

修士学位論文

8TeV 陽子陽子衝突における ATLAS レベル 1
ミューオントリガーの改良と性能評価

神戸大学大学院 理学研究科
博士課程前期課程 物理学専攻
粒子物理学研究室

111s126s

渡邊 一平

平成 25 年 3 月 6 日

概要

2010年に実験を開始した ATLAS 実験では、陽子陽子衝突で生成される膨大な粒子の中から目的の物理事象のみを選別する3段階のトリガーシステムが使用されている。レベル1エンドキャップミュオントリガーはこのトリガーシステムの初段におかれ、ATLAS 検出器のエンドキャップ部分に飛来するミュオンの運動量を概算、トリガーを発行する。運動量の概算には Look Up Table 方式の参照表が用いられており、この参照表によってトリガーシステムの初期の段階でイベントの選別が行われるため、実験全体において重要な役割を果たす。本研究ではこの参照表の改良と2012年度における性能評価を行った。

目次

第1章	序論	3
第2章	LHCとATLAS実験	5
2.1	LHC加速器	5
2.1.1	加速器のパラメータと現在の稼働状況	6
2.1.2	検出器	7
2.2	ATLAS実験の目指す物理	7
2.2.1	標準模型 Higgs 粒子	7
2.3	ATLAS 検出器	11
2.3.1	ATLAS 検出器の座標系	12
2.3.2	マグネットシステム	12
2.3.3	内部飛跡検出器	14
2.3.4	カロリメータ	15
2.3.5	ミュオンスペクトロメータ	16
第3章	ミュオントリガーシステム	18
3.1	トリガーシステム	18
3.1.1	レベル1トリガー (LVL1)	19
3.1.2	レベル2トリガー (LVL2)	19
3.1.3	イベントフィルター (EF)	20
3.2	レベル1エンドキャップミュオントリガー	20
3.2.1	ミュオントリガーの重要性	20
3.2.2	Thin Gap Chamber(TGC)	20
3.2.3	TGCシステムの読み出し構造	25
3.2.4	TGCトリガーシステム	29
第4章	レベル1ミュオントリガー	31
4.1	トリガーメニュー	31
4.2	トリガーパフォーマンス	32
4.2.1	トリガー効率	32
4.2.2	トリガーレート	35

4.3	2011 年度 7TeV 衝突における性能評価	35
第 5 章	Coincidence Window の作成と改良	37
5.1	Coincidence Window(CW)	37
5.2	作成方法	38
5.2.1	トリガーシミュレーション	39
5.2.2	Coincidence Window の作成	40
5.3	Coincidence Window の改良	44
5.3.1	クロストーク	44
5.3.2	TGC アライメント	47
5.4	Coincidence Window の性能評価	51
第 6 章	Coincidence Window の性能評価	53
6.1	8TeV 衝突における性能評価	53
6.1.1	アライメント補正方法の評価	53
6.1.2	トリガー効率	58
6.2	今後の課題	59
6.2.1	Forward 領域の取り扱い	59
6.2.2	アライメント効果の補正方法	59
第 7 章	まとめ	60

第1章 序論

素粒子標準模型とは素粒子物理学における3つの基本的な力である強い力、弱い力、電磁力を記述する理論である。標準模型は1970年代に構築され、1980年以降様々な実験においてその検証が行われてきた。その結果、標準模型が我々の世界を驚くほどよく記述していることが確かめられた。標準模型ではゲージ対称性が成立し、3つの力を媒介する粒子の質量が0であることが要求される。しかし、弱い力を媒介するW粒子とZ粒子は実験的に質量を持つことが確かめられている。そこでこれらの粒子に質量を与える”Higgs場”と呼ばれるモデルが提唱された。”Higgs”場を直接観測することは出来ないが、エネルギーの大きな粒子を介して場に揺らぎを与えることで、その揺らぎをHiggs粒子として観測できるとされてきた。

スイス・ジュネーブ近郊に建設されたLarge Hadron Collider(LHC)はこのHiggs粒子の探索を主な目的としている。LHCは最高重心系エネルギーが14[TeV]にもなる陽子・陽子衝突型円形加速器である。約15年間の準備期間を経て2010年から本格的な運転が開始した。LHCに設置されている検出器の1つであるATLAS検出器[3]もLHCの稼働と共にデータの取得を開始し、2012年にはHiggs粒子らしき新粒子の発見[6]に至った。

上記のHiggs粒子探索においてミューオントリガーが重要な役割を担っている。Higgs粒子の探索は崩壊に伴う粒子を観測し、その崩壊前の粒子を同定することで行われる。Higgs粒子が2つのZ粒子に崩壊したのち各Z粒子が2つのレプトンに崩壊する $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ というチャンネルでは、終状態に高い横方向運動量をもつミューオンが含まれる可能性が高い。また、背景事象であるクォークやグルーオン同士の散乱からくるQCD jetでは高い横方向運動量をもつミューオンが生じにくい。そのため、膨大な背景事象の中から高い横方向運動量をもつミューオンをいかに効率よく観測するかが重要になる。これはHiggs粒子に限らず超対称性粒子などその他の物理探索においても同様である。

ATLAS実験では物理事象を効率よく観測するため3段階のトリガーシステムが採用されており、レベル1ミューオントリガーはその第一段階に位置する。レベル1ミューオントリガーでは、磁場によるミューオンの飛跡の曲がりから横方向運動量 p_T を概算し、その値によってミューオンを選別する。この際、飛跡の曲がり具合と p_T を関連付けたCoincidence Windowと呼ばれる参照表が用いられる。この処理はハードウェア上でのLook Up Table方式が取られており、高速処理が求められるレベル1トリガーにおいて重要な役割を果たしている。

2011年の観測結果から検出器自体に設置位置のズレや歪みがあることがわかった。Coincidence Windowはズレのない理想的な検出器配置におけるシミュレーションから作成するため、ズレのある実機に適用するとトリガー効率の低下や p_T 分解能の悪化を招く可能性がある。そこで、検出器設置位置のズレを計測、パラメータ化し、Coincidence Windowに補正を加えることで p_T 分解能の改善を図った。2012年の実験ではこの補正を加えたCoincidence Windowが適用されデータの取得が行われた。このデータを使用しCoincidence Windowの性能評価や作成方法の検証などを行った。本論文は以下の構成で成り立つ。

- 第2章：LHCとATLAS実験
LHCの現状やATLAS検出器について述べる。
- 第3章：ミューオントリガーシステム
ATLAS実験におけるトリガーシステムの概要を述べる。特にTGCと呼ばれるミューオン検出器のトリガーの仕組みについて詳しく説明する。
- 第4章：レベル1ミューオントリガー
レベル1ミューオントリガーについて説明する。また、トリガーの評価方法、2011年度のトリガーパフォーマンスもこの章で述べる。
- 第5章：Coincidence Windowの作成と改良
Coincidence Windowとその作成方法について説明する。特にクロストークとTGCアライメントの2つの問題に対する補正方法の説明や、2011年のデータを使用したCoincidence Windowの性能評価結果を述べる。
- 第6章：Coincidence Windowの作成と改良
2012年8TeV陽子陽子衝突のデータを使用して行ったCoincidence Windowの評価結果について説明する。
- 第6章：まとめ
本論文のまとめ及び結論について述べる。

第2章 LHCとATLAS実験

本章ではLHCの概要とそこで行われているATLAS実験の説明を行う。まず、LHC加速器について軽く述べた後、ATLAS実験の目指す物理やATLAS検出器自体について説明していく。

2.1 LHC加速器

LHC(Large Hadron Collider)とはスイス・ジュネーブ近郊にある欧州原子核研究機構(CERN)の地下100mに建設された世界最大の陽子・陽子衝突型円形加速器である。衝突による重心系エネルギーは14[TeV]、最高ルミノシティは $10^{34}[\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}]$ に達する。

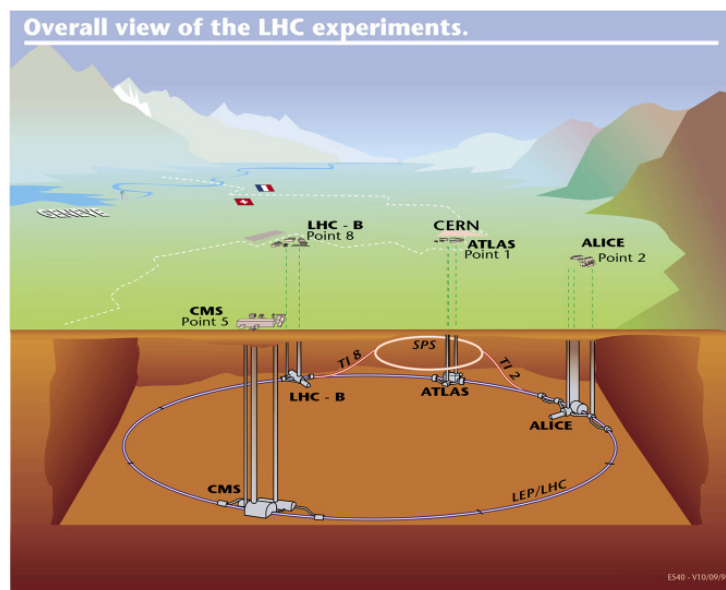


図 2.1: LHC の全体像

陽子質量は電子質量の約2000倍と大きいため、加速によって生じるシンクロトロン放射のエネルギー損失が電子に比べて少ない。そのため、LHCでは14[TeV]という高エネルギーを実現することが可能である。しかし、陽子陽子衝突では陽子の構成

粒子であるクォーク、グルーオン同士の散乱によって反応が複雑になり、且つ衝突が25[ns]間隔という高頻度で起こるため膨大な量の背景事象が現れる。そのため、背景事象をよく理解し、目的の物理現象を効率よく選別することがハドロンコライダーにおいて重要になる。

2.1.1 加速器のパラメータと現在の稼働状況

LHC 加速器は2010年3月に本格的に稼働を開始した。表2.1に現在の稼働状況における主要なパラメータを示す。

主リング周長	26.55[km]
重心系エネルギー (陽子+陽子)	4[TeV]+4[TeV]
積算ルミノシティ	27.03[fb ⁻¹]
瞬間最高ルミノシティ	7.73 × 10 ³³ [cm ⁻² sec ⁻¹]
バンチ数	1380 個
バンチ間隔	50[nsec]
1バンチ当たりの陽子数	1.4 × 10 ¹¹ 個
衝突点のビーム半径	23[μm]

表 2.1: LHC の主要なパラメータ [5]

図2.2は2012年12月17日までの積分ルミノシティの遷移を表している。緑がLHC全体、黄色がATLAS検出器で取得されたデータ量を表しており、図2.2の日付以降にとられたrunも含めて現在までに27.03[fb⁻¹]のデータが取得されている。

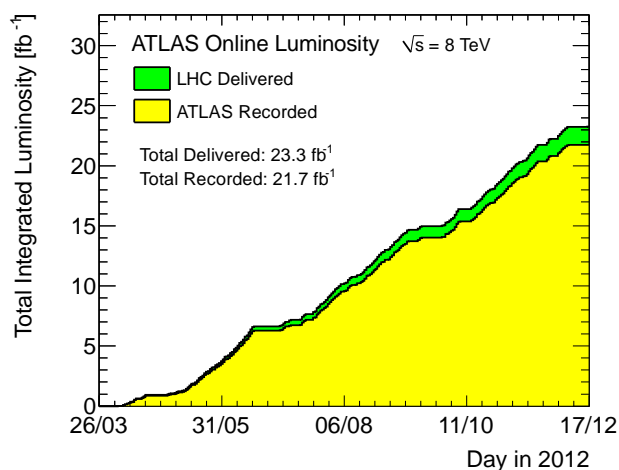


図 2.2: 積分ルミノシティの遷移 [5]

2.1.2 検出器

LHCにはビーム衝突点が4ヶ所あり、それぞれ目的に応じた検出器が設置されている。

- ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)
Higgs粒子と超対称性粒子(SUSY)の探索を主な目的とした汎用検出器である。2.3節以降で詳細を述べる。
- CMS (Compact Muon Solenoid)
ATLASと同様の汎用検出器であり、Higgs粒子と超対称性粒子(SUSY)の探索を主な目的とする。
- ALICE (A Large Ion Collider Experiment)
重イオン衝突によるクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)の解明を目的としている。
- LHCb (Large Hadron Collider beauty)
bクォークを含むB粒子のCP非保存などの稀崩壊現象を観測することにより、標準理論を超える物理事象の探索を目的としている。

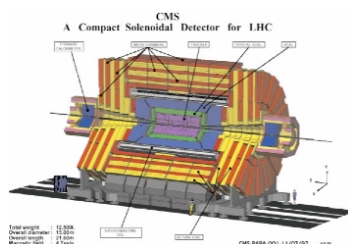


図 2.3: CMS



図 2.4: ALICE

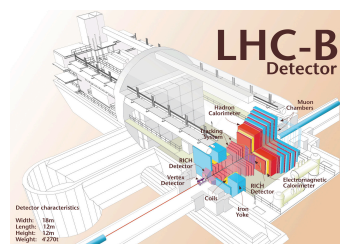


図 2.5: LHCb

2.2 ATLAS 実験の目指す物理

ATLAS実験は主に標準理論のHiggs粒子、超対称性粒子の発見を目的としている。本節では標準模型Higgs粒子の探索について簡単に述べる。

2.2.1 標準模型 Higgs 粒子

現在の素粒子物理学の基礎をなしている理論が素粒子標準模型である。標準模型は素粒子とその相互作用を記述する理論であり、様々な実験で精密に検証されてい

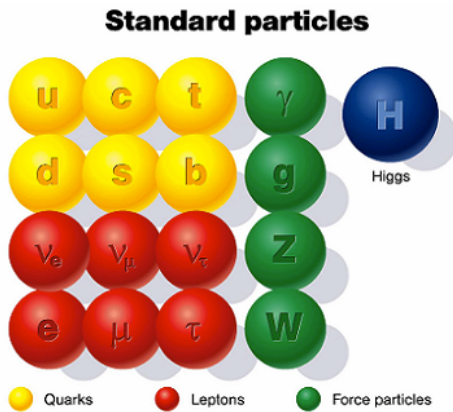


図 2.6: 標準模型粒子

る。図 2.6 に示されているのが標準模型に現れる粒子であり、クォーク、レプトン、力を媒介するゲージボゾン、質量の起源となる Higgs 粒子から成る。

Higgs 粒子の生成過程

Higgs 粒子はトップクォークや W、Z 粒子等の重い粒子と結合しやすいため、LHC では以下の 4 つの生成過程が予想されている。図 2.7 に Higgs 粒子生成のファインマン・ダイアグラム、図 2.8 に生成断面積と Higgs 粒子の質量との関係を示す。

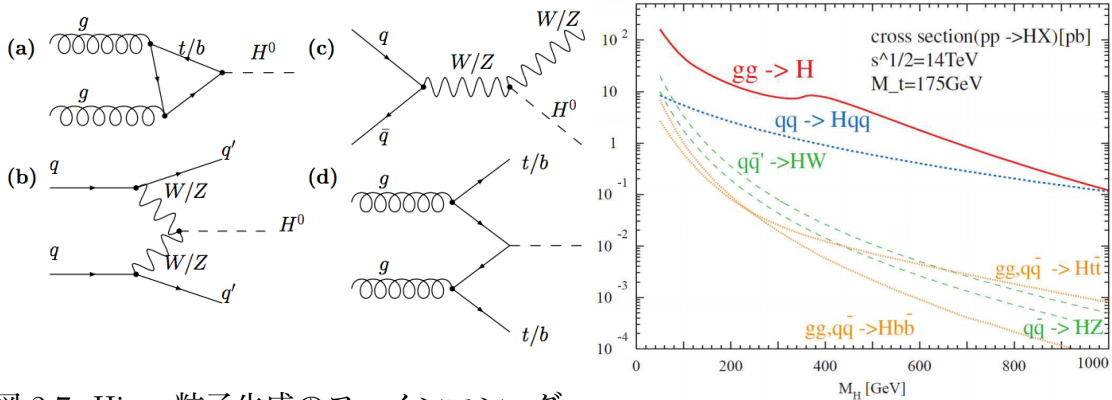


図 2.7: Higgs 粒子生成のファインマン・ダイアグラム

図 2.8: Higgs 粒子の生成断面積

- $gg \rightarrow H$ (gluon fusion (a))
 グルーオン同士の反応によって生じるトップクォークやボトムクォークのループを介した生成過程であり、最も反応断面積が大きい。しかし、Higgs 粒子の崩壊に伴う粒子以外に反応を特徴づける粒子が存在せず背景事象との選別が難しい。よって、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ のような Higgs の質量が精度よく再構成出来る崩壊が主な解析チャンネルとなる。

- $qq \rightarrow qqH$ (vector boson fusion (b))
クォークから放出されたゲージボゾンから Higgs 粒子が生成される過程である。生成断面積は比較的大きく、終状態に 2 本のジェットを含むため事象選別が行い易い。
- $q\bar{q} \rightarrow W/ZH$ (W/Z associated production (c))
クォークの対消滅で生成されたゲージボゾンから Higgs 粒子が生成される過程である。終状態にゲージボゾンが観測されるため、生成断面積は小さいが事象選別は行い易い。
- $g\bar{g} \rightarrow t\bar{t}H$ (top associated production (d))
対生成されたトップクォークから Higgs 粒子が生成される過程である。生成断面積は小さいが、終状態にトップクォーク対を含むため事象選別が行い易い。また、トップクォークと Higgs 粒子の結合定数を測定出来るという利点がある。

Higgs 粒子の崩壊モード

以下に予測されている Higgs 粒子の主な崩壊モードを示す。図 2.9 は Higgs 粒子の質量に対する崩壊分岐比を表す。

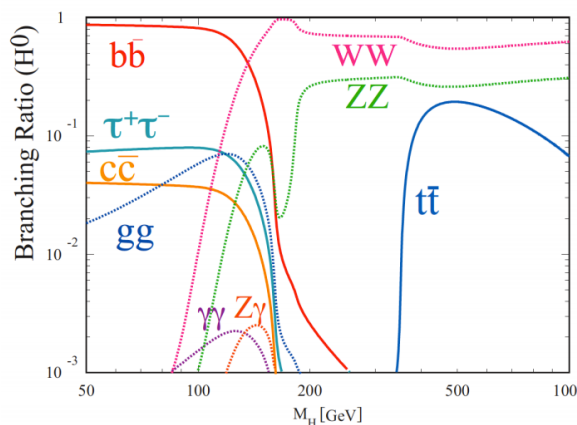


図 2.9: Higgs 粒子の崩壊分岐比

- $H \rightarrow \tau\tau$
 $\gamma\gamma$ よりも崩壊分岐比が高く、vector boson fusion との組み合わせで背景事象と区別することが出来る。 τ 崩壊にニュートリノを伴うため、横消失エネルギー E_T^{miss} の精密な測定が必要となる。
- $H \rightarrow \gamma\gamma$
150[GeV/c²] 以下の質量領域では $b\bar{b}$ 、 $c\bar{c}$ への崩壊が支配的であるが、これらは

陽子衝突による QCD 背景事象との区別が難しい。H $\rightarrow\gamma\gamma$ を観測することで不変質量 $H_{\gamma\gamma}$ を見積もり探索を行う。よって電磁カロリメータの測定精度が必要となる。

- H $\rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$
終状態にニュートリノを含むため、Higgs 粒子の質量を再構成することは出来ない。2つのレプトンの横方向運動量 p_T と2つのニュートリノに由来する E_T^{miss} から横方向質量を測定し探索を行う。
- H $\rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$
4つのレプトンから Higgs 粒子の質量の再構成が可能であり、背景事象も少ないことから gold-plated channel と呼ばれる。

Higgs 粒子探索の現状

2012年7月 CERN において、Higgs 粒子とみられる新粒子の発見が報告された。

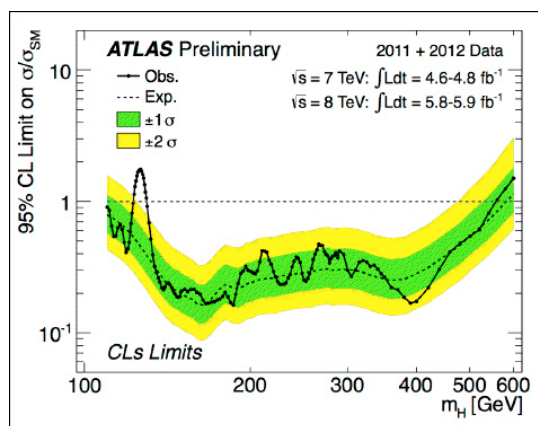


図 2.10: Higgs 質量の排除領域 [6]

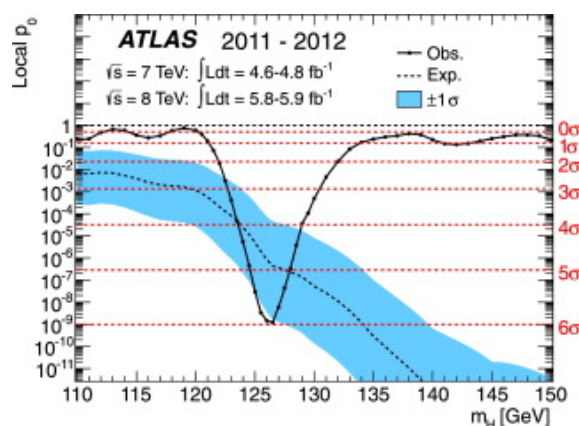


図 2.11: Local p-value[6]

図 2.10 は横軸に Higgs 粒子の質量、縦軸に実際の観測から求めた Higgs 粒子の生成断面積の 95%信頼度における上限値を標準模型の予想による Higgs 粒子の生成断面積で割った値を表す。この値が 1 以下の領域は標準模型 Higgs が排除されたことを意味する。黒線 (Observed) は実際の観測による値を示し、黒の点線 (Expected) は Higgs が存在しない場合の理論適予想を示している。また、緑と黄色のバンドはそれぞれ 65%、95%信頼度の範囲を示す。図 2.11 中の黒線はバックグラウンド事象だけの状態で偶然に信号があるように見える確率 (local p-value: p_0) を Higgs 粒子の質量の関数で表したものである。また、黒の点線は標準模型 Higgs が存在する場合の理論的予想を表しており、青のバンドは 95%信頼度の範囲を示す。 $m_H=126.5[\text{GeV}/c^2]$ 付近に 5.9σ の超過があることから新粒子が存在すると結論付けられた。 [6]

2.3 ATLAS 検出器

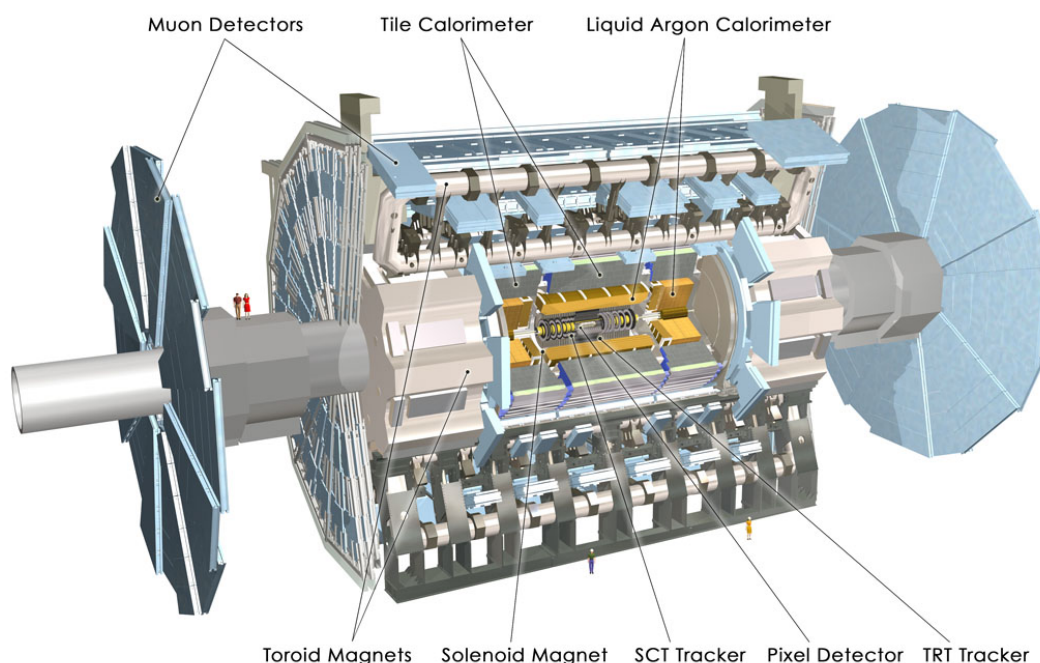


図 2.12: ATLAS 検出器の全体像

図 2.12 は ATLAS 検出器の全体像を表している。ATLAS 検出器は直径 25[m]、長さ 44[m]、総重量 7000[t] の円筒型の汎用検出器である。内側から、内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミューオンスペクトロメータと設置されており、検出器の間には超伝導磁石が設置されている。図 2.13 はそれぞれの検出器に対する各粒子の透過性を表している。

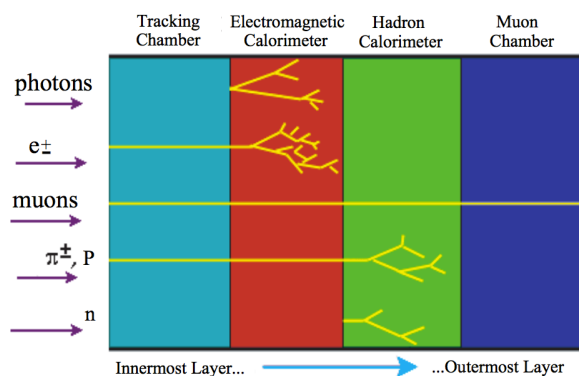


図 2.13: 各粒子の透過性

2.3.1 ATLAS 検出器の座標系

ATLAS 実験に用いられる座標系を図 2.14 に示す。

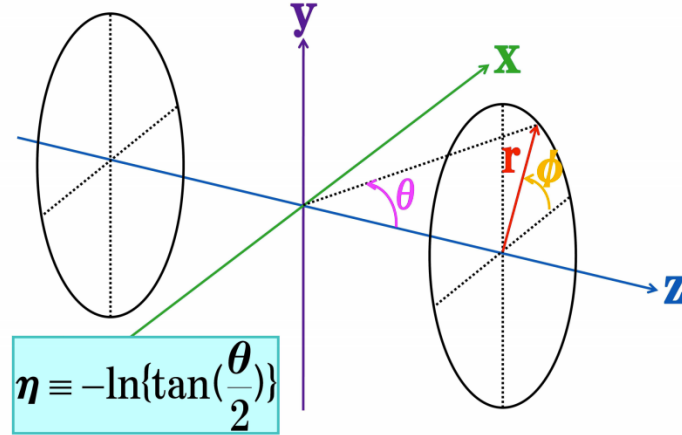


図 2.14: ATLAS 検出器の座標系

陽子の衝突点を原点にとり、LHC のビーム軸方向を z 軸とする。 z 軸と直行する面内で、LHC のビームリングの中心方向を x 軸、天頂方向を y 軸とする。このとき衝突点に対して $+z$ 方向を A-Side、 $-z$ 方向を C-Side と呼ぶ。また円筒形の ATLAS 検出器に対し、図 2.14 に示す通りに (r, θ, ϕ) を定義し、 θ と ϕ はそれぞれ $0 \leq \theta < 2\pi$ 、 $0 \leq \phi < \pi$ の範囲をもつ。さらに擬ラピディティ $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$ を定義する。ハドロンコライダーでは軽いハドロン の散乱断面積がこの η に対してほぼ一定になるためこの量がよく用いられる。また、検出器はこの η によって区切られており、それぞれバレル領域 ($|\eta| \leq 1$:円筒の側面部分)、エンドキャップ領域 ($1 < |\eta| \leq 1.9$:円筒の底面部外側)、フォワード領域 ($2.7 < |\eta|$:円筒の底面部内側) と呼ぶ。

2.3.2 マグネットシステム

ATLAS のマグネットシステムは 4 つの超伝導磁石から成る。全体像を図 2.15 に示す。内側に超伝導ソレノイド磁石が設置され、それを覆うようにして 3 つの超伝導トロイド磁石が設置されている。

超伝導ソレノイド磁石

超伝導ソレノイド磁石は内部飛跡検出器において荷電粒子の横方向質量 p_T を測定するため、内部飛跡検出器とカロリメータの間に設置されている。 z 方向の長さは 5.3[m]、直径 2.4[m]、径方向の厚さ 45[mm] の円筒形をしており、 z 方向に約 2[T] の磁束密度を提供する。図 2.16 に超伝導ソレノイド磁石を示す。

超伝導トロイド磁石

超伝導トロイド磁石はバレル部に1つ、エンドキャップ部に2つで計3つが設置されており、ミュオンの横方向運動量 p_T を測定することを目的としている。バレル部超伝導トロイド磁石はカロリメータを覆うように設置されており、長さ 25.3[m]、内径 9.4[m]、外径 20.1[m] で ϕ 方向に約 0.5[T] の磁束密度を提供している。バレル部超伝導トロイド磁石の写真を図 2.18 に示す。エンドキャップ部超伝導トロイド磁石は最も内側のミュオンスペクトロメータの外側に設置されており、長さ 5[m]、内径 1.65[m]、外径 10.7[m] で ϕ 方向に約 1[T] の磁束密度を提供している。エンドキャップ部超伝導トロイド磁石の写真を図 2.17 に示す。

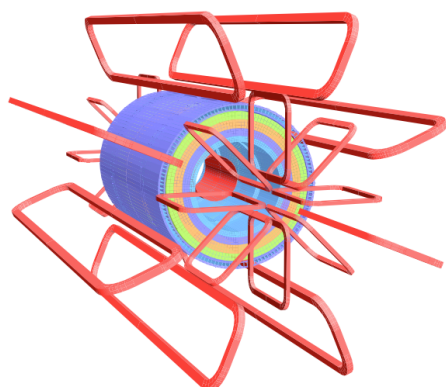


図 2.15: マグネットシステムの全体像



図 2.16: 超伝導ソレノイド磁石

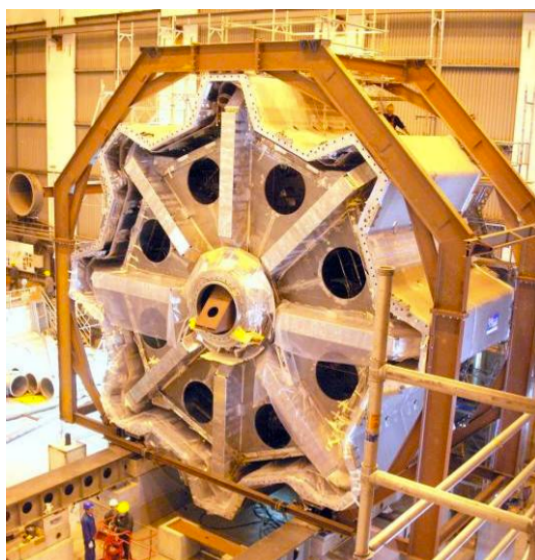


図 2.17: エンドキャップ部超伝導トロイド磁石

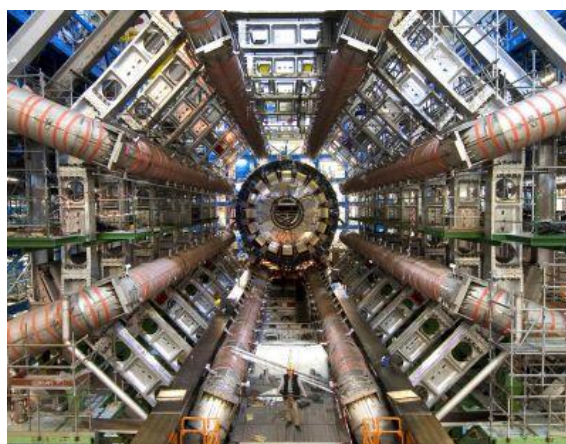


図 2.18: バレル部超伝導トロイド磁石

2.3.3 内部飛跡検出器

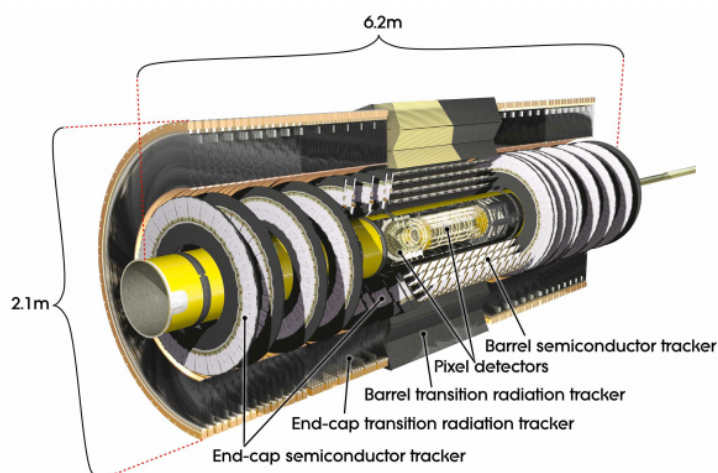


図 2.19: 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器はビーム衝突点の最近接に設置されており、超伝導ソレノイド磁石の作る 2[T] の磁場中に配置されている。粒子の衝突点や崩壊点、磁場を用いた運動量の測定を目的としている。内部飛跡検出器は非常に大量の放射線下に置かれるため、高い放射線耐性が要求される。内側から、ピクセル検出器、シリコン検出器、遷移輻射検出器の3つで構成されている。

ピクセル検出器 (Pixel : Silicon-pixel vertex detector)

再内層にある半導体検出器で高い位置分解能を持つ。1ピクセルが $50[\mu\text{m}] \times 400[\mu\text{m}]$ のシリコン検出器である。ビーム軸に一番近い検出器であり、占有率を下げるためにピクセル型にしている。

シリコン検出器 (SCT : Semi-Conductor Tracker)

シリコンマイクロストリップと呼ばれる。細長い有感領域を平行に並べた半導体型検出器で、ストリップ間隔は $80[\mu\text{m}]$ である。縦横6-7[cm]のシリコンウエハーが円筒状に敷き詰められ、2層を $40[\text{mrad}]$ 傾けることで2次元の位置検出を可能としている。

遷移輻射検出器 (TRT : Transition Radiation Tracker)

直径 $4[\text{mm}]$ のドリフトストローチューブ検出器を積み重ねた形状をしている。 $|\eta| < 2.0$ の範囲にわたってビーム軸と平行に設置されており、 $R-\phi$ 方向のみの位置情報を持つ。ストローチューブ1つ当たり $130[\mu\text{m}]$ の位置分解能を持ち、電子の識別や飛跡測定を行う。

2.3.4 カロリメータ

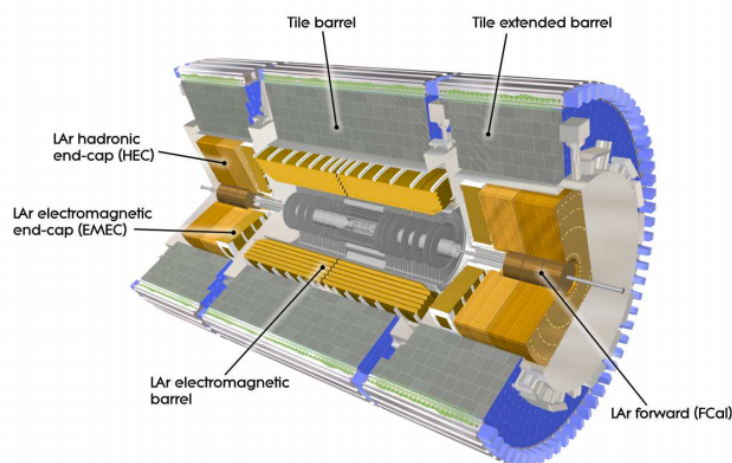


図 2.20: カロリメータ

カロリメータの主な役割は電子や光子のエネルギーと位置の精密な測定や、ジェットのエネルギーと方向、横方向消失エネルギー E_T^{miss} の測定である。また、電子や光子、 τ 粒子のハドロン崩壊とジェットの識別などおおまかな事象選別を行う。ATLAS 検出器に設置されているカロリメータは電磁カロリメータとハドロンカロリメータの2つに大別される。

電磁カロリメータ

電磁カロリメータはアコーディオン構造の鉛の吸収体と液体アルゴンから構成されている。超伝導ソレノイド磁石の外側のバレル、エンドキャップ両領域に設置されており、電子と光子の測定に用いられる。エネルギー分解能は

$$\frac{\Delta\sigma_E}{E} = \frac{9.5\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\% (E : \text{GeV 単位})$$

と表される。第1項は電子の数をエネルギーに換算した時の統計的な揺らぎ、第二項はキャリブレーションの精度や温度揺らぎからくる定数項である。E=100[GeV]であれば約1%の精度でエネルギー測定が可能である。

ハドロンカロリメータ

各領域で3種類のハドロンカロリメータが設置されている。それぞれ、バレル部では鉄の吸収体とタイル状のシンチレータからなるタイルカロリメータ、エンドキャップ部では銅の吸収体と液体アルゴンから成るカロリメータ、フォワード部では銅とタ

ングステンの吸収体と液体アルゴンからなるカロリメータが用いられる。ハドロンカロリメータは電磁カロリメータの外側に配置されており、ハドロンの同定、エネルギー測定、ジェットのリ構成などを行う。単一のハドロン粒子に対するエネルギー分解能は以下のように表される。

$$\frac{\Delta\sigma_E}{E} = \frac{52.3\%}{\sqrt{E}} \oplus 1.7\%(\text{バレル部}), \quad \frac{62.4\%}{\sqrt{E}} \oplus 3.6\%(\text{エンドキャップ部})$$

2.3.5 ミューオンスペクトロメータ

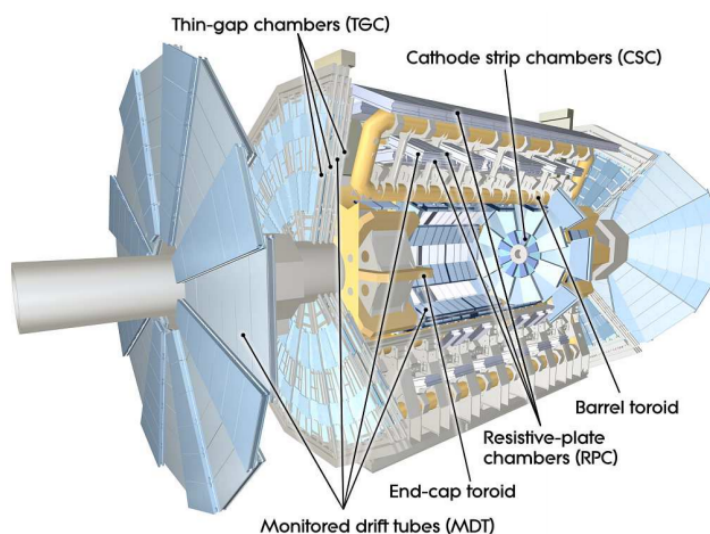


図 2.21: ミューオンスペクトロメータ

ミューオンスペクトロメータは ATLAS 検出器の最も外側に位置しており、ミューオンの測定を目的とする。ミューオンは $2.2[\mu\text{sec}]$ と比較的長寿命であり、物質の透過力も高いことから外側のミューオンスペクトロメータまで到達することが出来る。ミューオンスペクトロメータは位置の精密測定を行う Monitored Drift Tube(MDT) と Cathode Strip Chamber(CSC)、トリガーの発行を担う Resistive Plate Chamber(RPC) と Thin Gap Chamber(TGC) から構成されている。ミューオンスペクトロメータで計測される横方向運動量 p_T の分解能は、 1TeV のミューオンに対して $\sigma_{p_T}/p_T \simeq 7\%$ である。TGC については 3.2.2 節で詳細に述べる。

MDT (Monitored Drift Tube)

MDT はバレル、エンドキャップ両領域の $|\eta| < 2.0$ の広い部分に配置されている。直径 $30[\text{mm}]$ のドリフトチューブを積層し、フレームに固定した構造を持つ。位置分解能は $80[\mu\text{m}]$ で、 $R-z$ 方向成分を精密に測定することが可能である

CSC (Cathode Drift Chamber)

CSCはカソード読み出しの多線式比例計数箱で、位置分解能は $60[\mu\text{m}]$ である。CSCはバックグラウンドとしてミューオン測定妨げになる中性子への感度が 10^{-4} 未満と小さく、ガンマ線に対する感度も1%程度に抑えられている。そのため、最も放射線強度の高い超前方領域 ($2.0 < |\eta|$) に設置されている。

RPC (Resistive Plate Chamber)

RPCは $|\eta| < 1.0$ のバレル領域に設置されているトリガー用検出器である。アノードにワイヤーを使用せず、ストリップから読み出しを行うガスチェンバーである。ストリップ同士が直行するように重ねられており、2次元の読み出しが可能である。

第3章 ミューオントリガーシステム

LHC 加速器の理想的なルミノシティ ($10^{34}[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$) の場合、1 バンチあたり平均 24 回の陽子陽子衝突が予想される。バンチ間隔は $40.08[\text{MHz}]$ が想定されており、陽子衝突は $1[\text{GHz}]$ にまで達する。これらのイベントを全て保存することは不可能なため、ATLAS 実験では膨大なイベントの中から目的の物理事象のみを効率よく選別するトリガーシステムが準備されている。本章では各トリガーレベルにおけるトリガーについて簡単に述べ、特にレベル 1 ミューオントリガーシステムに関して詳細を述べる。図 3.1 に ATLAS 実験のトリガーシステムの概要を示す。

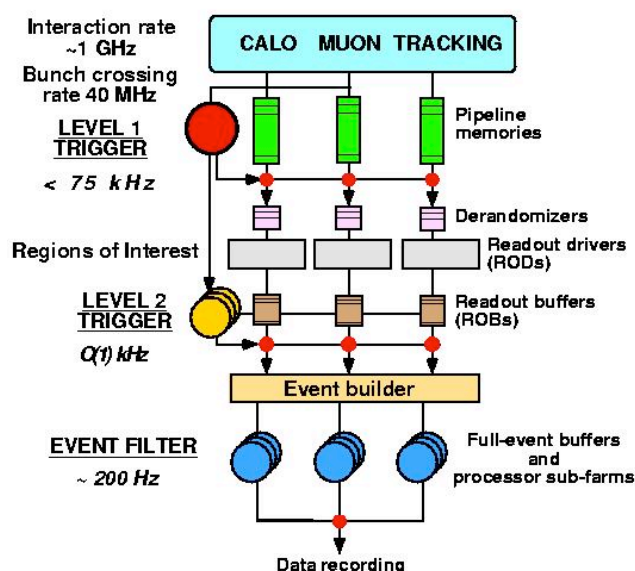


図 3.1: ATLAS 実験におけるトリガーシステム

3.1 トリガーシステム

ATLAS のトリガーシステムは大きく 3 段階に分けられている。この 3 段階のトリガーにより最高ルミノシティ時 $1[\text{GHz}]$ に達するイベントレートを最終的に $400[\text{Hz}]$

程度にまで落とすことが可能となる。以下に各段階のトリガーについての概要を述べる。[8]

3.1.1 レベル1トリガー (LVL1)

レベル1トリガーは全てハードウェア上で処理が行われ、1[GHz]のイベントレートを75[kHz]にまで落とすことを目的としている。図3.2の通りレベル1トリガーの判定にはカロリメータとミュオンスペクトロメータ (RPC、TGC) の情報が用いられる。その情報の中から各トリガーに設定された閾値を超えたもののみが Central Trigger Processor(CTP) に送られ最終的なレベル1トリガーの判定を行う。レベル1トリガーをパスした場合、Region of Interest(RoI) と呼ばれる粒子の大まかな位置情報と粒子の p_T 情報がレベル2トリガーへ送られる。

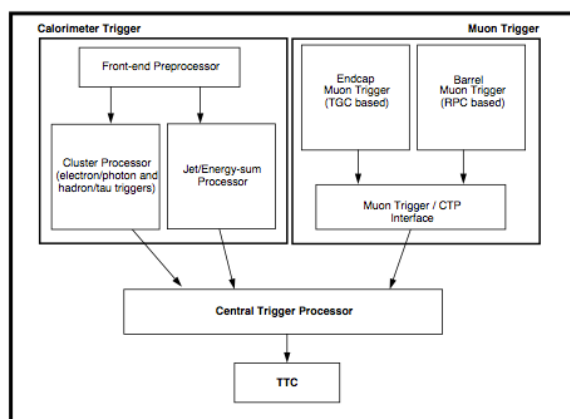


図 3.2: レベル1トリガーの処理の流れ

3.1.2 レベル2トリガー (LVL2)

レベル2トリガーはソフトウェア上で処理が行われ、イベントレートを75[kHz]から6[kHz]に落とすことを目的としている。レベル2トリガーではレベル1で用いることの出来ない内部飛跡検出器で再構成された粒子の飛跡(トラック)情報などを利用し、より精度の高い選別を行う。ミュオントリガーの場合、レベル1から送られてくるRoIの情報を元にその周辺の内部検出器、Monitored Drift Tube(MDT)の情報を用いてトリガーの発行を判断する。RoI付近のみの情報を対象とすることで計算の効率化を図っている。ミュオンスペクトロメータと内部飛跡検出器の情報を統合して得られたミュオンの飛跡を Combined Muon Track と呼ぶ。

3.1.3 イベントフィルター (EF)

イベントフィルターはソフトウェアによって最終的なトリガーを発行し、イベントレートを 400[Hz] まで落とすことを目的としている。イベントフィルターでは全ての検出器の完全な情報を用いて粒子を再構成・識別することでトリガーの発行を判断する。最終的にトリガーをパスしたイベントはオフライン解析のためにデータストレージに書き込まれる。

3.2 レベル1エンドキャップミュオントリガー

レベル1ミュオントリガーは TGC、RPC によって発行されるトリガーでありバレル部を RPC、エンドキャップ部を TGC がそれぞれカバーしている。レベル1ミュオントリガーの役割は高い p_T を持つミュオンの選別である。以下ではミュオントリガーの重要性とともに、レベル1エンドキャップミュオントリガーに用いられる TGC についての概要を述べる。

3.2.1 ミュオントリガーの重要性

陽子同士を衝突させる LHC 加速器では反応の終状態に複数のジェットが観測されるイベントが大多数を占める。このような QCD ジェット事象は ATLAS 実験が目指す新物理探索においては、そのほとんどがバックグラウンドとなる。しかし、第2章で述べたような Higgs 粒子や超対称性粒子に代表される新物理にはその相互作用の終状態としてミュオンなどのレプトン対が含まれる崩壊モードが存在する。この崩壊モードは Higgs 粒子の崩壊モードの中でも QCD ジェット事象バックグラウンドとの区別がしやすいモードである。そのためミュオンをどの程度効率よく観測できているかは実験において重要な指標となる。

またミュオンは陽子衝突の反応後に観測される粒子の中では比較的長寿命であり物質の透過力が高い粒子である。ミュオン以外の粒子のほとんどは内側の検出器等で止められてしまうため、TGC、RPC ではバックグラウンドの少ない環境でミュオンを観測することができる。

以上の理由から ATLAS 実験においてミュオンは観測しやすく、トリガーとしても重要性の高い粒子である。

3.2.2 Thin Gap Chamber(TGC)

TGC は高エネルギー実験ではよく使用される多線式比例係数箱 (Multi Wire Proportional Chamber:MWPC) の1種である。ATLAS 検出器ではエンドキャップ部に

設置され、ミューオントリガーの発行と MDT では測定されない ϕ 方向の位置情報を取得することを目的としている。

3.2.2.1 構造と動作原理

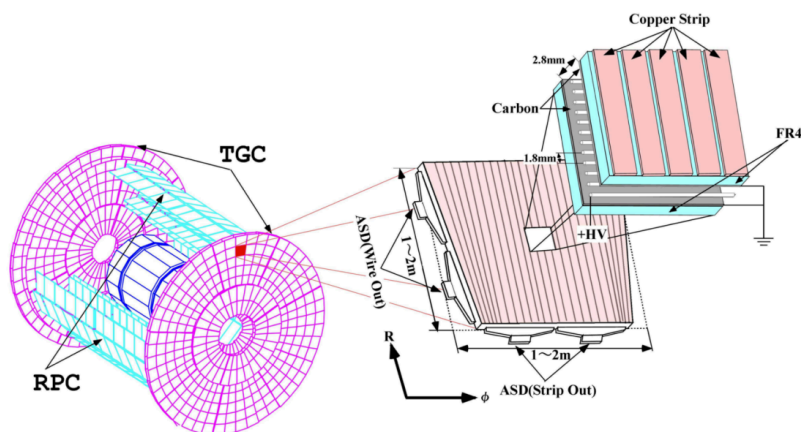


図 3.3: TGC の配置と構造図

図 3.3 は ATLAS 検出器における TGC の配置とその構造を表している。図 3.3 の両サイドの赤い円形部分が TGC を示し、R 方向と ϕ 方向に区切られた 1 つ 1 つが TGC のチェンバーである。

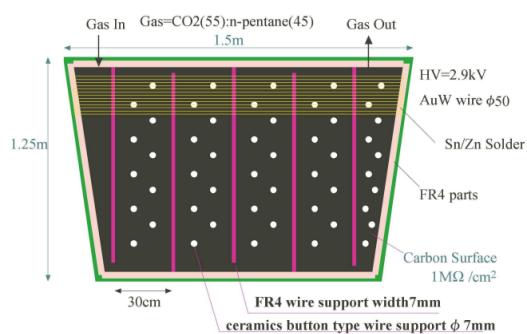


図 3.4: ワイヤーとワイヤーサポート

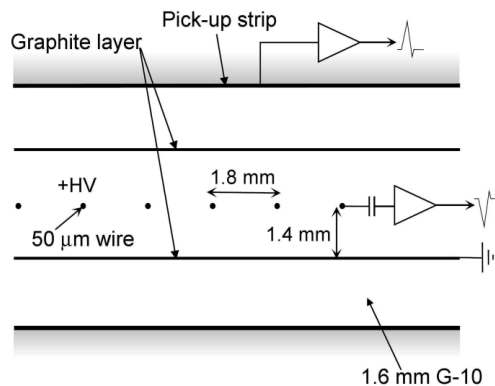


図 3.5: TGC の断面図

チェンバーの断面図を図 3.5 に示す。TGC は 1.6[mm] または 1.8[mm] のガラスエポキシ樹脂を基盤とし、その表面にカーボンを塗布することでカソード面を形成している。アノードワイヤーは直径 50[μm] の金メッキタングステンワイヤーが用いら

れており、ワイヤー間隔を 1.8[mm] と短くすることで LHC の 25[nsec] という短いバンクロッシング間隔に対応出来るように設計されている。ガラスエキボシ樹脂を挟んだ反対の面には銅のストリップがワイヤーに直交するように並べられており、カソード面の電荷により誘起された電荷を信号として読み出す。また、アノードとカソードの間隔は 1.4[mm] と通常の MWPC に比べて狭くなっており、陽イオンが早くカソードに到達する。このことから、TGC は粒子の高レート入射に対して耐性を持つ。

図 3.4 に TGC の R - ϕ 断面図を示す。TGC には 2 種類のスペーサーが入っており、一つはワイヤーのたるみを防ぐためのワイヤーサポート、もう一つはギャップ間隔を一定に保つためのボタン型サポートである。これらのスペーサーは不感領域となるが、TGC を多重構造にする際にこれらの不感領域が重ならないように設計されている。

荷電粒子によって励起状態にある分子が基底状態に戻る時に発生する紫外線によるガス分子の電離や、この紫外線がカソード面に衝突することで発生する電子は、自己放電を引き起こす可能性がある。そこで、クエンチ効果をもつ $\text{CO}_2/\text{n-pentane}(55/45)$ を封入し紫外線を吸収することで放電を抑えている。

ワイヤーは R 方向の位置情報を、ストリップは ϕ 方向の位置情報が得られるように配置される。ワイヤーは 6-20 本をまとめて 1 チャンネルとして読み出し、ストリップは各チャンバーに 32 本刻まれており 1 本が 1 チャンネルとして読み出される。

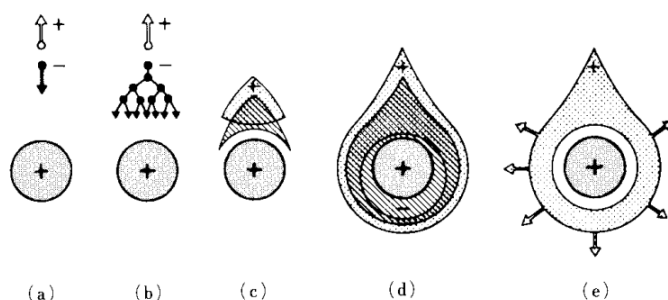


図 3.6: アノードワイヤー近傍でのタウンゼント型電子雪崩の推移

次に TGC の動作原理について簡単に述べる。TGC に入射した荷電粒子はその飛跡に沿ってガス中の分子と多数衝突しイオン化される (図 3.6(a))。電離された電子 (一次電子) は陽極へドリフトしながら印加電圧によって加速され、運動エネルギーを持つ。ここで電子のエネルギーがガス分子の電離エネルギーを超えると、ガス分子をイオン化し二次電子を生成する (図 3.6(b))。二次電子も同様に電場によって加速され、次々と衝突、電離を繰り返してタウンゼント型と呼ばれる電子雪崩を形成する。この過程をガス増幅という。電子とイオン雲はそれぞれドリフトを始め互いに分離 (図 3.6(c))、電子雲はアノードワイヤーを取り囲み (図 3.6(d))、イオン雲はさら

にその周りを取り囲むようにアノードワイヤー半径方向に拡散していく (図 3.6(e))。TGCはこの電子と陽イオンによる誘起電荷をシグナルとしてワイヤー、ストリップから読み出す。

3.2.2.2 TGCの配置

TGCシステムはM1、M2(middle)、M3(pivot)stationとEndcap Inner(EI)、Forward Inner(FI)の5つから構成され、ATLAS検出器の両側のエンドキャップ部において円盤状に配置されている。 $1 < |\eta| < 1.9$ の領域をエンドキャップ、 $1.9 < |\eta| < 2.7$ の領域をフォワードと呼ぶ。

本節ではTGCシステム全体の配置について述べる。

$R-z$ 平面における配置

実際の実験では図 3.7 に示されるように、TGCは2層または3層に重ねて配置されている。2層構造のTGCをDoublet、3層構造をTripletと呼ぶ。Doubletはワイヤー、ストリップ各2層の読み出しを行い、Tripletの場合は2層目のストリップがなくワイヤー3層とストリップ2層で読み出しを行う。またこのTGCの各層は衝突点側からlayer1,2,3と呼ばれる。図 3.8 は $R-z$ 平面におけるTGCの断面図を表しており、衝突点側からM1(Triplet)、M2(Doublet)、M3(Doublet)の3ステーション、計7層のTGCが配置されている。さらに $z = 7000$ [mm] 付近にEI、FIが設置されている。

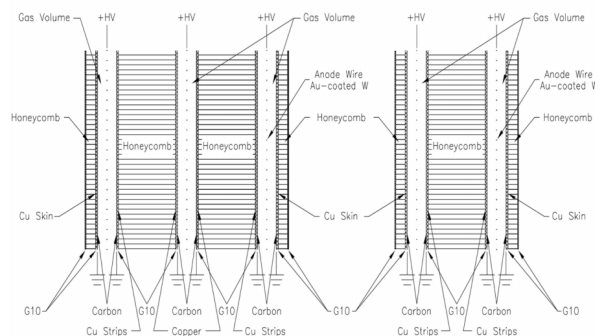


図 3.7: Doublet と Triplet の構造

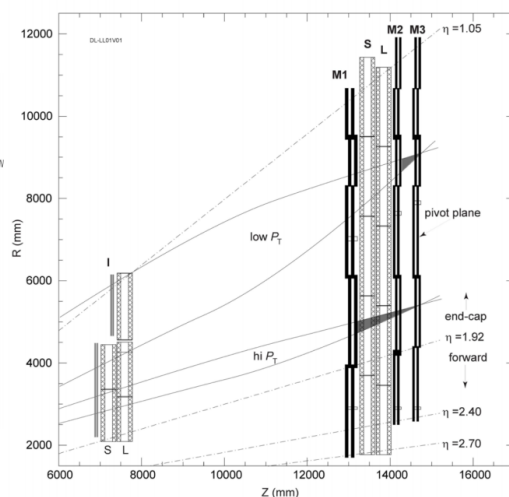


図 3.8: TGC の $R-z$ 断面における全体図

R- ϕ 平面における配置

図 3.9 に TGC の 1/12 セクターの配置を示す。この図は R- ϕ 平面での TGC を表したものであり、線で区切られた 1 つ 1 つがチェンバーに相当する。M3 の場合、R 方向に T1, T5, T6, T7, T8, T9 と呼ばれるチェンバーが並び、フォワード部では ϕ 方向に 2 列、エンドキャップ部では 4 列ずつ配置される。ATLAS 検出器ではこの 1/12 セクターが円盤状に配置されおり、その全体像を図 3.10 に示す。また図 3.10 で青く示された領域をトリガーセクターと呼び、 $\phi = 0$ に位置するチェンバーから順にエンドキャップ部では 1-48、フォワード部で 1-24 のセクター番号が割り振られている。さらに図 3.10 で黄色で示された領域が RoI に対応するサブセクターというトリガーの最小単位である。図 3.11 はサブセクターのナンバリングを表しており、エンドキャップ部で 0-147、フォワード部では 0-63 のサブセクター番号が割り振られている。ATLAS 実験に設置されている TGC の総数は約 3700 枚あり、全チャンネル数は R 方向で約 22 万、 ϕ 方向で約 10 万にも及ぶ。

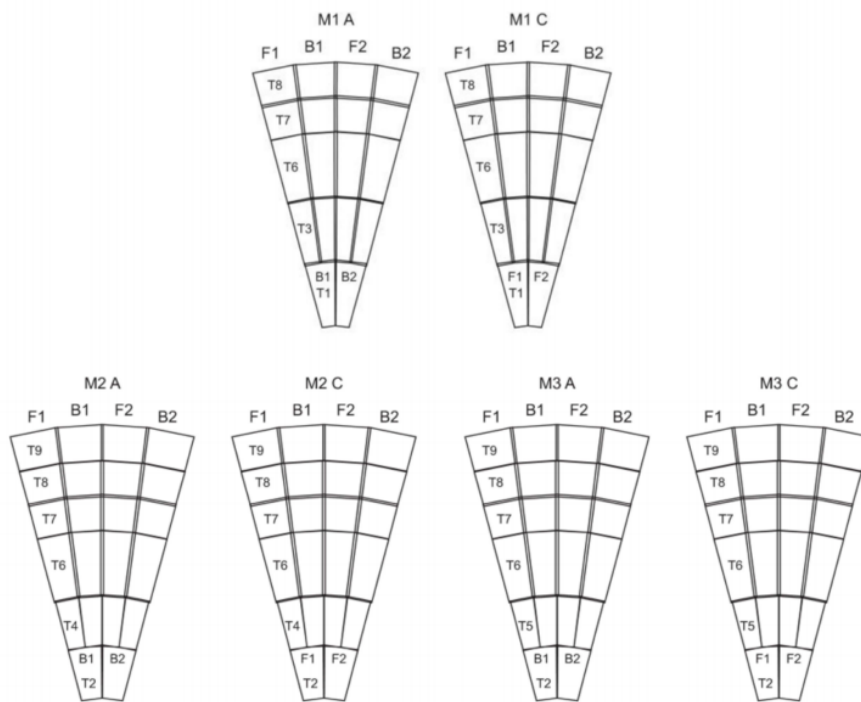


図 3.9: TGC 1/12 セクター

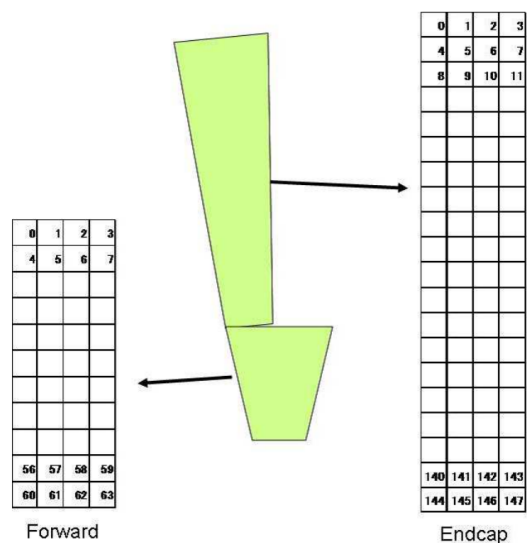
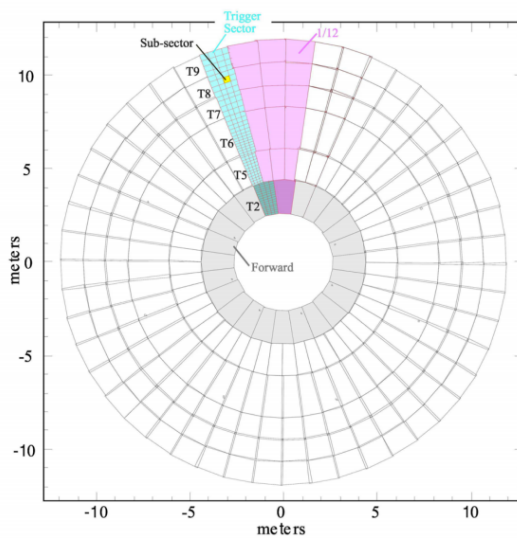


図 3.10: TGC の $R - \phi$ 断面図 (M3) 図 3.11: TGC のサブセクターナンバリング

3.2.3 TGC システムの読み出し構造

TGC エレクトロニクスの概要を図 3.12 に示す。TGC システムの読み出しにはトリガー系 (図 3.12(赤線)) とリードアウト系 (図 3.12(青線)) があり、以下でそれぞれの読み出しについて簡単に述べる。

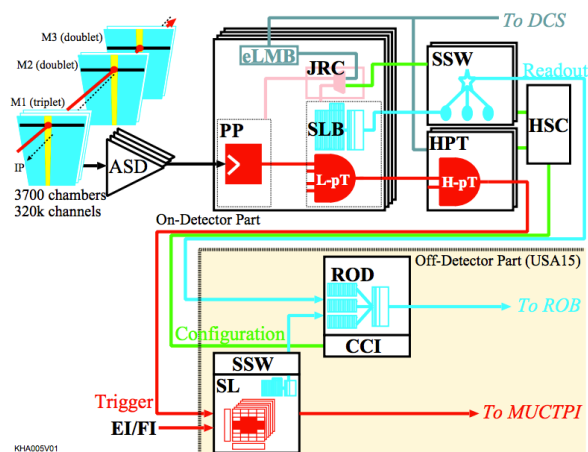


図 3.12: TGC エレクトロニクスの概要

3.2.3.1 トリガー系の読み出し

トリガー系では Amplifier Shaper Discriminator Board(ASD)、Patch Panel ASIC(PP ASIC)、Slave Board ASIC(SLB ASIC)、High-Pt Board(HPT)、Sector Logic(SL)の順に信号が処理される。TGC から出力されるアナログ信号は ASD に送られ、増幅、整形、デジタル化が行われ LVDS 信号で PP に送られる。PP では各チャンネルへ粒子が到着するまでの飛行時間 (Time Of Flight:TOF) やケーブル遅延などから生じるタイミングのズレを調整し、バンチ識別 (信号を LHC クロックに同期させる) を行う。SLB は PP からの情報を受け取り、M2、M3 の計 4 層からの信号を元にコインシデンス処理 (4 層中 3 層以上での検出を要求) が行われ low- p_T トリガーの判定が行われる。また M1 からの信号についてもコインシデンス処理 (ワイヤー:3 層中 2 層以上、ストリップ:2 層中 1 層以上) が行われる。HPT では SLB での M1 と M2、M3 のコインシデンス処理の結果を元に、High- p_T コインシデンス情報が生成される。SL ではここまで独立して扱われていたワイヤーとストリップの情報を統合しコインシデンス処理が行われる。そして TGC のトリガー系の最終的な情報として p_T の大きな 2 つのトラックをトリガーセクター毎に選別する。この結果は Muon CTP Interface(MuCTPI) に送られ、バレル部のトリガーを担う RPC の情報と共にミュオンの最終的なトリガー判定に用いられる。

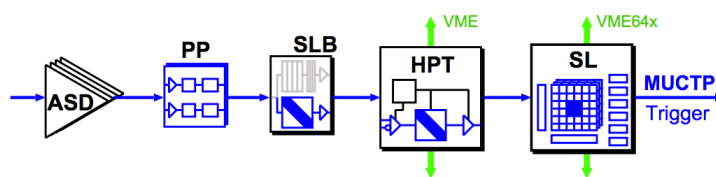


図 3.13: トリガー系のデータフロー概略図

3.2.3.2 リードアウト系の読み出し

PP から送られてきたデータは、SLB 中にある LVL1 バッファに蓄えられる。このバッファの保持時間は $2.5[\mu\text{sec}]$ である。蓄えられたデータの内 L1A (トリガー判定) 信号を受けたデータのみが Star Switch(SSW) へと送られ、SSW でデータの圧縮、規定フォーマットへの変換が行われる。また、トリガー情報 (コインシデンス処理の結果) は SL に搭載された SLB から同様に SSW へ送られる。SSW で変換されたデータは Read Out Driver(ROD) に送られ、Time Transfer Control(TTC) の情報との整合性が確認される。データが正しければ、要求されるフォーマットへ変換し Read Out Buffer(ROB) へ送られる。ROD では最大 10 個の SSW からの情報を収集する。

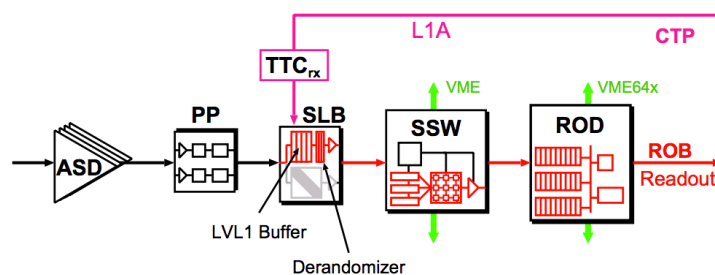


図 3.14: リードアウト系のデータフロー概略図

3.2.3.3 TGC エレクトロニクス

トリガー系、リードアウト系の読み出しに用いられる各モジュールについて概要を述べる。

Amplifier Shaper Discriminator Board(ASD)

ASD Board は TGC の側面に設置され 4 チャンネル分の処理を行う ASD ASIC が 4 つ搭載されており、1 つのボードにつき計 16 チャンネルを処理する。ASD ASIC は TGC からのアナログ信号を増幅、整形し閾値電圧を超えた信号のみを Low Voltage Differential Signal(LVDS:低電圧作動信号) レベルで出力する。また、ASD Board 以降のエレクトロニクスの動作確認やタイミング調整のため、TGC のダミー信号を出力する機能を持っている。

Patch Panel ASIC(PP)

ASD から送られてくる信号の TOF やケーブル遅延によるタイミングのズレを調整し、バンチ識別を行う。さらに TGC の重なった領域でのダブルカウントを防ぐため、その領域に対しては OR ロジックを通して信号を出力する。PP は 1 つで 32 チャンネルの信号を処理する。また、ASD Board に向けてテスト信号を発生させるための回路を搭載している。

Slave Board ASIC(SLB)

SLB は大きく分けてトリガー部をリードアウト部からなる。

トリガー部では TGC からの入力信号に対して、コインシデンス処理 ($low-p_T$) を行う。SLB の段階ではワイヤーとストリップ、Doublet と Triplet をそれぞれ別に扱うため、5 種類のコインシデンス処理 (Wire Doublet、Strip Doublet、Wire Triplet、Strip Triplet、EI/FI) を設定できる。Doublet ではワイヤー、ストリップ共に M2、M3 からの信号を用い、4 層中 3 層以上の検出を要求する。そして M3 を基準にして

M2 上でのワイヤー、ストリップ方向の無限運動量の飛跡のズレを計算し $\text{low-}p_T$ 判定を行う。Triplet ではワイヤーで3層中2層以上、ストリップで2層中1層以上での検出が要求される。また、トリガー部にはPPからの信号に $1/2\text{clock}$ 単位で遅延をかける機能、各チャンネルのマスク機能、連続したチャンネルからの入力信号があった場合に出力信号を1つのみに絞込む(デクラスタリング)機能、さらにSLB ASIC以降のエレクトロニクス動作確認やタイミング調整を行うためのテスト信号を出力する機能を持つ。

リードアウト部はLVL1トリガーの判定を受けたデータの読み出しを行う。データはCTPからのL1Aが与えられるまで保持され、L1Aが与えられると該当データとその前後1バンチずつの計3バンチ分のデータをSSWに送る。

High-Pt Board(HPT)

SLBまで独立に処理されてきたM1、M2とM3のデータを統合してHPTコインシデンス情報を生成する。M1はM2、M3間の間隔よりも離れた位置に設置されているため、M1の情報を用いることで磁場によってあまり曲げられなかった p_T の大きなミュオンを選別できる。HPTではワイヤーとストリップは独立して処理され、最終的なミュオンの p_T 判定に用いる δR 、 $\delta\phi$ を出力する。ただしHPTでコインシデンスがとれなかった場合、SLBのコインシデンス処理の結果($\text{low-}p_T$)が代わりに出力される。出力データは光ファイバーによって90-100[m]離れた実験室外のカウンティングルーム(USA15)にあるSLへ送信される。HPT ASICはエンドキャップ部用に4つ、フォワード部用に3つ搭載されている。

Sector Logic(SL)

TGCエレクトロニクスシステムにおけるトリガーのデータが最終的に集められるモジュールであり、2トリガーセクター分の信号を処理する。SLは主に $R-\phi$ コインシデンス、プレトラックセクター、ファイナルトラックセクターから構成される。

$R-\phi$ コインシデンスではHPTまで独立に処理されてきた R 方向(ワイヤー)と ϕ 方向(ストリップ)の信号のコインシデンス($R-\phi$ コインシデンス)を取ることで、6段階の p_T 閾値でミュオンを分類する。 p_T 判定には各閾値に対応したCoincidence Windowと呼ばれる参照表(Look Up Table:LUT)が用いられる。LUTとは入力信号の取りうる全てのパターンに対応した出力を予めメモリ内に格納し、入力信号をインデックスとしてメモリ内容を参照することで結果を得る方式である。このLUTが用いられる理由は、ミュオンの p_T を導きだす回路を組む場合、磁場の不均一性や検出器内部の構造物の影響などを考慮しなければならず演算が複雑になりレベル1の処理時間内に取まらないためである。また、LUTは実験状況に応じて随時対応できるように書き換え可能な集積回路によって実装されている。プレセクターで

は各閾値毎で p_T の大きい順に2つのトラックを選び、計12トラックがファイナルトラックセレクターに送られる。ファイナルトラックセレクターではプレトラックセレクターから送られた1トリガーセクター分から p_T の大きいものを2つ選択し、それらに対する6段階の p_T 判定と位置情報を MuCTPI に送る。SL が処理に使用した HPT からのデータと SL での処理の結果は USA15 に設置された SSW に送られる。

Star Switch(SSW)

SLB ASIC のリードアウト情報を収集、圧縮し、規定のフォーマットへ整形し ROD へ出力する。1つの SSW で最大23個の SLB ASIC のデータを受け取る。

Read out Driver Board(ROD)

TGC エレクトロニクスシステムにおけるリードアウトのデータが最終的に集められるモジュールであり、複数の SSW からのデータをトリガー情報を元に同じイベント毎にまとめ ROB に送る。

3.2.4 TGC トリガーシステム

TGC で発行されるレベル1 ミューオントリガーでは、検出されたミューオンの p_T を元にトリガー判定を行う。この p_T はミューオンの磁場による曲がりから概算される。本章では p_T の概算方法、トリガー判定について述べる。

3.2.4.1 横方向運動量 (p_T) の概算方法

陽子衝突により発生したミューオンはトロイド磁場によって曲げられた後、TGC の各層で検出される。最外層の TGC(M3:pivot) での検出点と陽子の衝突点を直線で結んだものを無限運動量をもつミューオンのトラック (図 3.15(青線)) と仮定する。M1、M2 での検出点と無限運動量トラックの通過点の差を R 、 ϕ 両方向について測定し、 δR 、 $\delta\phi$ を決定する。この δR 、 $\delta\phi$ を用いて p_T を概算する。

M1、M2 ではそれぞれ δR 、 $\delta\phi$ の絶対値に上限が設定されている。この上限の δR 、 $\delta\phi$ で形成される領域はウィンドウと呼ばれ、M1、M2 共に p_T が 6[GeV] 以上のミューオンがほぼ通過できる範囲に設定されている。

図 3.16 に実際のトリガー判定の流れを示す。まず M2、M3 のヒット情報に対して R 方向、 ϕ 方向別々にコインシデンス処理が施され low- p_T 判定が行われる (2-station コインシデンス)。low- p_T 判定をパスした場合、さらに M1 のヒット情報を加えてコインシデンス処理が施され high- p_T 判定が行われる (3-station コインシデンス)。最後にこれまで独立で処理されてきた R 方向、 ϕ 方向それぞれの情報が統合される。こ

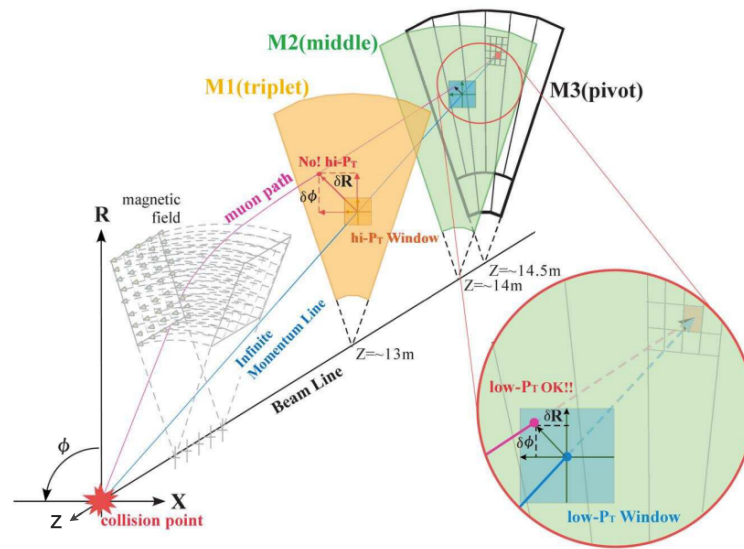


図 3.15: p_T 概算方法の模式図

の $R-\phi$ コインシデンス情報 ($\delta R, \delta\phi$) を用いて Coincidence Window (CW) と呼ばれる Look-up Table を参照することでトリガーの発行を判断する。また、low- p_T トリガーが設定されている場合、high- p_T 判定をパスしない場合でも M2 での $\delta R, \delta\phi$ 情報を用いて low- p_T トリガー用 CW を参照することでトリガーの発行が判断される。このように TGC の多層構造を利用した段階的なコインシデンス処理を行うことで、バックグラウンドによる偶発的なヒットの影響を抑えている。

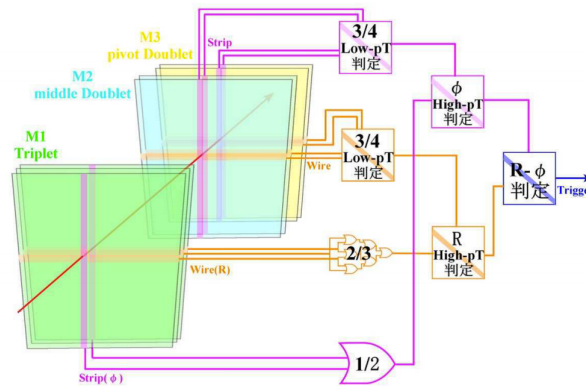


図 3.16: TGC トリガーの判定方法

第4章 レベル1ミュオントリガー

本章ではレベル1ミュオントリガーの説明とその評価方法について述べる。まずレベル1ミュオントリガーで実際に発行されるトリガーマニューの説明を行い、次にそのトリガーの評価に用いられるトリガー効率とトリガーレートの2つの手法について解説する。

4.1 トリガーマニュー

LVL1で発行されるトリガーのうち、TGCなどのミュオンスペクトロメータで発行されるものがレベル1ミュオントリガーである。以下にレベル1ミュオントリガーの現行のトリガーマニューを示す。6つのトリガーマニューが準備されているが、3番目のトリガーは現在使用されていない。

トリガーマニュー	L1_MU4'	L1_MU6	NA	L1_MU10	L1_MU15	L1_MU20
----------	---------	--------	----	---------	---------	---------

表 4.1: トリガーマニュー

TGCではCoincidence Window(CW)に従って上記いずれかのトリガーが発行される。各トリガーマニューの数字は概算されたミュオンの p_T を表しており、L1MU20の場合は p_T が20[GeV/c]以上のミュオンが通過したとLVL1で認識されたことを意味する。上記のトリガーは全て3-staion コインシデンスが取れたトラックに対して発行されるが、L1_MU0というトリガーでは2-staion コインシデンスのトラックにも発行される。このL1_MU0が発行されたイベントのうち、3-staion コインシデンスが取れたトラックはL1_MU4という別のトリガー名を与えることで使い分けられている。また、TGCのある領域のみではL1_MU4の3-staion コインシデンストリガーが発行され、それ以外ではL1_MU0の2-staion コインシデンストリガーが発行されるL1_MU4'というトリガーも準備されている

上記のトリガーマニューは三段階のトリガーシステムをパスしたイベントに対して初めて付与される。SLで処理が行われている段階、つまりCWを参照した際に得られる結果にはこの名称でなくPT1-6という名称が与えられている。このPTの右の数字はトリガーマニューの数字と同様にミュオンの p_T との対応関係(表4.2)が

あり、PT1の場合は p_T が4[GeV/c]以上であることを表している。また、現在PT3は使用されていないので省略する。

名称	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6
p_T [GeV/c]	4	6	NA	10	15	20

表 4.2: CW で使用される閾値

例としてPT6がSLで発行された場合は、ミューオンの p_T が20[GeV/c]以上なので、最終的なトリガー情報にはL1_MU4'からL1_MU20までのトリガー全てが発行される。

4.2 トリガーパフォーマンス

レベル1 ミューオントリガーのパフォーマンスはトリガー効率とトリガーレートの2点に注目し評価する。以下ではその2点についての定義と測定手法について説明する。

4.2.1 トリガー効率

TGC レベル1 トリガー効率は以下の式で定義する。

$$\text{TGC レベル1 トリガー効率} = \frac{\text{レベル1 トリガーが発行されたミューオンの数}}{\text{TGCに入射したミューオンの数}}$$

トリガー効率は $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントを使った Tag-and-Probe 法を用いて測定する。

$Z \rightarrow \mu\mu$ Tag and Probe 法

Tag and Probe 法とは粒子のダイミューオン崩壊を利用し、イベントトリガーとは独立なミューオンサンプルを選ぶことで、データからトリガー効率の計算を可能にする手法である。特に $Z \rightarrow \mu\mu$ (図 4.1) イベントを用いることで、比較的 p_T の高いミューオンを選別することが出来る。

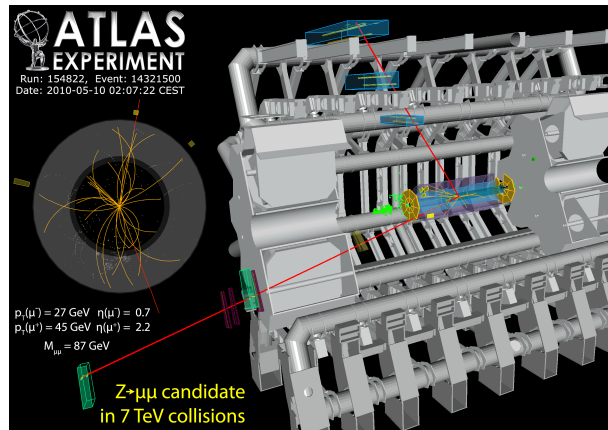


図 4.1: Z boson の崩壊によるダイミュオンイベントディスプレイ [5]

以下に $Z \rightarrow \mu\mu$ Tag and Probe 法の手順を示す。

1. Z boson mass(m_z) の再構成

まず、一つの衝突事象内に Combined Muon Track(ミュオンスペクトロメータ、内部飛跡検出器の情報を結合して得られるミュオントラック:CB muon)が2つ以上あるイベントを選び出す。その中で、異符号の電荷を持つ2つのCB Muonを選び出し不変質量を算出する。この算出した不変質量 $m_{\mu\mu}$ と Z の質量 m_z が、 $-10[\text{GeV}/c^2] \leq m_z - m_{\mu\mu} \leq 10[\text{GeV}/c^2]$ を満たしていれば、そのペアは Z の崩壊から発生したミュオンであるとみなす。

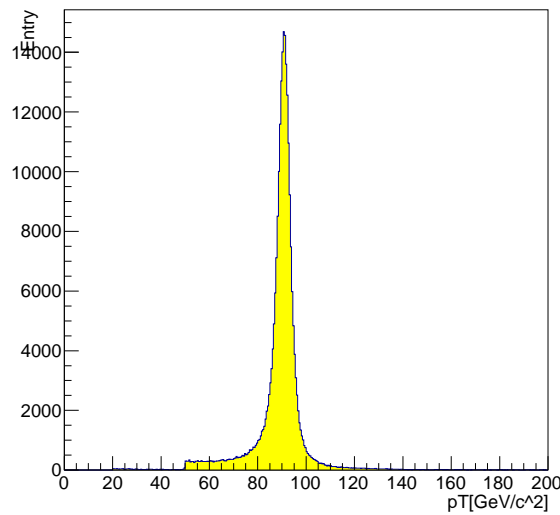


図 4.2: $m_{\mu\mu}$ 分布

2. Tag muon

2つの CB muon のうち任意の片方を選び、この CB muon の衝突点での運動量方向を η_μ, ϕ_μ と表す。また、このイベントに含まれる EF で再構成された combined track の運動量方向を η_{EF}, ϕ_{EF} と表す。 $\Delta\eta = \eta_\mu - \eta_{EF}$ 、 $\Delta\phi = \phi_\mu - \phi_{EF}$ とし、以下の式で定義された ΔR を計算する。

$$\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$$

$\Delta R \leq 0.008$ を満たした場合、この CB muon に対し EF トリガーが発行されていると判断し Tag muon とする。EF トリガーが発行されていれば、同イベント内に含まれる他の CB muon は発行されているトリガーに関係なく保存される。そのため、Tag muon と対となるもう一方の CB muon はイベントトリガーとは独立なミュオンサンプルだといえる。

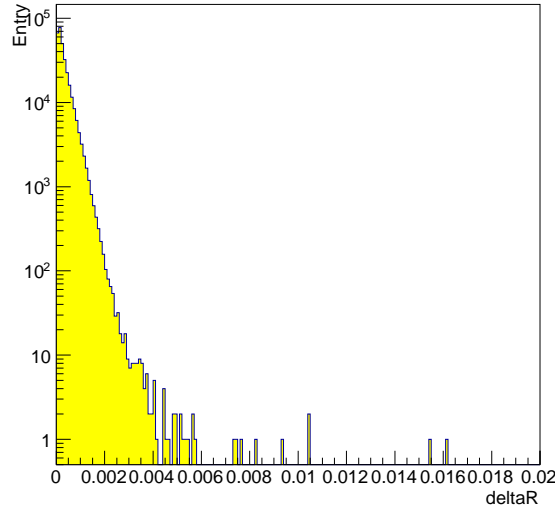


図 4.3: Tag muon の ΔR 分布

3. Probe muon

不変質量を組んだペアのもう一方を Probe muon と呼ぶ。この Probe Muon が TGC の方向 ($1.05 \leq |\eta| \leq 2.42$) を向いていれば分母 (TGC に入射したミュオンの数) に加える。さらに、Probe Muon に対して LVL1 トリガーが発行されている RoI との距離を計算する。RoI の場所を η_{RoI}, ϕ_{RoI} と表す。 $\Delta\eta = \eta_\mu - \eta_{RoI}$ 、 $\Delta\phi = \phi_\mu - \phi_{RoI}$ として ΔR を計算し、 $\Delta R \leq 0.2$ を満たした場合分子 (レベル 1 トリガーが発行されたミュオンの数) に加える。

以上のようにデータからミュオンを選び出し TGC レベル 1 トリガー効率を算出する。

4.2.2 トリガーレート

トリガーレートは単位時間あたりにレベル1の各トリガーが発行される回数を表す。トリガーレートは実際に適用されているCWに対してのみ計測できる。そのため、別のCWのトリガーレートを見積もる場合は、実際にATLAS検出器で計測されたデータからレベル1ミューオントリガーのRoI、 ΔR 、 $\Delta\phi$ 情報を引き出しどのトリガーを発行するかをカウントする。こうすることで、別のCWを適用した場合に実際のトリガーレートからどの程度レートが減るかを見積もることが出来る。

4.3 2011年度7TeV衝突における性能評価

取得された全てのデータが解析に使用されるわけではなく、Data Quality Monitoringという枠組みの中で検出器の運転状況が良好であると判断されたイベントのみが解析に用いられる。最終的に解析に使用されるデータの集まりをGood Run List(GRL)と呼ぶ。2011年度のrunでは、Peak Luminosity= $3 \times 10^{33}[\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}]$ に達し、GRLのデータはIntegrated Luminosity= $4.74[\text{fb}^{-1}]$ になった。このデータを使用して、2011年度におけるTGCのトリガーパフォーマンスを以下に示す。

図4.4にPT6のトリガー効率を p_T の関数で示す。

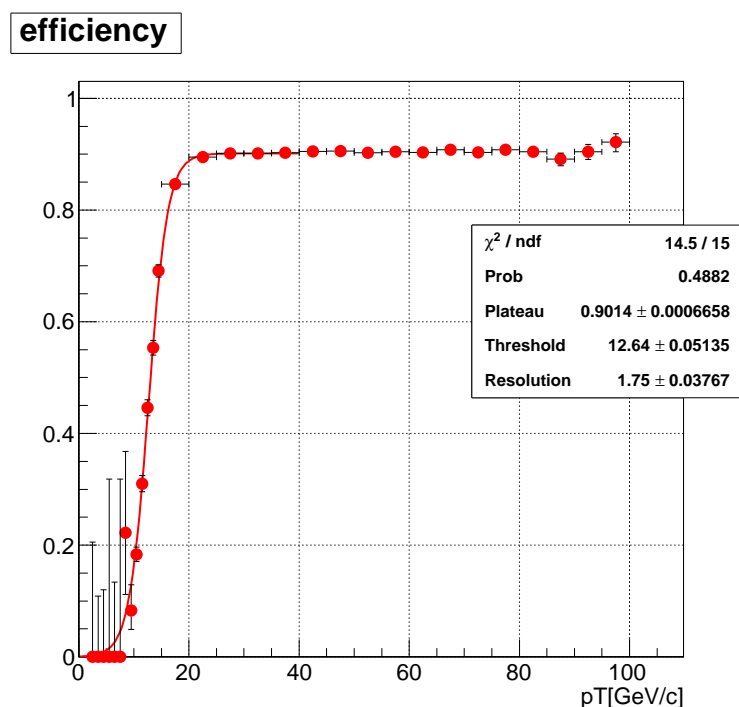


図 4.4: PT6 のトリガー効率

また、トリガー効率を以下で定義されたフェルミ関数によってフィットする。

$$F(p_T) = \frac{A_p}{1 + \exp(\frac{1}{C_R}(p_T - B_T))}$$

(A_p : Plateau efficiency, B_T : Threshold, C_R : Resolution)

ここで Plateau efficiency は十分に立ち上がった部分 (図 4.4 の場合、 $p_T \geq 20[\text{GeV}]$) のトリガー効率、Resolution は立ち上がりの鋭さを表す。理想的には、L1_MU20 のトリガー効率を p_T の関数で図示した場合、 $p_T=20[\text{GeV}]$ を境とした階段関数になる。しかし、検出器の分解能や後述する TGC の設置位置の影響などで実際は図 4.4 のように緩やかなカーブを描きながら立ち上がる。表 4.3 に各トリガーの Plateau efficiency を示す。

トリガー	L1_MU4'	L1_MU6	L1_MU10	L1_MU15	L1_MU20
Efficiency[%]	95.42±0.04	91.65±0.06	91.27±0.06	90.68±0.06	90.14±0.07

表 4.3: 各トリガーの Plateau efficiency

次に、各トリガーにおけるトリガーレートを表 4.4 に示す。また、2011 年に予測されていた 2012 年の run における各トリガーレートも同じく示す。2012 年度の run では peak Luminosity が当時のおよそ 2.7 倍まで到達すると見込まれており、重心系エネルギーが 8[TeV] に上がることも含めるとトリガーレートはさらに増大すると考えられていた。LVL1 を通過するまでにトリガーレートは 75[kHz] まで落とされる。

トリガー	L1_MU10	L1_MU15	L1_MU20
トリガーレート (2011)[Hz]	8.2	4.4	3.2
トリガーレート (2012)[Hz]	22.1	11.9	8.6

表 4.4: トリガーレート [?]

そのうちシングルミュオントリガーはおよそ 15[kHz] が想定されている。表 4.4 にあるように 2011 年度の run に使用された CW のままだと 2012 年の run では各トリガーレートが逼迫してしまうため、トリガーレートを抑えた CW を開発する必要があった。

第5章 Coincidence Windowの作成と改良

第3章で述べたように、レベル1 ミューオントリガーの発行には Coincidence Window(CW) と呼ばれる Look-up Table が用いられる。本章ではまずこの CW について述べ、その後作成方法や 2012 年度の run 用に作成された CW の改良点について説明する。

5.1 Coincidence Window(CW)

CW は SL に実装され、HPT から送られてくるミューオントラックの検出位置と磁場による曲がり具合 (ΔR 、 $\Delta\phi$) の情報を用いて p_T を判定するために用いられる。

図 5.2 は CW の一例で ΔR 、 $\Delta\phi$ と PT の対応関係を表している。図 5.2 で $\Delta R=+1$ 、 $\Delta\phi=+1$ が測定された場合、赤色の PT6(トリガーマニューでは L1_MU20) が発行され、観測されたミューオンの p_T が 20[GeV] 以上であると判断される。

表 5.1 に 3-station コインシデンス、2-station コインシデンスにおける ΔR 、 $\Delta\phi$ の範囲を示す。各 RoI に (ΔR : 3-station or 2-station) \times ($\Delta\phi$: 3station or 2station) で計 4 つの CW が設定されている。本研究では ΔR 、 $\Delta\phi$ 共に 3-station コインシデンスでの範囲の CW に対する改良を行ったため、以後 CW という場合はこの 3-station コインシデンス用の CW を指すこととする。

	ΔR	$\Delta\phi$
3-station コインシデンス	-15-+15	-7-+7
2-station コインシデンス	-7-+7	-3-+3

表 5.1: ΔR 、 $\Delta\phi$ の範囲

TGC では本来、無限運動量を持つミューオンの飛跡が ΔR 、 $\Delta\phi=0$ の点に対応するように設計されていた。しかし、その後磁場シールドを追加し TGC を衝突点から遠ざかる方向に移動したため、無限運動量を持つミューオンの飛跡の ΔR は各 RoI 毎で異なった値を持つようになっている。これは ΔR を計算する際に実際の距離で

なくチャンネル番号の差から計算するためである。また、無限運動量を持つミュオンの飛跡の $\Delta\phi$ に関しては、読み出しの都合により $\Delta\phi=+1$ になっている。

CW に対応する RoI の数はトリガーセクター 1 つあたり Endcap 領域で 148 個、Forward 領域で 64 個ある。ATLAS 検出器 Endcap 領域のトロイド磁場は 8 つのコイルによって形成されているため、基本的に磁場は八回対称になっている。一つの 1/8 円 (Octant) は Endcap 領域でトリガーセクター 6 つ分、Forward 領域では 3 つ分に相当する (図 5.1)。この Octant を基準とし計 1080 個の RoI に対してそれぞれ固有の CW を作成する。

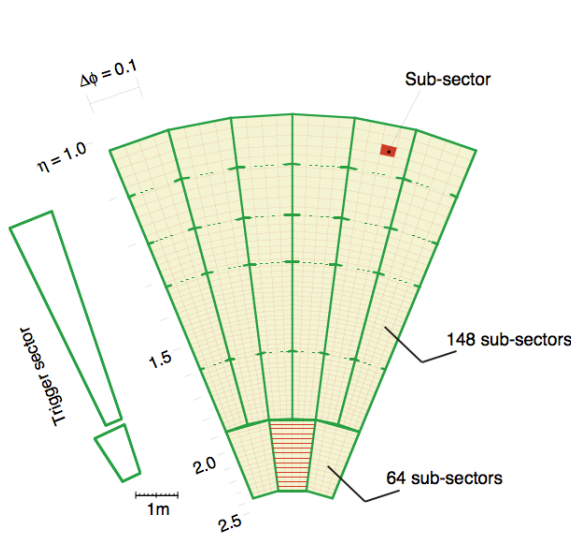


図 5.1: TGC Octant

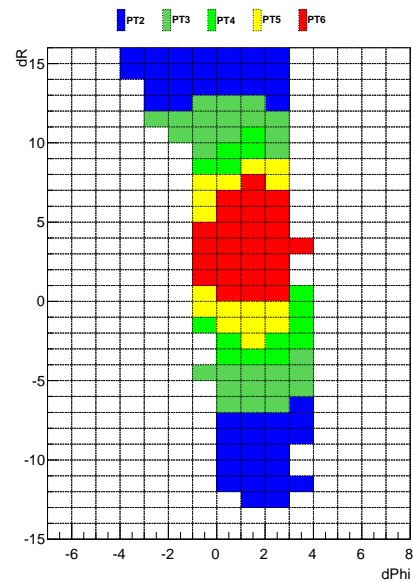


図 5.2: Coincidence Window の例

5.2 作成方法

実際の検出器では磁場や構造物などの様々な要素を考慮する必要があるため、CW を数式によって計算・作成することは不可能である。そこで、衝突点から飛来するミュオンに対する検出器、トリガーロジックの挙動をシミュレーションし、ミュオンの持つ p_T と各 RoI における ΔR 、 $\Delta\phi$ の対応を調べることで CW を作成する。以下に、トリガーシミュレーションの仕組みと CW の作成方法を述べる。

5.2.1 トリガーシミュレーション

ATLASにおけるデータの処理、解析は Athena と呼ばれるフレームワークに従って行われる。図5.3は Athena の処理の流れを表しており、四角いオレンジのブロックが Athena で行われる処理、青い楕円が生成されるデータフォーマットを表す。Event Summary Data(ESD)、Analysis Object Data(AOD) という実際に解析に用いる段階でのデータではデータとシミュレーションの結果が同じ形式で生成されるようになっている。以下で Athena によるシミュレーションの流れを説明する。

Generation(イベント生成)

理論により再現された陽子陽子衝突で起こる物理事象をモデル化し、モンテカルロシミュレーションを用いて再現する。目的のサンプルにあわせて生成粒子、電荷、運動量などのパラメータを設定することができる。生成されるデータフォーマットを HepMC と呼ぶ。

Simulation(検出器シミュレーション)

Geant4 というシミュレータを用いて測定器の詳細な形状と磁場分布に応じて粒子がどのような飛跡をたどるかを再現する。Generation で生成された事象情報を受取り、衝突点付近から発生した粒子の測定器や構造体中での相互作用をシミュレートし、粒子の飛跡を決定する。ミュオンが検出器の有感領域に作ったヒットは時間、位置、エネルギー損失などが記録される。生成されるフォーマットを Hits と呼ぶ。

Digitization(デジタル化)

粒子の通過時刻、位置、エネルギー損失の情報から実際の検出器信号をシミュレートする。このとき検出器の検出効率や、粒子の入射角度による信号の時間差などが考慮される。この過程を経て、シミュレーションは ATLAS 検出器による実際のデータと等価な情報になる。ここで生成されるフォーマットを Digits と呼ぶ。

Reconstruction(再構成)

シミュレーションによる Digits、もしくはデータに従ってトラックやクラスターを再構成し粒子識別を行う。その結果を解析用のフォーマットとして ESD、もしくはより物理情報を集約した AOD に保存する。

実際は ESD もしくは AOD をさらに Ntuple というフォーマットに変換して解析を行う。Ntuple は ROOT という解析ソフトウェアで読み込めるフォーマットであり、目的の物理事象に合わせて様々な形式の Ntuple が準備されている。本論文では TGC のヒット情報やミュオンの情報など TGC に関する情報が多く保存されている NTUP_L1TGC という Ntuple を使用した。この NTUP_L1TGC にはミュオンの運動量、コインシデンスの取れたサブセクター、 ΔR 、 $\Delta\phi$ などの情報がイベント毎に保存されており、これらを用いて CW を作成する。

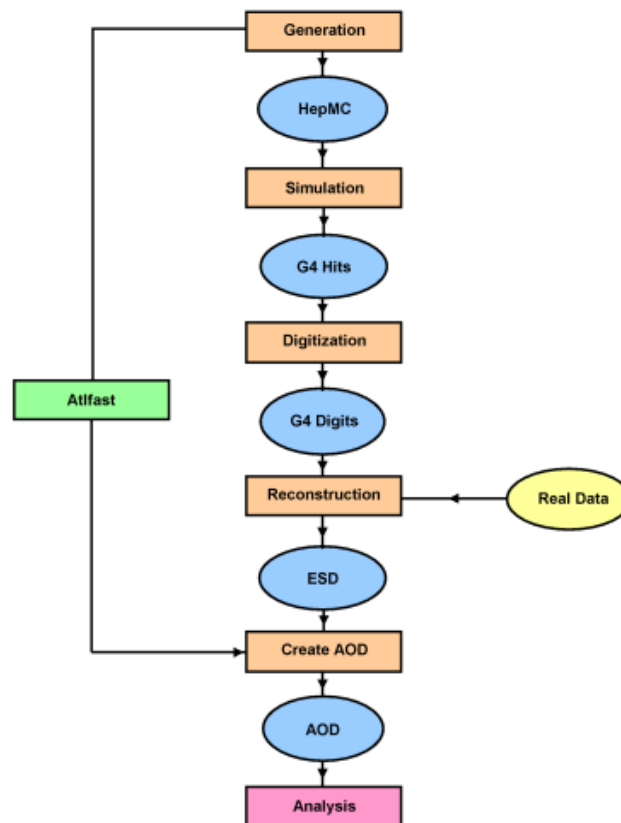


図 5.3: シミュレーションの流れ

5.2.2 Coincidence Window の作成

本節ではトリガーシミュレーションで得られた結果から CW を作成する流れを説明する。

1.HitMap の作成

電荷、 p_T 毎にシングルミュオンイベントを生成し、検出器の応答をシミュレートする。得られた結果から、各 p_T 、各 RoI 毎に ΔR 、 $\Delta\phi$ の情報を抜き出し、 ΔR - $\Delta\phi$ 分布 (HitMap) を作成する。

図 5.4 は $p_T=40[\text{GeV}]$ のミュオンイベントから作成した HitMap である。単一の p_T を持つイベントのみで HitMap を作成すると、図 5.5 のように閾値毎のウィンドウ間で隙間が出来てしまう。しかし、実際の実験で飛来するミュオンの p_T は連続分布であるためこの隙間を埋める必要がある。そのため、作成する閾値より 1 つ上の閾値をもつイベントを元のイベント数の半分だけ加えて HitMap を作成する。図 5.6 は 1 つ上の閾値を加えて作成した HitMap で、図 5.7 はその HitMap を用いて作成した CW である。また、表 5.2 に各閾値 (PT) と作成に使用したミュオンイベントの p_T の対応関係を示す。

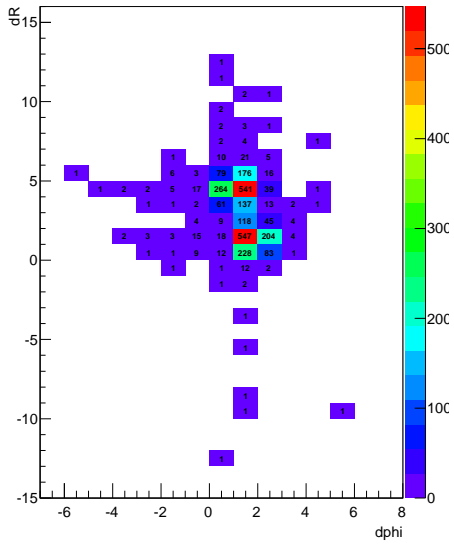


図 5.4: $p_T=40[\text{GeV}]$ のみの HitMap

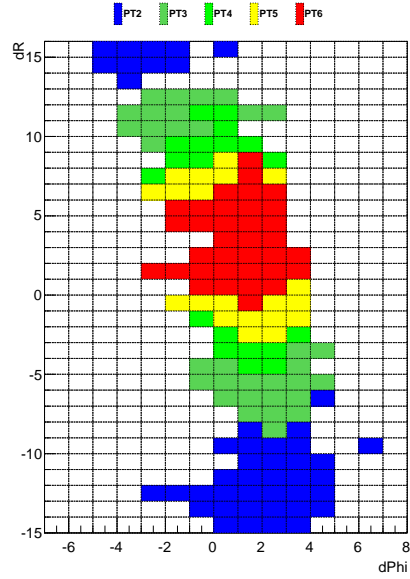


図 5.5: 単一 p_T で作成した CW

$p_T[\text{GeV}]$	NON	6 + 8	10 + 15	15 + 20	20 + 40	40 + 100
閾値	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6

表 5.2: 閾値とミューオンの p_T の関係

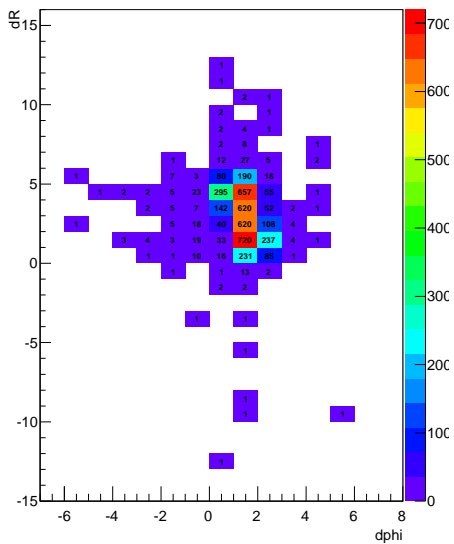


図 5.6: $p_T=40, 100[\text{GeV}]$ の HitMap

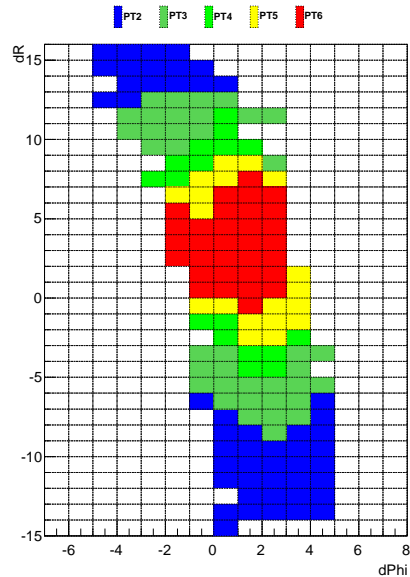


図 5.7: Coincidence Window の例

2. ウィンドウを開く

作成された HitMap を元に、ミュオンのエントリー数の多いセルから順次ウィンドウを開いていく。ここで ΔR 、 $\Delta\phi$ で区切られた 1 マスをセルと呼ぶことにする。この際、開いたセルのエントリーの合計が HitMap 全体のエントリー数に対してある一定の割合に達するまで処理を続ける。この割合は Endcap 領域では 98%、Forward 領域では 95% に設定されている。また、異なる p_T で同じセルが開けられる場合は p_T の高い方を優先し、低い p_T は開かない。これは高い p_T を持つミュオンに対し低い p_T イベントとしてトリガーを発行してしまい高い p_T イベントを取りこぼすこと防ぐためである。

3. 統計によるゆらぎの処理

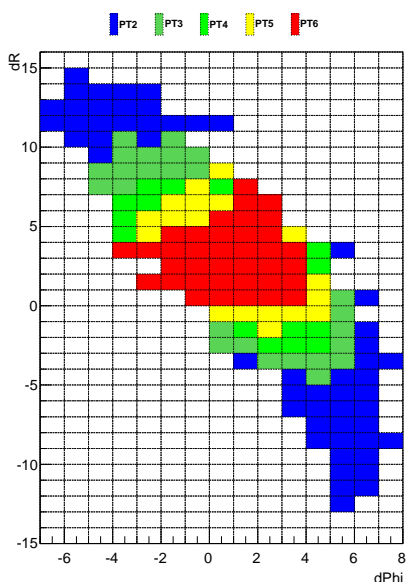


図 5.8: 処理前の CW

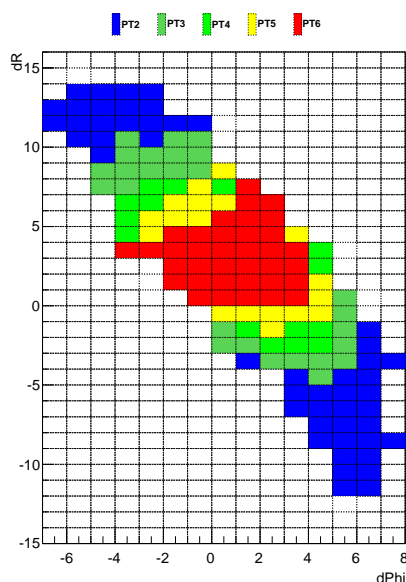


図 5.9: 処理後の CW

図 5.8 は上記の処理で作成した CW である。統計的なゆらぎにより、周りから孤立して開いたセルや、閉じているセルが存在する。 p_T の連続性から前者は閉じるべきセルで、後者は開くべきセルである。この統計のゆらぎの効果を減らすため以下の処理をセルのエントリー数に関係なく施す。

- 開いたセルで周囲の開いたセルが 3 つ未満のセルは閉じる。
- 閉じたセルで周囲に開いたセルが 7 つ以上あるセルは周囲に多く分布する閾値で開く。

この処理を施す際、CWの縁の部分に関しては隣の行(列)が外側に存在すると仮定した。例として $\Delta R=15$ の行であれば、 $\Delta R=16$ に $\Delta R=14$ と同じセル配列の行が存在すると仮定した。また、閉じたセルを開く際に周囲のセルの閾値の分布が等しい時、高い方の閾値でセルを開くように設定した。

以上の処理を施したCWが図5.9である。

最後にトリガー状況に合わせて各PTを統合する。現在はもともとのPT5とPT6を統合した領域をPT6とし、PT4をPT5、PT3をPT4に設定しなおしたCWが使用されている。

5.3 Coincidence Windowの改良

2011年のトリガーパフォーマンスの評価結果をふまえてCWの改良を行った。今回は特にクロストーク、TGCアライメントの2つの問題点に注目してCWを変更し、トリガーパフォーマンスの向上を図った。以下では、この問題点の説明とそれに対する対策方法について述べる。

5.3.1 クロストーク

図5.10はミューオンがTGCを通過する様子の模式図である。青い丸がミューオン、青矢印がミューオンの飛跡を表している。また、縦に並べられた長方形がTGCのストリップで、ピンクで塗られたものは信号を出している事を表す。図5.10右のように粒子が通過していないストリップ、つまり本来信号を出すべきでないストリップが信号を出すことをクロストークと呼ぶ。

TGCは入射荷電粒子により電離された電子がガス増幅され入射粒子付近のワイヤーとストリップに誘電電荷が生じる構造になっている。しかし、実際はワイヤーとストリップ間に容量カップリングが存在するため、複数のストリップに信号が生じることがある。この信号が本来信号を出すべきでないストリップでASDの閾値を超えてしまった場合には偽のヒット情報として記録されクロストークとなる。

さらにTGCのロジックにはデクラスタリングルールと呼ばれるものが適用されている。デクラスタリングルールとはヒット情報からコインシデンスをとり ΔR 、 $\Delta\phi$ を計算する際、複数のチャンネルにヒットがあった場合に対象とするチャンネルを1つに絞り込むためのルールである。デクラスタリングルールの概念図を図5.11に示す。図のように複数のヒットがあった場合、チャンネル番号の小さいものから2つ目のものを選ぶ設定になっている。これにより一度に複数のトリガーが発行されることは防げるが、クロストークによるヒットを選び出した場合には誤ったトリガーが発行されることになる。

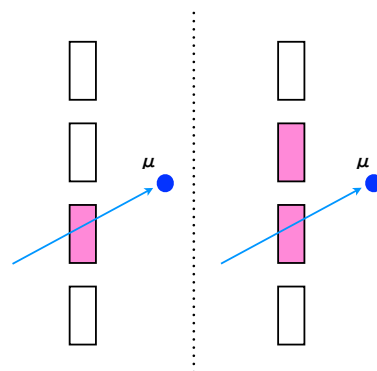


図 5.10: Cross-talk イメージ

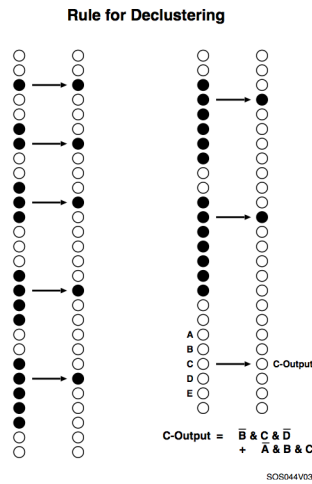


図 5.11: デクラスタリングルール

クロストーク対策

以前のシミュレーションではこのクロストークの影響が考慮されておらず、実際のデータにおいてトリガー効率が低下していた。これに対し、CWを $\Delta\phi$ 正、負の方向にそれぞれ2マスずつ広げるといった対策が取られた。図 5.12 と図 5.13 は広げる前後のCWを表す。この手法で作成されたCWはsetHと呼ばれ2011年のrunに使用された。

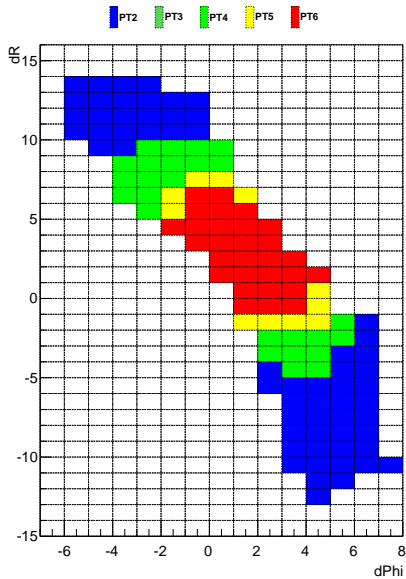


図 5.12: 広げる前

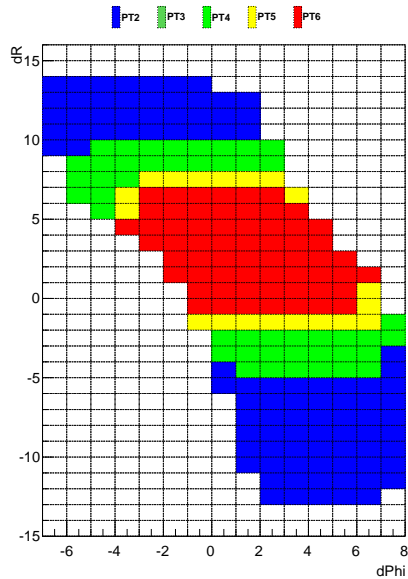


図 5.13: 広げた後

CWを広げたことによりトリガー効率は改善した。しかし、広げた部分で低い p_T のミュオンに対しても高い p_T を持つと判断してしまい、トリガーレートが急激に高くなった。表5.3は2011年におけるL1_MU20のCWを広げる前後のトリガーレートをルミノシティで正規化した数字である。表5.3にある通り広げた事によりトリガーレートが2倍以上になっている。ルミノシティが増大するとトリガーレートも同様に上昇するため、2012年のrunに向けてレートをなるべく抑えたCWの開発が必要となった。

	広げる前	広げた後
トリガーレート	0.0035	0.0084

表 5.3: トリガーレート

今回の改良では作成したCWをただ広げるのではなく、クロストークの効果を再現したシミュレーションを用いてCWを作成することにした。上記の通りクロストークとは荷電粒子が通過したTGCのストリップが近傍のストリップに電荷を誘発する現象である。そこで、TGCで複数のチャンネルが信号を出す確率を実際のデータから計算する。その確率をシミュレーションに取り入れることでクロストークを再現する。図5.14はTGCの各チェンバーのクロストークの出現確率を表している。横軸はTGCのレイヤー、縦軸はチェンバーを表しており下に行くにつれ $|\eta|$ が大きくなる。 $|\eta|$ が大きくなるほどクロストークの出現確率は高くなる。これは $|\eta|$ が大きい領域のチェンバーではストリップの間隔が狭くなり隣のストリップに電荷を誘発しやすくなるためである。

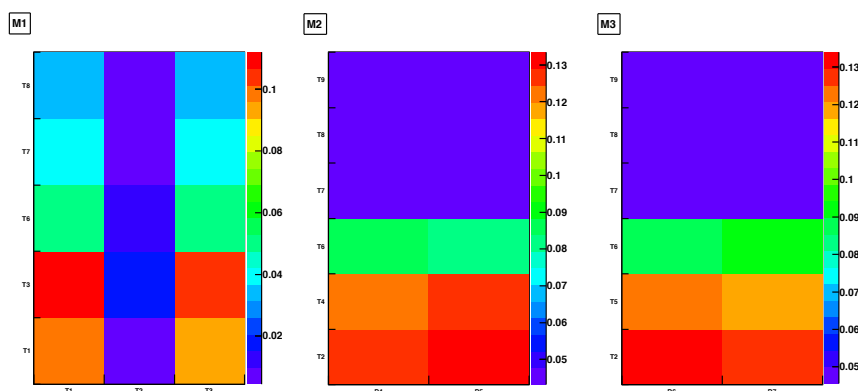


図 5.14: チェンバー毎のクロストーク出現確率 [12]

図5.16はクロストークを再現したシミュレーションから作成したCWを表す。図5.15に比べて $\Delta\phi$ の負の方向のみに広がっており、正の方向はあまり広がっていない。これは複数のチャンネルが信号を出した場合、デクラスタリングルールによって $\Delta\phi$ が小さい方から優先的に採用されるためである。

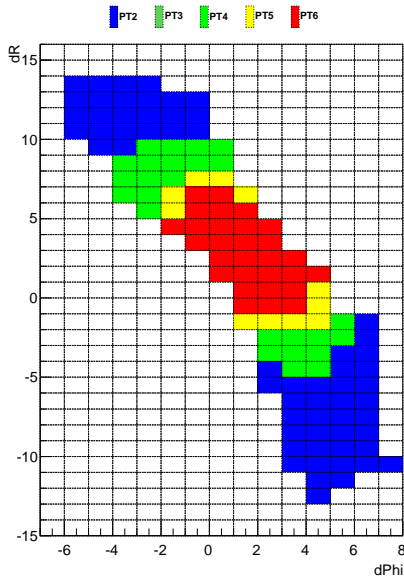


図 5.15: クロストークなし

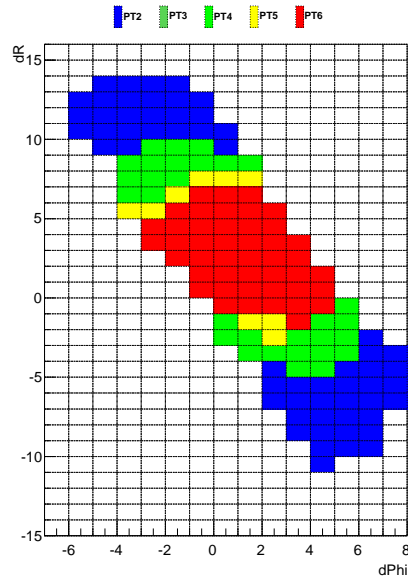


図 5.16: クロストークあり

このクロストークの影響を考慮したシミュレーションを用いて作成したCWをsetKと呼ぶ。

5.3.2 TGC アライメント

シミュレーションにおいてTGCは設計通りの位置に配置されているが、実際の検出器ではズレが生じている。CWはシミュレーションから作成するため、このズレの影響を考慮せずに作成したCWを実際の検出器に適用すると、トリガー効率の p_T 分布において立ち上がりが鈍くなる原因になる。そこで、データからTGCのズレの大きさを各チェンバー毎に見積もり、その値に従ってCWをズラすことでトリガー効率のResolutionについての改善を計った。まず、TGCの測定方法について簡単に述べ、得られた結果からCWをズラす方法について説明する。

TGC アライメントの測定

TGCの設置位置(アライメント)のズレの測定方法はこれまでの研究で既に開発されており、今回の改良もその結果に従った。測定には内部飛跡検出器とMDTで再構成されたミュオンの飛跡のTGC上での位置とTGCでのミュオン検出位置の残差を用いる。MDTは光学アライメントシステムを使用し、MDT同士の位置関係を精度よく測定している。このことから、再構成されたミュオントラックがTGCが設計通りに配置されている場合にどの部分で検出されるかが予測できる。この予測される検出点とTGCでの検出点を比較することで、TGCが設計からどれくらいズレているかを測定することが可能となる。[9]

上記の方法で測定された TGC のチェンバー毎のズレから TGC の M1 と M3 間のチャンネル間のズレを計算する。これは CW を参照する際、M1 と M3 のチャンネル番号を使用して ΔR 、 $\Delta\phi$ を計算するためである。この M1 と M3 間のチャンネル間のズレの大きさを以下の式で定義する。

$$\text{チャンネル間ズレの大きさ} = \Delta\rho_1/W_{ch1} - \Delta\rho_3/W_{ch3}$$

ここで $\Delta\rho$ は各チェンバーでのアライメントのズレ、 W_{ch} はチャンネル幅を表す。図 5.17 に $\Delta pull$ の計算の概略図を示す。

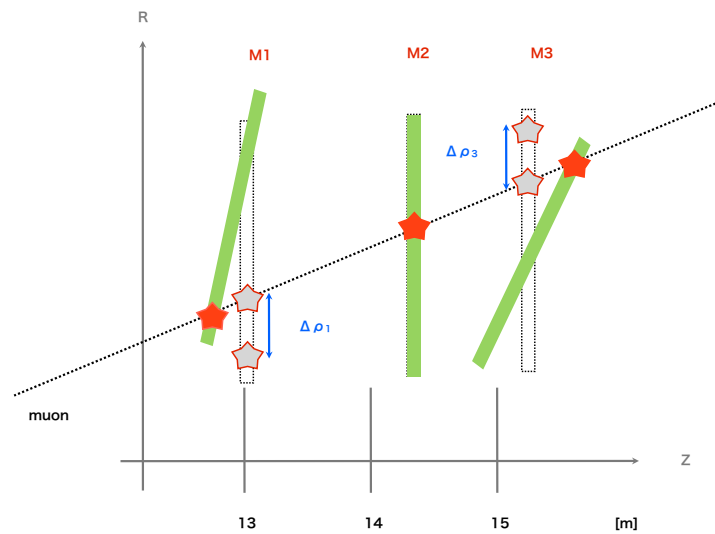
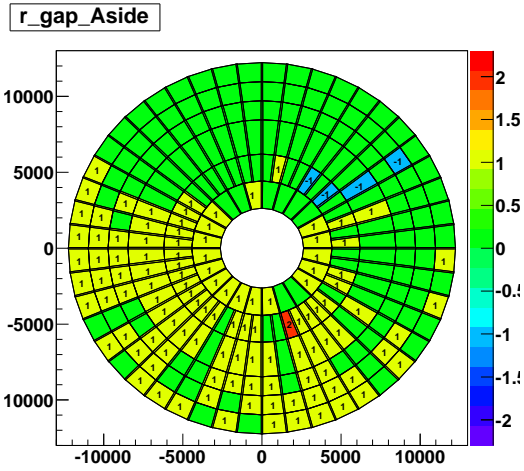
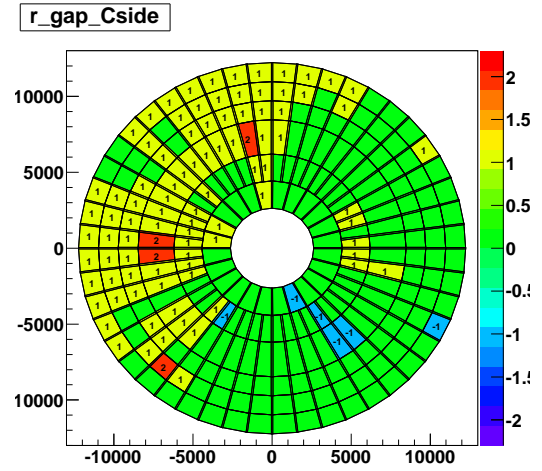


図 5.17: $\Delta pull$ の概略図

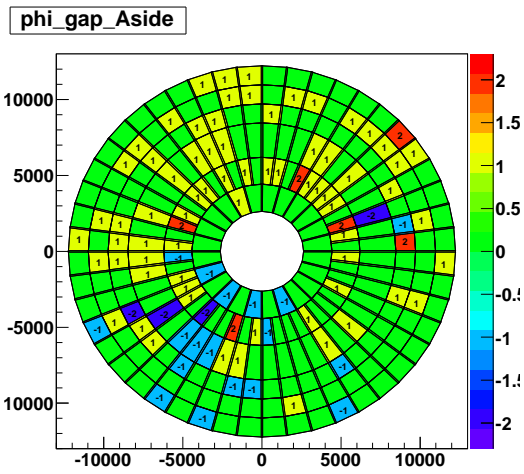
2011 年のデータから計測された TGC のアライメントのズレの大きさを図 5.18 に示す。最大で ± 2 チャンネルほどズレている部分があることがわかった。この結果に従って CW に補正を加える。



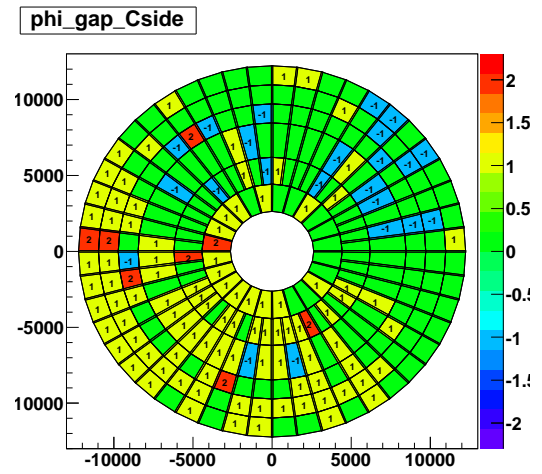
(a) R 方向のズレ (Aside)



(b) R 方向のズレ (Cside)



(c) ϕ 方向のズレ (Aside)



(d) ϕ 方向のズレ (Cside)

図 5.18: TGC のアライメントのズレ

CW に対するアライメント補正

CW は各 RoI 毎に作成するため、次にアライメントのズレをチェンバー単位から RoI 単位に変換する。今回は TGC の M3 のチェンバーを基準として RoI 単位への変換を行った。チェンバーと RoI の対応関係を表 5.4 に示す。T5-T9 は Endcap 領域、T2 は Forward 領域のチェンバーである。

チェンバー	T9	T8	T7	T6	T5	T2
RoI	0-15	16-31	32-47	48-99	100-147	0-63

表 5.4: RoI への変換

最後に CW 自体をアライメントのズレの分だけシフトさせる。図 5.19 はシフトさせる前の CW、図 5.20 は ΔR 方向に +1 だけシフトした後の CW を表す。今回は ΔR 方向のみのシフトを行った。

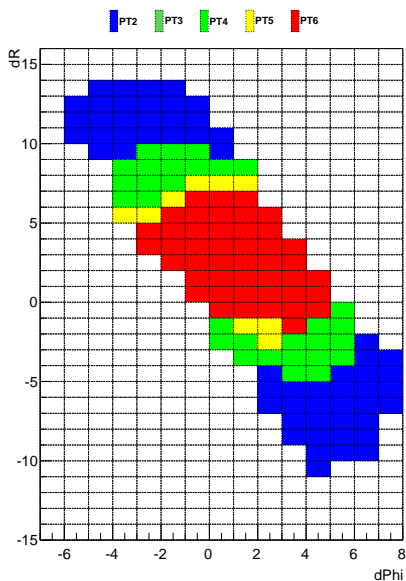


図 5.19: シフト前

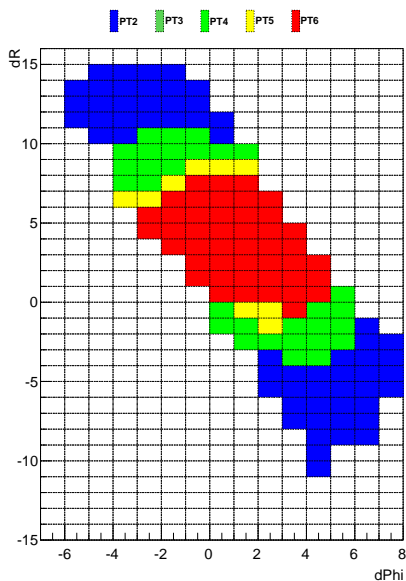


図 5.20: シフト後

また、CW には一つのセルが TGC の 1 チャンネルに対応する領域と 2 チャンネルに対応する領域が存在する。図 5.21 で薄い青で塗られた領域 ($|\Delta R| \geq 11$ 、 $|\Delta\phi| \geq 4$) が 2 チャンネルに対応する領域である。そのため、この 2 チャンネル対応領域では 1 つのセルをさらに 2 つに区切りシフトを行った。このとき奇数チャンネル分だけシフトすると、CW の 1 つのセルに対して 2 つの PT 値が存在するという場合が起こりえる。この例として、CW の一部を拡大した模式図 (図 5.22) で説明する。図 5.22 では左がシフト前、右がシフト後、セルの色が各 PT 値を表しており、 $|\Delta R| \geq 11$ の領域

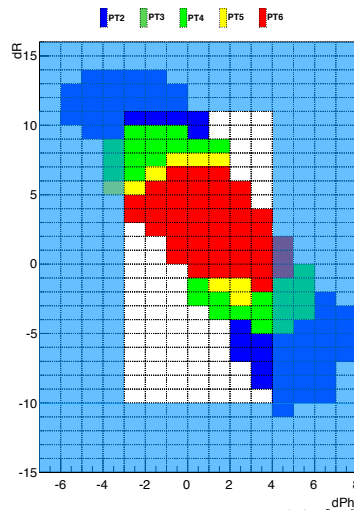


図 5.21: 2 チャンネル対応部分

では上記の通りセルを a、b の 2 つの領域に分けている。 ΔR 方向に +1 シフトした場合、 $\Delta R=12$ 、 $\Delta\phi=0$ のセルでは PT2(12b) と PT4(11a) の 2 つの PT 値をもつ。しかし、1 つのセルには 1 つの PT 値しか設定出来ないため、今回の改良では 2 つの PT 値があった場合は PT 値の大きい方 (例の場合 PT4) を選択し設定するという処理を行った。

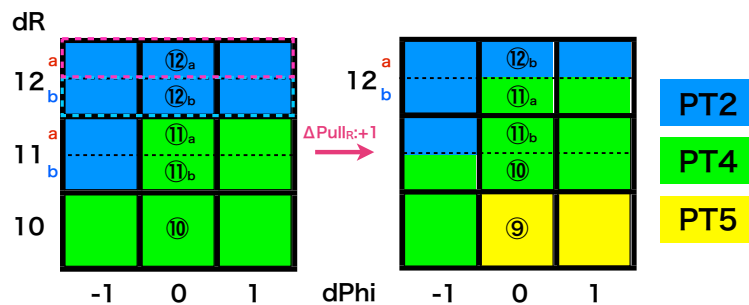


図 5.22: 2 チャンネル対応部分の扱い

以上の処理を setK に対して施した CW を setK_0 と呼ぶ。setK では 1 Octant 分 1080 個の RoI に対してのみ固有の CW を作成したが、setK_0 では両サイド、全 Octant 分である 17280 個の CW を作成した。

5.4 Coincidence Window の性能評価

2011 年のデータを使用し、setH、setK、setK_0 の比較を行った。まず、クロストーク対策の手法による違いを見るため、setH と setK の比較を行った。各 CW のトリガーレートとトリガー効率の結果を表 5.5 に示す。トリガーレートは PT5 の発行回

数をカウントし setH を基準として算出した。また、トリガー効率は PT5 の plateau 領域でのトリガー効率の結果を示す。

CW	トリガーレート (PT5)[%]	トリガー効率 (PT5 plateau 領域) [%]
setH	100	90.65 ± 0.11
setK	68.52	90.10 ± 0.11

表 5.5: setH と setK の比較

クロストークを再現したシミュレーションを用いて CW を作成することで、トリガー効率の低下を抑えつつトリガーレートの削減に成功した。

次に setK と setK_0 の比較を行う。アライメント補正の効果を見るため、トリガー効率の立ち上がり部分に注目して比較を行う。図 5.23 と表 5.6 に各 CW の PT6 におけるトリガー効率を示す。

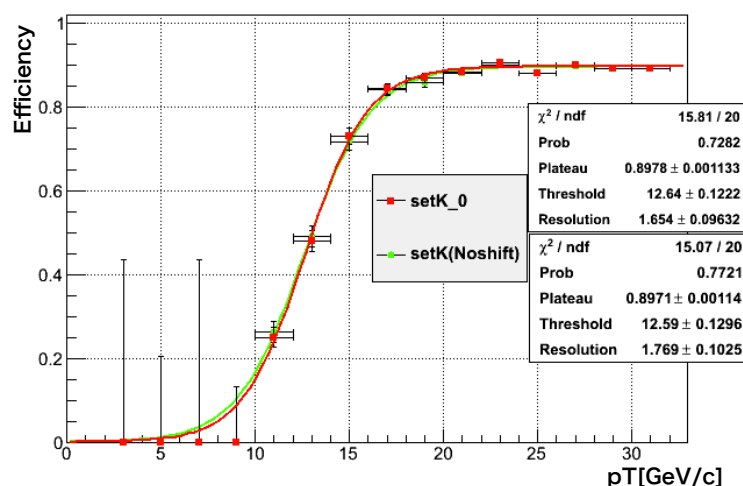


図 5.23: setK と setK_0 のトリガー効率

CW	トリガー効率 (PT6 plateau 領域) [%]	Resolution
setK	89.78 ± 0.11	1.769
setK_0	89.71 ± 0.11	1.654

表 5.6: setK と setK_0 の比較

アライメント補正を加えることで plateau 領域のトリガー効率と Resolution に改善が見られた。以上の結果より、2012 年の run には setK_0 の CW が採用されることになった。

第6章 Coincidence Windowの性能評価

6.1 8TeV 衝突における性能評価

2012年度のデータを使用してCWの性能評価を行った。今回は特にTGCのアライメント補正に注目し、補正方法の検証、補正前のCWとのトリガー効率の比較などを行った。

6.1.1 アライメント補正方法の評価

TGCのアライメントのズレに対するCWへの補正方法が正しいか評価を行う。以下ではまず評価方法を説明し、次に2012年の実際のデータを使用して行った評価結果について述べる。

6.1.1.1 評価方法

アライメントに対する補正方法が正しいか評価するため、新たな手法を開発した。今回はCWで設定されている無限運動量トラックの ΔR 、 $\Delta\phi$ と、データの検出点から予測した無限運動量トラックの ΔR 、 $\Delta\phi$ の差を見ることで補正方法を検証した。以下でその手法を説明する。

1. CWの ΔR 、 $\Delta\phi$

データと比較するため、CWで設定されている無限運動量トラックの ΔR 、 $\Delta\phi$ を決定する。CWにおいて無限運動量トラックの $\Delta\phi$ は+1に設定されているが、 ΔR に関してはCW毎に異なる値を持つ。そのため、 $\Delta\phi=+1$ で開いているPT6のセルの中心点をそのRoIの無限運動量トラックの ΔR とした。例えば図6.1であれば、 $\Delta\phi=+1$ で開いているPT6のセルの ΔR の最大値は+8、最小値は-2のため、無限運動量トラック $(\Delta R, \Delta\phi)=(+3, +1)$ となる。

以上のように各CWで無限運動量トラックの ΔR 、 $\Delta\phi$ を予め決定しておき、実際に検出された ΔR 、 $\Delta\phi$ と比較する。

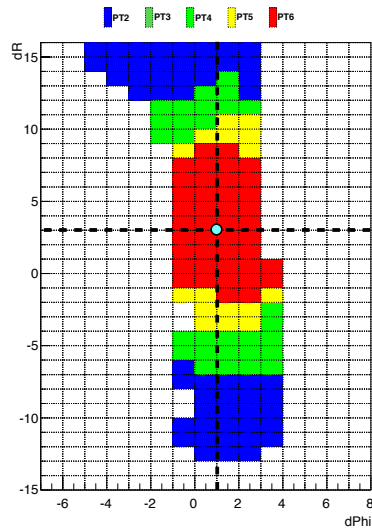


図 6.1: CW の無限運動量トラックの ΔR 、 $\Delta\phi$

2. ミューオンの選別

実際のデータからトリガー効率と同様に $Z \rightarrow \mu\mu$ Tag and Probe 法を用いて、ミューオンを選び出す。こうすることで、ミューオンの同定及び運動量測定に対して精度を高める。また、ミューオンがZ由来であることを要求するため比較的 p_T の高いミューオンのみを選別することが出来る。図 6.2 に $Z \rightarrow \mu\mu$ Tag and Probe 法で選別した Probe muon の p_T 分布を示す。

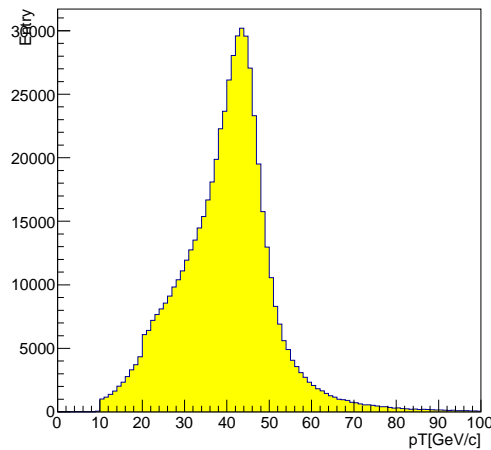


図 6.2: Probe muon の p_T 分布

3. データの ΔR 、 $\Delta\phi$

Probe muon 毎にヒット情報からトリガーセクター、RoI、 ΔR 、 $\Delta\phi$ などの情報を抜き出し、以下で定義する Δ を計算する。今回は ΔR のみのアライメント

補正を行ったため、 $\Delta\phi$ は省略する。

$$\Delta = \text{データから得た}\Delta R - CW \text{の無限運動量トラックの}\Delta R$$

RoI単位では統計が足りなかったため、チェンバー単位で Δ の分布を作成した。この際、RoIとチェンバーの対応関係は表5.4に準ずる。

図6.3はあるチェンバーでの Δ 分布を表す。実際の実験では無限運動量ほど大きな p_T をもつミュオンが観測されることは稀なので、一番数の多い p_T が45[GeV/c]ほどのミュオンのピークが $\Delta=0$ より少しズレたところに立つ。±両方に立つのはミュオンの電荷によって磁場中での曲がりか逆になるためである。

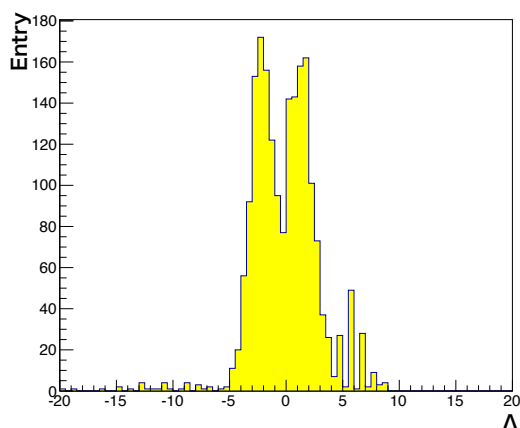


図 6.3: Δ 分布

この Δ 分布の平均値を求めることで無限運動量トラックに対応する ΔR がCWとデータの間でどれくらい差があるかを確認できる。

6.1.1.2 評価結果

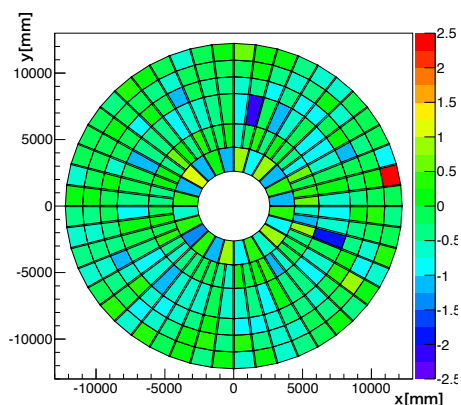


図 6.4: Δ の平均値 (Aside)

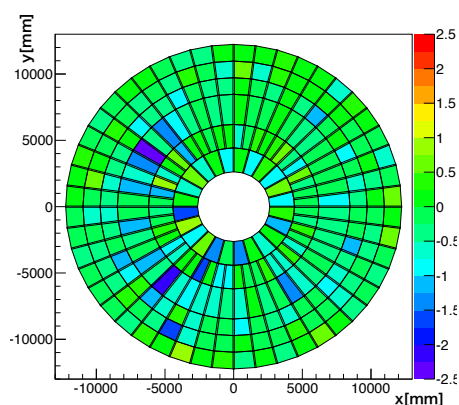


図 6.5: Δ の平均値 (Cside)

2012年度に使用されたCW(setK.0)のアライメントのズレに対する補正方法の評価を行った。図6.4がAside、図6.5がCsideの Δ の平均値を表す。大きくズレているところを1つずつ細かく見ることで、それぞれ以下の理由によってズレている事がわかった。

- 図6.4の3時方向の赤いチェンバー：統計不足
- Forward領域：CWの作成方法の問題
TGCは隣り合うチェンバー間で隙間が出来ないように前後にズラして一部が重なるように配置されており、セクター番号が偶数のチェンバーと奇数のチェンバーではz軸上での位置が異なる。しかし、5.2.2節で説明したようにCWを作成する際はOctantを基準として作成したので、Forward領域では本来分けて考えるべき偶数セクターと奇数セクターを統合してしまっていた。そのため、CWにおける無限運動量トラックの ΔR がそもそもズレてしまっており、 Δ の平均値がズレる原因になった。



図 6.6: 隣り合う TGC の様子

- マイナス方向に大きくズレているチェンバー (上記以外)
図6.7はマイナス方向に大きくずれているあるチェンバーの Δ 分布を表す。 $\Delta = -17$ 付近の小さなピークによって Δ の平均値がマイナスにズレていることわかる。そのチェンバーに含まれる一つのRoIでのデータの ΔR 、 $\Delta\phi$ 分布とそのRoIに対応するCWが図6.8と図6.9である。図6.8の赤い点はPT6が発行されたことを表す。

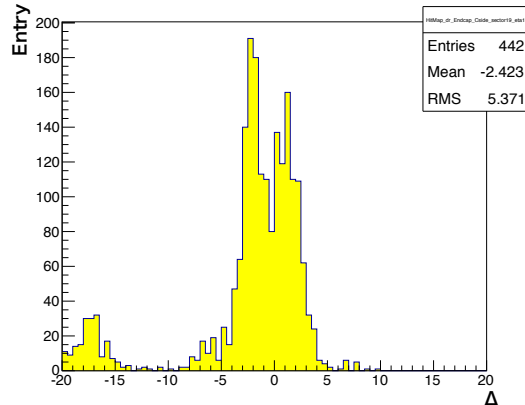


図 6.7: マイナス方向にズレのあるチェンバーの Δ 分布

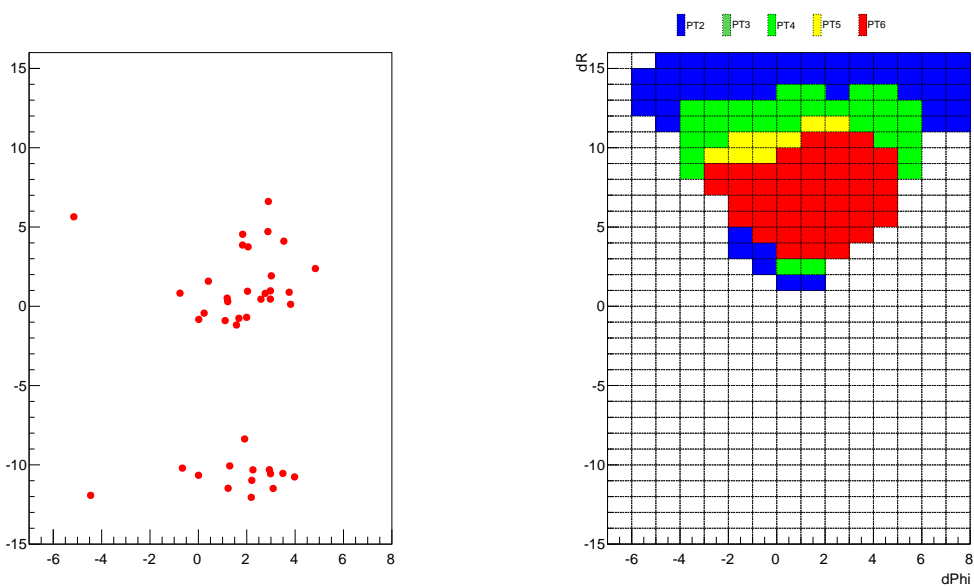


図 6.8: データの ΔR 分布

図 6.9: 対応する CW

PT6が発行されていればデータの ΔR 、 $\Delta\phi$ はCWの赤く塗られた領域に収まるはずである。しかし図6.8ではまったく収まっていない。このことから、レベル1トリガーが発行される段階までは ΔR 、 $\Delta\phi$ がPT6の領域に入っていたが、その後のハードウェア上での処理の途中で何らかの理由で ΔR 、 $\Delta\phi$ の値が変わってしまい、その結果が最終的なデータとして出力されたと考えられる。このハードウェアの不具合に関してはCWによって補正等を行うことは出来ないため、まったく別の問題として考える必要がある。そのため、この大きくズレているチェンバーに関しても補正方法自体が間違っているわけではないと結論づけた。

上記の3つの問題によって正しく確認できないチェンバーはあったが、それ以外のチェンバーでは Δ の平均値は ± 1 未満に収まっている。この結果からアライメントに対する補正方法は正しいと結論づけた。

6.1.2 トリガー効率

2011年と2012年のデータを使用し、トリガー効率を比較する。図6.10において、赤が2012年、緑が2011年のトリガー効率を表している。また、立ち上がりの部分をより詳しく見るためにミュオンの電荷毎に p_T の範囲を狭めてトリガー効率を確認した。図6.11は正電荷のミュオンのみで算出した各年のトリガー効率、図6.12は負電荷のトリガー効率である。

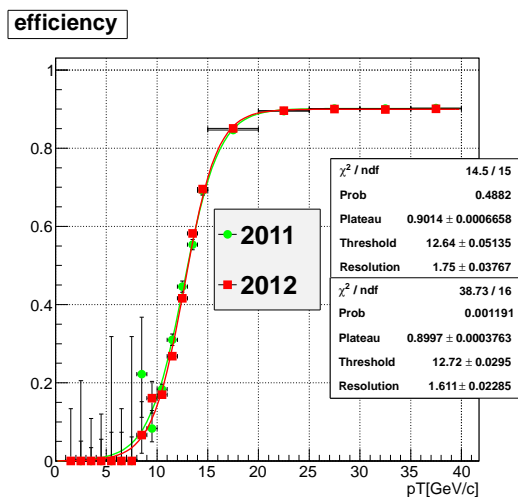


図 6.10: 2011年と2012年のトリガー効率の比較

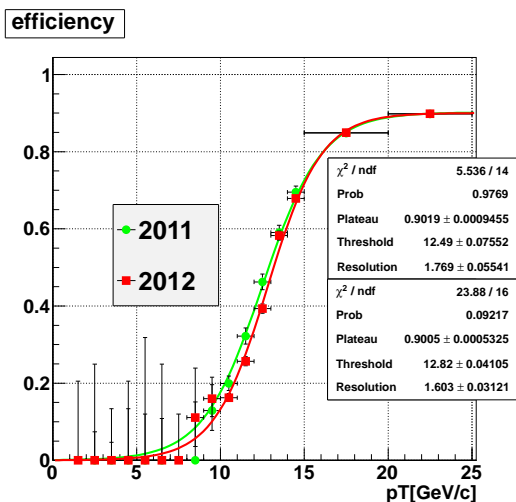


図 6.11: トリガー効率の比較 (正電荷)

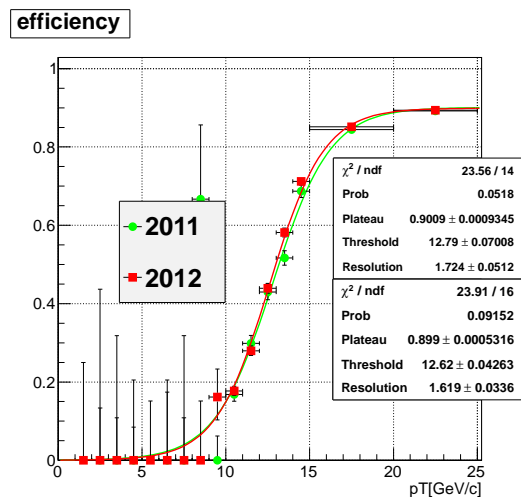


図 6.12: トリガー効率の比較 (負電荷)

電荷毎の図から、特に正電荷のミュオンについて Resolution が大きく改善していることがわかる。図6.10における plateau 領域のトリガー効率と Resolution を表??に示す。全体として plateau 領域のトリガー効率を維持しつつ Resolution が改善

しており、アライメント効果を取り入れた CW は狙い通りの改良を行うことが出来たと結論づけた。

CW	トリガー効率 (PT6 plateau 領域) [%]	Resolution
2011	90.14 ± 0.67	1.75
2012	89.97 ± 0.38	1.611

表 6.1: 2011 年と 2012 年の比較

6.2 今後の課題

今回の性能評価の過程で明らかになった課題についてまとめる。CW の作成方法を変更することで対応できる問題点として、Forward 領域の取り扱いとアライメント効果の補正方法という 2 点について述べる。

6.2.1 Forward 領域の取り扱い

6.1.1.2 節で述べたように、現在の CW の作成方法では本来分けて取り扱うべきである Forward の偶数セクターと奇数セクターを同様に扱ってしまっている。もともと違う 2 つの CW を統合してしまっているため、CW を無駄に広く設定してしまいトリガー効率の Resolution が悪化する。次回からの対策として、CW を作成する際は Endcap 領域では今回と同様に Octant を基準とし、Forward 領域では 1/4 円を基準とし作成することにした。こうすることで偶数、奇数セクターを完全に分けて取り扱うことが出来る。

6.2.2 アライメント効果の補正方法

今回の補正方法はアライメントのズレの値に対して、完成している CW をズラすことで対応するというものであった。しかし、現在ではアライメントのズレをシミュレーションに組み込む事が出来るようになったため、このシミュレーションを用いて Hitmap を作成するという方法が可能となった。この方法ならばチェンバーと RoI の対応やセルの 2ch 対応部分などを考慮しなくてもよいという利点があるが、CW 作成に必要なシングルミュオンサンプルの統計量が単純計算でも 16 倍必要になる。また、TGC のアライメントのズレが変わる度に 1 から作りなおす必要もある。しかし、より実機に近い環境でシミュレーションを行うことは非常に重要であり、TGC のアライメントパラメータが確定した段階でならば十分に有用な方法である。

第7章 まとめ

2011年のデータよりTGCの設置位置が設計通りの配置からズレていることが明らかになった。Coincidence Windowは理想的な設置位置でのトリガーシミュレーションを用いて作成するため、実機に適用するとCoincidence Windowの各セルが想定している場所と実際の検出点がズレてしまいトリガー判断を誤ってしまう。そのため、トリガー効率における p_T 分解能の低下を招く原因となっていた。そこで、TGCの設置位置のズレを計測、Coincidence Windowに適用出来る形にパラメータ化し、その値の分だけCoincidence Windowをシフトするという補正を加えた。2011年のデータを使用し新しく作成したCoincidence Windowのトリガー効率を計算したところ、狙い通りの分解能の改善が見られたため、2012年のランに採用されることとなった。

2012年のデータを使用し、補正方法の評価とトリガー効率の評価を行った。前述の通り、別の問題があり確認できない領域はあったが、それ以外の領域では補正方法が正しいことを確認した。また、2011年と2012年のトリガー効率について比較した結果、Plateau領域でのトリガー効率を維持しつつ、Resolutionを1.75から1.611まで改善していることがわかった。このことから今回の改良は正しく、レベル1ミュオントリガーにおける p_T 分解能の改善につながったと結論づけた。

今後は、今回明らかになった問題を一つ一つ解決していく予定である。Forward領域の作成方法の問題の場合、1/4円を基準としCoincidence Windowを作成することで、今まで異なるCoincidence Windowを足し合わせたような状態だったものが別々に分けられるため、Coincidence Windowの開いているセルの数が減り誤って高いPTトリガーを発行してしまうことが少なくなる。このことから、トリガーレートの減少と p_T 分解能の改善が見込める。また、TGCのアライメントの問題の場合、設置位置のズレを考慮したより実際の状況に近いシミュレーションを用いて作成することで、Coincidence Windowの各PTの設定が最適化されトリガー効率の改善が見込める。ただし、シミュレーションに対して設置位置のズレをどのように、どれくらい組み込むかはまだ考える必要があり、他にも必要な統計量が増えることを含めると作成期間はかなり長くなってしまう。特に今年から始まるテクニカルストップではTGCを一旦移動することが決まっているため、TGCの設置位置は少なからず変化すると考えられる。以上のことから、1つだけでなく様々な方法でCoincidence Windowが作成できるように準備しておく必要がある。

目 次

2.1	LHC の全体像	5
2.2	積分ルミノシティの遷移 [5]	6
2.3	CMS	7
2.4	ALICE	7
2.5	LHCb	7
2.6	標準模型粒子	8
2.7	Higgs 粒子生成のファインマン・ダイアグラム	8
2.8	Higgs 粒子の生成断面積	8
2.9	Higgs 粒子の崩壊分岐比	9
2.10	Higgs 質量の排除領域 [6]	10
2.11	Local p-value[6]	10
2.12	ATLAS 検出器の全体像	11
2.13	各粒子の透過性	11
2.14	ATLAS 検出器の座標系	12
2.15	マグネットシステムの全体像	13
2.16	超伝導ソレノイド磁石	13
2.17	エンドキャップ部超伝導トロイド磁石	13
2.18	バレル部超伝導トロイド磁石	13
2.19	内部飛跡検出器	14
2.20	カロリメータ	15
2.21	ミュオンスペクトロメータ	16
3.1	ATLAS 実験におけるトリガーシステム	18
3.2	レベル1トリガーの処理の流れ	19
3.3	TGC の配置と構造図	21
3.4	ワイヤーとワイヤーサポート	21
3.5	TGC の断面図	21
3.6	アノードワイヤー近傍でのタウンゼント型電子雪崩の推移	22
3.7	Doublet と Triplet の構造	23
3.8	TGC の $R - z$ 断面における全体図	23
3.9	TGC 1/12 セクター	24

3.10	TGC の $R - \phi$ 断面図 (M3)	25
3.11	TGC のサブセクターナンバリング	25
3.12	TGC エレクトロニクスの概要	25
3.13	トリガー系のデータフロー概略図	26
3.14	リードアウト系のデータフロー概略図	27
3.15	p_T 概算方法の模式図	30
3.16	TGC トリガーの判定方法	30
4.1	Z boson の崩壊によるダイミュオンイベントディスプレイ [5]	33
4.2	$m_{\mu\mu}$ 分布	33
4.3	Tag muon の ΔR 分布	34
4.4	PT6 のトリガー効率	35
5.1	TGC Octant	38
5.2	Coincidence Window の例	38
5.3	シミュレーションの流れ	40
5.4	$p_T=40[\text{GeV}]$ のみの HitMap	41
5.5	単一 p_T で作成した CW	41
5.6	$p_T=40, 100[\text{GeV}]$ の HitMap	41
5.7	Coincidence Window の例	41
5.8	処理前の CW	42
5.9	処理後の CW	42
5.10	Cross-talk イメージ	44
5.11	デクラスタリングルール	45
5.12	広げる前	45
5.13	広げた後	45
5.14	チェンバー毎のクロストーク出現確率 [12]	46
5.15	クロストークなし	47
5.16	クロストークあり	47
5.17	$\Delta pull$ の概略図	48
5.18	TGC のアライメントのズレ	49
5.19	シフト前	50
5.20	シフト後	50
5.21	2チャンネル対応部分	51
5.22	2チャンネル対応部分の扱い	51
5.23	setK と setK_0 のトリガー効率	52
6.1	CW の無限運動量トラックの ΔR 、 $\Delta\phi$	54
6.2	Probe muon の p_T 分布	54

6.3	Δ 分布	55
6.4	Δ の平均値 (Aside)	55
6.5	Δ の平均値 (Cside)	55
6.6	隣り合う TGC の様子	56
6.7	マイナス方向にズレのあるチェンバーの Δ 分布	57
6.8	データの ΔR 分布	57
6.9	対応する CW	57
6.10	2011 年と 2012 年のトリガー効率の比較	58
6.11	トリガー効率の比較 (正電荷)	58
6.12	トリガー効率の比較 (負電荷)	58

表 目 次

2.1	LHC の主要なパラメータ [5]	6
4.1	トリガーマニュー	31
4.2	CW で使用される閾値	32
4.3	各トリガーの Plateau efficiency	36
4.4	トリガーレート [?]	36
5.1	ΔR 、 $\Delta\phi$ の範囲	37
5.2	閾値とミューオンの p_T の関係	41
5.3	トリガーレート	46
5.4	RoI への変換	50
5.5	setH と setK の比較	52
5.6	setK と setK_0 の比較	52
6.1	2011 年と 2012 年の比較	59

謝辞

本研究を進めていく中でたくさんの人に助けて頂きました。特に指導教官の藏重久弥教授には研究やCERNでの生活など本当に多くのことを指導して頂きました。研究生活の中でご迷惑をかけることも多々あり、その度に助けて頂き本当に申し訳ありませんでした。心より感謝いたします。また、山崎祐司准教授、越智敦彦助教にはATLASやその他の研究に関する様々なご指導を頂きました。本当にありがとうございました。松下崇助教にはCERN出張時の研究活動において大変お世話になりました。実際の研究に関する助言だけでなく、研究の基礎となる論理的思考やプログラミング技術など多くの事をご指導頂きました。深く感謝いたします。研究室秘書の横山有美様にはCERN出張の手続きやその他研究に関する手続き等を行なって頂き本当にありがとうございました。

岸本巴様には研究の進め方やCERNでの生活などに関しての様々な助言を頂きました。自分が研究で悩んでいるときには適切なアドバイスを頂き、本当に助かりました。また、CERN滞在時には生活面で多くのことを助けて頂きました。心より深く感謝しています。Yuan Li様、Matthew King様、谷和俊様には研究やCERNの生活に関する多くの助言をいただきました。同じ学年の北村拓己様、森永真央様にはソフトウェア技術や解析方法等多くの助言を頂きました。CERN滞在時は一緒に暮らしていたこともあり、生活面でも多くのことを助けて頂きました。皆様に深く感謝いたします。

京都大学の石野雅也准教授、名古屋大学の青木雅人特任助教、若林潤様、山内克也様には自分の研究に関することで多くのアドバイスを頂きました。本当にありがとうございました。結束晃平様、鈴木友様にはCERN滞在時に大変お世話になりました。ありがとうございました。慣れない海外でまいっていました。お二人と岸本様のお陰でなんとか生活することができました。道前武様、二宮陽一様、野辺拓也様、吉原圭亮様を始め icepp の皆様にはCERN滞在時、生活の様々な場面で大変お世話になりました。また、奥山豊信様には生活の指針を教えてくださいました。皆様のお陰でCERN出張時、とても楽しく充実した生活をおくることができました。本当にありがとうございました。

また、研究室の同期である江戸勇樹さん、駒井英俊さん、細川佳志さん、村田亜

紀さん、山口貴弘さんには大変お世話になりました。皆様のおかげで2年間とても楽しく過ごすことが出来ました。また、後輩の稲丸由夫輝くんには研究、生活両面で助けて頂きました。ありがとうございました。

その他にも、粒子物理学研究室の皆様、ATLAS Japan グループの皆様、知人、友人の皆様がこの場を借りて感謝の意を表したいと思います。6年間の大学生活において様々な形で助けて頂きありがとうございました。

最後に、これまでの生活を支え続けてくれた家族に深く感謝致します。長い間私のワガママに付き合ってくれて本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] ATLAS Experiment, "ATLAS Level-1 Trigger:TDR", <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/DAQTRIG/TDR/tdr.html>.
- [2] Michael Spira, Peter M.Zerwas, "Electroweak Symmetry Breaking and Higgs Physics", arXiv:hep-ph/9803257, 5 Mar 1998.
- [3] The ATLAS Collaboration, "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider", JINST 3 (2008) S08003.
- [4] The ATLAS Collaboration, "Performance of the ATLAS Trigger System in 2010", arXiv:1110.1530, 13 Dec 2011.
- [5] ATLAS Experiment, "ATLAS Experiment", <http://atlas.ch/>.
- [6] The ATLAS Collaboration, "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC", Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29, 31 July 2012.
- [7] Thomas Schoerner-Sadenius, "The Trigger of the ATLAS Experiment", arXiv:hep-ex/0307078, 28 Jul 2003.
- [8] Brian Petersen, "Trigger & DAQ LS1 Upgrades for Run 2", ATLAS Week (Montreux), 2012.
- [9] 若林潤, "LHC-ATLAS 実験 μ 粒子トリガー検出器の 7TeV 陽子陽子衝突事象を用いたアライメントの研究", 修士学位論文, 名古屋大学, 2011.
- [10] 吹田航一, "ATLAS 実験前後方部レベル 1 ミューオントリガーシステムの動作検証", 修士学位論文, 神戸大学, 2011.
- [11] 岸本巴, "ATLAS 実験におけるミューオントリガー効率の評価", 修士学位論文, 神戸大学, 2012.t
- [12] 鈴木雄太, "Look Up Table 改良による ATLAS レベル 1 ミューオントリガーの性能向上の研究", 修士学位論文, 神戸大学, 2012.