算出した。

算出には 2015 年の RUN-2 の実データを用いた。前述のように、後段のハイレベルトリガーによる事象選択がされていないレベル1トリガーのみを用いて取得した事象を解析することにより、レベル1トリガーにおける正しいレートを求められる。



表 4.3 オーバーラップリムーバルによるレート削減 (エンドキャップ部・フォワード部)

トリガーの種類	レート削減 [%]
L1.2MU4	18.3 ± 0.1
L1.2MU6	31.5 ± 0.2
L1.2MU10	45.0 ± 0.3

また先述のように、オーバーラップリムーバルを実際に行うのは MIOCT ボードである。MIOCT ボード間ではトリガー情報を交換することはできない。すなわち、異なる MIOCT ボードで情報を処理されるトリガーセクター間においては、オーバーラップリムーバルを行うことはできない。MIOCT ボードはAサイドCサイド各 8 枚あるので、オーバーラップリムーバルを行うことができない境界部分が各サイド 8 箇所ある。この解析においても、異なる MIOCT ボードで処理されるトリガーセクター間においてはオーバーラップリムーバルを行うことができないとして計算した。

レート削減率の分母は、各 2 ミューオントリガー ( L1.2MU4, L1.2MU6, L1.2MU10 ) が発行され、トリガーの本数が 2 本であった事象数を用いた。トリガーが 3 本以上であっても 2 ミューオントリガーは発行されるが、簡単のため、トリガーが 2 本の事象に限定した。レベル 1トリガーでのレートを調べたいので、オフラインミューオンの本数での事象選択は行っていない。

レート削減率の分子は、分母となる事象のうち先述のリムーバルロジックにより削減される事象数である。実装時には、リムーバルロジックを満たした場合にトリガーを無効にするので、以上の定義で実装時のトリガー削減率を算出することができる。

以上のように算出した結果を示したのが、表 4.3 である。このように、現行の 2 ミューオントリガーのトリガーレートに対して、約 18 ~ 45 %のトリガーを削減することができる。オーバーラップリムーバルは  $p_T$  閾値 ( PT1, PT2, PT3 ) の組合せに対してはすでに導入されているが、高い  $p_T$  閾値 ( PT4, PT5, PT6 ) を含む組合せに対してはまだ導入されていない。よって、PT1 および PT2 ですでに一部オーバーラップリムーバルが導入されている L1.2MU4 および L1.2MU6 よりも、まだ全く導入されていない L1.2MU10 の効果が大きくなっている。

#### 4.1.5 オーバーラップリムーバルによる物理解析対象となる事象への影響 (エンドキャップ部・フォワード部)

オーバーラップリムーバルによりトリガーレートを抑制できるが、それと同時に物理解析対象となる事象も誤って排除してしまう可能性がある。2 ミューオントリガーでとらえるべき重要な事象のうちの 1 つは  $J/\psi$  の 2 本のミューオンへの崩壊である。この本物の 2 ミューオンを、オーバーラップにより過剰に排除していないかどうかを検証した。Z の 2 本のミューオンへの崩壊も存在するが、 $J/\psi$  のほうが質量が小さくブーストされるために 2 本のミューオンの  $dR$  が小さくなりやすく、オーバーラップリムーバルで排除しやすい。ゆえに、特に  $J/\psi$  の 2 本のミューオンへの崩壊を過剰に排除していないかを調べた。この解析においては、ハードウェアトリガーの情報だけでなく、ミューオンスペクトロメーターと ID を用いて再構成したミューオン ( オフラインミューオンと呼ぶ ) の情報を用いる。オフラインミューオンの情報は、ハードウェアトリガーの情報とは違ってリアルタイムで入手することはできないが、運動量や角度、電荷などのより正確な情報が得られる。 $J/\psi$  の崩壊による 2 つのミューオンを探すために、2 ミューオントリガーが発行された事象のうち、次の条件を満たすものを評価に用いた。

## Endcap, Forward inefficiency : $0.93 \pm 0.05 \%$

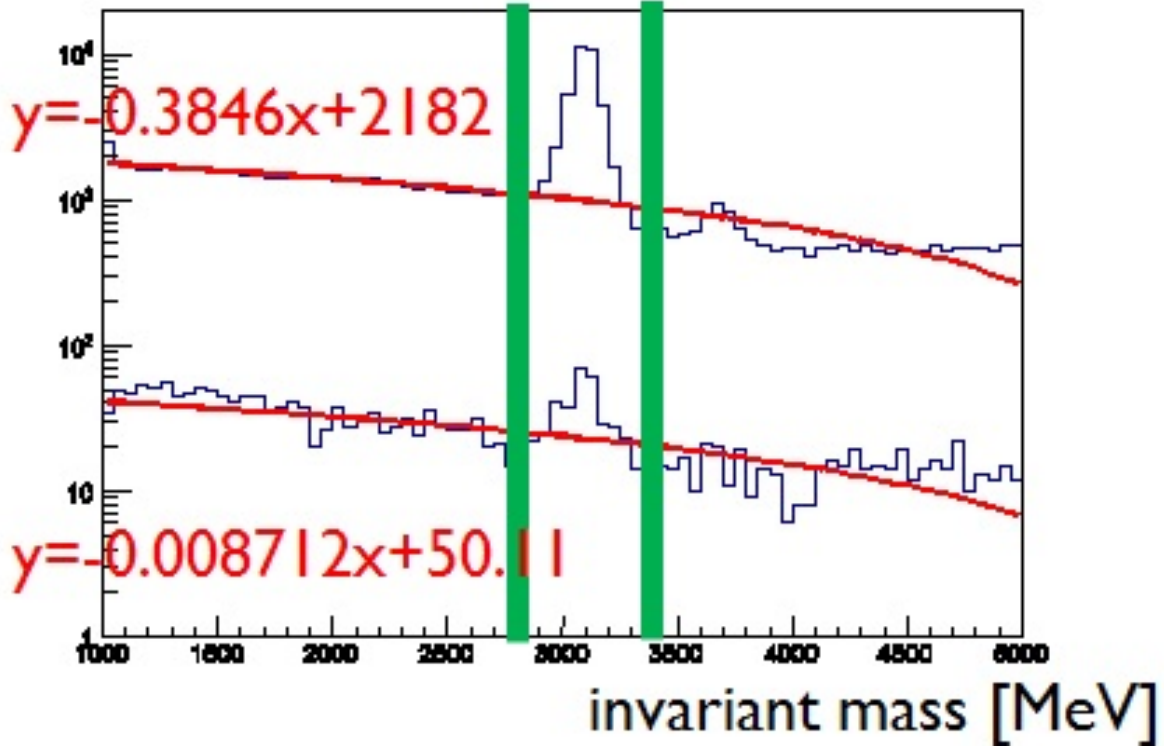


図 4.10 エンドキャップ部・フォワード部における、2ミューオントリガーが出された2ミューオン（電荷が正のものとの負のもの組み合わせ）の不変質量（上）および、そのうちオーバーラップリムーバルにより逃してしまう2ミューオンの不変質量（下）。ただし、縦軸は対数目盛りになっている。

1. オフラインミューオンが2つある。
2. 2本のミューオンの測定された電荷がそれぞれ正と負である。
3. 2本のミューオンの位置と運動量から計算された不変質量が  $(3.1 \pm 0.3)$  [GeV] である。

上記1. および2. を満たす事象を集め、その不変質量を計算したのが、図 4.10 である。上方のヒストグラムが上記条件をみたすすべての事象、そのうちオーバーラップリムーバルにより逃してしまう事象が下方のヒストグラムである。不変質量が  $(3.1 \pm 0.3)$  [GeV] である事象（緑色の線の間）から、背景事象（赤色の線、1次関数によるフィッティング）を除いたものの数を数え、どれだけの割合の  $J/\psi$  を逃しているのかを算出した。

結果、 $J/\psi$  を逃してしまう割合は、 $(0.93 \pm 0.05)\%$  であった。このように、物理解析の対象となる事象を逃してしまう割合は約1%におさえられている。

このように、 $J/\psi$  崩壊からの2ミューオンを排除してしまう割合は全体では約1%である。しかし、 $p_T$  が大きい  $J/\psi$  ほど2ミューオンがブーストすることにより、2つが近くの RoI に当たることが多くなる。そのためオーバーラップリムーバルによる排除が多くなってしまわないかということが考えられる。そこで、図 4.11 に、 $J/\psi$  からの2ミューオンによる2ミューオントリガーがオーバーラップリムー

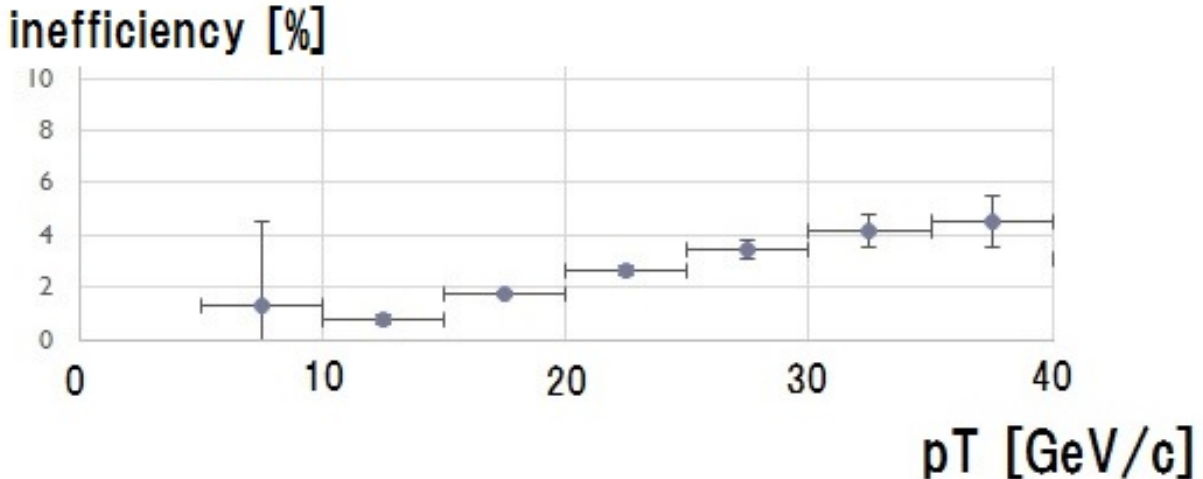


図 4.11 エンドキャップ部・フォワード部における、 $J/\psi$  からの2ミューオンによる2ミュートリガーの、オーバーラップリムーバルにより排除してしまう割合の、 $p_T$  依存

バルにより排除されてしまう割合の  $p_T$  依存を示した。 $J/\psi$  の  $p_T$  が増加するにつれて排除してしまう割合も増加するが、40 GeV/c 付近であっても、その割合は4%程度に抑えられている。

また、図 4.12 に  $J/\psi$  からの2ミューオンによる2ミュートリガーが発行された RoI の dR と  $J/\psi$  の  $p_T$  の関係を示した。上の図が先述の方法で選択した  $J/\psi$  からの2ミューオンすべての dR vs  $p_T$  をプロットしたもので、下の図がそのうちオーバーラップリムーバルにより排除される、2ミューオンによる2ミュートリガーが発行された RoI の dR vs  $p_T$  をプロットしたものである。オーバーラップリムーバルの特性上、すぐ近くに位置する RoI を2つのミューオンが通過したものを排除するので、下の図で dR の小さいイベントが排除されていることがわかる。なお、この図 4.12 には、図 4.10 において数を差し引いたバックグラウンドとなるイベントも含まれている。このようなものも当然オーバーラップリムーバルで排除されるが、排除してしまう割合の数値からは除外されている。

## 4.2 バレル部

続いてバレル部について論述する。エンドキャップ部・フォワード部と同様に、最初のセクションでオーバーラップリムーバルのロジックを説明する。その後のセクションで、オーバーラップリムーバルによるレート削減や物理解析の対象となる事象を過剰に殺していることがないかを論述する。

### 4.2.1 バレル部におけるオーバーラップリムーバルのロジック

まず、バレル部のオーバーラップリムーバルロジックについて説明する。図 3.14 に、バレル部の RoI ナンバリング図を示した。この図の通り、バレル部においては、トリガーセクターによって RoI の数が違うだけでなく、RoI の1つ1つの大きさまでもが異なっている。よって、各オーバーラップ領域ごとに異なりムーバルロジックが必要であり、エンドキャップ部やフォワード部のように一般的な RoI 番号を用いた法則が存在しない。ここからは、ある部分のオーバーラップ領域に着目して説明を進める。例として、A サイドのバレルトリガーセクター8番と9番の間のオーバーラップ領域を用いる。図 4.13 に A サイドのバレルトリガーセクター8番と9番それぞれに1つずつのトリガーが発行されたときの RoI

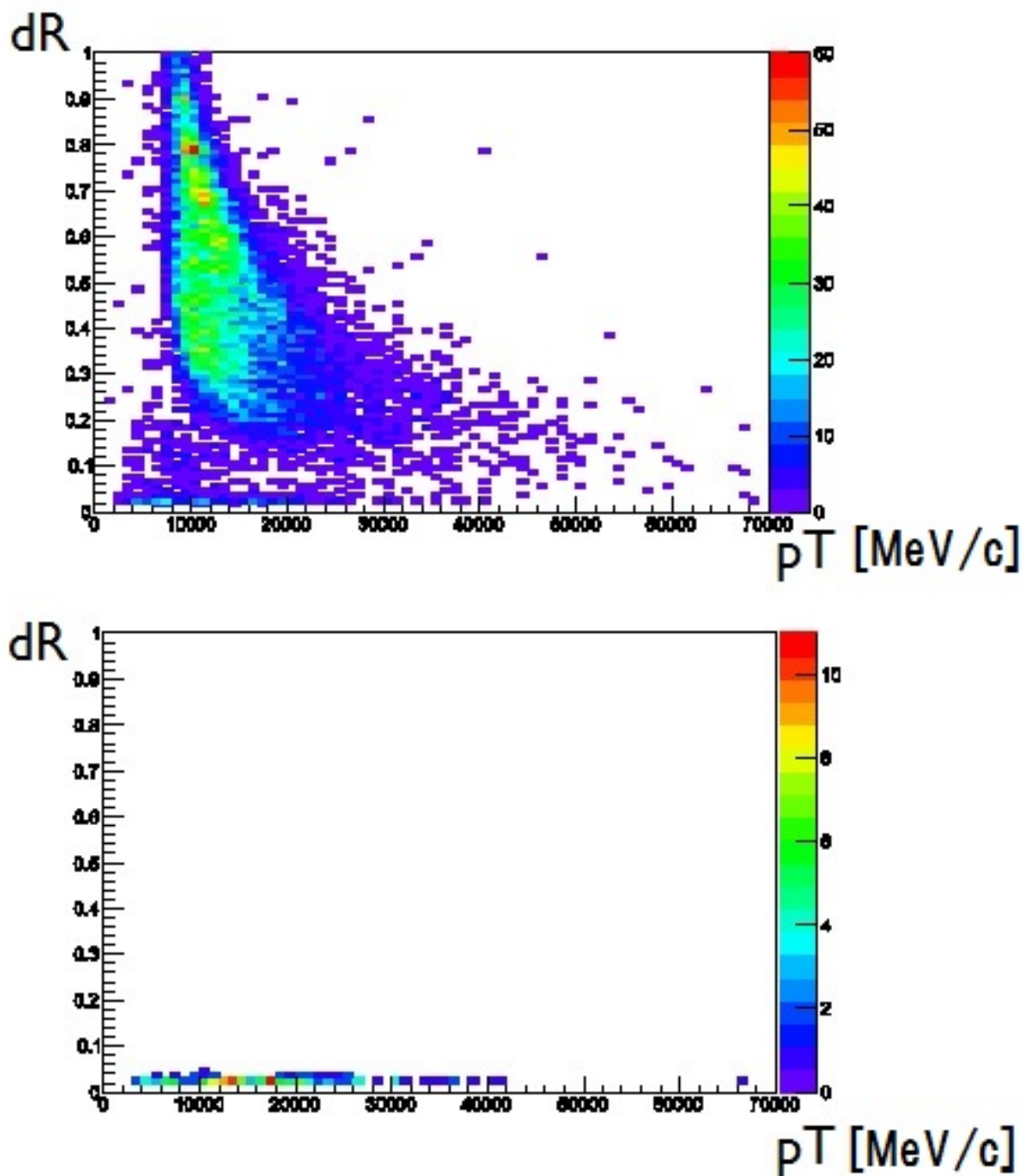


図 4.12 エンドキャップ部・フォワード部における、 $J/\psi$  からの2ミューオンによる2ミューオントリガーが発行された RoI の  $dR$  と  $J/\psi$  の  $p_T$  の関係。上が  $J/\psi$  についてのヒストグラムで、下が上のうちオーバーラップリムーバルにより排除されるもの

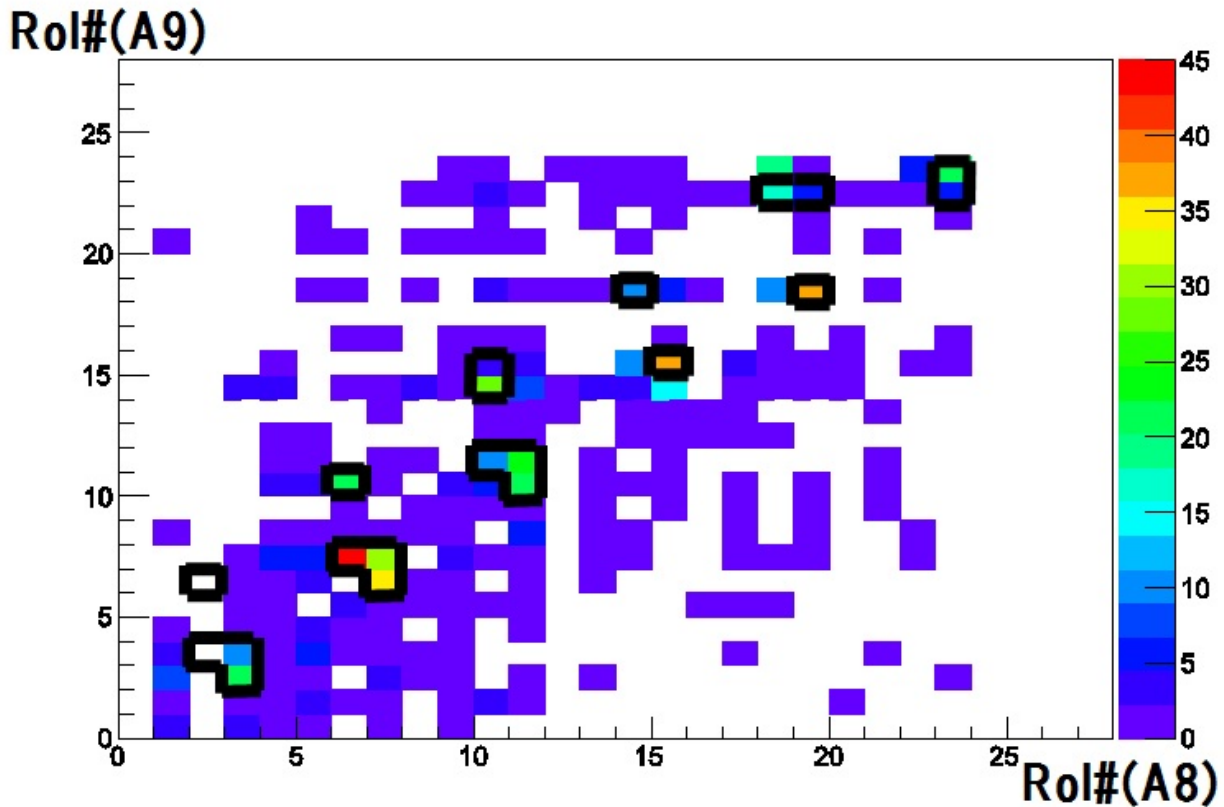


図 4.13 A サイドのバレルトリガーセクター 8 番と 9 番それぞれに 1 つずつのトリガーが発行されたときの RoI 分布

分布を示した。この部分のオーバーラップ領域の場合、図中の黒枠で囲った部分がオーバーラップリムーバルで削除すべき RoI の組み合わせである。表 4.4 に、このオーバーラップ領域における RoI の組み合わせを示した。このような RoI の組み合わせのテーブルを各オーバーラップ領域ごとに設定し、その組み合わせとなった 2 ミューオントリガーを発行させないようにする。

#### 4.2.2 オーバーラップリムーバルによるトリガーレート削減（バレル部）

エンドキャップ部およびフォワード部と同様に、オーバーラップのリムーバルは低い  $p_T$  閾値 (PT1, PT2, PT3) の組合せに対してはすでに導入されている。エンドキャップ部・フォワード部で説明したように、図 4.9 のイメージにしたがって、さらに高い  $p_T$  閾値も含め、全 PT の組合せに対してオーバーラップリムーバルを導入したすることを考える。このとき、どの程度のレート削減を施すことができるのかを算出した。

このレート削減率の算出方法はエンドキャップ部・フォワード部と同様に行った。では、このレート削減率の算出方法について説明する。算出にはエンドキャップ部・フォワード部と同様の 2015 年の RUN-2 の実データを用いた。

またエンドキャップ部・フォワード部同様、オーバーラップを実際に行うのは MIOCT ボードである。この解析においても、異なる MIOCT ボードで処理されるトリガーセクター間においてはオーバーラップリムーバルを行うことができないとして計算した。

レート削減率の分母は、各 2 ミューオントリガー (L1.2MU4, L1.2MU6, L1.2MU10) が発行され、トリ

表 4.4 A サイドのバレルトリガーセクター 8 番と 9 番に間おけるオーバーラップリムーバルのターゲット

A8	A9
2	3
2	6
3	2
3	3
6	7
6	10
7	6
7	7
10	11
10	14
10	15
11	10
11	11
14	18
15	15
18	22
19	18
19	22
23	22
23	23

表 4.5 オーバーラップリムーバルによるレート削減 (バレル部)

トリガーの種類	レート削減 [%]
L1.2MU4	6.1 ± 0.1
L1.2MU6	11.2 ± 0.1
L1.2MU10	21.0 ± 0.3

ガーの本数が 2 本であった事象数を用いた。1 トリガーが 3 本以上であっても 2 ミューオントリガーは発行されるが、解析をわかりやすくするため、トリガーが 2 本の事象に限定した。レベル 1 トリガーでのレートを調べたいので、オフラインミュオンの本数での事象選択は行っていない。

レート削減率の分子は、分母となる事象のうち、先述のリムーバルロジックにより削減される事象数である。実装時には、リムーバルロジックを満たした場合にトリガーを無効にするので、以上の定義で実装時のトリガー削減率を算出することができる。

その結果を示したのが、表 4.5 である。このように、約 6 ~ 21 % のトリガーを削減することができる。

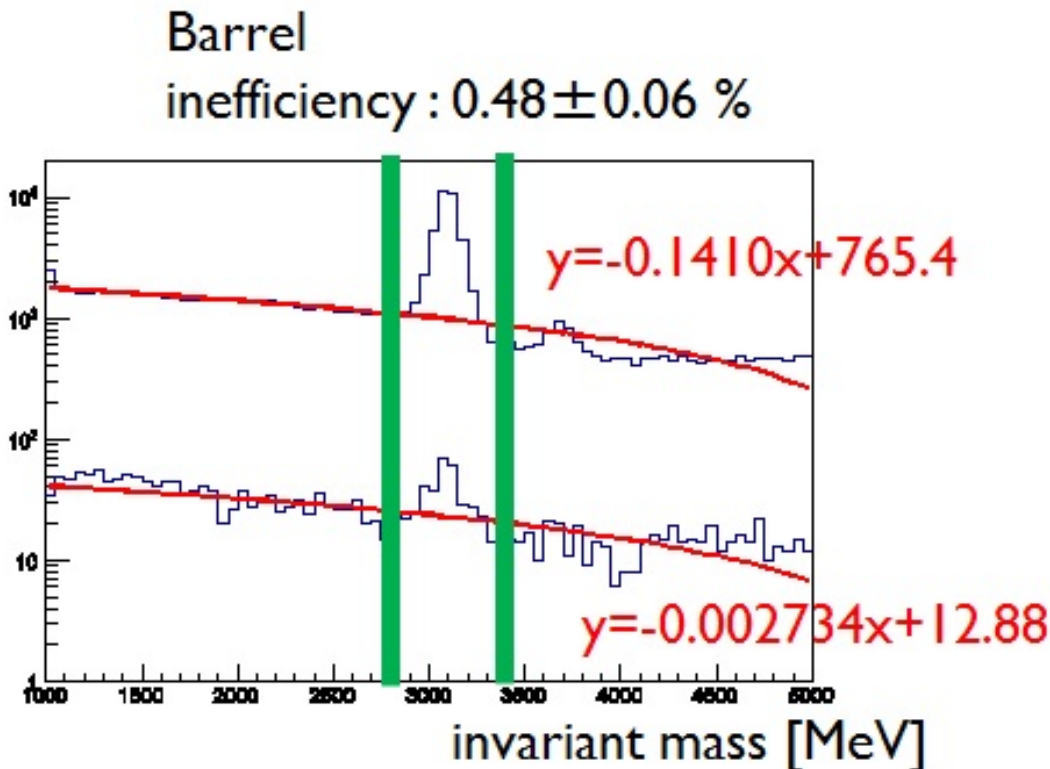


図 4.14 バレル部における、2ミューオントリガーが出された2ミューオン（電荷が正のものと負のもの組み合わせ）の不変質量（上）および、そのうちオーバーラップリムーバルにより逃してしまう2ミューオンの不変質量（下）。ただし、縦軸は対数目盛りになっている。

#### 4.2.3 オーバーラップリムーバルによる物理解析の対象となる事象への影響（バレル部）

エンドキャップ部・フォワード部のパートでも述べたように、オーバーラップリムーバルにより、トリガーレートを削減できるのはよいことであるが、その一方で物理解析の対象となる事象も誤って排除してしまう可能性がある。2ミューオントリガーでとらえる重要な事象のうちの一つは  $J/\psi$  の2本のミューオンへの崩壊である。この本物の2つのミューオンを、オーバーラップにより過剰に排除していないかどうかを検証した。この解析においても、エンドキャップ部・フォワード部同様にオフラインミューオンの情報を用いる。オフラインミューオンの情報は、ハードウェアトリガーの情報だけでなく、ミューオンスペクトロメーターおよび ID を用いて再構成したものである。オフラインミューオンの情報は、ハードウェアトリガーの情報とは違ってリアルタイムで入手することはできないが、運動量や角度、電荷などのより正確な情報が得られる。

エンドキャップ部・フォワード部同様、 $J/\psi$  の崩壊による2つのミューオンを探すために、2ミューオントリガーが発行された事象のうち、次の条件を満たすものを評価に用いた。

1. オフラインミューオンが2つある。
2. 2本のミューオンの測定された電荷がそれぞれ正と負である。
3. 2本のミューオンの位置と運動量から計算された不変質量が  $(3.1 \pm 0.3)$  [GeV] である。

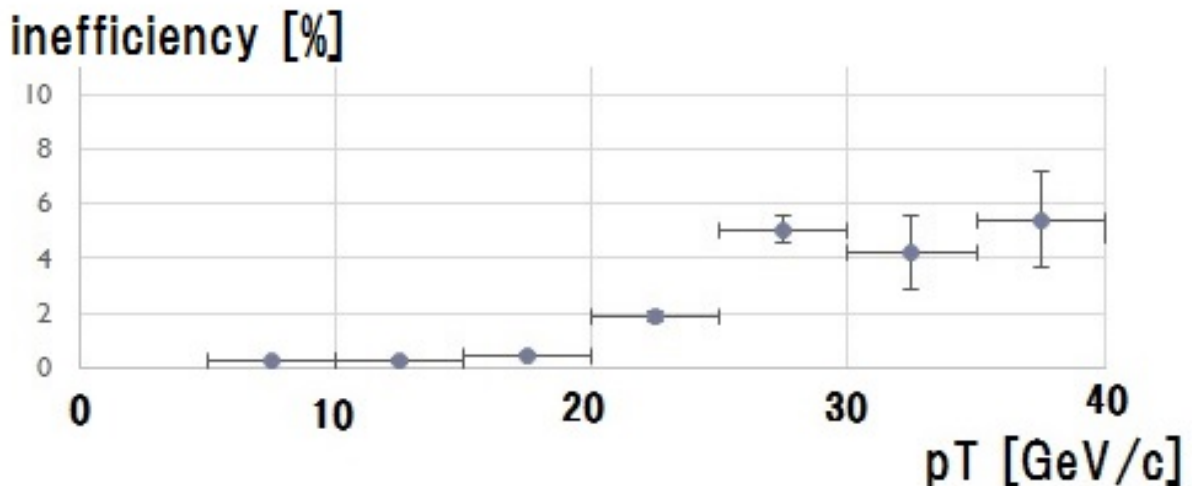


図 4.15 バレル部における、 $J/\psi$  からの 2 ミューオンによる 2 ミュートリガーの、オーバーラップリムーバルにより排除してしまう割合の、 $p_T$  依存

上記 1. および 2. を満たす事象を集め、その不変質量を計算し、ヒストグラムにしたのが、図 4.14 である。上方のヒストグラムが上記条件をみたすすべての事象、そのうちオーバーラップリムーバルにより逃してしまう事象が下方のヒストグラムである。不変質量が  $(3.1 \pm 0.3)$  [GeV] である事象（緑色の線の間）から、背景事象（赤色の線、1 次関数によるフィッティング）を除いたものの数を数え、どれだけの割合の  $J/\psi$  を逃してしまっているのかを算出した。結果、 $J/\psi$  を逃してしまいう割合は、 $(0.48 \pm 0.06)$  % であった。

このように、 $J/\psi$  崩壊からの 2 ミューオンを排除してしまう割合は全体では約 0.5 % である。しかし、エンドキャップ部・フォワード部と同様に、 $p_T$  が大きい  $J/\psi$  ほど 2 ミューオンがブーストすることにより、2 つが近くの RoI に当たることが多くなる。特に、バレル部の RoI 1 つあたりの大きさは、エンドキャップ部・フォワード部の RoI 1 つあたりの大きさの約 9 倍であるので、オーバーラップリムーバルによる排除が多くなってしまわないかという危惧がある。そこで、図 4.15 が、 $J/\psi$  からの 2 ミューオンによる 2 ミュートリガーのうち、オーバーラップリムーバルにより排除してしまう割合の、 $p_T$  依存である。 $J/\psi$  の  $p_T$  が増加するにつれて排除してしまう割合も増加するが、40 GeV/c 付近であっても、排除してしまう割合は 6 % 程度に抑えられている。

また、図 4.16 に  $J/\psi$  からの 2 ミューオンによる 2 ミュートリガーが発行された RoI の dR と  $J/\psi$  の  $p_T$  の関係を示した。上の図が先述の方法で選択した  $J/\psi$  からの 2 ミューオンすべての dR vs  $p_T$  をプロットしたもので、下の図がそのうちオーバーラップリムーバルにより排除される、2 ミューオンによる 2 ミュートリガーが発行された RoI の dR vs  $p_T$  をプロットしたものである。オーバーラップリムーバルの特性上、すぐ近くに位置する RoI を 2 つのミューオンが通過したものを排除するので、下の図で dR の小さいイベントが排除されていることがわかる。なお、この図 4.16 には、図 4.14 において数を差し引いたサイドバンドのバックグラウンドとなるイベントも含まれている。このようなものも当然オーバーラップリムーバルで排除されるが、排除してしまう割合の数値からは除外されている。



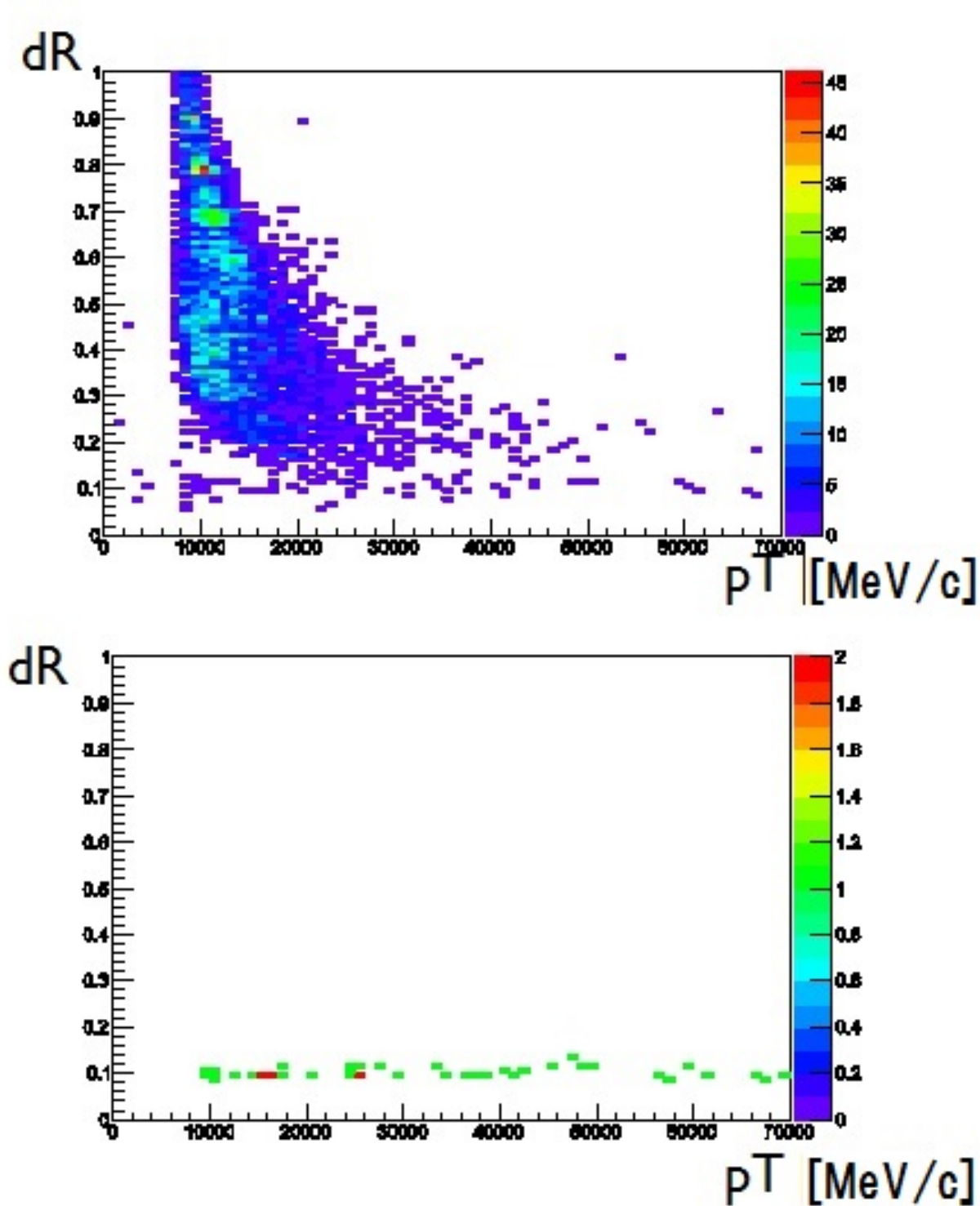


図 4.16 バレル部における、 $J/\psi$  からの 2 ミューオンによる 2 ミュートリガーが発行された RoI の  $dR$  と  $J/\psi$  の  $p_T$  の関係。上が  $J/\psi$  についてのヒストグラムで、下が上のうちオーバーラップリムーバルにより排除されるもの

## 第 5 章

# まとめ

本研究では、ATLAS 検出器のハードウェアミュオントリガーの改良を行った。

ミュオントリガーに用いられている検出器には、各部分（トリガーセクター）の検出器が物理的に重なっている部分がある（オーバーラップ領域）。このオーバーラップ領域にミュオンが入射した場合、オーバーラップ領域の両方のトリガーセクターでトリガーが発行される。このとき、実際には1つのミュオンが2つのトリガーセクターを通過しただけであるのに、誤って2つのミュオンが通過したというトリガー（2ミュートリガー）が発行される（フェイク2ミュートリガー）。現在、このフェイク2ミュートリガーを発行してしまうことで2ミュートリガーのレートが有意に高くなり、レベル1トリガー全体で 100 KHz という限られたバンド幅を無用に専有している状況にある。

この2ミュートリガーはBの物理や新粒子探索（複数のミュオンが出てくるもの）において非常に重要なトリガーとなっている。もし閾値をあげてトリガーレートを下げると、信号事象に対するアクセプタンスを大きく失うことになる。そこで、閾値を低く保ったまま、フェイク2ミュオンを取り除く手法（オーバーラップリムーバル）について研究した。

この問題を解決するために、まず、フェイク2ミュオンが発生している RoI の組み合わせを実データを用いて調べた。次に、その RoI の組み合わせを元に、フェイク2ミュオンを除去するためのロジック（オーバーラップリムーバルロジック）を開発した。このオーバーラップリムーバルロジックは、2本ミュオンの横方向運動量（ $p_T$ ）が 6 GeV/c 以下の限られた範囲について適用していた。これを、 $p_T$  の全域に渡って導入するとどれほどのレート削減が期待できるのか、RUN-2 の実データを用いて算出した。解析には、レベル1トリガーのみで取得されたデータを用い、リムーバルロジックを適用した場合に削減できるトリガー数を数えた。その結果、2本のミュオンに対する  $p_T$  閾値がいずれも 4 GeV/c のトリガー（L1.2MU4）で 14 %、6 GeV/c のトリガー（L1.2MU6）で 24 %、10 GeV/c のトリガー（L1.2MU10）で 36 %、のレート削減ができることを算出した。

その一方で、2ミュートリガーでとらえる物理解析の対象となる事象、 $J/\psi$  が2つのミュオンに崩壊する事象をオーバーラップリムーバルにより排除してしまうものの割合も計算した。オフラインミュオンの情報を用いて計算し、 $J/\psi$  が2つのミュオンに崩壊する事象のうち排除してしまうものは約 1 % に抑えられるという評価をした。

以上の結果より、オーバーラップリムーバルは、物理解析の対象となる事象をほとんど排除することなく効果的にレートを削減できることがわかった。ここまでの考察により、オーバーラップリムーバルは 2016 年の物理ランにおいて導入される予定となった。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた指導教員の石野雅也順教授、副指導教員の隅田土詞助教に感謝いたします。また、数多くの助言をいただきました京都 ATLAS グループ先輩の田代拓也氏、救仁郷拓人氏、後輩の赤塚駿一氏、野口陽平氏にも感謝いたします。また、日頃から多くの手助けを頂いた京都大学高エネルギー物理学研究室の皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] The ATLAS Collaboration “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider” Jinst, 2008
- [2] ATLAS Level-1 Trigger Group “ATLAS Level-1 Trigger Group Technical Design Report” ATLAS TDR-12, 2000
- [3] The ATLAS Collaboration “Track Reconstruction Performance of the ATLAS Inner Detector at  $\sqrt{s}=13$  TeV”
- [4] Fabio Sauli “PRINCIPLES OF OPERATION OF MULTIWIRED PROPORTIONAL AND DRIFT CHAMBERS” CERN Lecture, 1977
- [5] 稲丸由夫輝 修士学位論文, ATLAS 実験 RUN2 に向けたレベル 1 ミューオントリガーの改良
- [6] 大谷育生 修士学位論文, ATLAS ミューオントリガーシステムのアップグレードに向けたギガビット通信を用いたデータ収集系の検証及び読み出しプロトタイプの開発
- [7] 宇田純郎 修士学位論文, ATLAS 実験用ミューオントリガーチェンバーの性能評価
- [8] The ATLAS Collaboration “ATLAS Photos” <http://www.atlas.ch/photos/>
- [9] “Taking a closer look at LHC” <http://www.lhc-closer.es>
- [10] “ATLAS EXPERIMENT Public Result” <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/>
- [11] “ATLAS Experiment” <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/Collaboration/>