

修士学位論文

LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けた
レベル1 ミューオントリガー判定システムの改良

2019年2月1日

専攻名	物理学専攻
学籍番号	174s123s
氏名	吉田登志輝

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

概要

LHC は欧州原子核研究機構に設置された陽子陽子衝突型の粒子加速器である。ATLAS 検出器は LHC の衝突点に設置された汎用検出器である。TeV 領域までの新粒子の直接探索やヒッグス粒子の精密測定により、標準模型を超えた物理にアプローチしている。

ATLAS 実験において LHC の 40 MHz の陽子衝突事象を全て保存することは出来ない。そのため、興味のある物理事象が含まれる衝突事象のみを選別するトリガーシステムを採用し、データ保存を行っている。本研究では初段トリガーシステムの一つレベル 1 ミューオントリガーについて扱う。レベル 1 ミューオントリガーではハードウェアを用いてミューオンの運動量を測定し事象選別を行う。

LHC では 2021 年から重心系エネルギーと瞬間ルミノシティを増加させた Run-3 が始まる。それによる生成断面積の増加に伴い時間あたりの事象数がレベル 1 トリガーに許されるトリガーレートの制限は変わらない。そこで、LHC シャットダウン期間の 2019 年と 2020 年の 2 年間で Phase-1 アップグレードと呼ばれる検出器やシステムの大規模なアップグレードが行われる。本研究では、Phase-1 アップグレードにおけるトリガー判定システムの改良を行った。

一つは、新検出器 New Small Wheel (NSW) の導入が予定通りに進まなかった場合の対応である。その場合、NSW の導入と共に取り除かれる予定である検出器が残る形となり、トリガー判定用ボード New Sector Logic が入力ポートの都合上その検出器の信号を受け取ることが出来なくなる。そこで、検出器から送られる入力信号の通信規格を変換するコンバーターを使用することで問題の解決に当たる。本研究ではコンバーターの導入することによる恩恵を最大限に活かすための概念を考案した。

二つ目はトリガーアルゴリズムの改良である。レベル 1 ミューオントリガーにおいて、ミューオンの横運動量を測定するときに Coincidence Window (CW) と呼ばれるものを用いている。トリガー判定を行うハードウェアの改良により、従来よりも複雑な CW を使用することが出来るようになる。そこで、新たに CW を作成し性能評価を行い、新たな CW を用いることで、従来よりも高い性能でトリガー判定を行えることを確かめた。

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	LHC ATLAS 実験	4
2.1	LHC 加速器	4
2.2	ATLAS 実験	4
2.3	ATLAS 検出器	5
2.3.1	ATLAS 実験における座標系	5
2.3.2	超伝導磁石	6
2.3.3	内部飛跡検出器	6
2.3.4	カロリメーター	8
2.3.5	ミューオン検出器	9
2.4	トリガーシステム	12
2.4.1	Level-1 トリガー	12
2.4.2	High Level Trigger	13
第 3 章	ミューオントリガー	15
3.1	ミューオンによる事象選別	15
3.2	Level-1 エンドキャップミューオントリガー	15
3.2.1	TGC 検出器	15
3.2.2	トリガー単位	19
3.2.3	TGC BW を用いた横運動量測定	19
3.2.4	Inner Coincidence	22
3.2.5	トリガーエレクトロニクス	22
第 4 章	L1 ミューオントリガーアップグレード	28
4.1	LHC Run-3	28

4.2	トリガーマニュー	29
4.3	新検出器の導入	30
	4.3.1 New Small Wheel	31
	4.3.2 RPC BIS78	34
4.4	Sector Logic の改良	34
4.5	EI/FI converter	35
4.6	MuCTPi, L1Topo	37
	4.6.1 p_T 閾値増設	37
4.7	本研究の目的	39
第 5 章	トリガーアルゴリズムの改良	40
5.1	Coincidence Window の作成	40
	5.1.1 TGC BW の CW 作成	41
	5.1.2 EI/FI を用いた CW 作成	45
	5.1.3 NSW を用いた CW 作成	46
5.2	新しい CW の性能評価	50
	5.2.1 トリガー効率	50
	5.2.2 EI/FI LUT の性能評価	54
	5.2.3 不変質量分解能	59
第 6 章	結論と展望	64
	参考文献	66

第 1 章

序論

物質の最小単位となる粒子は素粒子と呼ばれる。素粒子とその相互作用を記述する模型として標準模型が導入されており、これまでの実験結果のほとんどを説明することが出来る。標準模型で予言された粒子は大きくフェルミオン、ボソン、そしてヒッグス粒子に分けられる。標準模型に導入された素粒子の一覧を図 1.1 に示す。

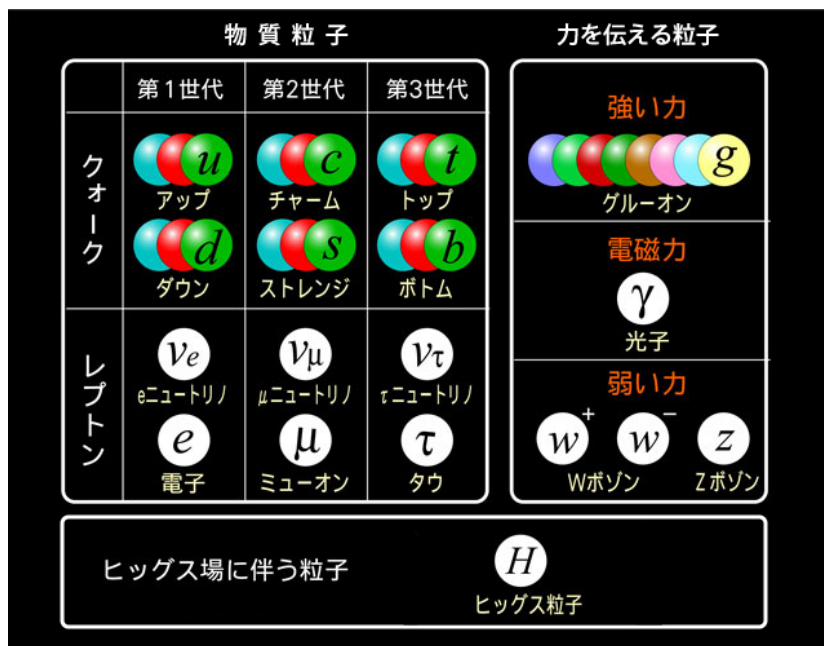


図 1.1: 標準模型に導入された素粒子 [1]。

2012年にLHCでヒッグス粒子が発見されたことにより、標準模型で予言された全ての粒子が発見された。標準模型は実験結果とほとんど無矛盾で完成された理論ではあるが、

重力相互作用やダークマターの存在、ヒッグス粒子の階層性問題やニュートリノ質量の起源など、説明できない新物理の存在はいくつも確認されている。標準模型を超えた新物理を探索し、新たな理論と結びつけるために世界中で実験が行われている。

これらの新物理を探索するための一つの手法として、高エネルギーの粒子衝突実験が行われている。その内の一つがスイスのジュネーブ郊外にある欧州原子核研究機構 (CERN) 地下にある円形加速器 Large Hadron Collider (LHC) である。LHC は 2018 年に Run-2 を終え、2021 年から始まる Run-3 に向けた大規模なアップグレードが行われる。ATLAS 実験は LHC の衝突点の一つに設置された ATLAS 検出器を用いて高エネルギーの陽子-陽子衝突から TeV 領域までの新粒子探索やヒッグス粒子の精密測定などを行う実験である。

ATLAS 実験では陽子のバンチを 40 MHz の頻度で衝突されている。しかしその高頻度の衝突事象を全て物理データとして保存することができない。そのためトリガーシステムを用いることで興味のある物理事象を選別し、保存可能なデータ量まで事象を減らしてから保存している。ATLAS 実験は 2 段階のトリガーシステムを採用している。1 段目がハードウェアを用いて短時間でトリガー判定を行うレベル 1 (L1) トリガーで、2 段目がソフトウェアを用いて精密なトリガー判定を行うハイレベルトリガー (HLT) である。その中でも、ミューオンを用いたトリガーは重要な役割を担う。ATLAS 検出器のミューオン検出器には理想的にはミューオンのみがヒットを残すため、ミューオンは粒子同定が容易であるので、限られた時間内にトリガー計算をすることができる。また、ヒッグス粒子の重要な崩壊先である Z ボソンや W ボソンの終状態として、高い運動量のミューオンが観測されやすい。それに加えて、ボトムクォークやチャームクォークが含まれる粒子の終状態には複数の運動量が低いミューオンが含まれる。そのためミューオンはトリガーに用いられやすい。

Run-3 からは重心系エネルギーと瞬間ルミノシティが増加する。それに伴ってイベントレートの増加が予想されるが、許容される L1 のトリガーレートの上限は Run-2 の 100 kHz で変わらない。図 1.2 にミューオンの運動量のビーム軸に垂直な成分である横運動量に対するアクセプタンスを示す。例えば、トリガー判定に用いるミューオンの p_T 閾値を 20 GeV から 30 GeV に上げると超対称性粒子グルイーノのアクセプタンスは約半分になる。そのため、 p_T 閾値を上げずにトリガーレートを抑制しなければならない。そこで、Run-3 が始まるまでのアップグレード期間でミューオントリガーシステムを改良する必要がある。

本論文では、2 章では ATLAS 実験の概要について述べ、3 章では現行のミューオントリガーシステムについて述べる。4 章では Run-3 に向けた L1 ミューオントリガーシステムの検出器やハードウェアのアップグレード、5 章ではトリガーアルゴリズムの改良につ

いて述べる。それらの結果を 6 章にまとめる。

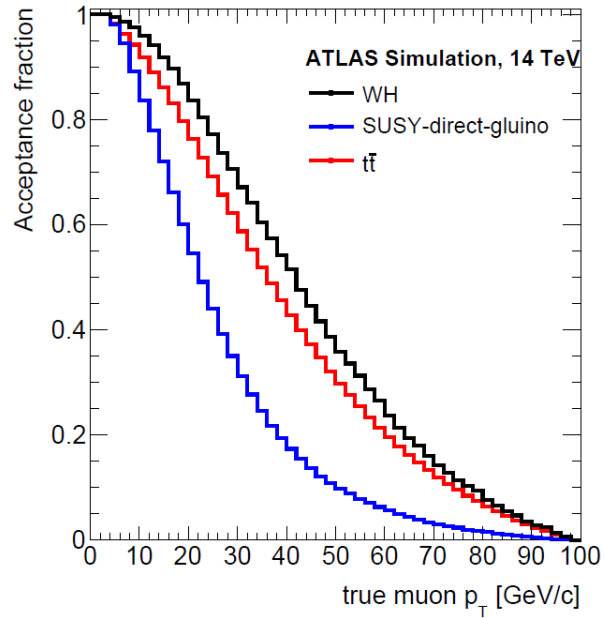


図 1.2: 重心系エネルギー 14 TeV におけるミュオンの横運動量に対する物理のアクセプタンス [2]。黒が W ボソンを伴うヒッグス粒子、青が超対称粒子グルイーノ、赤がトップクォーク対のアクセプタンスである。

第 2 章

LHC ATLAS 実験

2.1 LHC 加速器

Large Hadron Collider (LHC) はスイスのジュネーブ郊外にある欧州原子核研究機構 (CERN) に設置された世界最大最高エネルギーの衝突型粒子加速器である。周長約 27 km の円形加速器であり、最大で 14 TeV の重心系エネルギーで陽子陽子衝突をさせることが可能となっている。新粒子を探索するとともに、ヒッグス粒子やトップクォーク等の質量が大きい粒子を大量に生成できるので、結合定数などの精密測定も行うことが可能である。

LHC は 2010 年から運転を開始し、7 TeV から 8 TeV の重心系エネルギーで 2012 年まで稼働した。この期間を LHC Run-1 と呼び、瞬間最高ルミノシティは $0.77 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。その後、2013 年から 2015 年までのシャットダウン期間で加速器のアップグレードを行った。2015 年からは重心系エネルギー 13 TeV で LHC Run-2 が始まり、2018 年末まで続いた。Run-2 の 3 年間で得られた積分ルミノシティは約 150 fb^{-1} であった。

LHC は 2 年間のシャットダウン期間を経て 2021 年から重心系エネルギー 14 TeV の LHC Run-3 が始まる予定である。図 2.1 に LHC の運用スケジュールを示す。Run-3 が約三年運転した後、シャットダウン期間を挟んで High Luminosity LHC (HL-LHC) が始まる予定である。

2.2 ATLAS 実験

ATLAS 実験は LHC の衝突点に設置された ATLAS 検出器を用いて陽子陽子衝突から TeV スケールまでの高エネルギー物理事象を探索する実験である。2012 年には、同じ

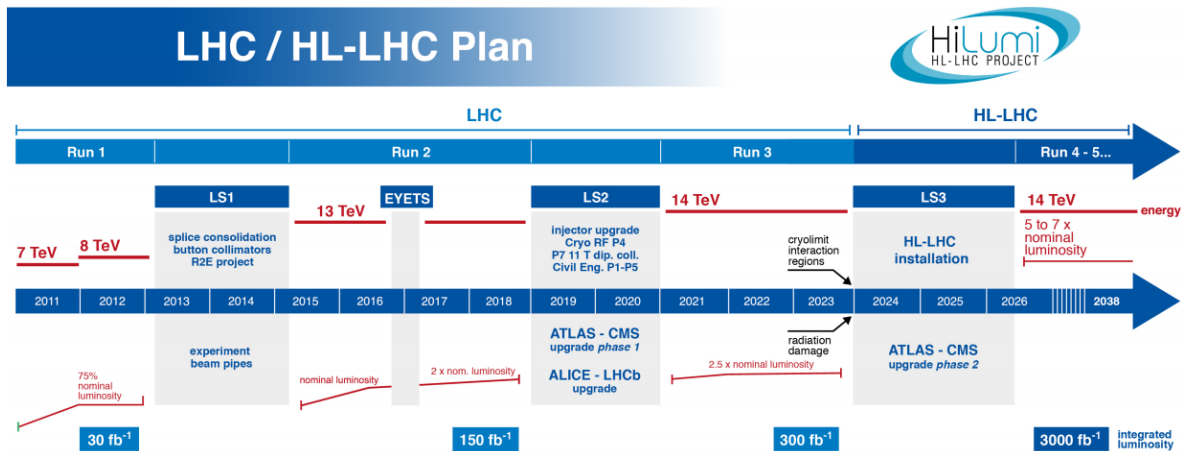


図 2.1: LHC の運転計画 [3]。2011 年から始まった Run-1 からエネルギーとルミノシティを上げながら運転を続けている。

LHC 実験の CMS 実験と共にヒッグス 粒子を発見し、標準理論の完成の大きな役割を担った。世界最高エネルギーの LHC を使ったヒッグス粒子やトップクォークといった重い粒子の精密測定は ATLAS 実験の重要な目的の一つである。他にも超対称性粒子などの新粒子を発見することが特に大きな目的となっている。

2.3 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器の全体図を図 2.2 に示す。ATLAS 検出器は高さ 25 m、全長 40 m の円筒形検出器であり、大きく分けて内側から内部飛跡検出器、カロリメーター、ミュオン検出器で構成されている。

2.3.1 ATLAS 実験における座標系

図 2.3 は ATLAS 実験で用いられる座標系を示している。陽子衝突点を原点として、ビーム軸方向に z 軸、鉛直上向きに y 軸ととり、LHC の中心方向を x 軸としている。加えて、円筒座標系として動径方向を R 、 z 軸の正方向となす角を θ 、方位角を ϕ としている。 θ 方向を表す際に $\eta = -\log(\tan \theta/2)$ と定義された擬ラピディティ η を用いて表すことが多い。また、反応する陽子中のクォークやグルーオンのビーム軸方向の運動量は分からないため、運動量のビーム軸に垂直な成分である横運動量 (Transverse momentum, p_T) を用いることが多く、 p_T は運動量ベクトル \mathbf{p} を用いて $p_T = |\mathbf{p}| \sin \theta$ と定義される。

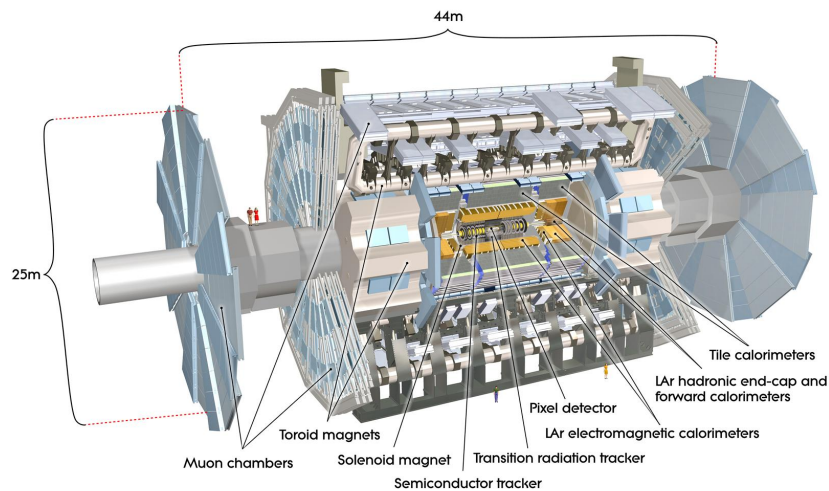


図 2.2: ATLAS 検出器の全体図 [4]。高さ 25 m、全長 40 m の円筒形検出器であり、内側から内部飛跡検出器、カロリメーター、ミューオン検出器で構成されている。

ATLAS 検出器においては円筒形の底面部分と側面部分では検出器の種類や配置が異なり、概ね $|\eta| = 1$ で二つの領域に分けられ、 $|\eta| < 1$ の側面部分をバレル領域、 $|\eta| > 1$ の底面部分をエンドキャップ領域と呼び、 $\eta > 0$ の領域を A-side、 $\eta < 0$ の領域を C-side と呼ぶ。

2.3.2 超伝導磁石

ATLAS 検出器では磁場によって荷電粒子の飛跡を曲げ、その曲率を用いて運動量を計算する。検出器内部にはソレノイド磁石とトロイド磁石の二種類の超伝導磁石が導入されており、ソレノイド磁石は衝突点付近で運動量を測定するために用いられ、ミューオンの運動量を測定するためにトロイド磁石が用いられる。図 2.4 に超伝導磁石の構成とその配置を示す。トロイド磁石はバレル領域とエンドキャップ領域で分けられて設置されており、それぞれ ϕ 方向に八回対称で設置されている。

2.3.3 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は、Insertable B-Layer (IBL)、Pixel 検出器、Semiconductor Tracker (SCT) と Transition Radiation Tracker (TRT) からなり、荷電粒子の飛跡を検出する。図 2.5 に内部飛跡検出器の配置を示す。ソレノイド磁石によってその飛跡が曲げられ、その曲率から

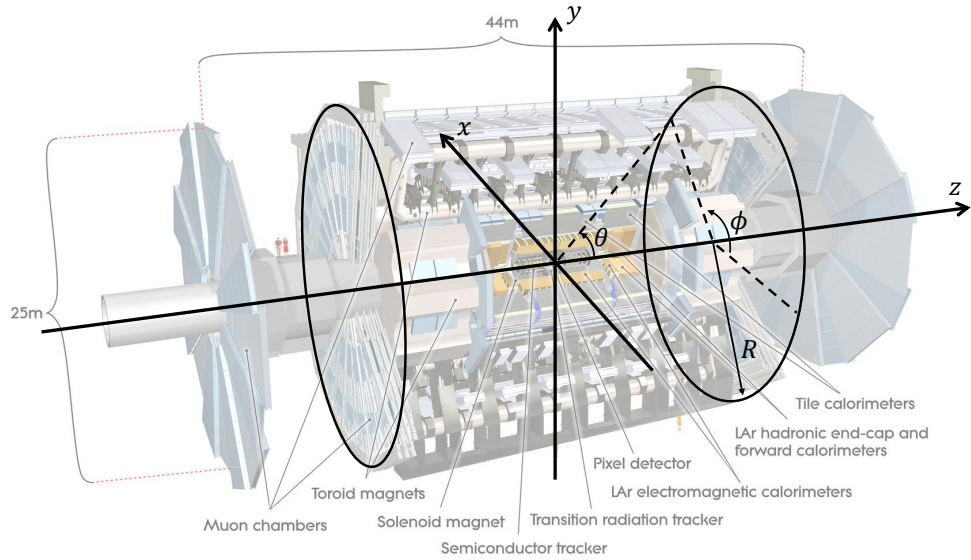


図 2.3: ATLAS 実験における座標系。 x, y, z 軸の直角座標系と R, θ, ϕ の円筒座標系を用いる。前方を表すパラメータとして擬ラピディティ η を用いる。

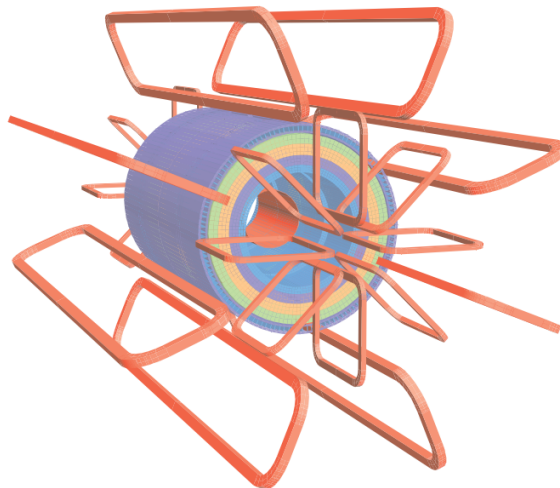


図 2.4: ATLAS 検出器における超伝導磁石の構成 [4]。衝突点付近のソレノイド磁石と、外側にあるトロイド磁石の二種類で構成される。トロイド磁場はエンドキャップ領域とバレル領域でずらして八回対称で設置されている。

運動量を計算する。また、衝突点や生成粒子の 2 次崩壊点を識別することで、B 中間子などの長寿命粒子の同定が可能となっている。

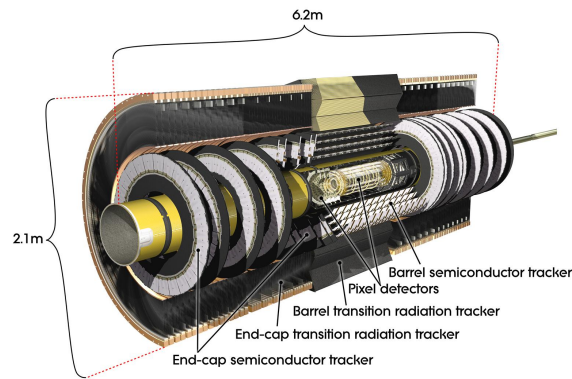


図 2.5: 内部飛跡検出器 [4]。最内層の IBL はこの図には描かれていない。そのほかの検出器は内側から Pixel、SCT、TRT の順に配置されている。

2.3.4 カロリメーター

カロリメーターは電子と光子のエネルギーを測定する電磁カロリメーターと、ハドロン
のエネルギーを測定するハドロンカロリメーターで構成される。図 2.6 にカロリメーター
の概略図を示す。

LAr 電磁カロリメーター

電磁カロリメーターは鉛と液体アルゴンで構成され、内部飛跡検出器のすぐ外側に設置
されている。電子と光子はこの電磁カロリメーターの内部で電磁シャワーを生成し、それを用
いて電子と光子のエネルギーを測定する。 $|\eta| < 1.5$ のバレル領域と $1.4 < |\eta| < 3.2$ のエ
ンドキャップ領域に分けられ、厚さはバレル領域で放射長の 22 倍、エンドキャップ領域
で放射長の 24 倍になっている。

ハドロンカロリメーター

強い相互作用によるシャワーから π 中間子などのハドロンのエネルギーを測定する。
 $|\eta| < 1.7$ のバレル領域を覆う Tile Calorimeter と $1.5 < |\eta| < 4.9$ のエンドキャップ領
域を覆う LAr ハドロンカロリメーターの二種類で構成されている。Tile Calorimeter は
鉄とプラスチックシンチレーターで構成されている。LAr ハドロンカロリメーターは更

に $1.5 < |\eta| < 3.2$ の Hadronic Endcap Calorimeter (HEC) と $3.1 < |\eta| < 4.9$ の Forward Calorimeter (FCal) に分けられる。

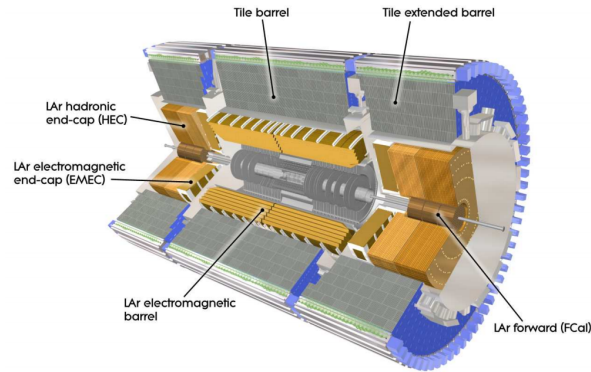


図 2.6: カロリメーターの概略図 [4]。電磁カロリメーターとハドロンカロリメーターで構成されている。

2.3.5 ミューオン検出器

ミューオン検出器は ATLAS 検出器最外層に位置し、トロイド磁石によって曲げられたミューオンの飛跡を再構成することで運動量を測定する。ミューオンは寿命が長く、制動放射によるエネルギー損失が小さいのでカロリメーターを通過し最外層のミューオン検出器に到達する。ミューオン検出器はトリガー発行用の TGC、RPC と精密測定用の MDT、CSC から構成されている。図 2.7 にミューオン検出器の概略図を示す。

ミューオン検出器の配置を図 2.8 に示す。トリガー用検出器はエンドキャップ領域では TGC が、バレルでは RPC が使われている。精密測定用にはバレル領域では全域に MDT が、エンドキャップでは MDT と CSC の二種類が使われている。また、ミューオン検出器はエンドキャップ領域、バレル領域ともに大きく 3 層に分けられる。その層をそれぞれステーションと呼び、内側からインナー、ミドル、アウターと呼ばれる。大きさや配置が異なる 2 種類の検出器を持ち、それぞれラージセクター、スモールセクターと呼ばれ、 ϕ 方向に交互に配置されている。

Thin Gap Chamber (TGC)

TGC はエンドキャップ領域に設置されたトリガー発行用のガス検出器である。詳細は 3.2 節で説明する。

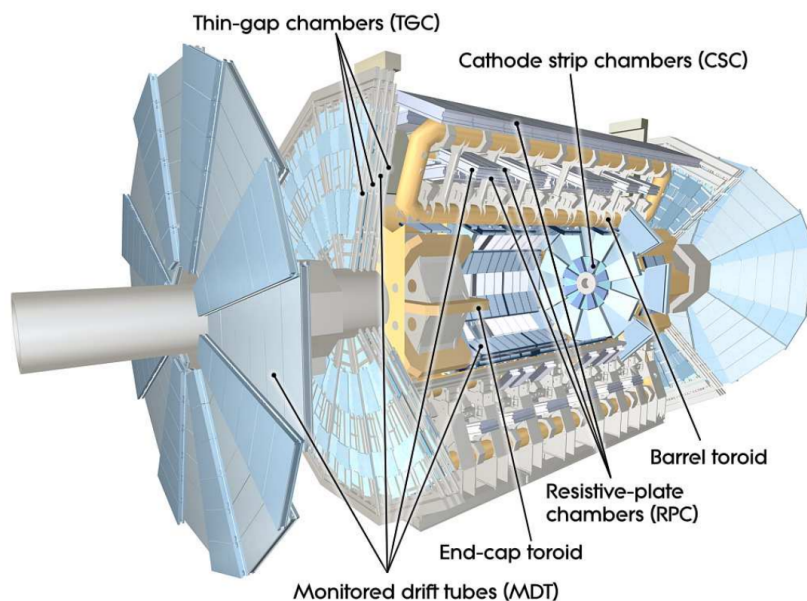


図 2.7: ミューオン検出器 [4]。トリガー発行用の TGC・RPC と精密測定用の MDT・CSC から成る。

Resistive Plate Chamber (RPC)

RPC はバレル領域で用いられるトリガー発行用検出器である。図 2.9 で示すように、高抵抗並行板で 2mm のガスギャップを挟み込み、互いに直行したストリップにより z 方向と ϕ 方向の位置を測定する。

Monitored Drift Tube (MDT)

MDT は図 2.10 に示すようにドリフトチューブを多数並べた構造をした検出器であり、電離された電子のドリフト時間からミューオンの位置を精密に測定できる。エンドキャップ領域では R 方向、バレル領域では z 方向のみ測定できる。

Cathode Strip Chamber (CSC)

CSC は前方領域 ($2.0 < |\eta| < 2.7$) で用いられる精密測定用の検出器である。図 2.11 に CSC の構造図を示す。この領域では粒子のヒットレートが高く、MDT では十分な性能が発揮できないのでこの CSC を用いる。

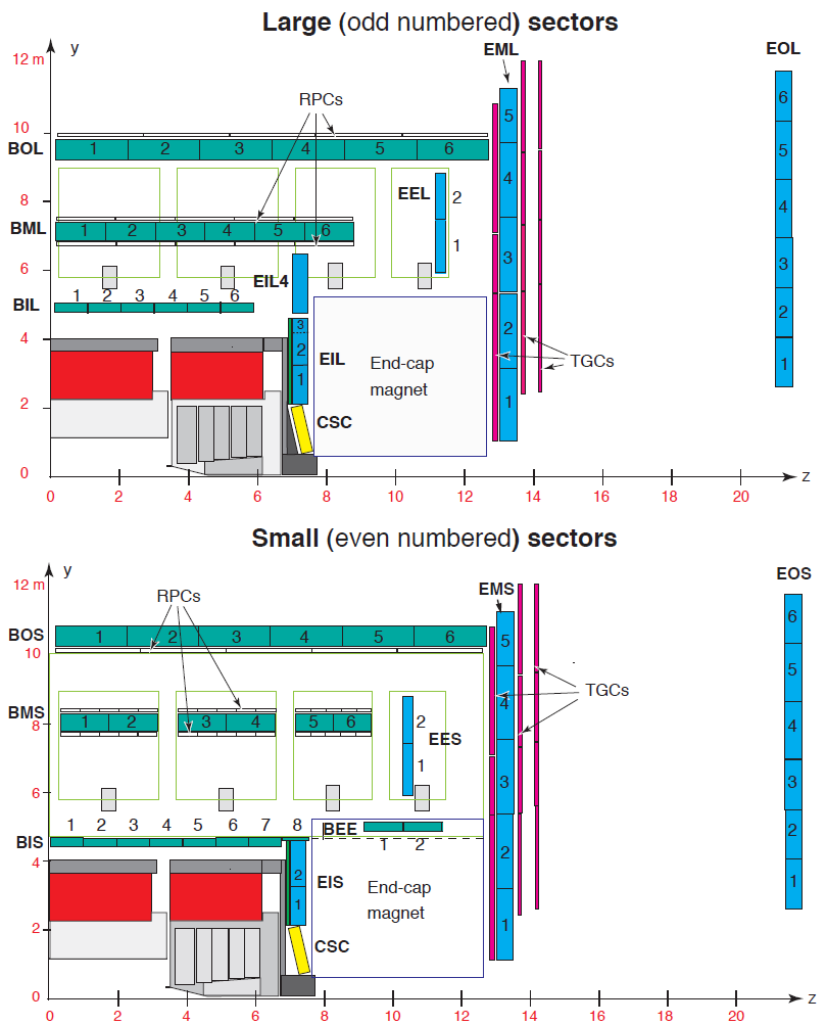


図 2.8: ミューオン検出器の配置図 [5]。ラージセクターとスモールセクターが並び、エンドキャップ、バレルともにインナー、ミドル、アウターの3層がある。

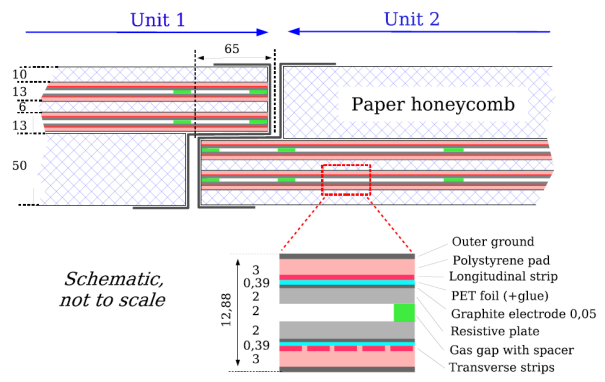


図 2.9: RPC の構造図 [4]。高抵抗並行板でガスギャップを形成する。

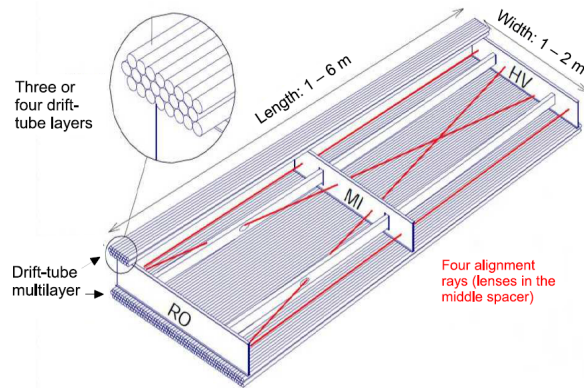


図 2.10: MDT の構造 [4]。多数のドリフトチューブが並んでいる。

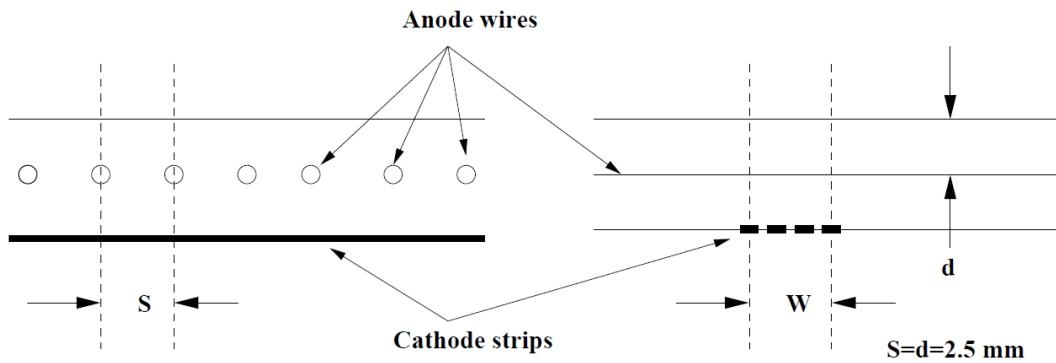


図 2.11: CSC の構造 [4]。複数のストリップで信号が読み出される。

2.4 トリガーシステム

ATLAS 実験では 40 MHz の頻度で陽子バンチ衝突が起こる。しかし、Run-2 ではデータ記録速度の限界により平均 1 kHz の頻度しか保存することが出来ない。そこで、ATLAS 実験では 2 段階に分けたトリガーシステムを導入することで興味のある事象を選び出して保存している。

2.4.1 Level-1 トリガー

初段のトリガーを Level-1 (L1) トリガーと呼ぶ。L1 トリガーでは ATLAS から送られてくる 40 MHz のイベントを $2.5 \mu\text{s}$ 以内に 100 kHz まで削減することが求められる。そのため Field Programmable Gate Array (FPGA) などの高速処理が可能なハードウェア

で実装されている。

図 2.12 にトリガーの流れを示す。L1 Trigger は電磁カロリメーターとハドロンカロリメーターの情報を用いて発行される L1Calo、ミュオン検出器の情報を用いて発行される L1Muon、それらを組み合わせた L1Topo の三種類で構成される。

L1Muon はミュオン検出器のトリガー用検出器の情報を用いてトリガー判定を行う。エンドキャップ領域とバレル領域でそれぞれ独立にトリガー判定を行い、それらのトリガー情報は Muon to CTP Interface (MuCTPi) に送られ、統合される。L1Calo と L1Muon は Central Trigger Processor (CTP) に送られると同時に Topology Processor (L1Topo) に送られる。L1Topo では L1Calo、L1Muon の情報を元に複合的なトリガーを発行する。L1Topo も L1Calo、L1Muon と同じく CTP に送られ、100 kHz に収まるようにプレスケールをかけられた後、L1 トリガーが発行される。

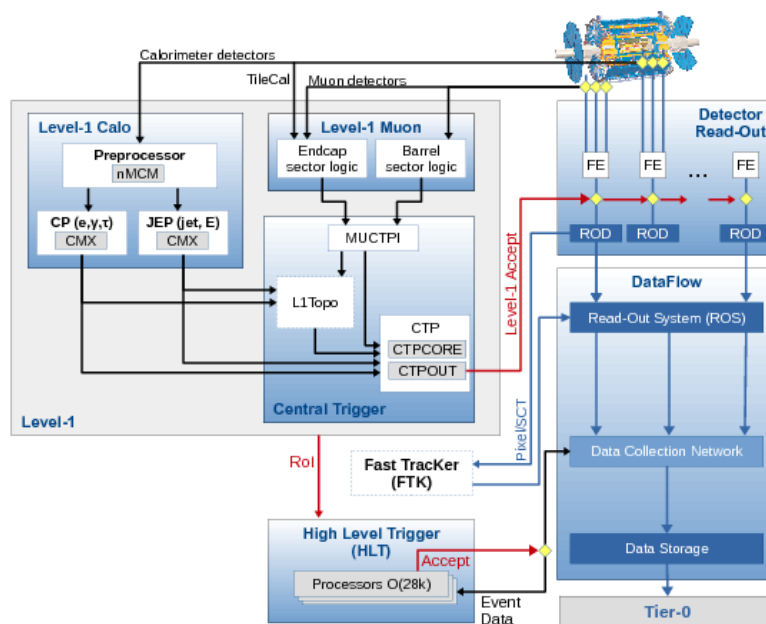


図 2.12: Run-2 におけるトリガーの流れ [6]。L1 トリガーには L1Calo、L1Muon、L1Topo の 3 種類のトリガーが存在。

2.4.2 High Level Trigger

2 段目のトリガーである High Level Trigger (HLT) では L1 Trigger を通過したイベントに対してソフトウェアを用いた高精度なトリガーを発行する。内部飛跡検出器の情報も用

いて荷電粒子の飛跡を再構成し、ATLAS 検出器内の全ての情報を用いることでトリガーレートの削減を行う。HLT は衝突から約 1 秒以内にイベントレートを 1 kHz まで減らし、データを保存する。

第 3 章

ミューオントリガー

3.1 ミューオンによる事象選別

ミューオン検出器は ATLAS 検出器最外層に位置し、ミューオン検出器に飛跡を残す粒子はミューオンだけである。そのため、ミューオンは粒子同定が容易であり、オンラインの事象選別に用いやすい。ミューオンは電弱相互作用をする事象の終状態粒子として出てきやすい粒子である。中でも W ボソンや Z ボソンの崩壊から生じるミューオンは高い p_T を持つことが多く、ヒッグス粒子やトップクォークといった重い粒子を含んだ物理に高い感度を持つ。そのため、高い p_T のミューオンが含まれる事象を選び出すことで、これらの粒子が生成された事象を選ぶことが出来る。また、ボトムクォークやチャームクォークを含んだ粒子の終状態として p_T が低いミューオンが複数生成されることが多く、 p_T が低い複数のミューオンを用いたトリガーによってそれらの物理に感度を持つ事象を選別できる。

3.2 Level-1 エンドキャップミューオントリガー

ここでは TGC を用いたエンドキャップ領域でのトリガーについて説明する。

3.2.1 TGC 検出器

TGC 検出器の構造を図 3.1 に示す。TGC はガスギャップが 2.8 mm の Multi Wired Proportional Chamber (MWPC) であり、アノードワイヤーとカソードストリップによる 2 次元読み出しが可能である。 R 方向はワイヤー、 ϕ 方向はストリップで読み出し、位置を測定する。ワイヤーは直径 50 μm の金メッキされたタングステンワイヤーで、カソード

はガラスエポキシ板が用いられている。

図 3.2 に示すように TGC はワイヤー層、ストリップ層を 2 層ずつ持つダブルレット構造と 3 層のワイヤー層と 2 層のストリップ層を持つトリプレット構造の二種類のチェンバーが使われている。

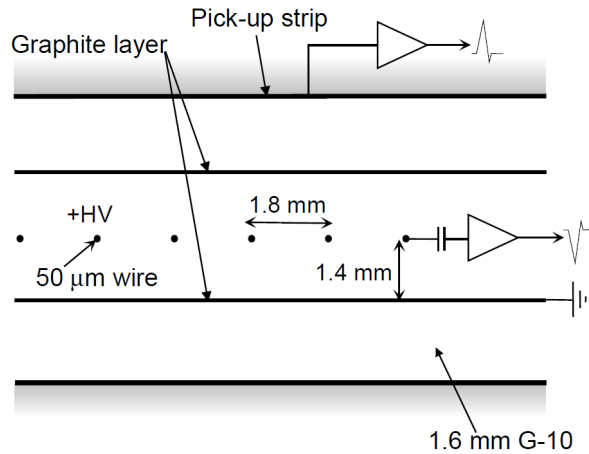


図 3.1: TGC 検出器の構造 [4]。ワイヤーで ϕ 方向、ストリップで R 方向の位置情報を読み出す。

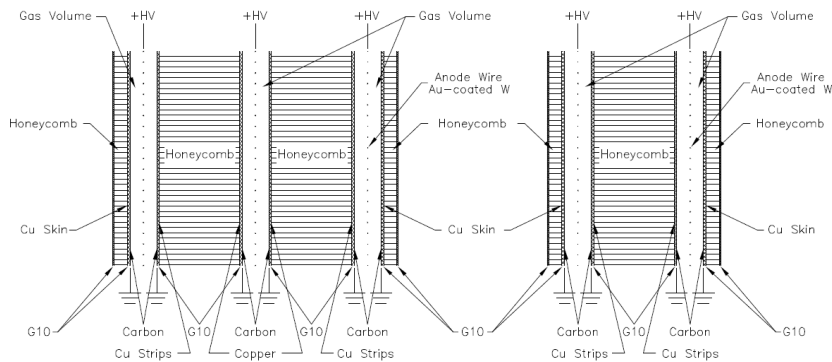


図 3.2: TGC 検出器のダブルレット・トリプレット構造 [4]。ストリップ層はともに 2 層であるが、ワイヤー層は 3 層のものと 2 層のものがある。

TGC 検出器の配置図を図 3.3 に示す。磁場の外側には 3 層の TGC が設置されていて、この 3 層の TGC をまとめて TGC Big Wheel (BW) と呼ぶ。TGC BW の写真を図 3.4 に示す。TGC BW を構成する TGC の層は図 3.5 の様な円盤形の検出器で内側から M1、M2、M3 と呼ばれている。磁場の内側にも TGC が配置されている。この TGC 層を Small

Wheel (SW) と呼び、 η 方向に並んだ2つのチェンバーで構成されている。 $|\eta|$ が大きい方を FI、 $|\eta|$ が小さい方を EI と呼ぶ。 $R-\phi$ 平面の EI/FI を図 3.6 に示す。FI は全ての ϕ を覆っているが、EI はトロイド磁石との干渉を避けるため一部の ϕ を覆っている。M1 はトリプレット構造をしており、その他の TGC 検出器はダブルレット構造をしている。

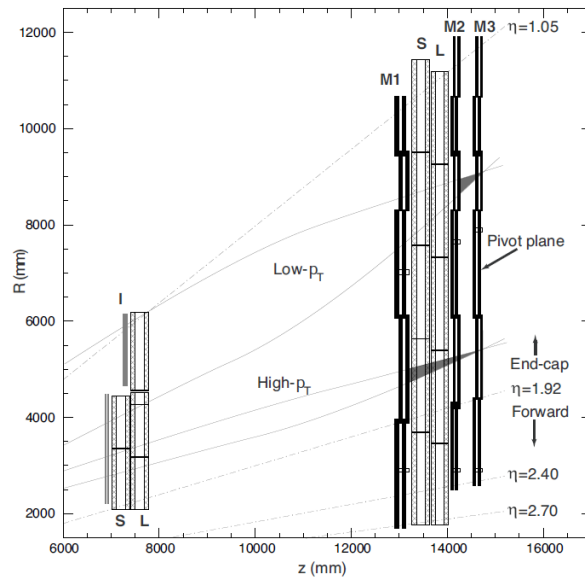


図 3.3: TGC の配置図 [4]。磁場の外側に M1、M2、M3、磁場の内側に EI、FI が設置されている。

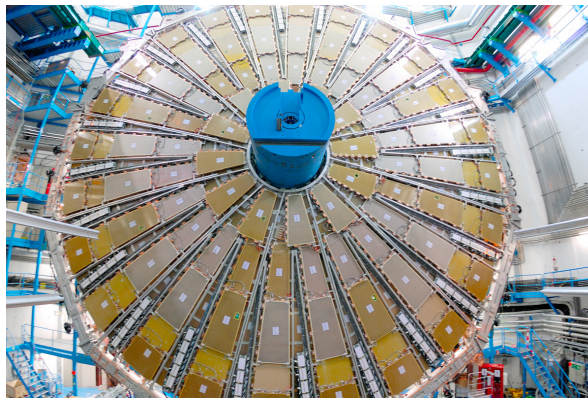


図 3.4: TGC BW。 [4]

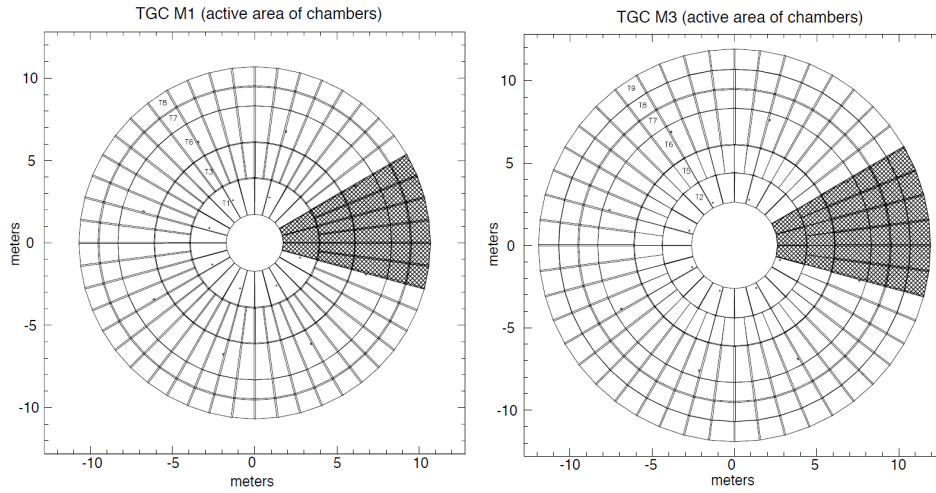


図 3.5: TGC BW の M1、 M3 チェンバー [7]。M2 も同様の構造をしている。実線で囲まれた 1 マスが一つのチェンバーに対応している。

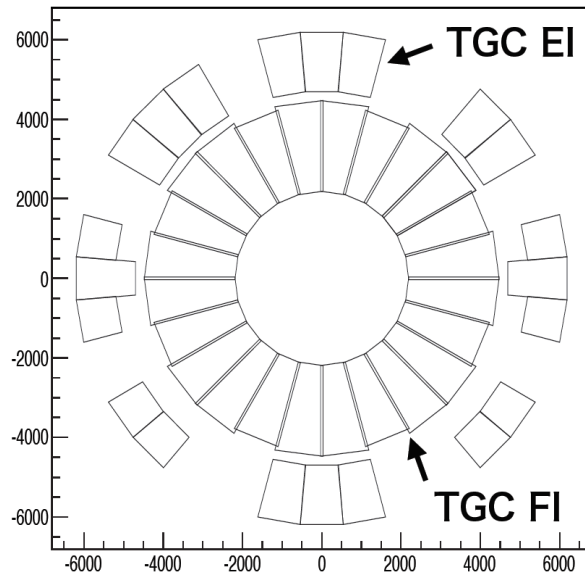


図 3.6: TGC EI/FI[8]。FI は全ての ϕ を覆っているが、EI はトロイド磁石との干渉を避けるため全ての ϕ を覆っているわけではない。

3.2.2 トリガー単位

TGC ではトリガーセクターと呼ばれる単位でトリガー判定を行う。トリガーセクタは η の範囲によって異なり、 $1.05 < |\eta| < 1.9$ では $|\phi|$ 方向に 48 分割、 $1.9 < |\eta|$ では ϕ 方向に 24 分割したものである。以下では、 $1.05 < |\eta| < 1.9$ のトリガーセクターを Endcap セクター、 $1.9 < |\eta|$ のトリガーセクターを Forward セクターと呼ぶ。

トリガーセクターは更に Region of Interest (RoI) と呼ばれる単位に分割される。Endcap セクターでは η 方向に 37 分割、 ϕ 方向に 4 分割したものを RoI とし、Forward セクターでは η 方向に 16 分割、 ϕ 方向に 4 分割したものを RoI とする。L1 ミューオントリガーではこの RoI を最小単位としている。トリガーセクターと RoI の分割規則を図 3.7 に示す。

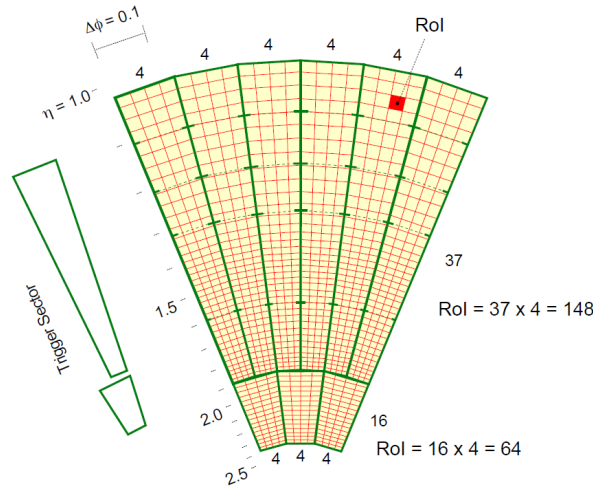


図 3.7: TGC のトリガーセクターと Region of Interest (RoI) [9]。緑の線で囲まれた部分が 1 トリガーセクター、赤い四角のマスが 1RoI を示している。

3.2.3 TGC BW を用いた横運動量測定

レベル 1 ミューオントリガーではミューオンの運動量のビーム軸に垂直な成分 (横運動量、 p_T) を測定し、高い p_T のミューオンが含まれるイベントに対してトリガーを発行する。衝突点で生成されたミューオンは磁場内部の検出器を通過し、トロイド磁場領域に侵入する。 ϕ 方向にかかった磁場によってミューオンの飛跡は η 方向に曲げられる。その曲率は p_T に依存し、 p_T が高いミューオンはあまり曲がらない。このように飛跡の R 方向と ϕ 方向の曲がり具合を利用してミューオンの p_T を計算し、その情報を用いてトリ

ガーを発行する。図 3.8 に示すような手法を用いてミューオンの p_T を計算する。トロイド磁場によって曲げられたミューオンは TGC BW の M1・M2・M3 にヒットを残す。そのヒット位置からミューオンの飛跡を再構成し、 p_T を計算する。ここで、衝突点と M3 のヒット位置を結んだ直線からの M1 におけるヒット位置の R 方向と ϕ 方向のずれ $dR, d\phi$ をあらかじめ計算し、図 3.9 のような Coincidence Window (CW) を作成しておく。図の色によって判定される p_T が異なり、基本的に中心に行くほど p_T が高いと判断される。理想的には ϕ 方向にかかった磁場によって R 方向に曲げられるが、場所によっては ϕ 方向に曲がることもある。また、図のマス中の数字は表 3.1 に示す pt number と対応している。この CW を Look Up Table (LUT) としてハードウェアに書き込んでおくと、ミューオンが TGC BW にヒットしたときにその LUT を参照するだけで良いので短時間での p_T 判定が達成できる。エンドキャップ領域のトロイド磁場や TGC は理想的には八回対称だが、場所によっては磁場の向きが ϕ 方向に傾いていることや、チェンバーが少しずれていることがあるので CW は TGC BW の全ての RoI で独立に作成されている。

表 3.1: Run-2 における p_T 閾値。値は 2017 年、2018 年に使われていたもの。L1_MU10 と L1_MU11、L1_MU20 と L1_MU21 は TGC では同じ CW だが RPC の状態が異なる。

pt number	Threshold	Status
1	L1_MU4	$p_T \geq 4 \text{ GeV}$
2	L1_MU6	$p_T \geq 6 \text{ GeV}$
3	L1_MU10	$p_T \geq 10 \text{ GeV}$ (barrel 2-station)
4	L1_MU11	$p_T \geq 10 \text{ GeV}$
5	L1_MU20	$p_T \geq 20 \text{ GeV}$
6	L1_MU21	$p_T \geq 20 \text{ GeV}$ (barrel no feet)

また、ミューオントリガーでは 2-station、3-station の 2 種類のコインシデンスが存在する。2-station コインシデンスは M2、M3 のダブルレットの計 4 層の内 3 層のコインシデンス (3/4 コインシデンス) が行われ、low- p_T 判定が行われる。3-station コインシデンスはそれに加えて M1 のトリプレットの内ワイヤーで 2/3 コインシデンス、ストリップで 1/2 コインシデンスを取り、2-station コインシデンスと合わせて high- p_T 判定が行われる。2-station と 3-station では CW の $dR, d\phi$ の範囲が異なり、表 3.2 に示す。Run-2 では 2-station は全て L1_MU4 ($p_T \geq 4 \text{ GeV}$ に対するトリガー) と判定される。

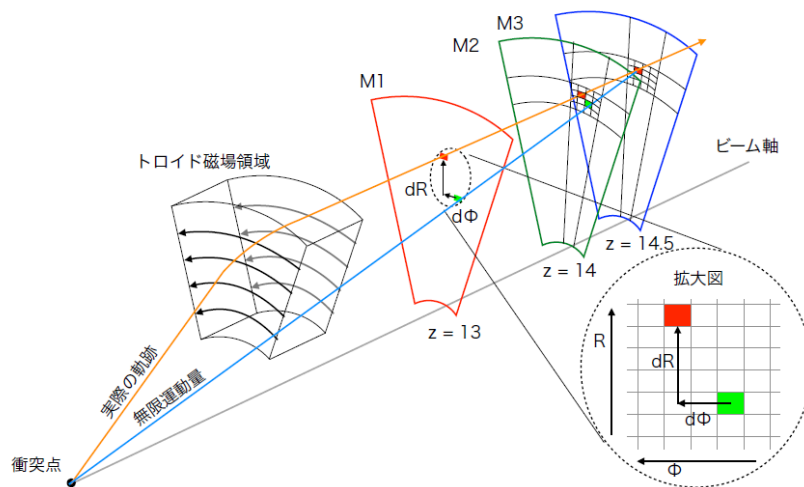


図 3.8: エンドキャップ領域のトリガーコンセプト。[10] M1・M2・M3 でのヒット位置からミュオンの飛跡の曲率を計算し、その情報を用いてトリガー判定を行う。

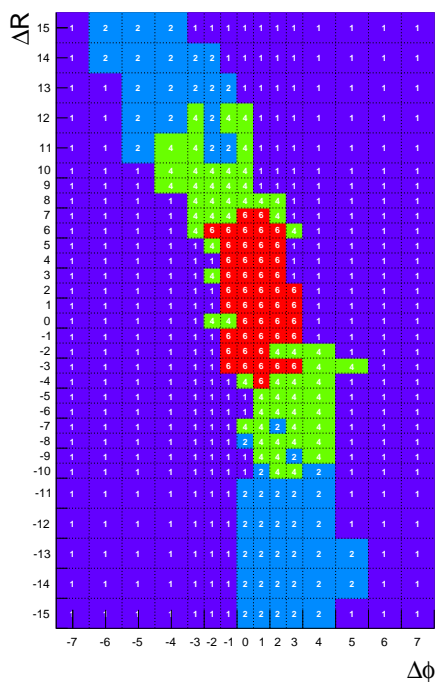


図 3.9: Run-2 で使われている CW の一つ。それぞれの色が p_T 閾値に対応している。赤が $p_T \geq 20$ GeV のミュオンに、緑、薄青、濃青がそれぞれ $p_T \geq 10, 6, 4$ GeV のミュオンに対応。それぞれの RoI でヒットがあったときにこれを参照し、 $dR, d\phi$ から p_T を見積もる。

表 3.2: 2-station コインシデンスと 3-station コインシデンスの CW における dR 、 $d\phi$ の範囲。

2-station or 3-station	dR	$d\phi$
Wire 2-station, Strip 3-station	-15 ~ 15	-7 ~ 7
Wire 2-station, Strip 3-station	-7 ~ 7	-7 ~ 7
Wire 3-station, Strip 2-station	-15 ~ 15	-3 ~ 3
Wire 2-station, Strip 2-station	-7 ~ 7	-3 ~ 3

3.2.4 Inner Coincidence

Run-1 では TGC BW 単体でトリガー判定を行っていた。そこで問題になったのは、図 3.10 で示すように、 $|\eta| > 1$ の領域でオフラインでミューオンが再構成されないトリガー判定が多いことであった。その主な原因は衝突点由来でない荷電粒子によるフェイクであった。例えば図 3.11 のように、衝突点でソフトな衝突をした陽子がビームパイプにぶつかって荷電粒子を生成し、その荷電粒子がトロイド磁場で曲げられて TGC BW にヒットを残すことで衝突点由来のものとしてトリガー判定がなされたものがある。Run-2 からは EI/FI や Tile calorimeter とコインシデンスを取ることで、衝突点由来でない荷電粒子を排除しフェイクトリガーを大きく削減することが出来た。図 3.12 は EI/FI のコインシデンスによるトリガー発行数削減を示す。このように Inner coincidence によりフェイクによるトリガーレートの削減が可能になった。

3.2.5 トリガーエレクトロニクス

TGC で用いられるエレクトロニクスにはトリガー判定とデータを読み出しの二つの役割が求められる。図 3.13 にトリガー信号と読み出しデータの流れを示す。

トリガーラインはトリガー用の情報からレベル 1 トリガーを発行するまでの信号の流れであり、図 3.14 にトリガーラインの概要を示す。

リードアウトラインは ASD → PP → SLB と信号が受け渡された後、トリガー判定が行われる間データをバッファに保持し、トリガーが発行されたときのみデータを読み出しボードに送信する。図 3.15 にリードアウトラインの概要を示す。

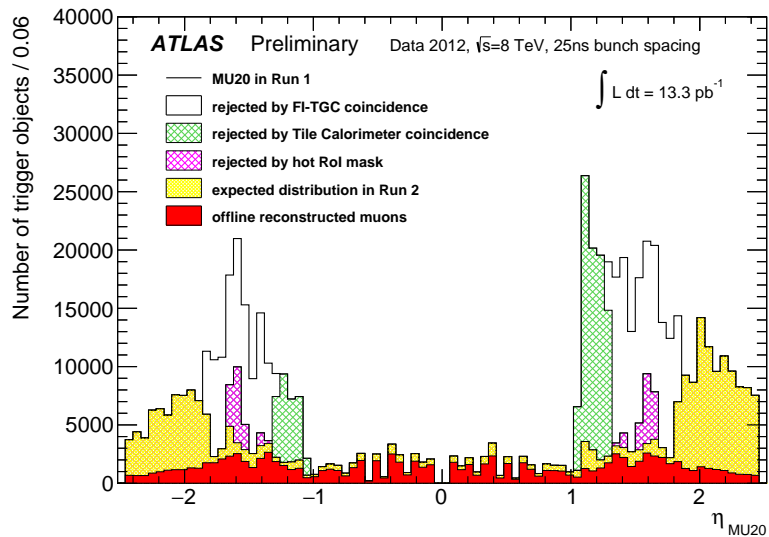


図 3.10: Run-1 におけるトリガー発行数の η 分布 [11]。赤い領域がオフラインで再構成されたミュオンであり、 $|\eta| > 1$ の領域ではそれ以外の原因によるトリガーが多くを占める。

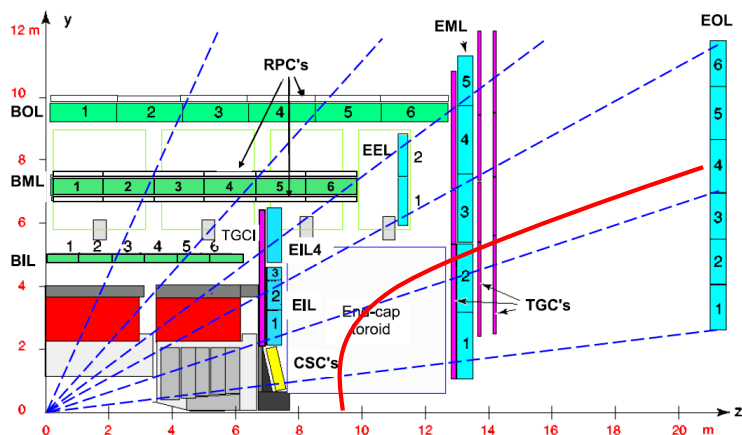


図 3.11: フェイクトリガーの一例。赤線のようにビームパイプで生成された荷電粒子が磁場によって曲げられ TGC にヒットを残すことで、衝突点由来のミュオンとしてトリガーされる。

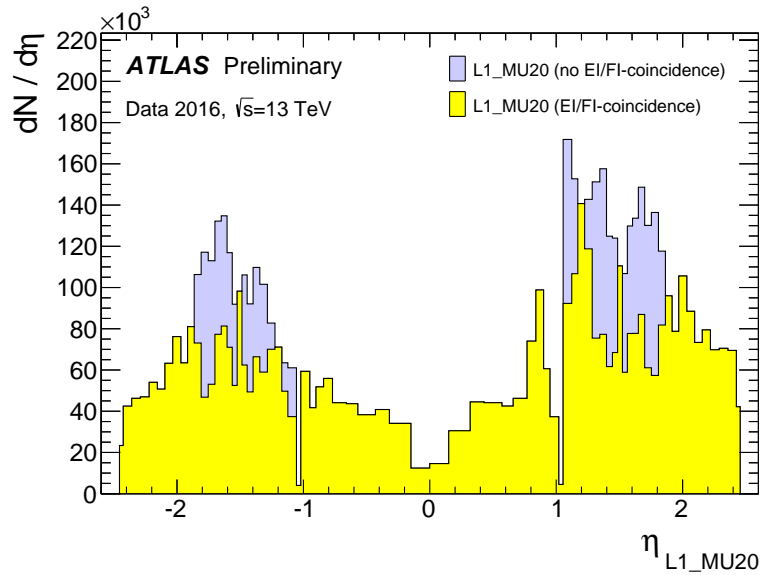


図 3.12: Run-2 におけるトリガー発行数の η 分布。青い領域が EI/FI コインシデンスにより削減されたトリガーである。

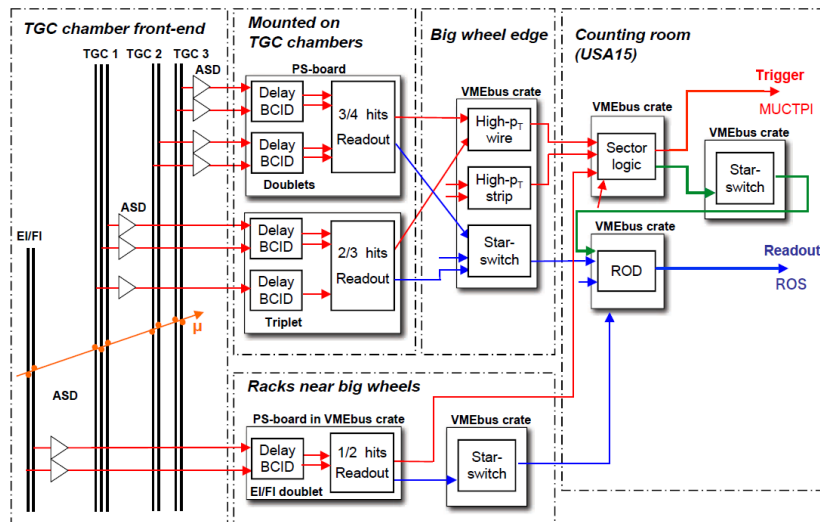


図 3.13: トリガー信号と読み出しデータの全体図 [12]。赤線がトリガー信号、青線が読み出しデータの流れ

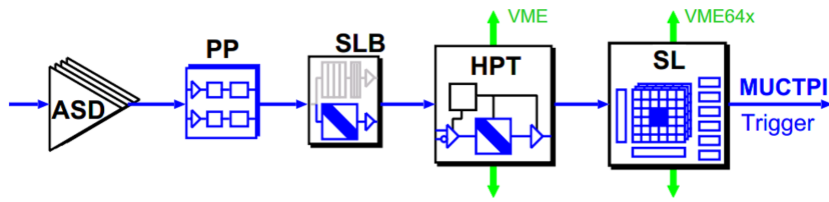


図 3.14: TGC エレクトロニクスのトリガーラインの概念図 [13]。ASD → PP → SLB → HPT → SL という順にトリガー信号が受け渡され、トリガー判定結果は MuCTPi に送信される。

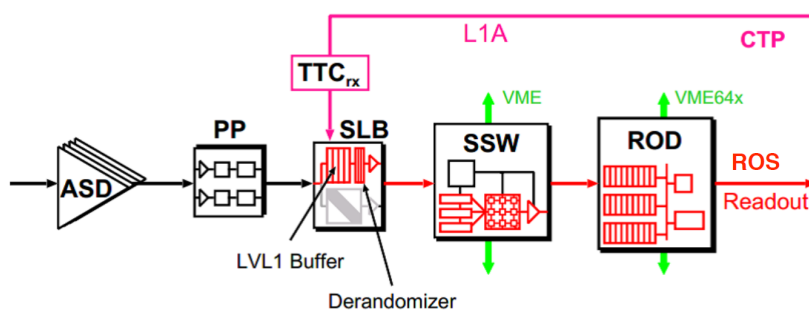


図 3.15: TGC エレクトロニクスのリードアウトラインの概念図 [13]。ASD → PP → SLB → SSW → ROD の順に受け渡され、最終的に Read Out System (ROS) に送信される。

Amplifier Shaper Discriminator (ASD)

ASD は TGC から送られる電圧信号を電流信号に変換し、増幅した後にデジタル化する回路である。

Patch Panel (PP) ASIC

PP ASIC は ASD から受信した信号のケーブル長の違いや粒子の Time of flight (TOF) の違いによるタイミング差を吸収しタイミング調整を行う。

Slave Board (SLB) ASIC

SLB では M1 の 2/3 (ストリップは 1/2) コインシデンスや M2-M3 の 3/4 コインシデンス、EI/FI の 1/2 コインシデンスを行う。M1 および M2-M3 のコインシデンス結果は後段の HPT ボードに送られる。

SLB のリードアウト部分はトリガーが発行されるまでデータを保持するバッファの機

能を持つ。L1A が発行された場合、後段の SSW に情報を送信する。EI/FI の情報は直接 SL に送られる。

PP and SLB (PS) ボード

PS ボードには PP ASIC と SLB ASIC が搭載されている。TGC 上に置かれており、トリガー情報を受け取る HPT ボードと読み出し用の SSW に接続されている。

HPT ボード

HPT ボードは M1 の SLB と M2-M3 の SLB から遅れられるコインシデンス情報を用いて M1-M3 コインシデンスを行う。M1 のチャンネル情報と M3 のチャンネル情報から位置の差 (dR , $d\phi$) を計算し、小さいのものの情報を SL に送る。

Sector Logic (SL)

SL は Front end から送られる検出器の信号から p_T 計算とトリガー判定を行う。図 3.16 に SL の写真を示す。2 枚の FPGA に図 3.9 のような CW を LUT として実装する。FPGA は書き換え可能なので、検出器のアライメントの変化などに応じて LUT を変化させることができ、最適なトリガー判定が行える。CW によるコインシデンスを通過した後、EI/FI や Tile calorimeter のヒット位置から Inner coincidence も行う。最終的に 1 トリガーセクターあたり 2 イベントまでトラックを絞り、後段の MuCTPi に送信する。

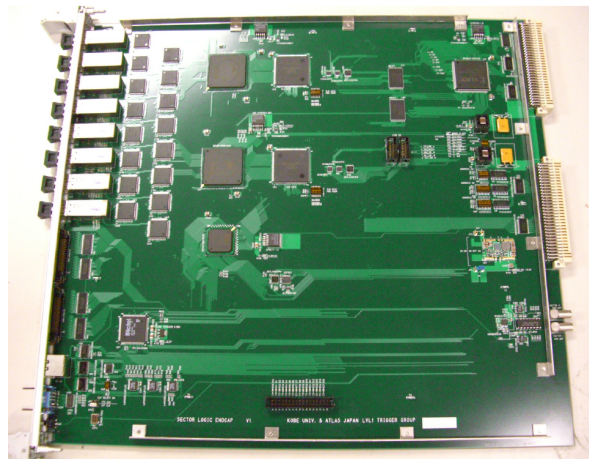


図 3.16: SL の写真 [12]。

Muon to Central Trigger Processor Interface (MuCTPi)

MuCTPi は Barrel、Endcap、Forward の SL から送られたトリガーセクター毎のトリガー判定を統合し、トリガー判定を行う [14]。MuCTPi では 6 段階の p_T 閾値を計算する。また、バレル領域とエンドキャップ領域の境目などで一つのトラックに対して 2 回トリガー判定を行ってしまうオーバーラップを取り除くことも MuCTPi の役目である。

第 4 章

L1 ミューオントリガーアップグレード

4.1 LHC Run-3

Run-3 では重心系エネルギーが 13 TeV から 14 TeV に上がり、瞬間ルミノシティも増加する予定である。それにより Run-2 よりも高いエネルギーの物理に対して感度が持てることに加え、稀な事象を高い統計で探索することが可能になると期待される。Run-3 の三年間で Run-2 の約 2 倍の 300 fb^{-1} の積分ルミノシティが得られる見込みである。2021 年から始まる LHC Run-3 に向けて 2019–2020 年の 2 年間で大規模なアップグレードが行われ、この期間を Phase-1 Upgrade と呼ぶ。

Run-3 では重心系エネルギー増加に伴う生成断面積の増加や瞬間ルミノシティが増えることでイベントレートが増加するが予想されるが、その一方で要求されるトリガーレートは増やせないため、物理への感度を犠牲にしてトリガー閾値を上げるか現行のものより高性能なトリガーを実装することでトリガーレートを抑える必要がある。図 4.1 に重心系エネルギー 14 TeV、瞬間ルミノシティ $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ における L1 ミューオントリガーレートを示す。Run-2 のシステムのままでは $p_T = 20 \text{ GeV}$ の閾値で 30 kHz を超えてしまう。後述の新検出器 New Small Wheel (NSW) を導入することで閾値を保ったままトリガーレートを約 15 kHz に抑えられると期待される。

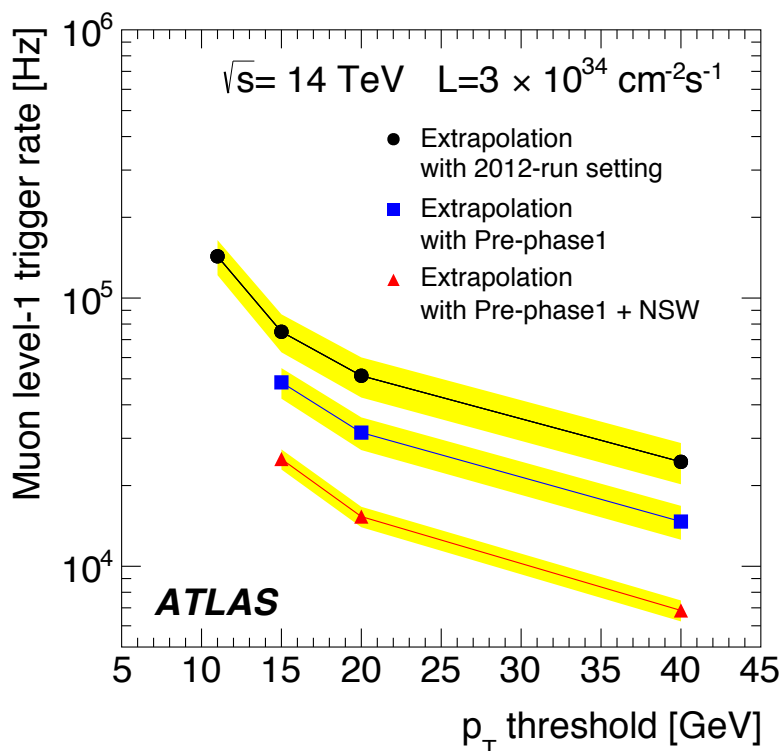


図 4.1: 重心系エネルギー 14 TeV、瞬間ルミノシティ $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ における L1 ミューオントリガーレートの予想 [9]。黒が Run-1 終わりのトリガーシステム、青が Phase-1 アップグレード前のシステム、赤が新検出器 NSW を導入した後のもの。

4.2 トリガーマニュー

L1 や HLT でのトリガー要求を組み合わせたものをトリガーチェーンと呼び、それらの集合をトリガーマニューと呼ぶ。トリガーマニューに対して瞬間ルミノシティなどの状況に合わせてトリガーレートが配分されている。表 4.1 に瞬間ルミノシティ $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ における Run-2 と Run-3 の L1 のトリガーマニューとそのトリガーレートを示す。このように細かく決められたトリガーレートの要求を満たすようなトリガー開発が求められる。ミューオントリガーは Run-2 で 32 kHz 許容されているのに対し Run-3 では 19 kHz に抑えなければならない。このトリガーレートを実装するために新検出器を導入し、現行のものよりも高性能なエレクトロニクスを用いる予定である。

表 4.1: Run-2 と Run-3 のトリガメニュー [15]。想定される瞬間ルミノシティは $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。

Run 2			Run 3		
	Offline p_T Threshold [GeV]	Rate [kHz]		Offline p_T Threshold [GeV]	Rate [kHz]
EM30VHI	38	14	EM25VHR	32	14
EM80	100	2.5	EM80	100	2.5
2EM15VHI	2x22	2.9	2EM12VHR	2x19	5.0
EM total		18			20
MU20	25	28	MU20	25	15
2MU11	2x12	4.0	2MU11	2x12	4.0
Muon total		32			19
EM15VH_MU10	22,12	3.0	EM10VHR_MU10	17,12	3.0
EM10H2_MU6	17,2x6	2.5	EM10HR2_MU6	17,2x6	1.0
TAU80V	180	4.7	TAU80VR	180	3.2
2TAU50V	2x110	3.8	2TAU40VR	2x100	3.9
2TAU20VI_3J20	2x50,60	5.2	2TAU15VR_3J15	2x40,50	8.1
2TAU20VI_EM18VHI_3J18	50,25,60	2.8	2TAU15VR_EM13HR_3J13	40,20,50	3.3
TAU15VI_MU15	40,20	3.8	TAU11VR_MU11	35,12	6.4
TAU20VI_XE40_3J20	50,90,60	4.4	TAU15VR_XE40_3J15	40,90,50	5.0
Tau total		20			25
J100	200	7.0	J100	200	7.0
4J25	4x60	3.3	4J25	4x60	3.3
J75_XE40	150,150	8.3	J75_XE40	150,150	8.3
XE90	250	10	XE70	200	13
Jet/E_T^{miss} total		25			25
Topological triggers		~ 5			~ 20
Total		~ 100			~ 100

4.3 新検出器の導入

Run-2 では図 4.2 に示すように、Inner Coincidence によって磁場領域の内側とのコインシデンスによって図 3.11 のようなフェイクトリガーを削減していた。しかし、図 4.3 に示した Run-2 におけるトリガー数の η 分布を見ると発行されたトリガーの内、実際の

ミューオンはほんの一部であることが分かる。特に $|\eta| > 1$ の領域で誤ったトリガーが多く、この主な原因はフェイクトリガーによるものと考えられる。Run-3 ではイベントレート増加に伴って更にフェイクトリガーの頻度が上がると予想されるため、新たに性能の良い検出器を導入することでフェイクトリガーを削減することを試みる。

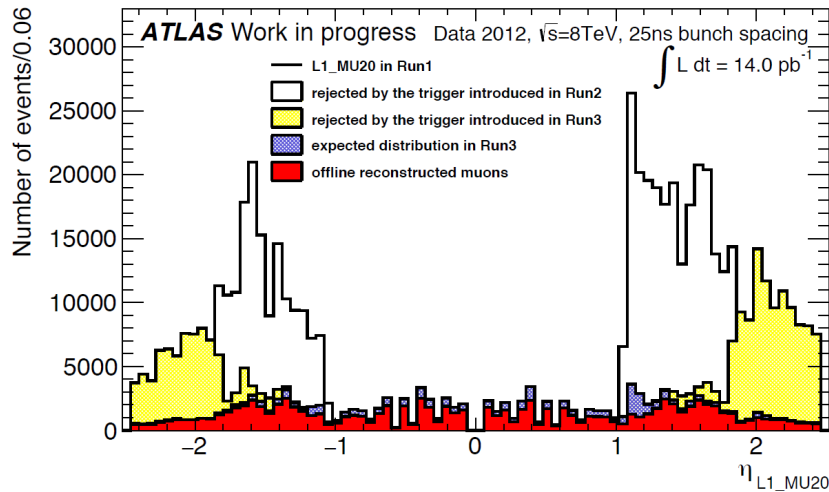


図 4.2: 閾値 20 GeV におけるトリガー発行数の η 分布 [10]。白い領域が EI/FI や Tile calorimeter によって削減された。

4.3.1 New Small Wheel

New Small Wheel (NSW) は Run-3 から 磁場領域内側の $1.3 < |\eta| < 2.42$ の範囲に導入される予定の検出器である [17]。FI に代わって導入され、FI よりも前方領域までカバーすることが出来る。NSW の全体図を図 4.4 に示す。ラージセクターとスモールセクターでは同じ構造で大きさが異なるものを用いて全ての ϕ を覆うように設置される。

NSW は 8 層の small-strip TGC (sTGC) と 8 層の Micromegas で構成されている。図 4.5 のように 8 層の sTGC を 4 層ずつの Micromegas で挟んだ構造になっている。計 16 層からなる検出器であるため、この検出器だけでミューオンの飛跡を再構成することが可能である。そのため、今までの SW では不可能だった角度情報を用いたトリガー判定を行うことが可能になる。また、 $100 \mu\text{m}$ の位置分解能と 1 mrad の角度分解能を有する。この高い分解能によって位置情報のコインシデンスに関しても従来の SW よりも高い性能を期待できる。

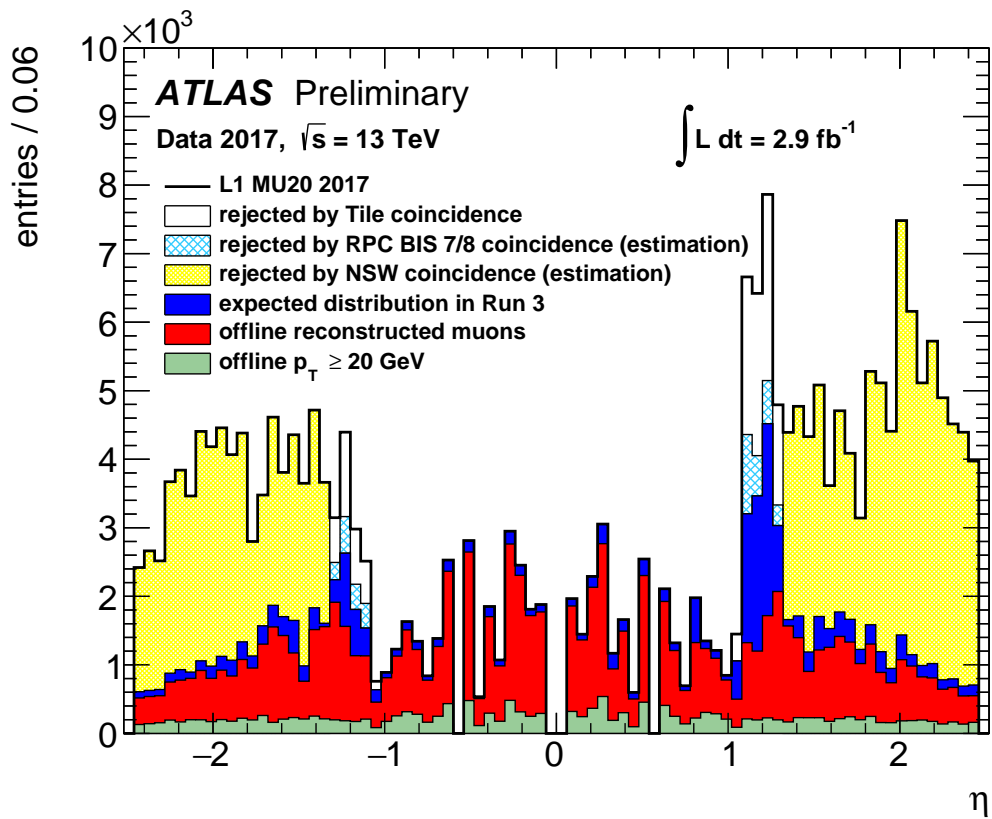


図 4.3: Run-2 におけるトリガー発行数の η 分布 [16]。赤い領域が実際のミュオンで、緑の領域が $p_T \geq 20 \text{ GeV}$ のミュオン。

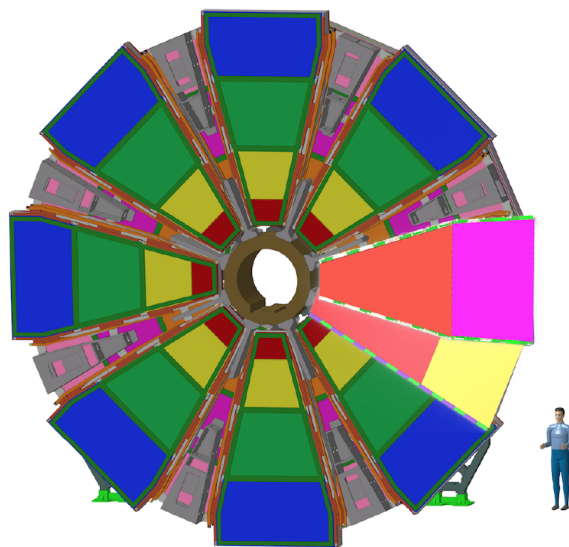


図 4.4: NSW の全体図 [7]。 $1.3 < |\eta| < 2.42$ の全ての ϕ を覆う。

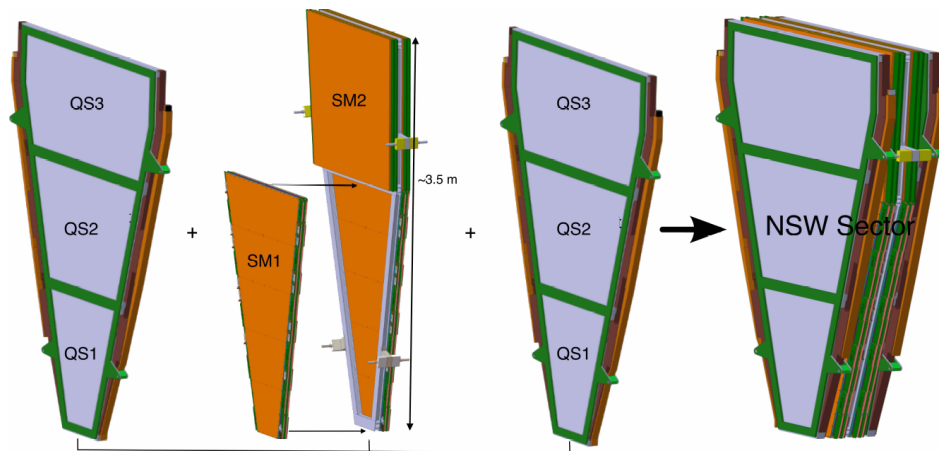


図 4.5: NSW の構造 [7]。8 層の sTGC (橙) を 4 層ずつの Micromegas (青) で挟んだものを一つのチェンバーとする。

Micromegas

Run-3 から新たに導入される検出器の一つが Micro mesh gaseous structure (Micromegas) である。Micromegas は高い位置分解能とレート耐性を持つガス検出器である。図 4.6 に Micromegas の構造を示す。Micromegas の特徴はドリフト領域と増幅領域が金属のメッシュで区切られていることである。広いドリフト領域を持ち、ガス分子から電離された電子がメッシュに到達する時間差からトラックの z 方向の位置が測定でき、斜めに入射した荷電粒子に対する高い位置分解能を持つ。増幅領域が狭いことから、電離されたイオンがメッシュに到達する時間が短いので、高いレート耐性を持つ。

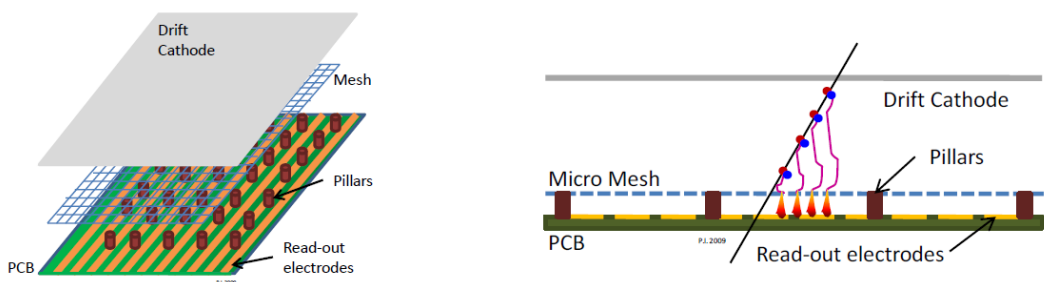


図 4.6: Micromegas の構造 [17]。狭い増幅領域によって高いレート耐性を持つ。

small-strip TGC (sTGC)

Micromegas とともに新たに導入されるのが sTGC である。図 4.7 に sTGC の構造を示す。現行の TGC との違いはストリップの感覚が小さいことで、良い位置分解能を達成する。また η 方向をストリップ、 ϕ 方向をワイヤーで測定することも現行の TGC とは異なる。

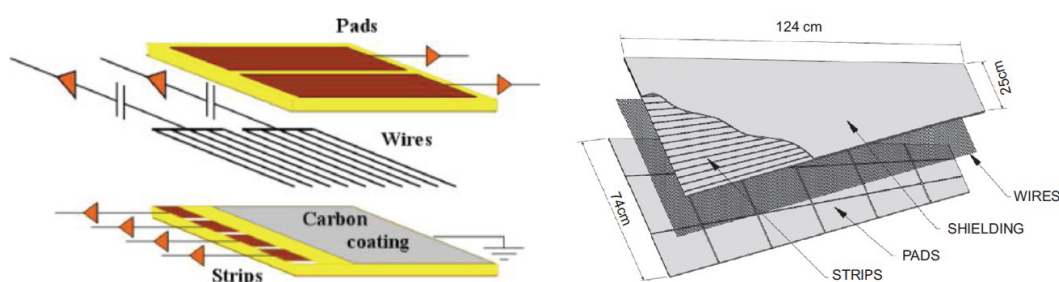


図 4.7: sTGC の構造 [17]。

4.3.2 RPC BIS78

RPC BIS78 はバレル領域のインナーセクションスモールセクター (BIS) の 7、8 の位置に設置される RPC である。基本的な構造は現行の RPC と変わらないが、バックグラウンドを減らすために 3 層構造になっている。また、トロイド磁石とカロリメーターに挟まれた領域に導入されるため、ガスギャップは従来の RPC よりも薄く、約 1 mm である。

4.4 Sector Logic の改良

Run-3 から新しいトリガー判定ボード New Sector Logic (New SL) が導入される。New SL への要求は TGC BW と EI からの信号を受け取ることが出来ること、NSW やその他の検出器からの信号を受信できること、トリガー判定ロジックが実装できること、トリガー判定結果を MuCTPi に送信できること、信号が読み出せること、VME により制御できることがある。図 4.8 に New Sector Logic (New SL) の写真と概略図を示す。これまでの FPGA よりも大きなリソースの FPGA を搭載し、メインのトリガーロジックは FPGA 上に実装される。TGC BW や EI の信号を受け取るための G-Link の入力ポートが 14 個、NSW やその他の検出器からの信号を受け取る GTX 高速トランシーバーの入力ポートと MuCTPi に信号を送る GTX の出力ポートがそれぞれ 12 個ずつ搭載される。データ読み

だしのためのイーサネットのポートと VME で制御するためのバスも搭載している。一枚の New SL には 2 トリガーセクター分の信号が入力され、並行してトリガー判定を行う。最終的にトリガーセクターあたり最大で 4 つのトラックを選び出し、MuCTPi に送信される。

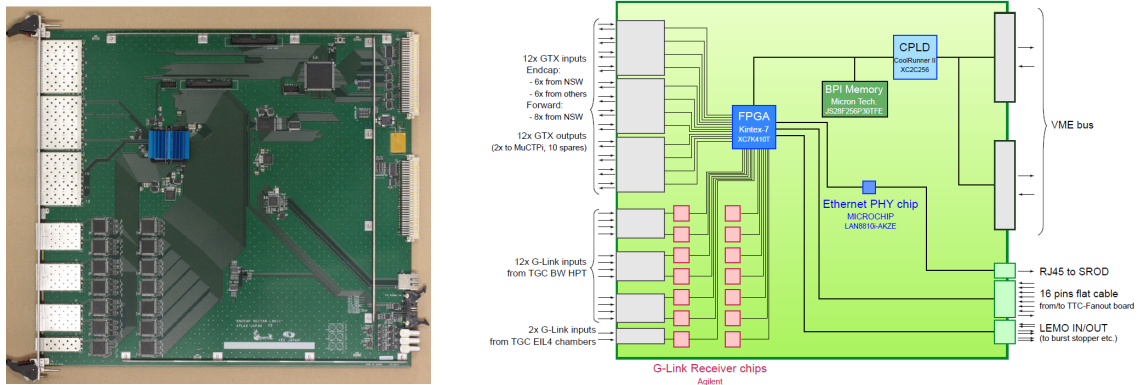


図 4.8: New Sector Logic (NSL) の写真 (左) と主なチップと配線の概略図 (右) [15]。

4.5 EI/FI converter

Run-3 から NSW が導入される予定だが、検出器の生産が思うように進まず、間に合わない可能性がある。A-side、C-side の両サイドどちらも間に合わないということではなく、片サイドのみ導入されるというオプションが最も現実的であると考えられる。その場合 A-side は NSW が導入され、C-side には今ある Old-SW が残ることになる。この場合問題になるのは New SL の G-Link ポートが不足していることである。New SL 生産時は FI が残ることは想定されておらず、G-Link ポートは TGC BW と EI からの信号を受信できるだけの数しか用意されていない。そのため、Old-SW の FI から信号を受信することが出来ない。一方で、NSW が導入されないので GTX のポートはその分余っている。そこで G-Link を GTX に変換するコンバーターを導入し、FI からの信号を GTX 信号として New SL に送信するという案が考えられる。コンバーターは入力信号のタイミング調整や定められた出力に分配することもできるため、コンバーターは FI の信号だけでなく、EI の信号も GTX に変換し出力するようにすれば、EI の信号を分配する FanOut ボードも不要になる。また、そうすることで片サイドしか NSW が導入されなかった場合でも、両サイドにコンバーターを導入し FI がないサイドでは FI 信号を出力しないようにすれば両サイドで同じシステムを用いることが出来る。

ここからは予備の New SL をコンバーターとして使用することを考える。New SL には G-Link のインプットが 14 ポートあり、GTX のアウトプットは 12 ポートある。EI/FI の信号を送信する PS ボードは片サイド 24 枚あり、New SL も同じく 24 枚ある。コンバーターの GTX アウトプットからそれぞれの New SL に 1 本のファイバーで信号を送信すると片サイドでコンバーターは二つ必要になる。コンバーターの G-Link インプットは 14 ポートあるので、4 つの PS ボードは二つのコンバーターにまたがって信号を送ることが出来る。これにより、全ての New SL が 3 つの PS ボードからの信号を受け取ることが出来る。このとき、二つのコンバーターにまたがる PS ボードの信号は G-Link FanOut ボードによって二つに分けるようにすると、全ての PS ボードは 1 ファイバーで信号を出力すれば良い。図 4.9 で示すようにトリガーセクター毎に ϕ が近い 3 チェンバーと対応させる。コンバーターの firmware 概念図を図 4.10 に示す。コンバーターはファイバーあたり 16-bit で受け取った 14 本の G-Link 信号を分配し、あらかじめ決められた 3 ファイバー分の情報を一つにまとめ、ファイバーあたり 48-bit で 12 本の GTX 信号として New SL 一枚あたり一本のファイバーで出力する。

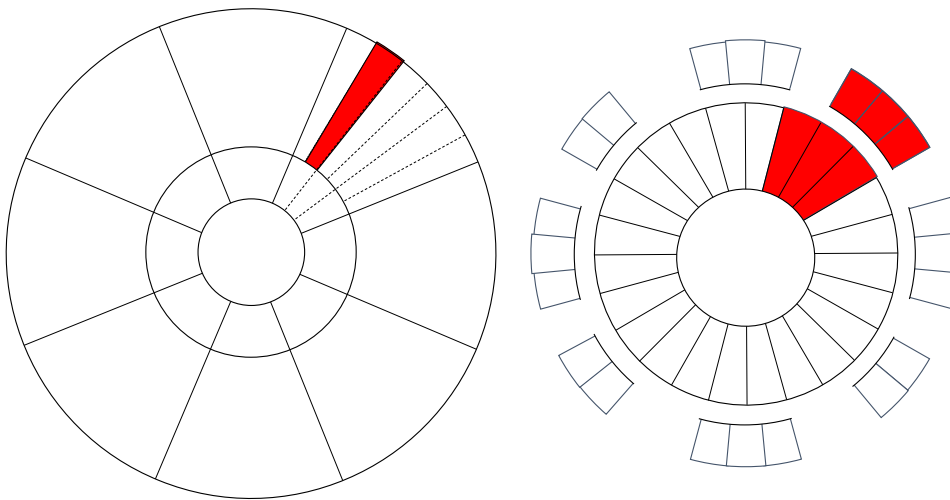


図 4.9: TGC BW (左) と EI/FI (右) の対応。BW の点線が一つのトリガーセクター、EI/FI の実線が一つのチェンバー。赤く塗られたトリガーセクターと赤く塗られた EI/FI チェンバーが対応している。

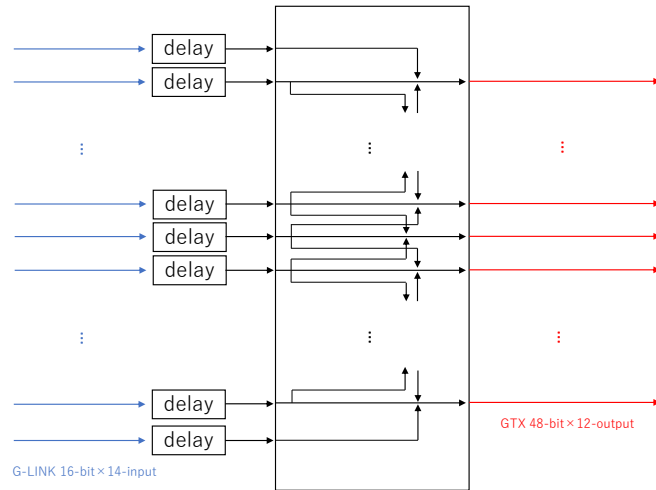


図 4.10: EI/FI コンバーターの firmware 概念図。PS ボードから送られた 14 本の G-Link インプットを分配し、3 本分の信号をまとめたものを 12 本の GTX アウトプットで New SL に送る。

4.6 MuCTPi, L1Topo

通信規格が G-Link から GTX に変更になったことで MuCTPi が送受信できる情報量が増加する。SL から送られるミュオン候補の情報がトリガーセクターあたり最大 4 トラックに増加し、1 トラックの情報のうち p_T に関する情報が 1-bit 増加する。

4.6.1 p_T 閾値増設

Run-2 では L1 ミュオントリガーの p_T 閾値は 6 段階存在している。これは MuCTPi から送られる p_T 閾値の情報が 3-bit であることに起因している。Run-3 からは New SL が MuCTPi と情報をやり取りするのに GTX が用いられる。これにより従来の G-LINK を用いた通信よりも多くの情報を送受信できるようになり、 p_T 閾値の情報に関しては 4-bit の情報として送信できるようになる。4-bit の内、0000 はミュオンの候補がないときに用いられるので、Run-3 からは p_T 閾値を最大 15 段階に増加することができる。当初は 1111 もミュオン候補がないときに用いられる予定であったため、本研究では 14

段階の閾値として研究を行った。

表 4.2 に Run-3 で使われる予定の p_T 閾値を示す。L1_MU2 は検出器のキャリブレーションに用いるトロイドオフランで使用し重イオン衝突ランでは L1_MU40 を使用する。このような特殊なランで用いる p_T 閾値をあらかじめ設定できることが p_T 閾値増加の一つの利点である。従来の 6 段階 p_T 閾値では特殊なランがある度に LUT を書き換えていた。 p_T 閾値を細かく判定できるようになることで 2 つのミュオントラックを用いたトリガー要求などに柔軟に対応することが出来るようになる。また、L1_MU8 の様な低い p_T のミュオンに対する閾値を追加することで、L1Topo におけるミュオンを用いた不変質量の分解能が向上し、ボトムクォークやチャームクォーク に関わる物理への感度が高くなる。また、この p_T 閾値において、L1_MU6 以上は TGC BW の M1,M2,M3 の全てにヒットがあった 3 ステーションコインシデンスを通過したトラックにのみ使用される。L1_MU0 は M1 にヒットがなかった 2 ステーションコインシデンスのみに使用され、L1_MU4 は 2 ステーション、3 ステーションのどちらにも使用される。

表 4.2: Run-3 における p_T 閾値の候補。

pt number	Threshold	Status
1	L1_MU2	$p_T \geq 0$ GeV (to use toroid off run)
2	L1_MU4	$p_T \geq 4$ GeV
3	L1_MU6	$p_T \geq 6$ GeV
4	L1_MU8	$p_T \geq 8$ GeV
5	L1_MU9	$p_T \geq 10$ GeV (no NSW)
6	L1_MU10	$p_T \geq 10$ GeV (barrel 2-station)
7	L1_MU11	$p_T \geq 10$ GeV
8	L1_MU13	$p_T \geq 13$ GeV
9	L1_MU15	$p_T \geq 15$ GeV
10	L1_MU18	$p_T \geq 18$ GeV
11	L1_MU20	$p_T \geq 20$ GeV
12	L1_MU21	$p_T \geq 20$ GeV (barrel no feet)
13	L1_MU30	$p_T \geq 30$ GeV
14	L1_MU40	$p_T \geq 40$ GeV (to use heavy ion run)

4.7 本研究の目的

本研究では、Run-3 のための L1 ミューオントリガーアップグレードを成功させるためにトリガー判定システムの改良を行った。4.5 節の EI/FI コンバーターの概念を考案するとともに、PS ボード、コンバーター、SL 間の接続規則をデザインした。また p_T 閾値増加に伴う Coincidence Window (CW) を TGC BW、NSW、EI/FI について作成し、性能を評価することを目的とする。

第 5 章

トリガーアルゴリズムの改良

Run-3 に向けたトリガーアルゴリズムの改良を行う。一つは、MuCTPi の情報量増加に伴った p_T 閾値増加のための TGC BW と NSW の CW 作成である。二つ目は、New SL の FPGA リソース増加を利用した EI/FI の LUT 実装のための CW 作成である。本章ではそれぞれの検出器についての CW 作成手順を述べ、作成した CW の性能評価について述べる。TGC BW および NSW のはデータを用いたトリガー効率、シミュレーションによる不変質量分布によって評価し、EI/FI は TGC BW に対する相対トリガー効率とレート削減率を用いて評価する。

5.1 Coincidence Window の作成

レベル 1 ミューオントリガーではあらかじめ作成された Coincidence Window (CW) を New SL に Look-Up Table (LUT) として実装しておく。検出器にヒットがあったときにこれを参照すれば良いので短時間でのトリガー判定が可能になる。New SL のリソースの増加や、MuCTPi が送受信できる情報量の増加に伴って、従来よりも複雑な LUT の実装が可能になる。図 5.1 に New SL におけるトリガー判定の概要を示す。まず、TGC-BW Coincidence で TGC BW から受信した情報を用いて RoI と p_T を判定する。その後、磁場内側の検出器から得られた信号とともに BW-Inner Coincidence に送られて p_T の計算を行う。これらの処理は 8 つの RoI をひとまとめにした Sub-Sector-Cluster (SSC) 毎に並列で行われ、最終的にトリガーセクターあたり最大 4 つのトラックを選び出し、MuCTPi に送信される。図 5.2 は SSC 単位の TGC BW の信号を用いた R - ϕ コインシデンスの概要である。SSC はワイヤー方向に 2 行、ストリップ方向に 4 列をひとまとめにしたものになっている。ここに 2 ステーションか 3 ステーションの情報と HPT ボードから送ら

れたコインシデンス情報の R と ϕ を入力として LUT は p_T の情報を 4-bit で出力する。Run-3 からは、それとは別に 電荷の情報を 1-bit で出力するようになる予定である。TGC BW で p_T 判定を行った後、EI/FI や NSW 等の磁場内側の検出器から送られた情報を元に、最終的なトリガー計算を行う。

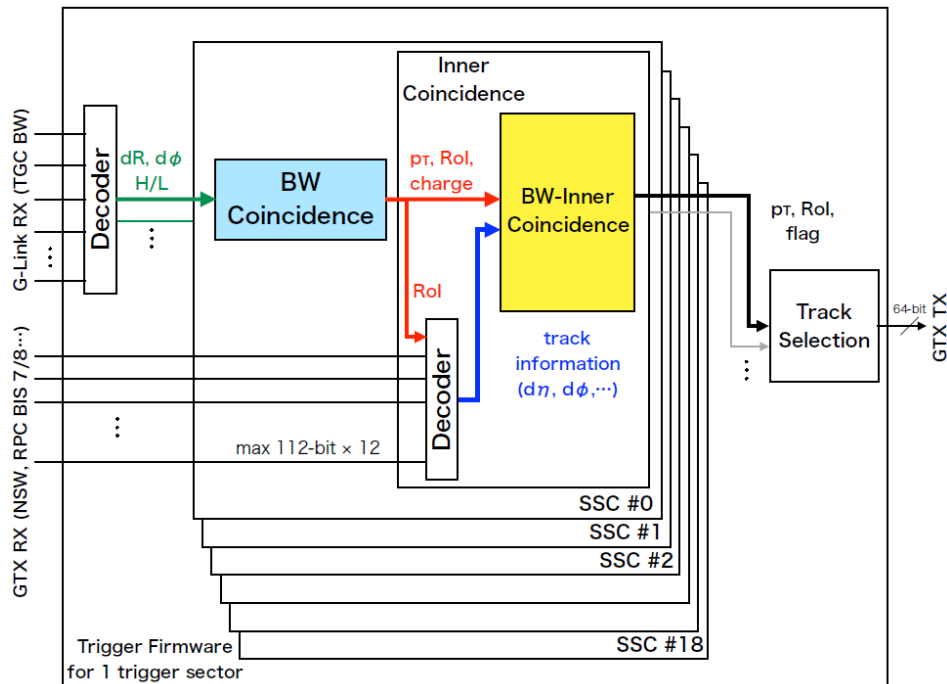


図 5.1: New SL の 1 トリガーセクターにおけるトリガー判定の概要 [9]。

ここでは、14 段階 p_T 閾値に対応した CW と NSW の位置マッチングを用いた CW および EI コインシデンスのための CW を作成する手順を紹介し、性能を評価する。

5.1.1 TGC BW の CW 作成

本研究ではまず 14 段階の p_T 閾値に対応した CW を作成した。CW 作成手順は以前行われた CW 最適化の手順 [18] を応用する。2017 年に得られた実データを用いて、再構成されたミューオンの運動量と TGC におけるヒット位置の関係から CW を作成していく。表 4.2 で示した Run-3 の p_T 閾値に対応した CW を作成する。ただし、Run-2 から存在する L1_MU4、L1_MU6、L1_MU11、L1_MU20 の領域に関しては新たに作成することせず、Run-2 と同じものを使用することにした。ただし、L1_MU2 は CW を定義せず、TGC にヒットがあったイベント全てにトリガーを発行するものである。そして、表 4.2

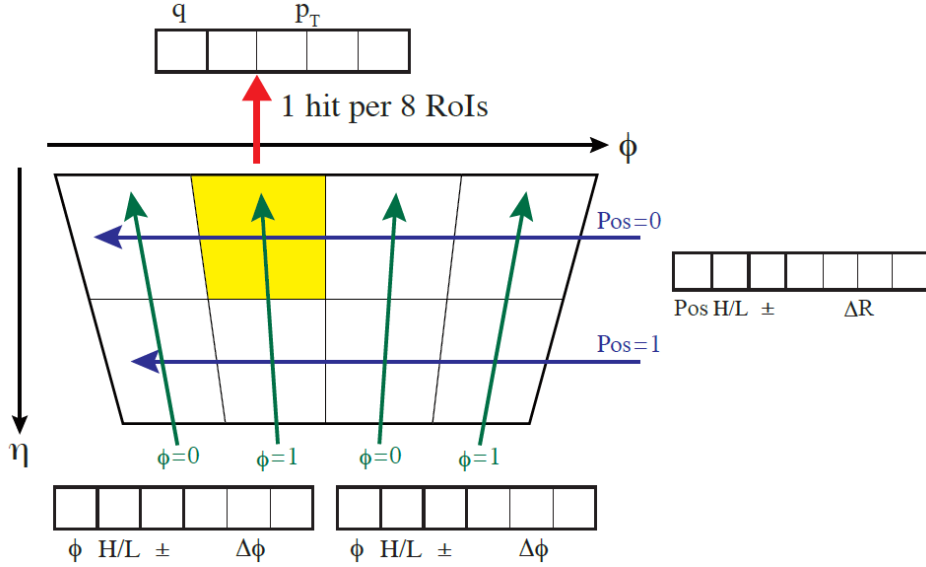


図 5.2: SSC 単位の R - ϕ コインシデンスの概要 [9]。

に示した閾値の中で TGC BW では同じ p_T であるが、バレルや NSW の状態が異なるものに相当する CW は作成しない。

TGC 検出器 M1 と M3 における R 方向と ϕ 方向のヒット位置のずれをそれぞれ dR , $d\phi$ と表す。CW は 3-station のみにおいて作成し $-15 \leq dR \leq 15$, $-7 \leq d\phi \leq 7$ の範囲で定義され、0 に近いほどヒット位置のずれは小さい。

一つ一つの RoI に対して p_T がある閾値よりも高いミュオンと低いミュオンについて dR , $d\phi$ の 2 次元ヒストグラムを作成する。これをヒットマップと呼び、このヒットマップを元に CW を作成していく。ヒットマップ作成のためのイベントセレクションとして、少なくとも一つのオフラインミュオンがあること、ミュオンの位置が TGC 領域 ($1.05 < |\eta| < 2.42$) であること、オフラインミュオンとマッチングが取れるレベル 1 トリガーの RoI が作られていること ($\Delta R_{\text{offline,L1}} < 0.3$) を要求する。Endcap セクターのとある RoI における $p_T = 8 \text{ GeV}$ を閾値としたヒットマップを図 5.3 に示す。ただし、 $p_T \geq 8 \text{ GeV}$ のミュオン全てを用いてヒットマップを作成すると、 p_T が高いミュオンのヒットがヒットマップの中心付近に集中するため、 $p_T = 8 \text{ GeV}$ 付近の境目がわかりにくくなってしまう。なので $p_T < 15 \text{ GeV}$ のミュオンのみ使用する。同様に、 $10 < p_T < 20 \text{ GeV}$ を閾値とするヒットマップについては p_T が閾値よりも高いヒットマップについて $p_T < 25 \text{ GeV}$ の上限を設ける。また、TGC の 1 チャンネルが CW の 1 マスと対応する領域と、TGC の 2 チャンネルが CW の 1 マスと対応する領域が存在す

る。 $|dR| \geq 11$ 、 $|d\phi| \geq 4$ が 2 チャンネルに対応する領域である。

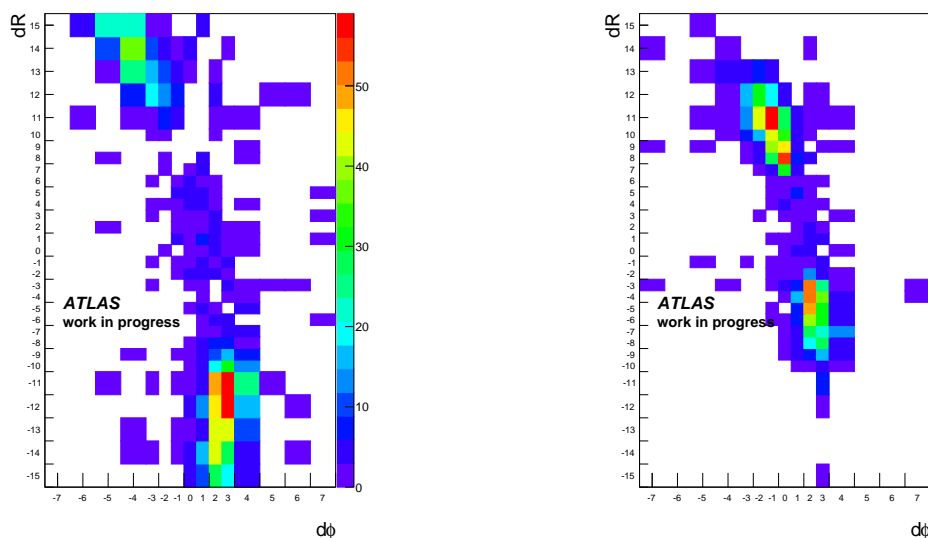


図 5.3: RoI number = 12 における $p_T < 8 \text{ GeV}$ のミュオンヒットマップ (左) と $8 \leq p_T < 15 \text{ GeV}$ のミュオンヒットマップ (右) の一例。

また、以下では L1_MU8 の CW 作成を例に説明を進める。この二つのヒットマップから $p_T \geq 8 \text{ GeV}$ の割合が高いマスを選んでいき、それを L1_MU8 のマスにする。偶然ヒットがあったマスを除外するためにエントリー数が 3 以下のマスは削除する。 $p_T \geq 8 \text{ GeV}$ の割合を表すパラメーターとして式 5.1 に示した x を用いる。

$$x = \frac{R_{high}}{\sqrt{R_{high}^2 + R_{low}^2}} \quad (5.1)$$

ここで、 R_{high} 、 R_{low} はそれぞれ $p_T \geq 8 \text{ GeV}$ 、 $p_T < 8 \text{ GeV}$ のヒットマップにおける該当のマスのエントリー数をそれぞれのヒットマップの全エントリー数で規格化したものである。 x の分布を図 5.4 に示す。この分布をみると、 x の値が大きくなるほど高い p_T と判定されるマスの割合が高いことが分かる。ここで、すべてのヒットマップについて Run-2 の CW で L1_MU4、 L1_MU6 と判定されるマスの内 $x > 0.2$ を満たすマスを L1_MU8 のマスに変更する。ただし、飛び地を削減するために上下左右に隣接した L1_MU8 のマスがないマスは変更しない。図 5.5 に図 5.3 のヒットマップに上記のエントリー数 ≥ 4 のカット、飛び地のカット、 $x > 0.2$ のカットをかけたもの。これをこの RoI における L1_MU8 の CW とする。

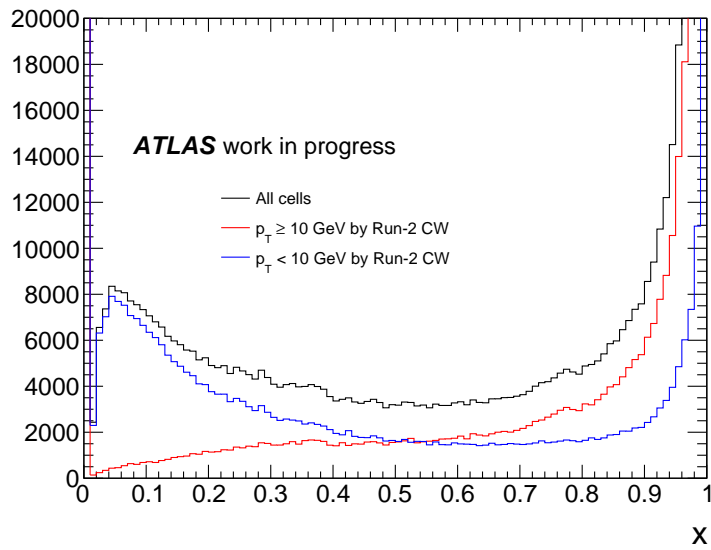


図 5.4: $p_T \geq 8 \text{ GeV}$ を閾値とした x の分布。黒が全てのマスで、赤、青が Run-2 の CW でそれぞれ $p_T \geq 10 \text{ GeV}$ 、 $p_T < 10 \text{ GeV}$ と判定されるマス。

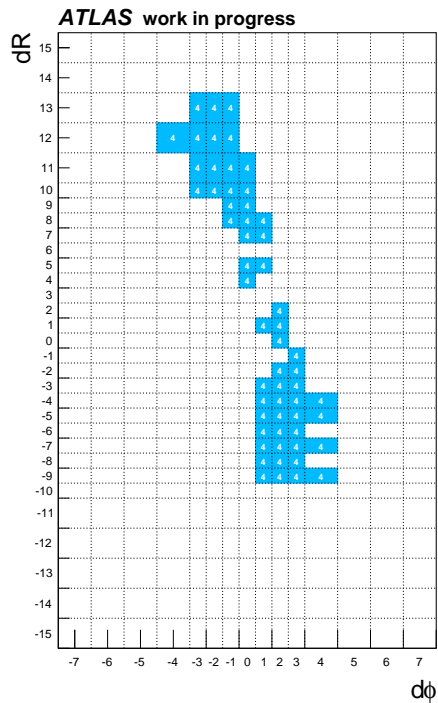


図 5.5: RoI number = 12 におけるヒットマップにエントリー数のカット、飛び地のカット、 x のカットかけたもの。これを L1_MU8 の CW とする。

同様の手順を $p_T \geq 13 \text{ GeV}$, $p_T \geq 15 \text{ GeV}$, $p_T \geq 18 \text{ GeV}$, $p_T \geq 30 \text{ GeV}$, $p_T \geq 40 \text{ GeV}$ のミュオンについても行うことで、14 段階閾値に対応した CW を作成した。その一例を図 5.6 に示す。図中のマスに書かれている数字と表 4.2 の pt number が対応している。RoI の個数は Endcap セクターで $148\text{RoI} \times 48\text{Sector} \times 2\text{Side} = 14208$ 個、Forward セクターで $64\text{RoI} \times 24\text{Sector} \times 2\text{Side} = 3072$ 個なので、CW は合計 17280 個作成した。

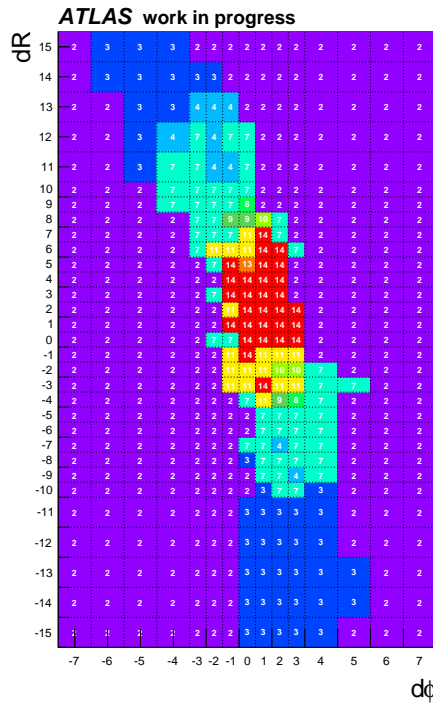


図 5.6: RoI number = 12 における新しい CW。それぞれの色が p_T 閾値に対応している。マスの中に書かれた数字と表 4.2 の pt number が対応している。

5.1.2 EI/FI を用いた CW 作成

磁場内側に新検出器が導入されるが、EI チェンバーは現在そのまま残る予定である。また、NSW の生産が間に合わなかった場合、片サイドまたは両サイドに FI チェンバーも残ることになる。New SL の豊富なリソースを利用して、EI/FI のコインシデンスにも LUT を使用すればより性能の高いトリガーが可能になると期待される。

EI/FI とのコインシデンスは $p_T \geq 20 \text{ GeV}$ と判定されたミュオンに対して行う。トリガーセクター毎に ϕ が近い 3 チェンバーを選択し、選んだチェンバーとコインシデン

スを取る。オフラインで $p_T \geq 20 \text{ GeV}$ と判定されたミュオンがヒットしたときに鳴っていたワイヤーとストリップで AND を取り、2次元ヒストグラムを作成する。これを EI におけるヒットマップと呼ぶ。ここで、EI は 24 ワイヤー・32 ストリップ、FI は 32 ワイヤー・32 ストリップである。このヒットマップには偶然鳴っていたワイヤーとストリップの情報が含まれていると予想されているので、ヒット数が少ないマスから全エントリー数のある割合以下になるまで削除していく。今回は、全エントリー数の 50% ~ 100% を 10% 刻みで閾値として、性能を比較する。G-Link で送ることが出来る情報量による制限から、ヒット数を削減したヒットマップを、8 ワイヤー、8 ストリップで OR を取ったものを CW とする。図 5.7、図 5.8 に閾値が 70% で EI/FI の CW を作成した手順を示す。(a) は EI/FI ヒットマップでストリップ方向に 3 チェンバー並べたようになっている。(b) は (a) のエントリーが 70% 以下になるようにカットしたもの。(c) は (b) の 8 ストリップ、8 ワイヤーで OR を取ったもの。

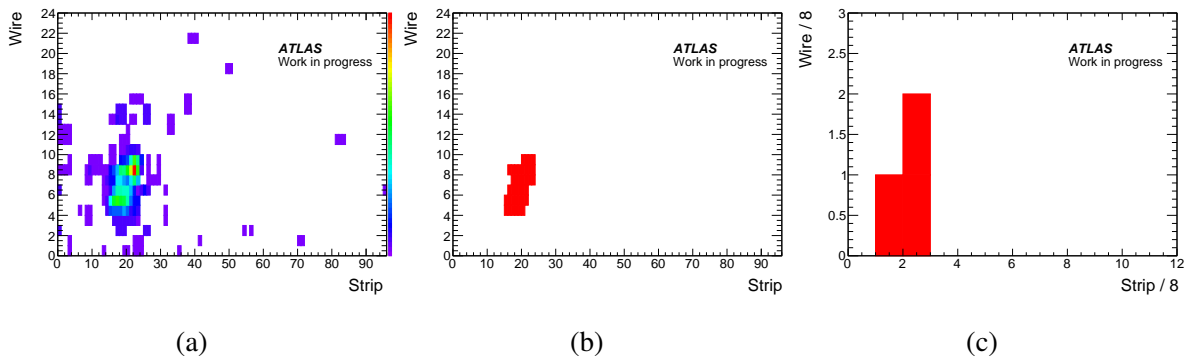


図 5.7: EI の CW 作成手順。(a) は EI ヒットマップ。(b) はエントリーが 70% になるようにカットしたもの。(c) は 8 ストリップ・8 ワイヤーで OR を取ったもの。RoI number = 3 での作成手順を示している。

5.1.3 NSW を用いた CW 作成

新検出器 NSW を用いた CW を作成する。NSW は角度情報を持っているので角度差を用いたコインシデンスが可能であるが、ここでは位置のマッチングを用いたコインシデンスのみ紹介する。NSW も TGC BW と同じ閾値に対応した CW を作成するが、 $p_T < 10 \text{ GeV}$ のミュオンはトロイド磁場での曲率が大きくなり、コインシデンスが上手く取れないことから $p_T \geq 10 \text{ GeV}$ のミュオンに対応した閾値のみで CW を作成す

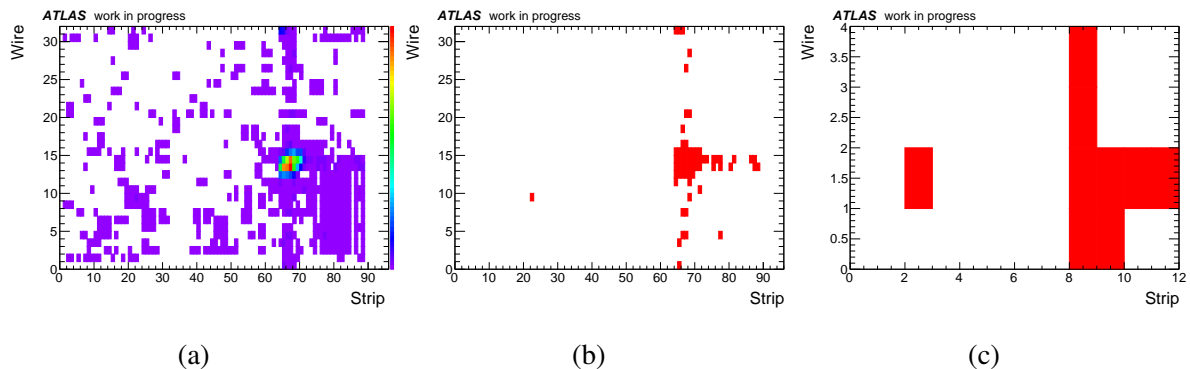


図 5.8: FI の CW 作成手順。(a) は FI ヒットマップ。(b) はエントリーが 70% になるようにカットしたもの。(c) は 8 ストリップ・8 ワイヤーで OR を取ったもの。RoI number = 50 での作成手順を示している。

る。図 5.9 に NSW による位置マッチングの概念図を示す。

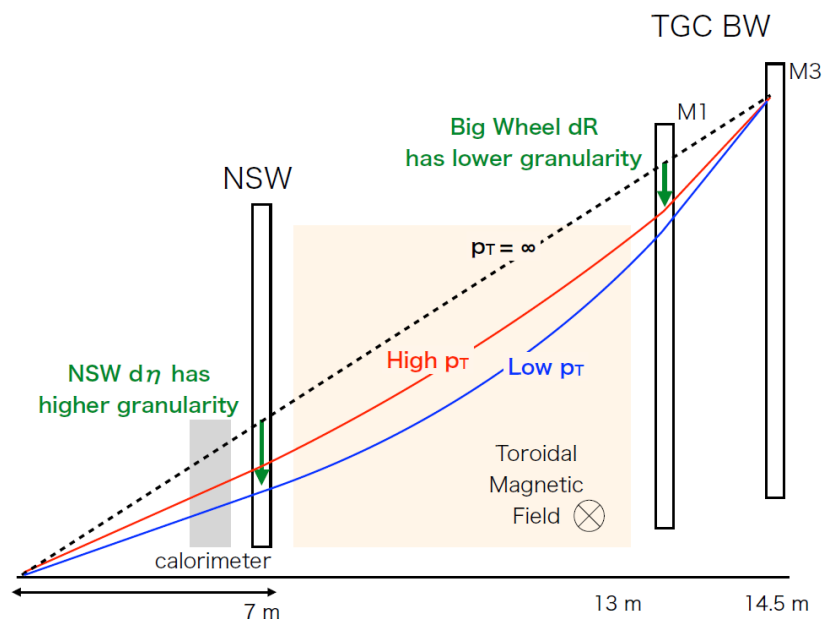


図 5.9: NSW による位置マッチングの概念図 [9]。赤い曲線が p_T が高いミュオンの飛跡、青い曲線が p_T が低いミュオンの飛跡。

NSW は現時点で導入されていないため、実データを用いた CW 作成はできない。そこで、Monte Carlo (MC) シミュレーションサンプルを用いて CW 作成および性能評価を行う。今回使用した MC サンプルはシングルミュオン、つまり 1 イベントにミュオン

が一つのサンプルである。NSW がカバーする $1.3 < |\eta| < 2.4$ の範囲のミューオンのみを使用する。 $0 \leq p_T \leq 100 \text{ GeV}$ の p_T を持ったミューオンを生成し、NSW における位置と TGC BW のヒット位置から η 方向、 ϕ 方向のずれを見積もる。今回は実際に NSW が導入されたジオメトリが使用できなかったため、NSW における位置は NSW が導入される z における η と ϕ を使用した。シミュレーションでは磁場や検出器の配置が理想的にオクタント対称であるとし、一つのオクタントに対してのみ CW を作成する。

NSW を用いた LUT 作成の手順を示す。ここでは L1_MU20 に対応した LUT の作成手順を示すが、他の閾値に対しても同様である。TGC BW における $\eta, \phi(\eta_{\text{BW}}, \phi_{\text{BW}})$ と NSW における $\eta, \phi(\eta_{\text{NSW}}, \phi_{\text{NSW}})$ の差をそれぞれ $\Delta\eta = \eta_{\text{BW}} - \eta_{\text{NSW}}$ 、 $\Delta\phi = \phi_{\text{BW}} - \phi_{\text{NSW}}$ と定義する。 $p_T \geq 20 \text{ GeV}$ のミューオンに対して $\Delta\eta, \Delta\phi$ を RoI 毎に計算し、2次元ヒストグラムを作成する。ただし、NSW がカバーする η の端はミューオンの電荷による曲がり方の違いでヒットがある場合とない場合が存在するので、 $|\eta| < 1.4, 2.3 < |\eta|$ では作成しない。以下ではこの2次元ヒストグラムを $\Delta\phi\Delta\eta$ マップと呼ぶ。図 5.10 に $\Delta\phi\Delta\eta$ マップの一例を示す。この $\Delta\phi\Delta\eta$ マップからエントリーが全体の 99% 以下になるまでイベント数が少ないマスから削減していき、これを L1_MU20 の CW とする。図 5.11 に L1_MU20 の CW の一つを示す。同様に他の閾値に対しても CW を作成することで、図 5.12 に一例を示すような CW を作成することが出来る。

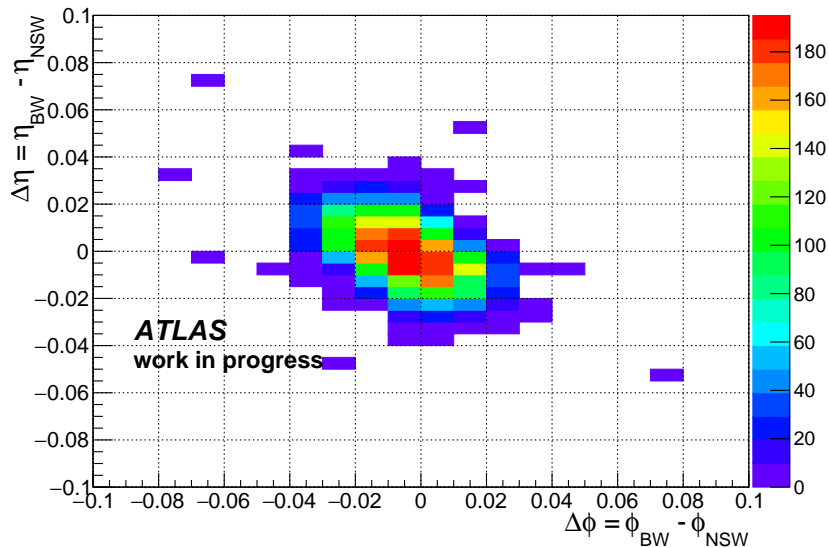


図 5.10: RoI number = 60 における $p_T \geq 20 \text{ GeV}$ の $\Delta\phi\Delta\eta$ マップ。

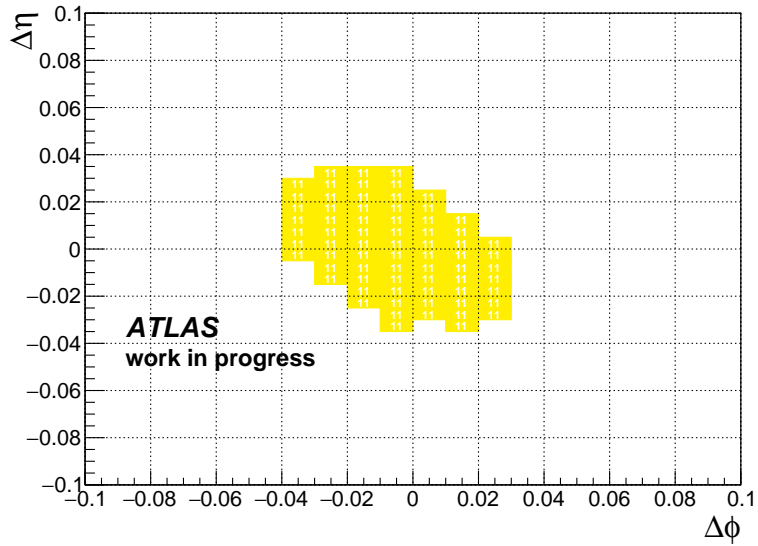


図 5.11: RoI number = 60 における $p_T \geq 20$ GeV の $\Delta\phi\Delta\eta$ マップをエントリーが全体の 99% 以下になるようにカットしたもの。これを NSW における L1_MU20 の CW とする。

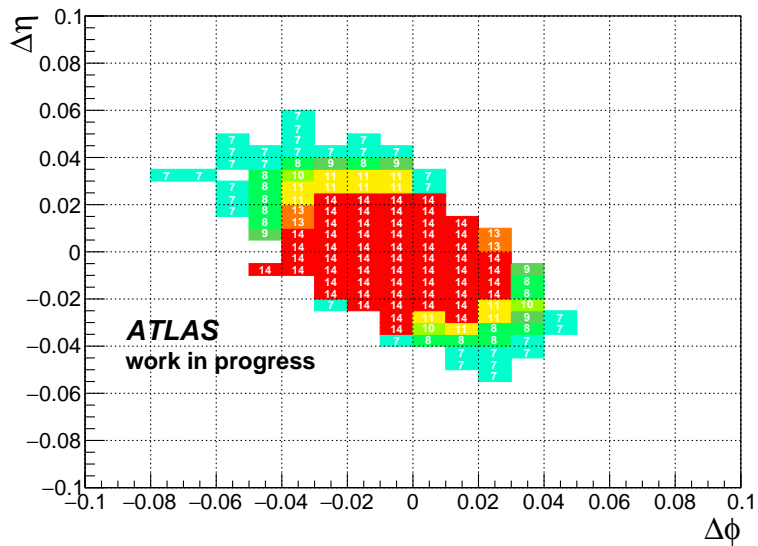


図 5.12: NSW CW の一つ。例として RoI number = 60 のものを示している。

5.2 新しい CW の性能評価

5.2.1 トリガー効率

14 段階 p_T 閾値に対応した CW を式 5.2 に示したトリガー効率 ε で評価する。

$$\varepsilon = \frac{\text{トリガーを通過したミュオン数}}{\text{全ミュオン数}} \quad (5.2)$$

ATLAS 実験で得られたデータは既にトリガーを通過したものだけが保存されている。すなわち、ミュオントリガーが発行されたイベントには、必ず少なくとも一つはトリガーを通過したミュオンが含まれている。そのため、保存されたデータの全てのミュオンを使ってトリガー効率を算出すると正しく評価できない。そこで Z ボソン由来のミュオンを用いた Tag & Probe 法を用いてトリガー効率を正しく算出する。

Tag & Probe 法では内部飛跡検出器とミュオン検出器でそれぞれ独立に再構成され、その後飛跡が結合できたミュオン候補を用いる。1 回のバンチ衝突においてこのようなミュオンが二つ以上存在するイベントのみを用いて行う。それらのミュオンの内、任意の二つの電荷が異符号のミュオンを選び、不変質量 $M_{\mu\mu}$ を計算する。図 5.13 に $M_{\mu\mu}$ の分布を示す。その不変質量が Z ボソンの質量 91 GeV に近い $81 < M_{\mu\mu} < 101$ GeV のミュオンペアを選択する。選ばれたミュオンペアは Z ボソン由来であり、これらのミュオンは正しく再構成されたミュオンであるということが保証される。

こうして選ばれたミュオンペアの内、どちらか一方を Tag ミュオンとする。Tag ミュオンの衝突点での運動量方向を $\eta_{\text{tag}}, \phi_{\text{tag}}$ とする。続いて、この Tag ミュオンがトリガーを通過したミュオンであることを確かめる。HLT_mu26_ivarmediam という p_T が高いミュオンに対するトリガーが発行された飛跡の衝突点における運動量方向を $\eta_{\text{HLT}}, \phi_{\text{HLT}}$ としたとき、 $\Delta\eta = \eta_{\text{tag}} - \eta_{\text{HLT}}, \Delta\phi = \phi_{\text{tag}} - \phi_{\text{HLT}}$ を用いて、オフラインミュオンとの運動量方向の差 $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$ を定義する。図 5.14 に Tag ミュオンと HLT の ΔR を示す。ここで、 $\Delta R < 0.01$ ならば Tag ミュオンが HLT を発行したと見なす。Tag ミュオンが HLT を発行していると思なされたとき、もう一つのミュオンを Probe ミュオンと呼ぶ。

Tag ミュオンが HLT を発行していると思なされているため、Probe ミュオンは正しく再構成されたミュオンであり、発行されたトリガーとは独立なミュオンであるということになる。この Probe ミュオンを用いてトリガー効率を算出することで、正しくトリ

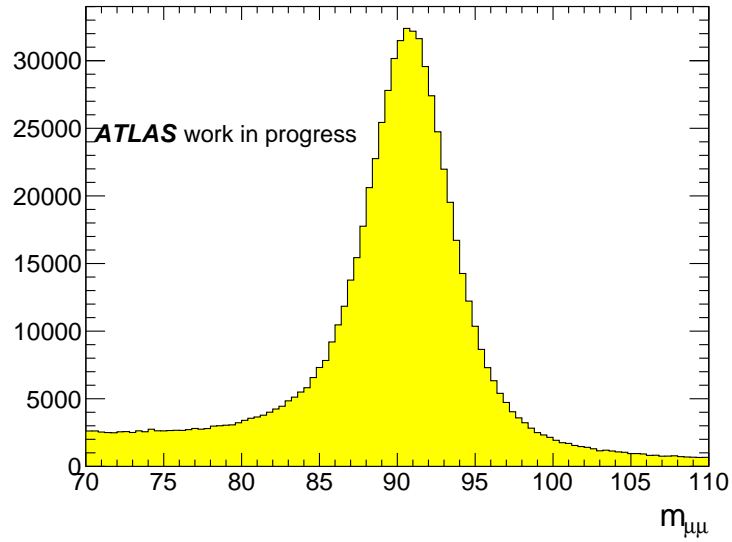


図 5.13: 電荷が異符号のオフラインミュオンペアを用いて計算した不変質量分布。
 $81 < M_{\mu\mu} < 101$ GeV のミュオンペアは Z ボソンの崩壊由来であるとする。

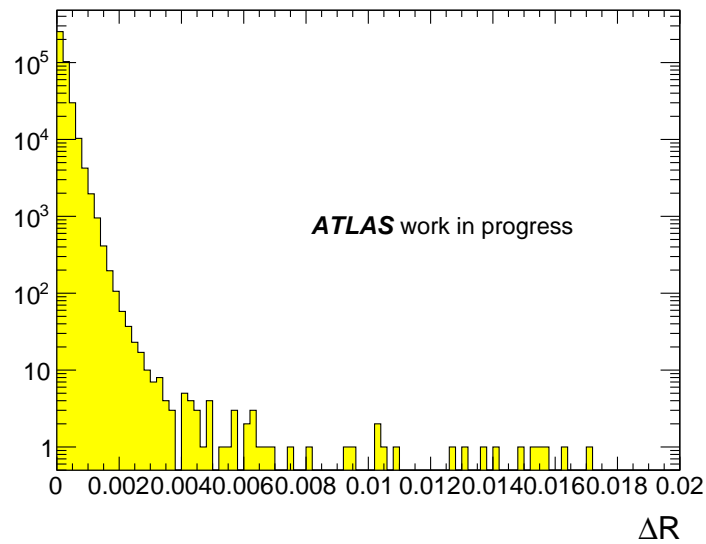


図 5.14: Tag ミュオンと HLT の運動量方向の差 ΔR 。 $\Delta R < 0.01$ ならば Tag ミュオンが HLT を発行したとする。

ガー効率を見積もることが出来る。Probe ミューオンの方向を $\eta_{\text{probe}}, \phi_{\text{probe}}$ L1 が発行された RoI の方向を $\eta_{\text{L1}}, \phi_{\text{L1}}$ とすると、 $\Delta\eta = \eta_{\text{probe}} - \eta_{\text{L1}}, \Delta\phi = \phi_{\text{probe}} - \phi_{\text{L1}}$ を用いて ΔR を計算することが出来る。図 5.15 に Probe ミューオンと L1 の ΔR を示す。ここで、 $\Delta R < 0.3$ ならば Probe ミューオンが L1 を通過しているとする。

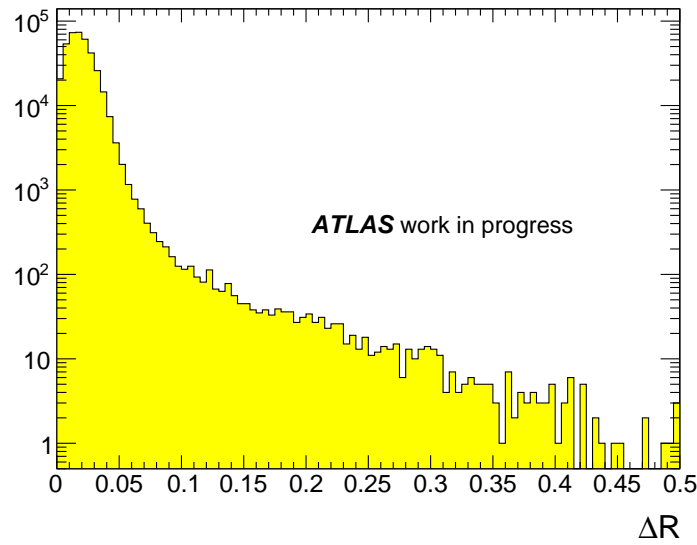


図 5.15: Probe ミューオンと L1 の運動量方向の差 ΔR 。 $\Delta R < 0.3$ ならば Probe ミューオンが L1 を通過したとする。

2016 年に得られたデータの一部を用いて TGC BW の新しい CW のトリガー効率を評価する。トリガー効率は Tag & Probe 法を用いて見積もる。Probe ミューオンは TGC 領域 ($1.05 < |\eta| < 2.42$) にあることを要求する。保存されたデータは当時の CW 用いて L1 の p_T が割り当てられたものであり、新しく作成した CW の p_T 値を新たに割り当てなければいけない。Probe ミューオンと $\Delta R < 0.3$ でマッチングが取れた L1 の RoI の情報と、 $dR, d\phi$ の値を使って CW を参照し、新たに p_T を割り当てる。図 5.16 は Probe ミューオンの p_T 分布である。L1_MU8 を通過した Probe ミューオンの数を全ての Probe ミューオンの数で割ることで L1_MU8 のトリガー効率が算出できる。ただし、L1_MU8 を通過した Probe ミューオンには L1_MU8 よりも高い閾値のトリガーとマッチングされた Probe ミューオンも含まれる。同様に全ての閾値でトリガー効率を算出した。図 5.17 に TGC BW の CW を用いて計算したトリガー効率の結果を示す。新たに追加した閾値だけでなく TGC BW で判定される全ての閾値について評価を行った。立ち上がりの p_T 、プラトーになる p_T が全ての閾値で異なるので、ミューオンの p_T を分離できる性能があることが

確認できる。

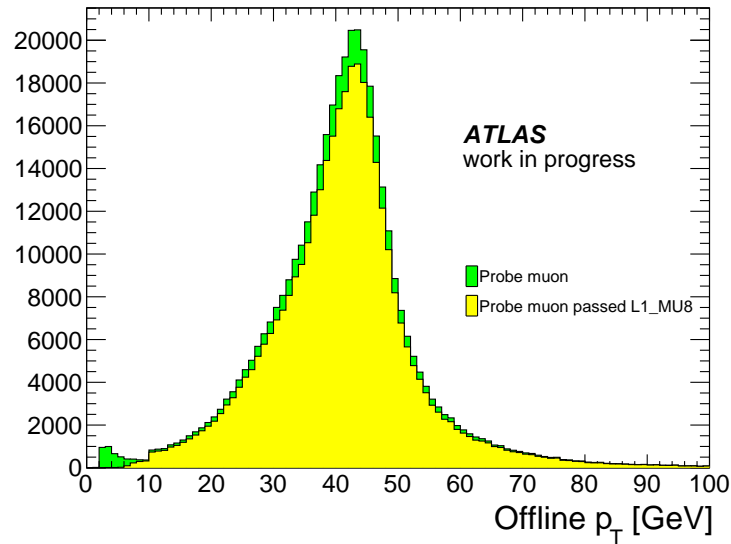


図 5.16: Probe ミューオンの p_T 分布。横軸はオフラインミューオンの p_T 。緑は全ての Probe ミューオン、黄色は L1_MU8 以上を通過した Probe ミューオン。

NSW の CW もトリガー効率を評価する。前述の通り NSW は実際に導入されていないため、MC サンプルを用いて評価する。用いるサンプルは $0 \leq p_T \leq 100$ GeV のシングルミューオンサンプルである。MC で生成されたイベントはトリガーに関係なく全てのイベントが保存されているので、MC サンプルを用いてトリガー効率を算出する場合は Tag & Probe 法を用いる必要はない。また、トリガー効率は TGC BW のみで計算したトリガー効率に対する相対トリガー効率として評価する。ここで、TGC BW のトリガー効率の評価は新たに作成した CW を用いて行う。ただし、TGC BW の CW は実データで作成されたものであり、MC では検出器が理想的に ϕ 方向に八回対称 (オクタント対称) になっているが、実際の TGC 検出器は少しずれている。そのため、実データを用いた評価と同様にしますと、ずれの影響が出てしまう。そこで、最もずれが少ないオクタント領域の CW を全てのオクタントで使用する。MC のミューオンの方向 $\eta_{\text{truth}}, \phi_{\text{truth}}$ と TGC BW の RoI の方向 η_{L1}, ϕ_{L1} を用いて ΔR を計算し、 $\Delta R < 0.3$ を満たす RoI の $dR, d\phi$ の情報から CW を用いて p_T を計算し、オフラインの $p_T \geq 20$ GeV のミューオンに対する L1_MU20 以上のトリガー効率をオクタント毎に見積もった。図 5.18 に各オクタント

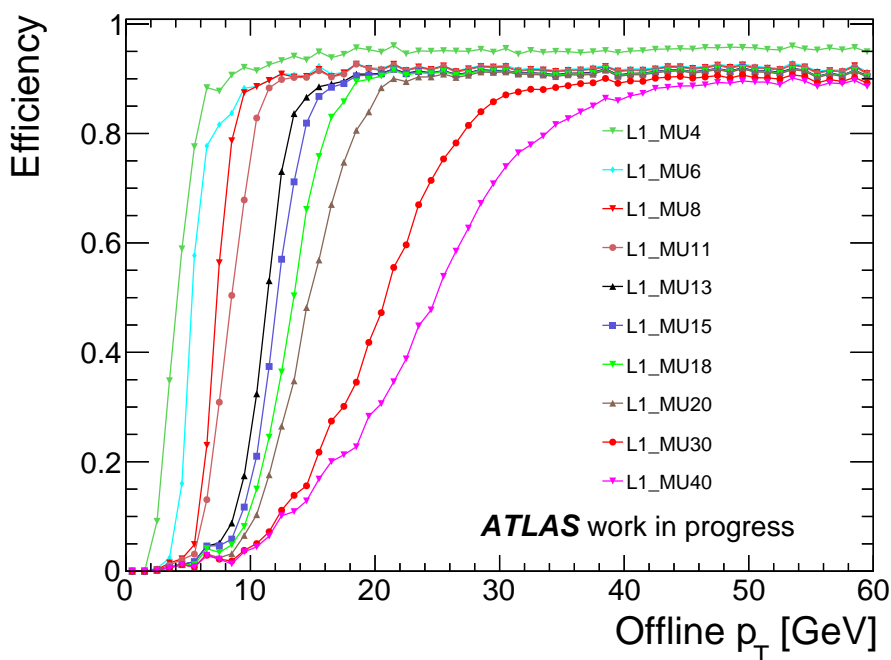


図 5.17: 新しい CW を用いたトリガー効率。TGC BW で判定される閾値をすべて評価した。横軸はオフラインで再構成されたミューオンの p_T である。

におけるトリガー効率を示す。A-side では a1、C-side では c1 のトリガー効率が高い。このことからこれらのオクタントが最もずれが少ないとわかるので、TGC BW の CW を MC に適応するときはこのオクタント領域の CW を全てのオクタントで使用する。

図 5.19 に NSW の CW を用いて評価した相対トリガー効率を示す。プラトーのトリガー効率は高く保ったまま、TGC BW 単体よりも低い p_T のミューオンに対するトリガーを抑制できる性能であることが分かる。

図 5.20 は図 5.17 のトリガー効率に NSW の相対トリガー効率をかけたプロットを追加したもの。ここで用いた相対トリガー効率は図 5.19 のもの。NSW を導入することで立ち上がりは鋭くなり、より p_T が分離できる性能になることが確かめられた。

5.2.2 EI/FI LUT の性能評価

トリガー性能の指標としてトリガーレートはとても重要な役割を担う。EI/FI の LUT の最適化によりどれだけトリガーレートを削減できたかを示すパラメータとして式 5.3 と

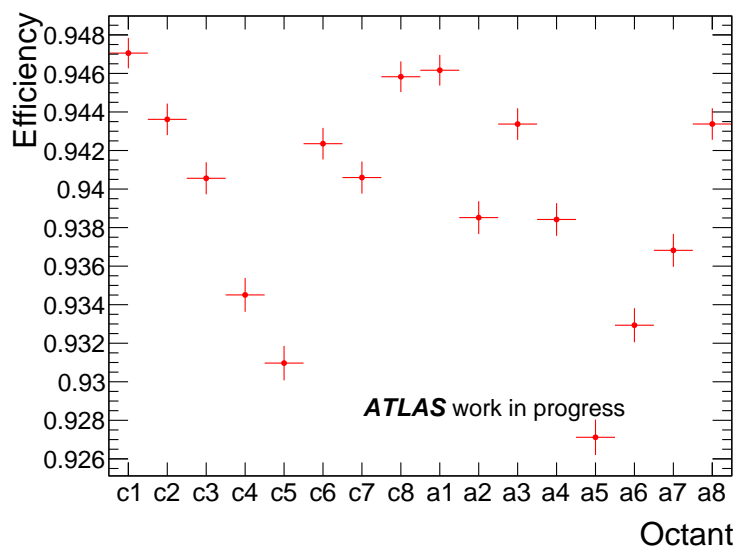


図 5.18: TGC BW の CW を用いて評価した各オクタントにおける $p_T \geq 20 \text{ GeV}$ のミューオンに対する L1_MU20 以上のトリガー効率。a1、c1 がそれぞれ A-side、C-side において ϕ が最も小さい領域。数字が大きくなるほど ϕ も大きくなる。

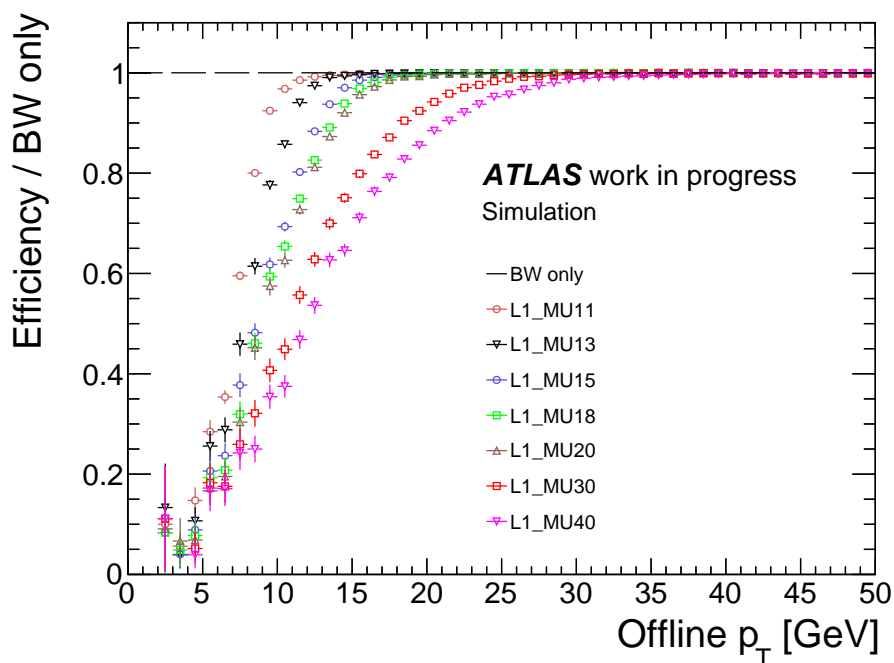


図 5.19: NSW の CW を用いて評価した相対トリガー効率。黒線は TGC BW のトリガー効率。

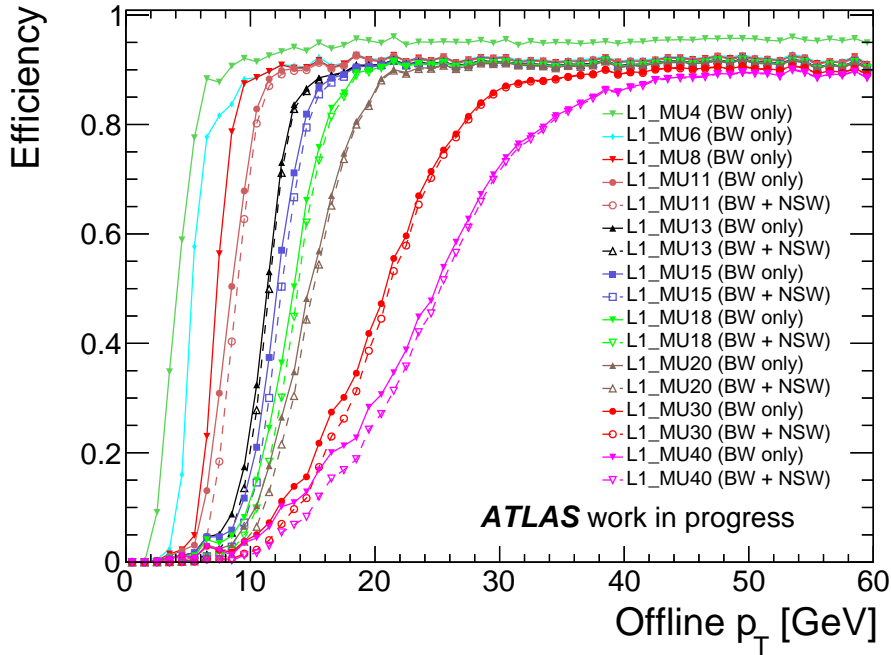


図 5.20: TGC BW のトリガー効率と NSW を導入したトリガー効率の予想。実線が TGC BW の CW を用いたもので破線がそれに NSW の相対トリガー効率をかけたもの。

定義したレート削減率を導入する。

$$\text{レート削減率} = 1 - \frac{\text{EI/FI の LUT を要求した L1_MU20 のトリガー発行数}}{\text{EI/FI を要求しない L1_MU20 のトリガー発行数}} \quad (5.3)$$

この値が大きいほどトリガーレートを抑制できていることを表す。

EI/FI の LUT はこのレート削減率とともに式 5.4 と定義した相対トリガー効率も用いて評価する。

$$\text{相対トリガー効率} = \frac{\text{EI/FI の LUT を要求したトリガー効率}}{\text{EI を要求しないトリガー効率}} \quad (5.4)$$

このトリガー効率は $p_T \geq 20 \text{ GeV}$ の Probe ミューオンを用いた Tag & Probe 法で算出する。

EI/FI は上記二つのパラメーターで評価するが、EI/FI とのコインシデンスを要求する領域は RoI 単位で決定し、その領域のみで評価を行う。2018 年実データの一部を用いて評価する。オフラインで再構成された $p_T \geq 20 \text{ GeV}$ と $\Delta R_{\text{Offline}, L1} < 0.3$ の L1 ヒット位置を選び、そのときの EI/FI におけるワイヤー・ストリップの情報から LUT を参照しコインシデンスを取る。

図 5.21 に EI の LUT を用いた性能評価の結果を示す。横軸は LUT 作成時のエントリー数に対する閾値である。EI の結果を見ると閾値を 70 % ~ 90 % を選ぶと Run-2 のトリガー効率を維持したままレート削減率を上げることが出来ることが分かる。FI の結果を見ると EI に比べてトリガー効率が低くなっていることが分かる。特に、Run-2 で低くなっている。その原因として図 5.23 に示すように検出器中心に行くほどチェンバーへのヒット効率が悪くなり、トリガー効率が正しく見積もれていないことが考えられる。ワイヤーとストリップのヒット効率の算出方法は、ストリップ（ワイヤー）に信号があったときに対応するワイヤー（ストリップ）に信号があるかどうか。この現象は Run-2 の陽子衝突が終わってから見つかったもので、詳しい原因は分かっていない。一つの候補として、FI の ASD は検出器の外側に置かれており、検出器信号がケーブルを通して ASD に送られる途中で減衰し、ASD が次の陽子バンチの信号と判断しているというものが挙げられる。

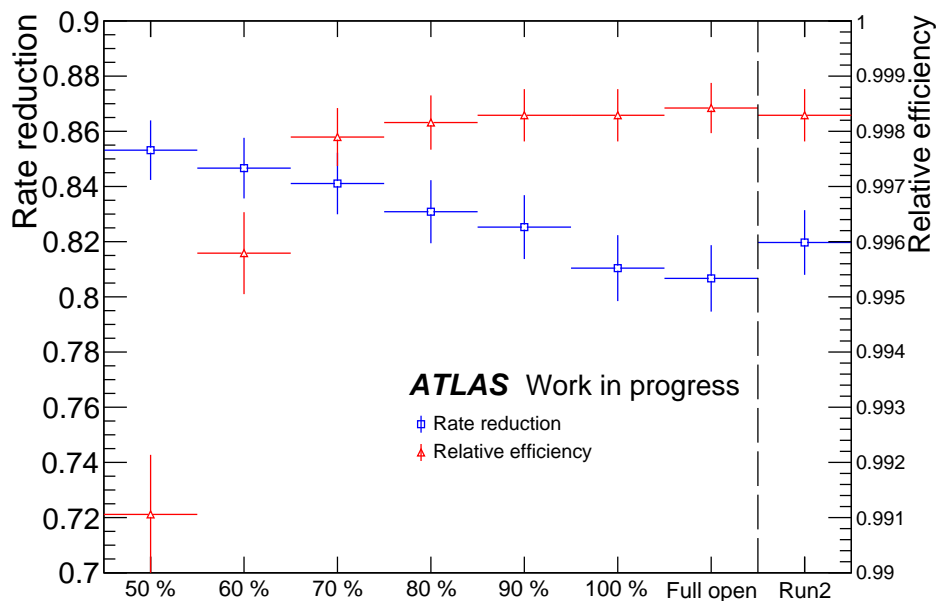


図 5.21: EI の LUT を用いたレート削減率と相対トリガー効率。横軸は LUT 作成時のエントリー数に対する閾値。

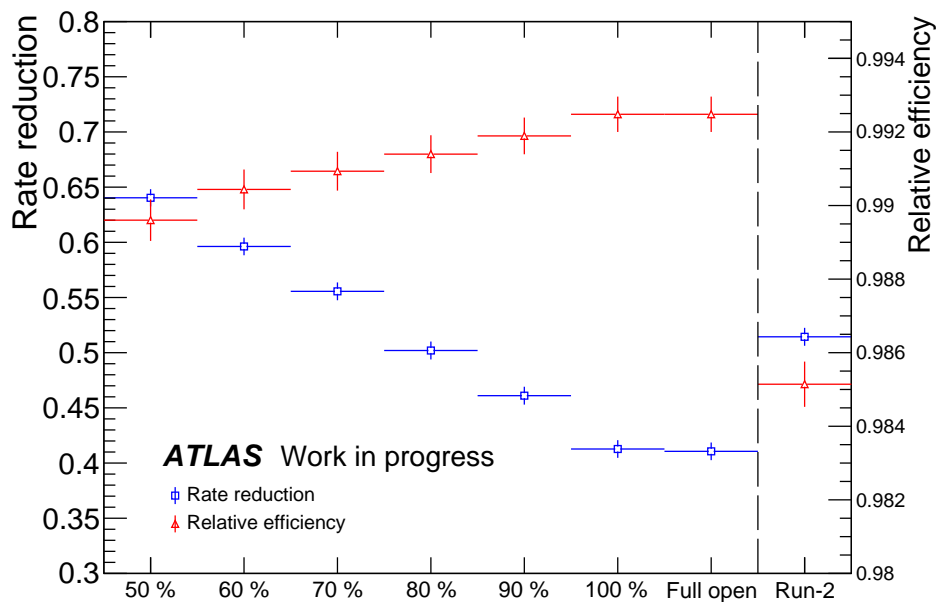


図 5.22: FI の LUT を用いたレート削減率と相対トリガー効率。横軸は LUT 作成時のエントリー数に対する閾値。

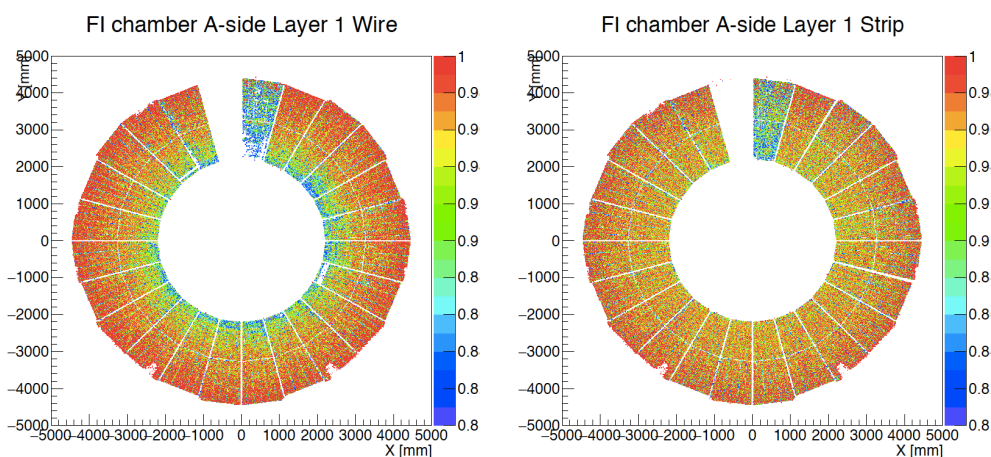


図 5.23: FI チェンバーのヒット効率。左がワイヤー、右がストリップのヒット効率。検出器中心に行くほどワイヤー・ストリップともにヒット効率が下がっている。一部高電圧が正しくかかっていないチェンバーが存在する。

5.2.3 不変質量分解能

L1Topo では L1Muon と L1Calo のトリガー情報を用いて複合的なトリガー判定を行う。その中に RoI 位置や判定された p_T 値などの情報を用いて複数のトラックで不変質量を計算するトリガーがある。L1Muon における p_T 閾値が増加したことによりミューオンを用いて計算した不変質量の分解能が向上すると期待される。

MC を用いてトリガー情報を用いた不変質量分解能を評価する。2 種類のサンプルを使用し、それぞれ J/ψ 中間子と $\Upsilon(1S)$ 中間子が二つのミューオンに崩壊するものである。 J/ψ 中間子はチャームクォークと反チャームクォークの組み合わせからなる中間子で、終状態に二つのミューオンを含む崩壊がある。そのミューオン対を用いて計算した不変質量は 3.1 GeV 付近に共鳴ピークを持つ。 $\Upsilon(1S)$ 中間子はボトムクォークと反ボトムクォークの組み合わせからなる中間子であり、終状態に二つのミューオンを含む崩壊がある。ミューオン対を用いて計算した不変質量は 9.5 GeV 付近に共鳴ピークを持つ。作成した TGC BW の CW を使用して p_T 判定を行い、そのトリガー結果の RoI 位置と p_T の情報を用いて不変質量を計算し、6 段階の p_T 判定を用いて計算したものと比較する。

2 体崩壊による不変質量 $M_{\mu\mu}$ は式 (5.5) のように計算する。

$$\begin{aligned} M_{\mu\mu}^2 &= (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2 \\ &= 2p_{T,1}p_{T,2}\{\cosh(\eta_1 - \eta_2) - \cos(\phi_1 - \phi_2)\} \end{aligned} \quad (5.5)$$

ここで、 $E_i, \mathbf{p}_i, p_{T,i}, \eta_i, \phi_i$ ($i = 1, 2$) はそれぞれの粒子のエネルギー、運動量、 p_T 、 η 、 ϕ を表す。また、TGC の情報を用いた不変質量の計算は、真のミューオンとマッチングが取れた TGC の RoI 位置と判定された p_T の値を用いる。 p_T の値は表 4.2 の L1_MU の値を用い、例えば L1_MU8 と判定された場合は、 $p_T = 8$ GeV として計算する。ただし、14 段階 p_T 閾値における L1_MU2 は 2 ステーションコインシデンスのトラックのみに適応される。L1_MU2 と判定されたトラックの中には、実際は高い p_T のミューオンでも M1 とのコインシデンスが上手く取れなかったために L1_MU2 と判定されたものも含まれると考えられる。図 5.24 に示した p_T 分布を見ると、特に Υ では L1_MU2 と判定されたものはほとんどが高い p_T である。そのため、本研究においては不変質量の計算に L1_MU2 は使用しない。

不変質量の分解能を評価する前に、これらの MC サンプルを用いて p_T 分解能を評価する。 p_T 分解能の評価方法として式 5.6 に示した p_T residual を用いる。

$$p_T \text{ residual} = \frac{p_T^{\text{L1}} - p_T^{\text{offline}}}{p_T^{\text{offline}}} \quad (5.6)$$

ここで、 p_T^{L1} は RoI の情報を用いて計算した横運動量、 p_T^{offline} は真のミューオン情報を用いた横運動量。図 5.25 に p_T residual の分布を示す。また、この分布の -0.5 から 0.5 の範囲における平均値と標準偏差を 5.1 に示す。どちらも平均値が少し増加している。これは、CW 作成において Run-2 から既に存在した閾値に対応したマスを高い p_T と判定される方にのみ変更したからである。 Υ は 6 段階では低く見積もっていたものを正しい p_T と判定され、平均値が 0 に近づいた。どちらのサンプルでも標準偏差が小さくなり、 p_T 分解能が向上したことが確かめられた。

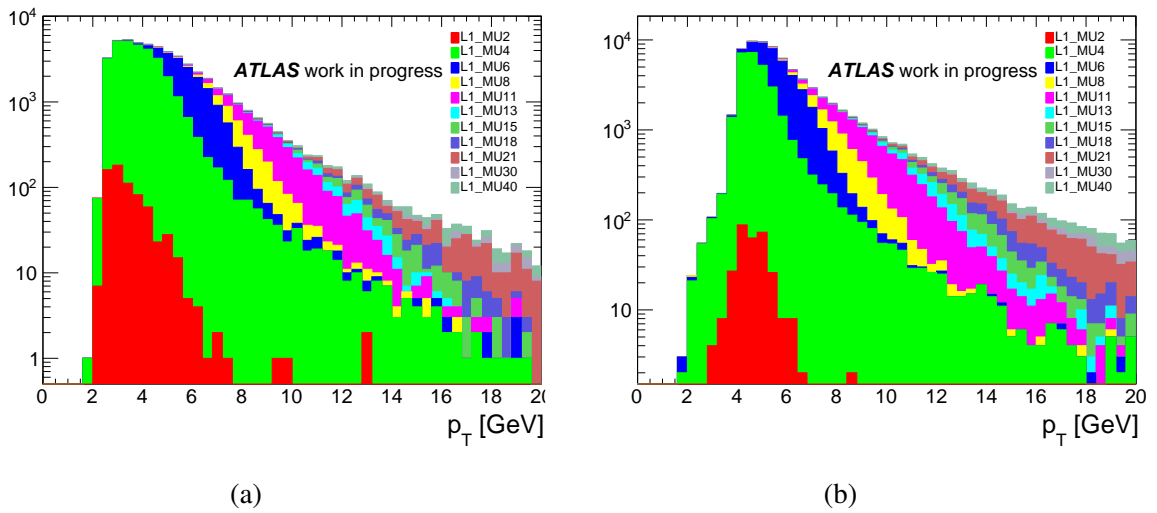


図 5.24: ミューオンのオフライン p_T 分布。14 段階 CW を用いて判定された p_T によって色分けされている。(a) は J/ψ 、(b) は Υ 。

表 5.1: p_T residual 分布の -0.5 から 0.5 の範囲における平均値と標準偏差。

Number of thresholds	J/ψ		Υ	
	Mean	Sigma	Mean	Sigma
6	0.030	0.210	-0.025	0.195
14	0.058	0.207	-0.003	0.194

図 5.26 に 6 段階の p_T 閾値と 14 段階の p_T 閾値を用いて計算した不変質量分布を示す。 p_T 分解能と同様に、式 5.7 に示した Mass residual を用いる。

$$\text{Mass residual} = \frac{m_{L1} - m_{\text{offline}}}{m_{\text{offline}}} \quad (5.7)$$

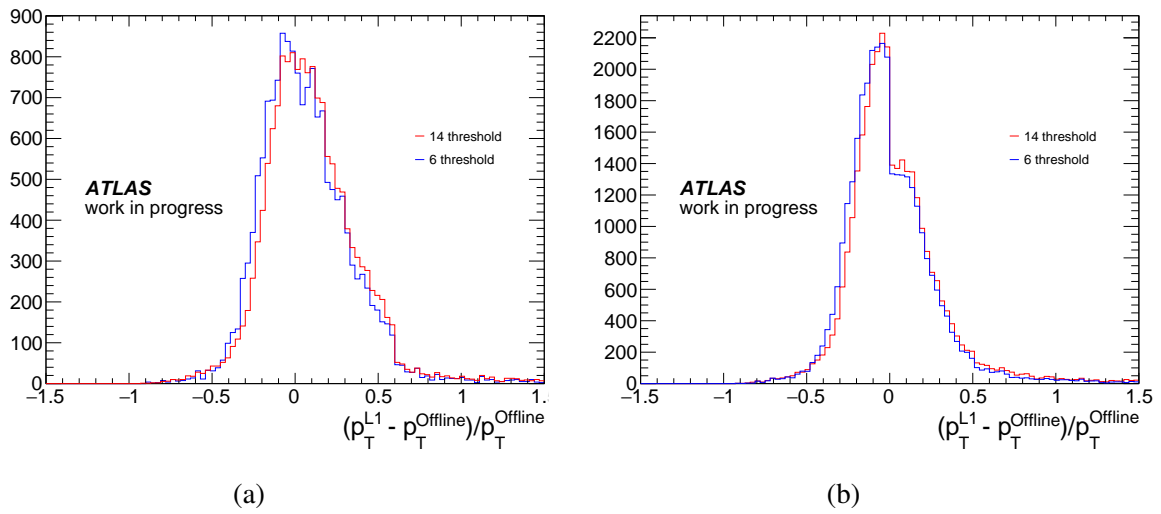


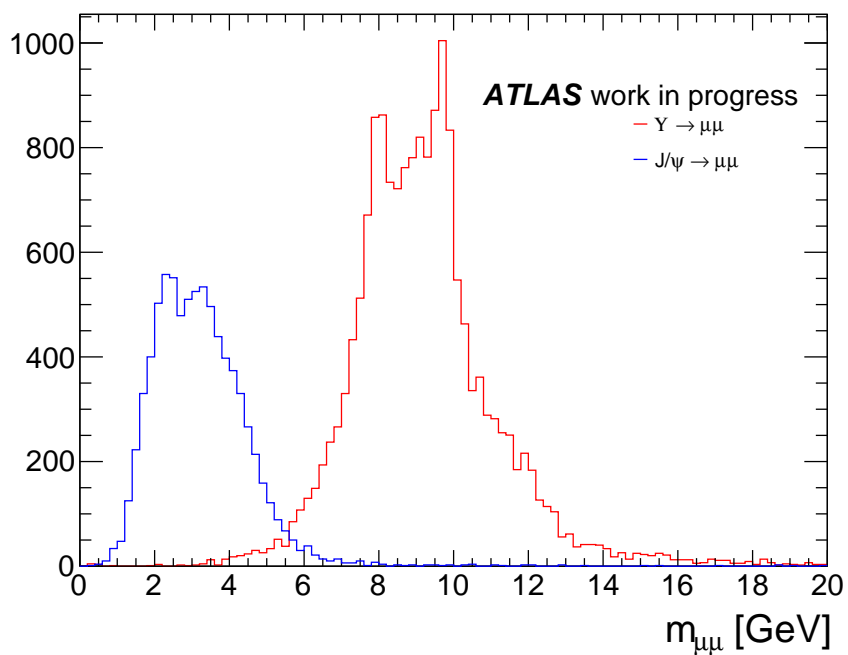
図 5.25: p_T residual 分布。(a) は J/ψ 、(b) は Υ サンプルを用いたもの。

ここで、 m_{L1} は RoI の情報を用いて計算した不変質量、 $m_{offline}$ は真のミューオン情報を用いた不変質量。図 5.27 に Mass residual の分布を示す。 J/ψ 、 Υ のどちらも 6 段階 p_T 判定よりも 14 段階 p_T 判定を用いた方が不変質量分布が細くなっていることがわかる。表 5.2 にこの Mass residual 分布の -1 から 1 の範囲における平均値と標準偏差を示す。どちらも標準偏差が 6 段階に比べて大きくなってしまった。特に Υ はピーク付近の分布を見ると細くなっているように見えるが、標準偏差が大きくなってしまった。理由としては、 p_T を高く見積もってしまうことが増えるため、質量が高い領域にテールを引いてしまったことである考えられる。

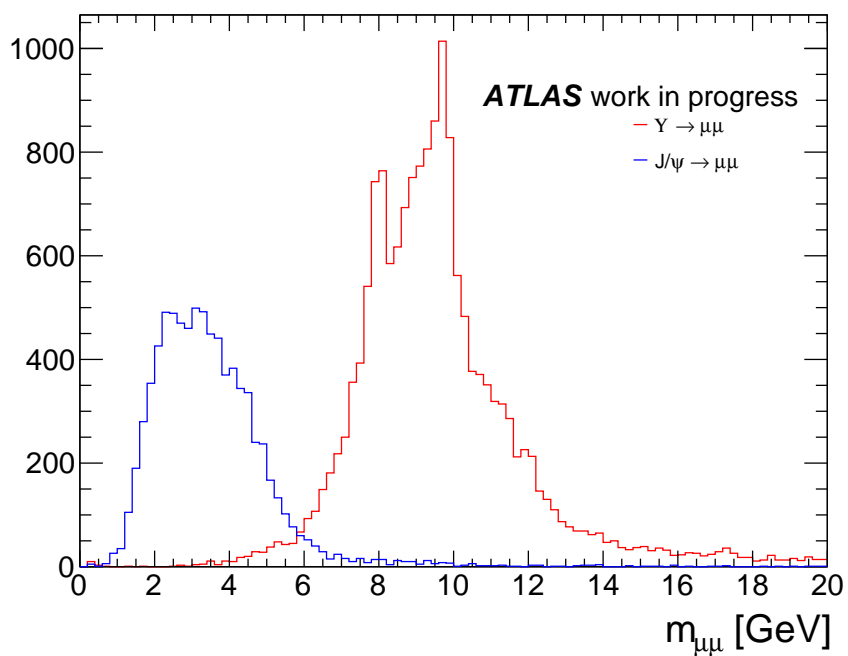
今回の p_T 閾値に対する CW では p_T を高く見積もってしまうことが増え、不変質量分解能を向上させるに至らなかった。適切な p_T 閾値を選び、CW を最適化することで、不変質量分解能を向上させ、高い性能のトリガー判定を行えるようにすることが今後の課題である。

表 5.2: Mass residual 分布の -1 から 1 の範囲における平均値と標準偏差。

Number of thresholds	J/ψ		Υ	
	Mean	Sigma	Mean	Sigma
6	0.024	0.342	-0.016	0.201
14	0.072	0.361	0.024	0.228



(a)



(b)

図 5.26: ミューオンの不変質量分布。(a) は 6 段階 p_T 判定を用いたもの、(b) は 14 段階 p_T 判定を用いたもの。赤が $\Upsilon \rightarrow \mu\mu$ 、青が $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ 。

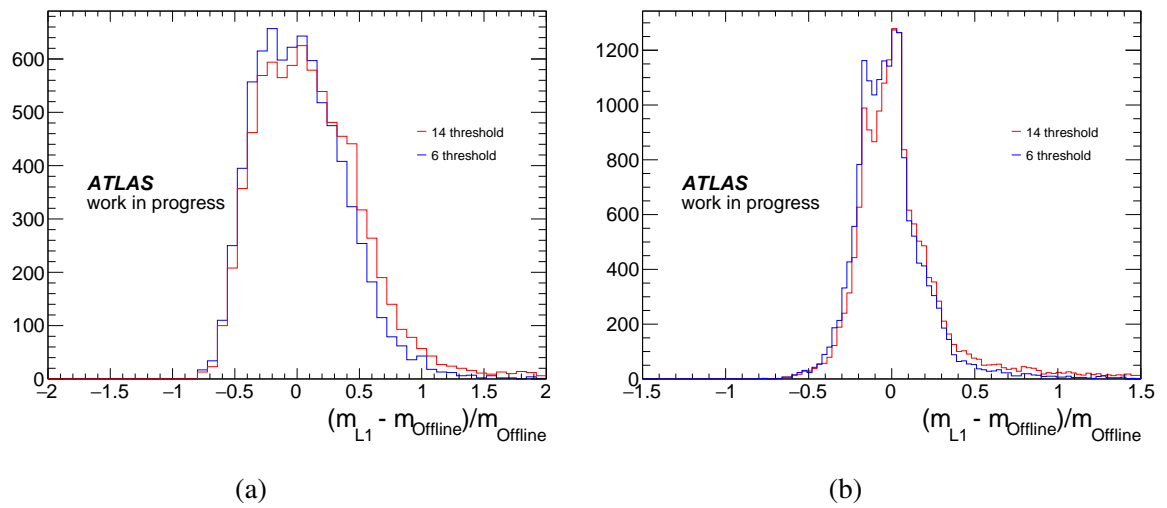


図 5.27: Mass residual 分布。(a) は J/ψ 、(b) は Υ サンプルを用いたもの。

第 6 章

結論と展望

LHC Run-3 において、重心系エネルギーと瞬間ルミノシティが増加する。それに伴ったイベント数の増加により、ATLAS 実験のトリガーシステムを改良する必要がある。本研究では、アップグレードが想定通りに進まなかった場合の対応を考え、新しいトリガーアルゴリズムの開発と性能評価を行った。

Run-3 から導入される予定の新検出器 New Small Wheel (NSW) の生産が間に合わず、片方もしくは両方とも導入されなかった場合、現行の TGC FI チェンバーがそのまま残ることになる。その場合、トリガー判定ボード New Sector Logic (SL) の TGC から信号を受け取る G-Link ポートが不足してしまう。G-Link 信号を GTX 信号に変換し、New SL に送信するコンバーターの概念と配置を考案した。

さらに、Run-3 に向けたトリガーアルゴリズムの開発を行った。送受信できる情報量の増加に伴った 14 段階 p_T 閾値に対応した TGC Big Wheel (BW) と位置マッチングを用いた NSW の Coincidence Window (CW) を作成した。New SL の FPGA のリソース増加に伴い、EI/FI の Look-Up Table (LUT) が実装できるようになるため、EI/FI の CW も作成した。トリガー効率を用いて TGC BW と NSW の CW の性能を評価した。TGC BW だけでも p_T を細かく判定し、分離することができる性能であることを確かめた。NSW の位置マッチングを併せることでさらに分離できるようになると期待できる。EI/FI の CW は TGC BW に対する相対トリガー効率と相対トリガーレート削減率を用いて評価した。EI は CW を最適化することで Run-2 と同等のトリガー効率を保ったままトリガーレートを削減できる性能であることを確かめた。一方 FI ではトリガーレートを削減できる性能を持つことを確かめたが、トリガー効率が正しく見積もれなかった。しかし、その原因を調べることで、検出器システムの不良を発見した。 $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ と $\Upsilon(1S) \rightarrow \mu\mu$ のシミュレーションサンプルを用いて TGC BW の CW の性能評価を行った。 p_T 閾値増加に伴っ

てどちらのシミュレーションサンプルでも p_T residual の標準偏差が小さくなり、 p_T 分解能向上が見られた。一方で、mass residual の標準偏差は大きくなり、不変質量分解能の向上には至らなかった。

今回研究した 14 段階の p_T 閾値は仮のものであり、Run-3 から今回のものが使われるとは限らない。現在候補に挙がっている他の案の一つとしては、2 GeV 刻みで L1_MU2 から L1_MU30 までの 15 段階 p_T 閾値を用いるものがある。今後はそのような p_T 閾値候補に対する CW を作成し、性能評価を行っていきたいと考えている。今回用いたものとは別の様々なシミュレーションサンプルを用いて様々な物理に感度を持つ最適な p_T 閾値と CW を選ぶのが今後の課題である。

参考文献

- [1] <https://www.kek.jp/ja/Research/IPNS/>.
- [2] ATLAS Collaboration. Letter of Intent for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Experiment, Dec 2012.
- [3] ATLAS Collaboration. *High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Technical Design Report V. 0.1*. CERN Yellow Reports: Monographs. CERN, Geneva, 2017.
- [4] ATLAS Collaboration. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. <https://nordberg.web.cern.ch/nordberg/PAPERS/JINST08.pdf>, 2008.
- [5] ATLAS Collaboration. ATLAS Muon Chamber Construction Parameters for CSC, MDT, and RPC chambers, Apr 2008.
- [6] ATLAS Collaboration. Performance of the ATLAS Trigger System in 2015, 2017.
- [7] ATLAS Collaboration. *ATLAS level-1 trigger: Technical Design Report*. Technical Design Report ATLAS. CERN, Geneva, 1998.
- [8] 救仁郷拓人. LHC-ATLAS 実験 Run-2 に向けた Level-1 ミューオントリガーアルゴリズムとデータ収集システムの改良, 2015.
- [9] ATLAS Level-1 Endcap Muon Trigger group. Full Design Report of the ATLAS Level-1 Endcap Muon Trigger in the Phase-1 upgrade.
- [10] 赤塚駿一. LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けたミューオントリガーの改良, 2017.
- [11] ATLAS Collaboration. The expected eta-distributions of the LVL1 muon trigger from the data in Run-1 (25ns runs) for the reference of the results in Run-2, Nov 2015.
- [12] 田代拓也. ATLAS 実験における新しいミューオントリガー回路の開発と実装, 2013.
- [13] 来見田吏恵. ATLAS 実験 RUN2 に向けたレベル1 ミューオントリガー回路の開発, 2013.
- [14] ATLAS Collaboration. The ATLAS Level-1 Muon to Central Trigger Processor Interface, 2007.

- [15] ATLAS Collaboration. Technical Design Report for the Phase-I Upgrade of the ATLAS TDAQ System, Sep 2013.
- [16] ATLAS Collaboration. Performance estimation of the Level-1 Endcap muon at Run 3, May 2018.
- [17] ATLAS Collaboration. New Small Wheel Technical Design Report, Jun 2013.
- [18] 木戸将吾. ATLAS 実験 Run-2 におけるレベル1 ミューオントリガーの性能評価及び最適化の研究, 2016.

謝辞

本研究をするにあたり、多くの方に支えていただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。指導教員である前田順平先生には、ATLAS 実験の基礎からソフトウェアの知識まで様々なことをご教授いただきました。学会等の発表準備の際に発表資料の添削をしていただいたり、本論文作成にあたって何度も何度も添削していただいたおかげで論文を書き上げることができました。

神戸 ATLAS グループのミーティングでは藏重久弥先生、山崎祐司先生、越智敦彦先生、川出健太郎先生に毎週たくさんの助言をいただきました。竹内康雄先生、身内賢太郎先生、鈴木州先生、中村輝石先生、伊藤博士先生には研究室ミーティングのコロキウムで様々なご指導をいただきました。神戸 ATLAS グループの先輩である木戸将吾氏、竹田康亮氏には研究のことや CERN でのこと等様々なことに関してサポートしていただきました。木戸氏には特に CERN の生活面で大変お世話になりました。竹田氏とは、研究室でよくお話しさせていただきました。他先輩方の長谷川誠氏、橋本隆氏、池田智法氏には研究やそれ以外のことでも色々とお世話になりました。M1 の網本圭輔君、上野龍一君、塩沢知晃君、説田暉君、中村拓馬君、山下和輝君、B4 の今井田奈波さん、塩見崇宏君、島田拓弥君、角源一郎君、瀧瀬優斗君、谷口浩平君、乃一雄也君、畠内康輔君、山本祥太郎君、吉田佳織さん、末田皓介君、あまり先輩らしいことはできませんでしたが、一緒に研究できて良かったです。

Phase-1 グループでは佐々木修先生、青木雅人先生、齋藤智之先生、岸本巴先生を初めとする皆様に様々なことを教えていただきました。先輩方にも色々助けていただきました。赤塚駿一氏にはソフトウェアのこと等を度々教えていただきました。水上淳氏には CERN の生活でとてもお世話になりました。岡崎佑太氏には、研究の助言を何度もいただきましたし、CERN では仲良くしていただいて本当に感謝しています。Phase-1 以外の先輩でも、山崎友寛氏と一緒にパリに行っていたことは忘れられない思い出です。

同期にも恵まれていました。フレンドリーに接してくれた石浦宏尚さん、学部時代いつ

も一緒に京阪電車で帰った石飛由介君、昼食をよく一緒に食べた磯部裕太君、同じ ATLAS メンバーとして仲良くしてくれた酒井貴義君、入学当初からの腐れ縁杉本太郎君、一年間隣の席だった堀口楠日君、昼間は大体寝ていた宮辺裕樹くん。みんなと同じ研究室で良かったです。ATLAS では東大の桶作愛嬉君、小玉昂史君、東田旺大君、名古屋大の伊藤秀一君、林田翔太君、信州大の日比宏明君、九州大の藤野主一君、学会等で会ったときは仲良くしてくれてありがとう。

最後に、研究する機会を与えてくれて、いつも支えてくれていた家族に感謝します。