

修 士 学 位 論 文

ATLAS 実験 Run2 に向けた レベル 1 ミューオントリガーの改良

平成 26 年 2 月 7 日

専攻名 物理学専攻
学籍番号 123s105s
氏名 稲丸由夫輝

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

概要

Higgs 粒子の発見という成果をもたらした 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とする物理事象のみを選別するために3段階のトリガーシステムが用いられている。その第1段階に位置するレベル1 ミューオントリガーでは、ミュオンの運動量を概算しトリガー判定を行う。運動量の概算には Coincidence Window(CW) と呼ばれる参照表が用いられるため、CW の性質によってレベル1 ミューオントリガーの性能が決定する。

本研究では、2015 年から予定されている ATLAS 実験 Run2 に向けて CW を改良するとともに、新たに導入される Inner Coincidence Window(ICW) の作成・最適化を行い、トリガーの性能を評価した。

目次

第1章	序論	3
第2章	ATLAS 実験	5
2.1	LHC 加速器	5
2.2	ATLAS 実験の目指す物理	7
2.2.1	標準模型における Higgs 粒子	7
2.3	ATLAS 検出器	10
2.3.1	超伝導磁石システム	12
2.3.2	内部飛跡検出器	13
2.3.3	カロリメータ	14
2.3.4	ミュオンスペクトロメータ	15
第3章	ミュオントリガー	17
3.1	トリガーシステム	17
3.1.1	レベル1トリガー	18
3.1.2	レベル2トリガー	18
3.1.3	イベントフィルター	18
3.2	レベル1エンドキャップミュオントリガー	19
3.2.1	Thin Gap Chamber(TGC)	19
3.2.2	TGC システムの読み出し構造	22
3.2.3	TGC トリガーシステム	23
3.2.4	TGC エレクトロニクス	25
3.3	トリガー性能	27
3.3.1	トリガー効率	27
3.3.2	トリガーレート	30
第4章	Run2	31
4.1	フェイクトリガー	31
4.1.1	フェイクトリガーの影響	31
4.1.2	フェイクトリガーの原因	32
4.2	Run2 に向けての変更	33
4.2.1	概要	33
4.2.2	レベル1ミュオントリガーの変更	34

第 5 章	Coincidence Window の作成	35
5.1	Coincidence Window(CW)	35
5.2	作成方法	36
5.2.1	トリガーシミュレーション	36
5.2.2	CW の作成	37
第 6 章	Coincidence Window の改良及び Inner Coincidence Window の作成	41
6.1	Coincidence Window の改良	41
6.1.1	TGC アライメント	41
6.1.2	TGC ジオメトリー	47
6.2	Inner Coincidence Window	50
6.2.1	Inner Coincidence Window(ICW) について	50
6.2.2	作成方法	51
第 7 章	Coincidence Window 及び Inner Coincidence Window の性能評価	55
7.1	トリガー効率の評価	55
7.2	トリガーレートの評価	57
第 8 章	まとめ	62

第1章 序論

素粒子標準模型とは、素粒子物理学における重力相互作用を除く3つの相互作用(強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用)を記述する理論である。標準模型は1970年代に構築され、その後様々な実験によっ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認された。標準模型では、対称性を自発的に破る作用を持つ”Higgs場”と呼ばれるモデルが導入されている。このモデルを用いることにより、弱い相互作用を媒介するW粒子やZ粒子が質量を持つ一方、電磁相互作用を媒介する γ は質量を持たないことを明らかにした。”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考えられており、これまで様々な実験でHiggs粒子の探索が試みられてきた。

スイス・ジュネーブ近郊に建設されたLarge Hadron Collider(LHC)でもこのHiggs粒子の探索を主な目的の1つとしてきた。LHCは周長27[km]で最高重心系エネルギー14[TeV]、ルミノシティ $10^{34}[\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}]$ を実現できるようにデザインされた陽子・陽子衝突型円形加速器であり、2010年4月から本格的に運転を開始した(2010年の運転開始から2013年のシャットダウンまでの期間をLHC Run1と呼ぶ)。LHCに4ヶ所ある衝突点の1つに設置されたATLAS検出器もLHCの稼働と共にデータの取得を開始し、2012年には $21.7[\text{fb}^{-1}]$ で重心系エネルギー8[TeV]の陽子・陽子衝突データの取得に成功した。またそのデータを解析した結果、同年7月にHiggs粒子と思われる新粒子を発見した。その後もデータの取得・解析が続けられ、2013年10月に前年に発見した粒子がスピン0のHiggs粒子であると確定した。なおLHCは現在シャットダウン期間中であり、2015年からのLHC Run2に向けて重心系エネルギーやルミノシティを増強するための改良が行われている。

上記のHiggs粒子の探索において、ミューオントリガーが重要な役割を担っている。Higgs粒子はその崩壊に伴う粒子を観測し、崩壊前の粒子を同定することで探索されるが、その崩壊モードとして $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ や $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ など終状態にミューオンを含む場合が多く存在する。そのためミューオンを観測することで、膨大な背景事象の中から目的とする物理事象を選別することができる。

ATLAS実験では3段階のトリガーシステムが採用されており、本研究で対象とするレベル1ミューオントリガーはその第1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、その値によってトリガーを発行するが、この際、飛跡の曲がり κ と p_T との対応を関連づけたCoincidence Windowと呼ばれる参照表が用いられる。そのため、Coincidence Windowの性質によってレベル1ミューオントリガーの性能が決定する。神戸大学ATLASグループでは以前より、このCoincidence Windowの作成・改良や実装といったレベル1ミューオントリガーに関する研究を行ってきた。

これまでの研究で、ミュオンスペクトロメータ自体に設置位置のズレや歪みがあることが判明している。また、レベル1ミュオントリガーで発行されるトリガーの大半は陽子・陽子衝突由来でない粒子によるものであることも判明している(このようなトリガーはフェイクトリガーと呼ばれ、検出器内を漂う陽子や中性子が磁石等の物質と相互作用することで発生する荷電粒子が原因と考えられている)。

これらの問題を解決するため、Coincidence Window にミュオンスペクトロメータの設置位置等の効果による補正を加えた。また、磁場で曲げられる前のミュオンの位置情報を用いてミュオンが衝突点由来かどうかを判定する Inner Coincidence を新たに導入することでフェイクトリガーの削減を図った。

本論文は以下のように構成される。

- 第2章：LHC Run1 での運転状況及び ATLAS 実験の概要を述べる。
- 第3章：ATLAS 実験におけるトリガーシステム、特に TGC と呼ばれるミュオントリガーチェンバーを用いたトリガーの仕組みを述べる。
- 第4章：Coincidence Window とその作成方法を説明する。
- 第5章：フェイクトリガーと LHC Run2 に向けた変更点を述べる。
- 第6章：Run2 に向けた Coincidence Window の改良、及び新たに導入される Inner Coincidence Window に関して説明する。
- 第7章：2012年に取得された 8[TeV] の陽子・陽子衝突のデータを用い、トリガーの性能評価を行った結果を述べる。
- 第8章：本論文のまとめとする。

第2章 ATLAS実験

2.1 LHC 加速器

LHC(Large Hadron Collider)は、スイス・ジュネーブ近郊にある欧州原子核研究機構(CERN)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り、衝突による重心系エネルギーは14[TeV]、最高ルミノシティーは $10^{34}[\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}]$ に達する。

陽子の質量は電子の約1800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によるエネルギー損失が少ない。そのため、LHCでは14[TeV]という世界最高エネルギーでの衝突を実現することが可能である。

表2.1に2012年の稼働状況における主要パラメータを示す。なお、現在(2013~2014年)はシャットダウン期間中であり、重心系エネルギー及びルミノシティー増強のため改良が行われている(詳細は第5章)。

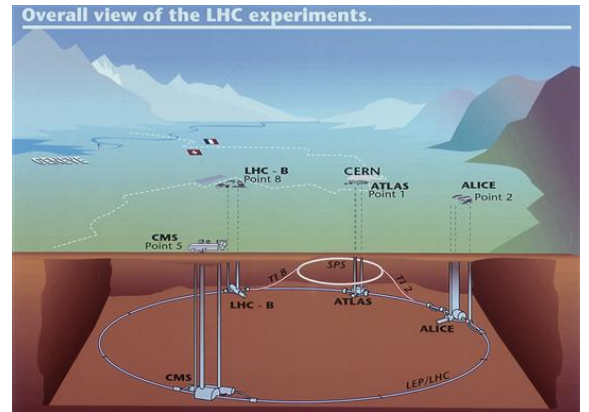


図 2.1: LHC 加速器

主リング周長	26.66[km]
重心系エネルギー(陽子+陽子)	4[TeV] + 4[TeV]
瞬間最高ルミノシティー	$7.73 \times 10^{33}[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$
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 の主要パラメータ

図2.2に2012年に取得されたデータの積分ルミノシティーの推移を示す。緑がLHC全体、黄色がATLAS検出器で取得されたデータを表しており、それぞれ $23.3[\text{fb}^{-1}]$ 、 $21.7[\text{fb}^{-1}]$ に相当するデータ取得することに成功した。

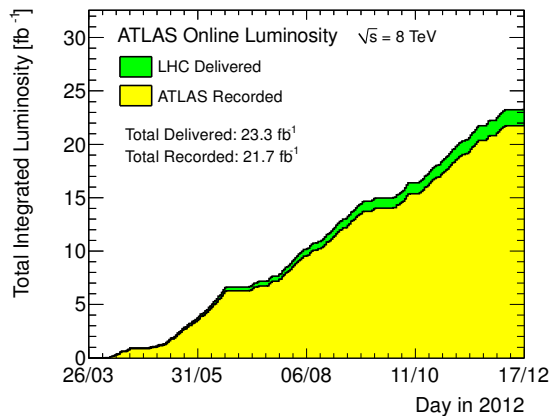


図 2.2: 積分ルミノシティの推移

また LHC では衝突点が 4 ヶ所あり、それぞれで次の 4 種類の実験が行われている。

- ATLAS (A Troidal LHC Apparatus)
Higgs 粒子や超対称性粒子 (SUSY) の探索を主な目的とした実験。詳細は後述する。
- CMS (Compact Muon Solenoid)
ATLAS 実験と同じく Higgs 粒子や超対称性粒子 (SUSY) の探索を主な目的とする。検出器は ATLAS 検出器よりも小型で、より強いソレノイド磁場をもつ。
- ALICE (A Large Ion Collider Experiment)
重イオン同士を衝突させることにより、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の解明を目的とする実験である。
- LHCb (Large Hadron Collider beauty)
b クォークを用いた CP 対称性の破れを観測することにより、標準模型を越える物理事象の探索を目的とする実験である。

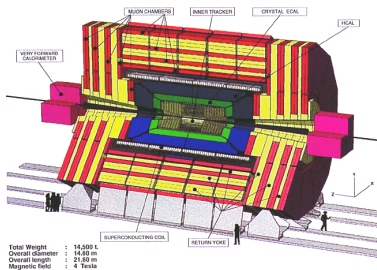


図 2.3: CMS 検出器

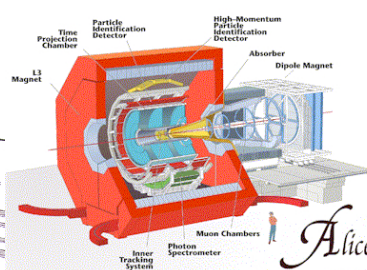


図 2.4: ALICE 検出器

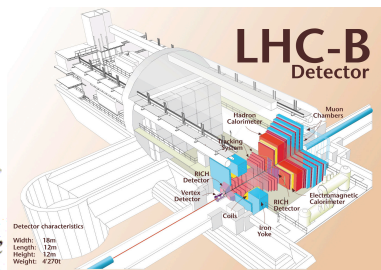


図 2.5: LHCb 検出器

2.2 ATLAS 実験の目指す物理

ATLAS 実験ではこれまで Higgs 粒子の探索及び精密測定を主目的の 1 つとしてきた。以下に標準模型における Higgs 粒子について簡単に述べる。

2.2.1 標準模型における Higgs 粒子

Higgs 粒子は素粒子の基本的な振る舞いを記述する標準模型において粒子に質量を与えるとされ、その存在が予想されてから様々な実験で探索が続けられてきた。そして 2012 年 7 月、ATLAS(及び CMS) では新たな粒子を発見し、その後もさらに多くのデータを解析した結果、2013 年 10 月にその新たな粒子がスピン 0 の Higgs 粒子であると確定した。

Higgs 粒子の生成

Higgs 粒子はトップクォークや W^\pm 、 Z 粒子などの質量の大きな粒子と結合しやすいため、LHC では主に以下の 4 つの生成過程が考えられる。図 2.6 にそのファインマン・ダイアグラムを、図 2.7 に生成断面積を示す。

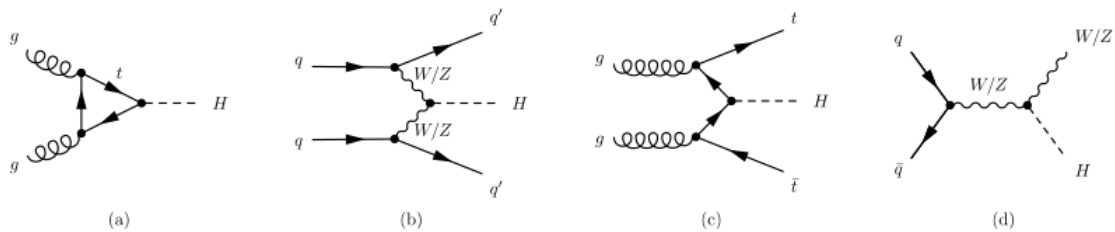


図 2.6: Higgs 粒子の生成過程

- $gg \rightarrow H$ (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、生成断面積が最も大きい。しかし Higgs 粒子の崩壊により生成される粒子以外に反応を特徴づける粒子が存在しないため、背景事象との選別が難しい。
- $qq \rightarrow qqH$ (vector boson fusion(b))
クォークから放出されたゲージボゾン (W/Z) から Higgs 粒子が生成される過程である。生成断面積が比較的大きく、終状態に 2 本のジェットを含むため、事象の選別が行いやすい。
- $gg \rightarrow t\bar{t}H$ (top associate production(c))
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を含むため事象の選別が行いやすい。

- $g\bar{g} \rightarrow (W/Z)H$ (W/Z associate production(d))

クォークの対消滅によって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。生成断面積は小さいが、終状態にゲージボゾンが観測されるため事象の選別が行いやすい。

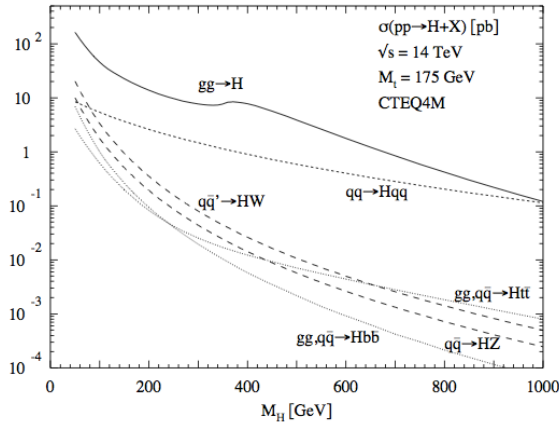


図 2.7: Higgs 粒子の生成断面積

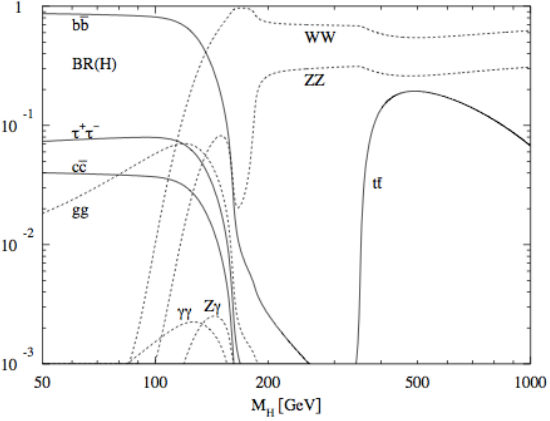


図 2.8: Higgs 粒子の崩壊分岐比

Higgs 粒子の崩壊

以下に予測されている Higgs 粒子の主な崩壊モードを示す。Higgs 粒子の崩壊分岐比の質量依存性を図 2.8 に示す。

- $H \rightarrow \gamma\gamma$

Higgs 粒子が 2 つの光子に崩壊する過程。光子は質量が 0 であり Higgs 粒子と結合できないので、トップクォークやボトムクォーク、W 粒子などのループを介することで光子を放出する。Higgs 粒子は $b\bar{b}$ や $c\bar{c}$ への崩壊が支配的であるが、これらは QCD 背景事象との区別が困難である。そのためこの崩壊過程が主な探索チャンネルとなる。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ため、電磁カロリメータの高い測定精度が要求される。

- $H \rightarrow \tau\tau$

Higgs 粒子が 2 つの τ に崩壊する過程である。 $\gamma\gamma$ 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 の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} の精密な測定が要求される。

- $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$

Higgs 粒子が 2 つの W に崩壊し、それぞれが $l\nu$ ($l: \mu, e$) に崩壊する過程である。崩壊分岐比は高いが、この過程は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} から横方向質量を算出し探索を行う。

- $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-$

Higgs 粒子が2つの Z に崩壊し、それぞれが ll に崩壊する過程である。終状態の4つのレプトンは Z の崩壊により生成されるため、高い横方向運動量 p_T を持つ。

Higgs 粒子の探索結果

2012年7月、CERNではHiggs粒子と思われる新粒子を発見したと報告した。図2.9及び図2.10はその結果である [7]。

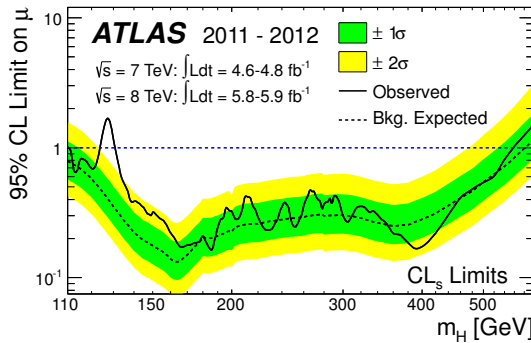


図 2.9: Higgs 粒子生成に対する制限

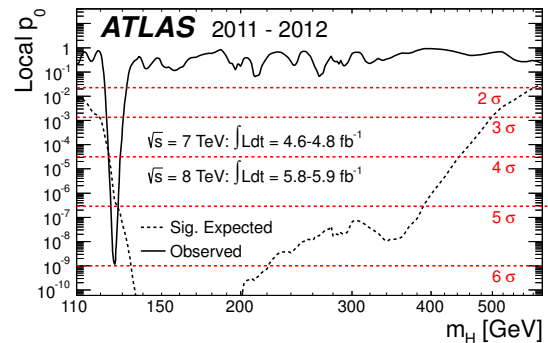


図 2.10: 背景事象が信号に見える確率

図 2.9 は 110~600[GeV] の質量範囲における、標準模型を仮定した Higgs 粒子生成に対する制限である。横軸は Higgs 粒子の質量、縦軸は Higgs 粒子の生成断面積の上限値を表す。実線は実験で得られた制限で、この値が 1 よりも小さくなる質量の領域では 95[%] の信頼度でその可能性が排除される。破線で示された曲線は Higgs 粒子が存在しない場合に得られると期待される制限をシミュレーションで評価した結果の中心値である。緑と黄色のバンドはそれぞれ評価値の $\pm 1\sigma$ 、 $\pm 2\sigma$ の統計揺らぎの範囲を示す。この図から、質量が 500[GeV] 以下では 123~130[GeV] の範囲のみ 95[%] の信頼度で排除されていない領域であることが分かる。また図 2.10 は、背景事象のみ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 (検査をした全ての質量範囲) で表したものである。ほとんど全ての仮定した質量に対して、その確率 (実線) はせいぜい数 [%] であるが、 $m_H=126.5$ [GeV] では確率が 10^{-9} (赤の破線で示す通り 6σ) まで落ち込んでいる。新粒子の発見を表すのに使用される標準が 5σ の超過であることから、新粒子が存在すると結論づけられた。

その後発見された粒子の質量や結合定数、スピン・パリティの測定が行われ、標準模型の Higgs 粒子と無矛盾であることが分かった。図 2.11 は、発見された粒子のスピン・パリティの測定結果である [8]。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 、 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 、 $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ に崩壊する過程を利用し、 J^P (スピン・パリティ) = 0^+ という標準模型に対して $J^P = 0^-, 1^\pm, 2^+$ という仮定をデータがどれだけ嗜好しているかを表す度合い ($CL_s(J_{alt}^P)$) を表している。ここで、

$$CL_s(J_{alt}^P) = \frac{p^0(J_{alt}^P)}{1 - p^0(0^+)}$$

と定義し、グラフの縦軸にとっている。また、黒の実線とそれに沿った点は実データを、青の破線とそれに沿った点がシミュレーションで評価した値を表し、緑のバンドは評価値の $\pm 1\sigma$ の統計揺らぎの範囲を示す。

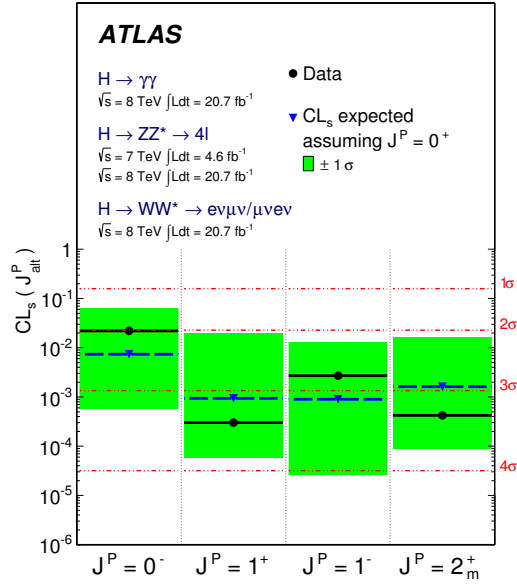


図 2.11: 各 J^P 仮説である確率

この結果から、新粒子のスピンのパリティが 0^+ 以外である仮説は 2 または 3σ で棄却され、新粒子はスピン 0 の Higgs 粒子であると確定した。

2.3 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は直径 22[m]、長さ 44[m]、総重量 7000[t] の円筒型の汎用検出器である。衝突点に近い位置から順に、内部飛跡検出器、(電磁・ハドロン) カロリメータ、ミュオンスペクトロメータと設置されており、検出器間には超伝導磁石が設置されている。全体像を図 2.12 に示す。

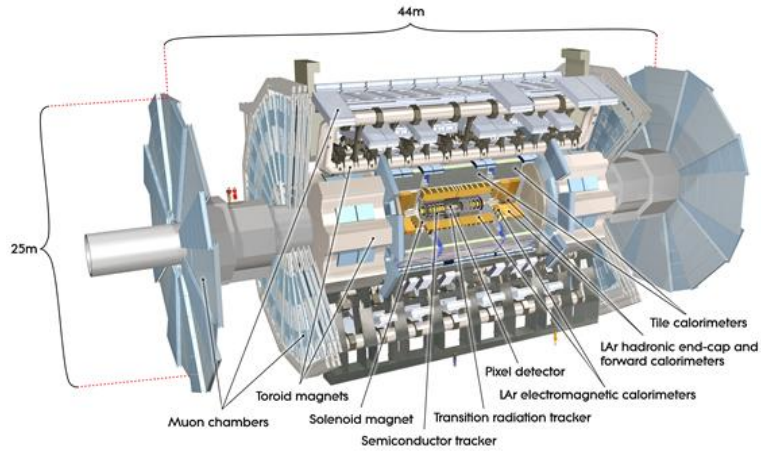


図 2.12: ATLAS 検出器の全体像

ATLAS 検出器の座標系を図 2.13 に示す。陽子の衝突点を原点とし、LHC のビーム軸方向を Z 軸とする。Z 軸と直交する面内で、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。また図の通りに r 、 θ 、 ϕ を定義する ($0 \leq \theta < 2\pi$ 、 $0 \leq \phi < \pi$)。さらに擬ラピディティ η を

$$\eta \equiv -\ln \left\{ \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right\}$$

と定義する。 η を用いるのは、ハドロンコライダーでは生成される粒子の η 分布 ($\Delta N/\Delta\eta$) がほぼ一定になるためである。円筒形の ATLAS 検出器はこの η の範囲によって区切られており、それぞれバレル部 ($|\eta| < 1.0$: 円筒の側面部) とエンドキャップ部 ($1.0 < |\eta|$) に分けられる。またエンドキャップ部はさらに $1.0 < |\eta| < 1.9$ の領域をエンドキャップ領域、 $1.9 < |\eta|$ の領域をフォワード領域と分けて呼ぶこともある。

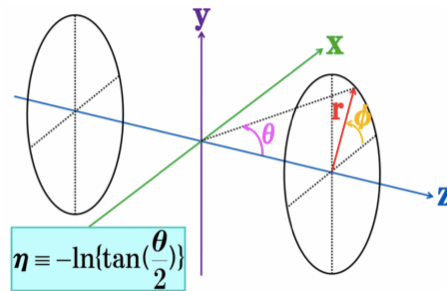


図 2.13: ATLAS 検出器の座標系

2.3.1 超伝導磁石システム

ATLAS 検出器のマグネットシステムは4つの超伝導磁石で構成される。中央に設置されている超伝導ソレノイド磁石は内部飛跡検出器での運動量測定を主な目的としており、バレル部及びエンドキャップ部に設置されている超伝導トロイド磁石はミューオンスペクトロメータでのミューオンの運動量測定を主な目的としている。

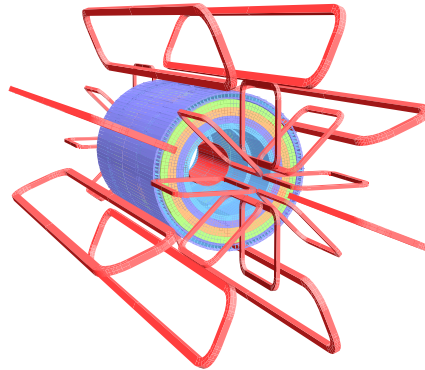


図 2.14: マグネットの構造

超伝導ソレノイド磁石は長さ 5.3[m]、直径 2.4[m]、径方向の厚さ 45[mm] の円筒形をしている。超伝導トロイド磁石は8つのコイルがビーム軸に対して8回対称となるように、バレル部に1つ、エンドキャップ部に2つ設置されている。バレル部は長さ 25.3[m]、内径 9.4[m]、外径 20.1[m] で積分磁場強度は 2 ~ 6[T] であり、エンドキャップ部は長さ 5[m]、内径 1.65[m]、外径 10.7[m] で積分磁場強度は 4 ~ 8[T] である。



図 2.15: 超伝導ソレノイド磁石

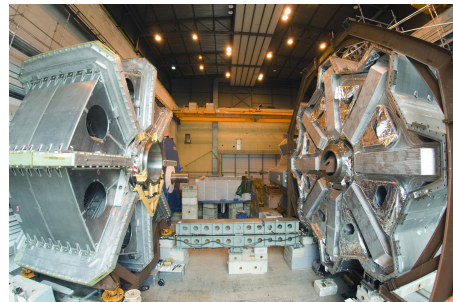
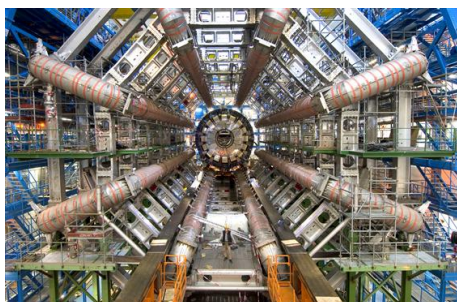


図 2.16: 超伝導トロイド磁石 (バレル)

図 2.17: 超伝導トロイド磁石 (エンドキャップ)

2.3.2 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は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約 2[T] の磁場によって運動量の測定を行う。内部飛跡検出器はピクセル検出器、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。

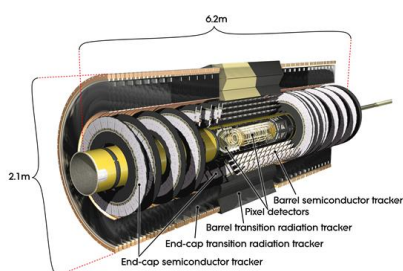


図 2.18: 内部飛跡検出器の全体像

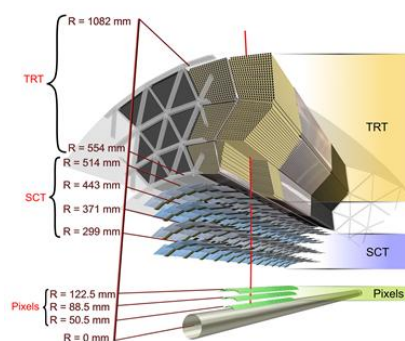


図 2.19: 内部飛跡検出器の断面図

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

衝突点から最も近い領域に設置されている半導体検出器で、高い位置分解能 (R- ϕ 方向 : 10[μm]、Z 方向 : 115[μm]) を持つ。1 ピクセルが 50[μm] \times 400[μm] で 2 次元での位置測定が可能であり、ピクセル毎に読み出しを行う。バレル部、エンドキャップ部共に 3 層の構造になっており、総チャンネル数は 8040 万チャンネルとなる。

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

細長い有感領域を平行に並べた半導体検出器である。1 枚のシリコンセンサーは 6.4[cm] \times 6.4[cm] で、読み出しストリップの間隔は 80[μm] である。各モジュールは 4 枚のシリコン

センサーで構成される。2層を40[mrad]傾けることで2次元での位置検出を可能にしている。位置分解能はR- ϕ 方向で16[μm]、Z方向で580[μm]である。

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

直径4[mm]のカーボンファイバー製のドリフトストローチューブを積層したガス増幅検出器である。 $|\eta| < 2.0$ の範囲に渡りビーム軸と平行に設置されており、R- ϕ 方向の位置測定を行う。ストローチューブ1つあたり130[μm]の位置分解能を持ち、荷電粒子の識別や飛跡の検出を行う。

2.3.3 カロリメータ

ATLAS検出器のカロリメータの全体像を図2.20に示す。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に分けられ、電子や光子、ジェットなどのエネルギーや位置の測定を目的としている。以下に各カロリメータについて記述する。

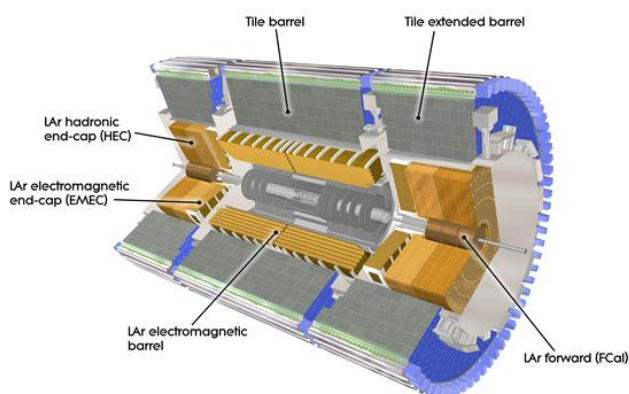


図 2.20: カロリメータ

電磁カロリメータ

LAr(液体アルゴン)と鉛のアブソーバ(吸収体)で構成される。アブソーバをアコーディオンのような形状にすることで ϕ 方向の不感領域がなくなるように設計されている。超伝導ソレノイド磁石の外側のバレル部 ($|\eta| < 1.5$)とエンドキャップ部 ($1.4 < |\eta| < 3.2$)の両領域に設置されており、エネルギー分解能は

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

と表される。第1項は電子数をエネルギーに換算する際の統計的な揺らぎによる項で、第2項は較正の精度や温度の揺らぎによる項である。

ハドロンカロリメータ

バレル部 ($|\eta| < 1.7$) ではタイルカロリメータ、エンドキャップ部 ($1.5 < |\eta| < 3.2$) では LAr Hadronic Endcap Calorimeter(HEC) が使用されている。

- タイルカロリメータ
鉄の吸収体とタイル状のシンチレータから構成される。シンチレータタイルの両端に波長変換ファイバーが繋がれており、2つの光電子増倍管から読み出しを行う。
- LAr Hadronic Endcap Calorimeter(HEC)
電磁カロリメータと同じく LAr を用いたカロリメータである。ただしアブソーバに銅を使用している。32個の同一な形状のくさび形モジュールを組み合わせて円盤状になっている。

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。

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

2.3.4 ミューオンスペクトロメータ

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。

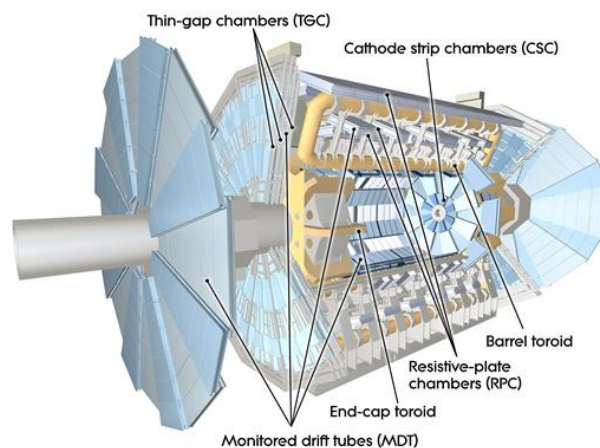


図 2.21: ミューオンスペクトロメータ

Monitored Drift Tube(MDT)

MDTはバレル・エンドキャップ両領域の広い部分をカバーし、R-Z方向成分を精密に測定する。直径30[mm](ワイヤー径50[μm])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。粒子の通過位置をドリフト時間によって算出する。位置分解能は60[μm]で、総チャンネル数は30万チャンネルである。

Cathode Strip Chamber(CSC)

CSCは運動量精密測定用のカソードストリップ読み出しMWPC(Multi-Wire Proportional Chamber)であり、放射線強度の高い $2.0 < |\eta| < 2.7$ の領域に設置されている。ワイヤー間隔が2.5[mm]、ストリップ間隔が5.3[mm]と5.6[mm]の2種類の構造を持つものが存在する。ドリフト時間は30[nsec]以下で、位置分解能は60[μm]である。

Resistive Plate Chamber(RPC)

RPCは $|\eta| < 1.0$ のバレル部に設置されているトリガー用検出器であり、MDTでは測定されない ϕ 方向の位置測定も行う。アノードにワイヤーを使用せず、平行板電極を用いたストリップによって読み出しを行うガスチェンバーである。電極間には4.9[kV/mm]の高電圧が印加され、荷電粒子が通過するとそのトラックに沿ってなだれ増幅が起きてアノードまで達する。 ϕ 方向の位置分解能は5~10[mm]程度であり、反応時間が短いという特徴を持つ。

Thin Gap Chamber(TGC)

次章で詳細を述べる。

第3章 ミューオントリガー

3.1 トリガーシステム

ATLAS 実験ではバンチ衝突間隔は 40.8[MHz] であり、衝突点での陽子の非弾性衝突事象頻度は 1[GHz] を越える。これらの膨大なイベントを全て保存することは不可能なため、ATLAS 実験では目的とする物理事象のみを効率良く選別するためにトリガーシステムが用いられる。

ATLAS 実験におけるトリガーシステムの概要を図 3.1 に示す。トリガーシステムはレベル 1(LVL1)、レベル 2(LVL2)、イベントフィルター (EF) の 3 段階で構成されており、最終的にイベントレートを 400[Hz] 程度にまで落とす。

レベル 1 トリガーではカロリメータとミュオンシステムにより事象選別を行う。カロリメータあるいはミュオンシステムにおいてトリガーの対象となる信号が観測された領域を Region of Interest(RoI) と呼ぶ。レベル 2 トリガーでは RoI の検出器情報を用いてイベントの精密な選別を行い、イベントフィルターでは全検出器の情報を用いてイベントの選別を行う。

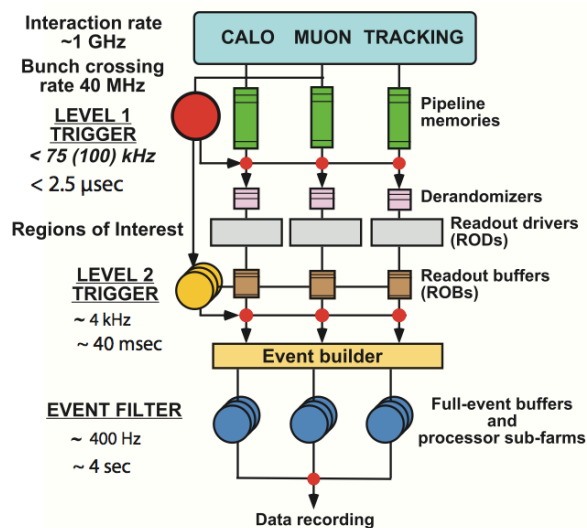


図 3.1: トリガーシステムの概要

3.1.1 レベル1トリガー

レベル1トリガーでは衝突点で発生した1[GHz]のイベントレートを75[kHz]程度にまで落とすことを目的としている。レベル1トリガーの処理の流れを図3.2に示す。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。カロリメータでは E_T^{miss} 、 e/γ 、 τ 、jetsのエネルギーなどに対する閾値が設定されており、ミュオンスペクトロメータでは横方向運動量 p_T に対する閾値が設定されている。トリガーの閾値を超えたイベントのトリガー情報は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。

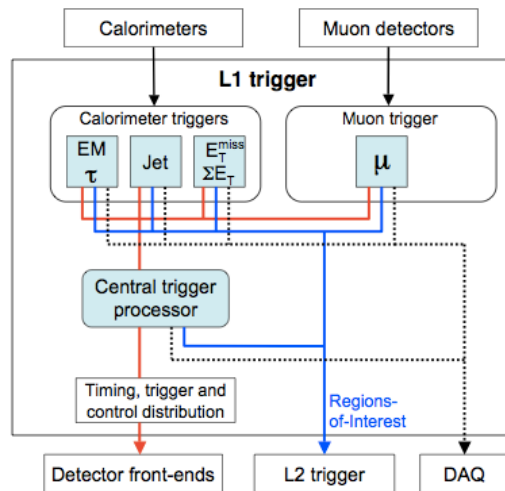


図 3.2: レベル1トリガーの処理の流れ

3.1.2 レベル2トリガー

レベル2トリガーではイベントレートを75[kHz]から4[kHz]程度にまで落とすことを目的としている。レベル1トリガーにより選定されたRoIの情報を元にカロリメータ、MDT、内部飛跡検出器からの位置情報を利用してより精度の高い選別を行う(RoI付近の情報のみを対象とすることで計算の効率化を図っている)。

3.1.3 イベントフィルター

イベントフィルターではイベントレートを400[Hz]程度にまで落とすことを目的としている。ここでは全ての検出器の情報をを用いて粒子を再構成・識別し、トリガーの判定を行う。最終的にトリガーと判定され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とRPCによって発行されるトリガーであり、バレル部 ($|\eta| < 1.05$) をRPC、エンドキャップ部 ($1.05 < |\eta| < 2.42$) をTGCがカバーしている。レベル1ミュオントリガーの目的は高い横方向運動量 p_T を持つミュオンの選別である。以下でTGCに関して概要を述べる。

3.2.1 Thin Gap Chamber(TGC)

TGCは高エネルギー実験ではよく使用されるMWPC(Multi-Wire Proportional Chamber)の一種であり、ATLAS検出器ではエンドキャップ部に設置されている。TGCはミュ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。チェンバーは台形で、その大きさは一辺が1~2[m]程度である(配置場所によって異なる)。図3.3にTGCの配置とその構造を示す。図3.3の赤く示された両サイドの円形部分がTGCを表している。

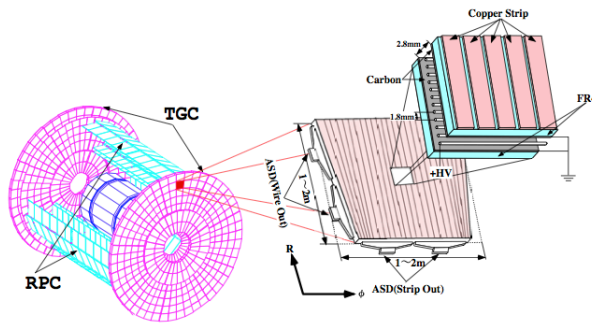


図 3.3: TGC の配置と構造

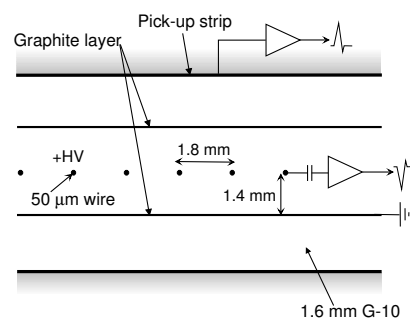


図 3.4: TGC の断面図

TGCの構造と検出原理

TGCのチェンバーの断面図を図3.4に示す。TGCは、アノードとして直径50[μm]の金メッキをしたタングステンワイヤーが1.8[mm]の間隔で台形の上底・下底に平行に張られている。カソードとしては1.6[mm]または1.8[mm]のガラスエポキシ樹脂を基板とし、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。ガラスエポキシ板を挟んだ反対面には、1面を32分割した扇形の銅のストリップがワイヤーに直交して並べてあり、 $R \cdot \phi$ の2次元の読み出しを行う(図3.3)。ワイヤーには約30[cm]毎にワイヤサポートがあり(図3.5)、ワイヤーのたるみを防ぐとともにガスの流路の形成とTGCの歪みを防いでいる。ワイヤーは6~20本をまとめて1つのチャンネルとし、 R 方向の位置情報を読み出す。ストリップは32本あり、それぞれが1つのチャンネルとして ϕ 方向の位置情報を読み出す。またTGCの内部は $\text{CO}_2/\text{n-pentan}(55/45)$ 混合ガスで満たされている。これは、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とき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が自己放電を引き起こす可能性があるからである。紫外線を吸収し放電を抑えるため、クエンチ効果を持つこのガスが封入されている。

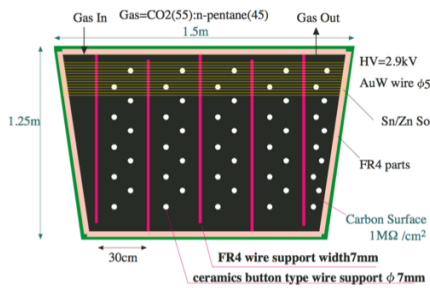


図 3.5: ワイヤサポート

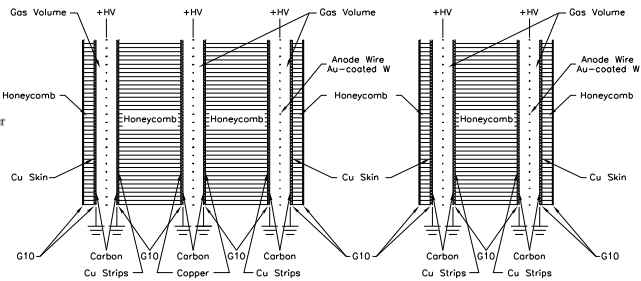


図 3.6: doublet(右) と triplet(左) の構造

TGCのワイヤーは2.9[kV]程度の高電圧が印加されている。そのため、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電離され、電子・陽イオン対を作る。電離された電子(一次電子)はアノードに移動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。電子のエネルギーがガス中の分子の電離エネルギーを超えるとガス分子がイオン化され、二次電子が生成される。二次電子も同様に印加電圧によって加速され、次々と衝突・電離を繰り返し電子雪崩を起こす。これが信号として読み出される。一方電離によって生じた陽イオンはカーボン面に向かって移動するが、カーボン面は高抵抗であるため瞬間的には電流は流れず、時間とともに負の電荷が誘起される。これによってストリップに正の電荷が局所的に誘起され、信号として読み出される。また、TGCのアノードとカソードの間隔は1.4[mm]と一般的なMWPCと比べ狭くなっており(図3.4)、陽イオンがカソードに早く到達する。このことからTGCは粒子の高レート入射に耐性を持ち、高ルミノシティ環境に対応できる。

ATLAS実験ではTGCは2層(doublet)または3層(triplet)を重ねた構造にして用いられる(図3.6)。doubletの場合は2層のワイヤー面と2層のストリップ面から読み出しが行われる。tripletの場合は、2層目にはストリップがなく、3層のワイヤー面と2層のストリップ面から読み出しが行われる。多層構造にすることで、各層のコインシデンスをとってバックグラウンドによる信号の影響を減らすだけでなく、ワイヤーサポートによる不感領域の影響を減らしている。また機械的強度を保つため、ハニカムが接着されている。

TGCの配置

TGCの配置図を図3.7に示す。図3.7はR-Z平面における断面図で、横軸がZ、縦軸がRである(単位は共に[mm])。TGCシステムはM1(triplet)、M2(middle)、M3(pivot)の3つのstationとEndcap Inner(EI)、Forward Inner(FI)の5つから構成され、エンドキャップ部において円盤状に配置されている。M1は3層、M2・M3・EI・FIは2層のチェンバーからなり、M1・M2・M3の計7層でトリガー判定を行う。

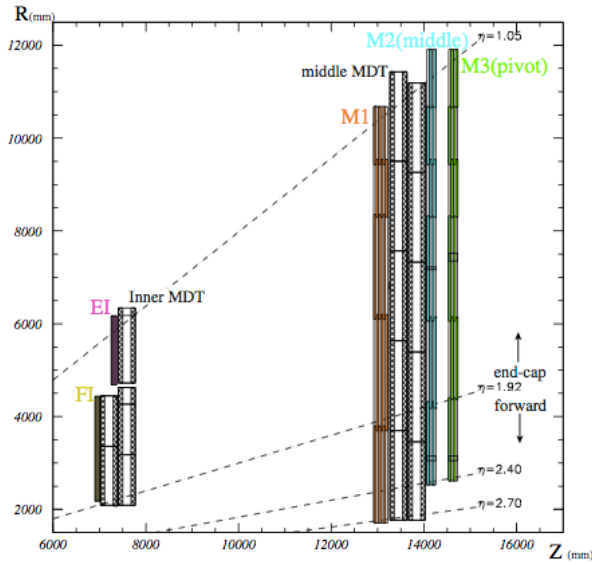


図 3.7: R-Z 断面での TGC の配置

TGC は 1/12 円を 1 つの単位とする (図 3.8 の赤く囲まれた領域)。レベル 1 トリガーではこの 1/12 円をさらにセクターと呼ばれる単位に分割する。1.0 < $|\eta|$ < 1.9 のエンドキャップ領域では ϕ 方向に 4 分割した領域を、1.9 < $|\eta|$ のフォワード領域では ϕ 方向に 2 分割した領域をトリガーセクターと呼ぶ (すなわちトリガーセクターは図 3.9 のようにエンドキャップ領域で 48 つ、フォワード領域で 24 つとなる)。さらにトリガーセクターはエンドキャップでは η 方向に 37 分割、 ϕ 方向に 4 分割され、フォワードでは η 方向に 16 分割、 ϕ 方向に 4 分割される。この分割された領域はサブセクターと呼ばれ、トリガー処理の最小単位となる (RoI に対応している)。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 万に及ぶ。

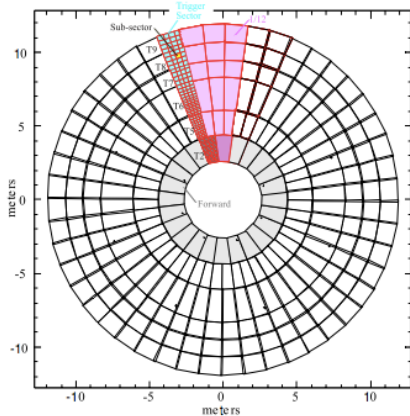


図 3.8: TGC の R- ϕ 断面図

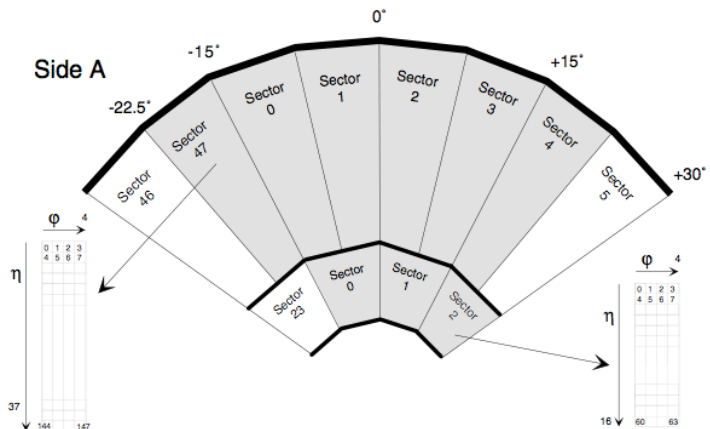


図 3.9: サブセクターナンバリング

3.2.2 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 3.10 に示す。

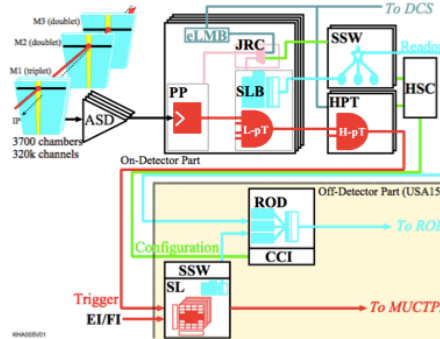


図 3.10: TGC エレクトロニクスの概要

TGC システムのデータの流りは

- トリガー系
レベル 1 トリガー判定のためのデータを渡す。図 3.10 の赤線で表される。
- リードアウト系
レベル 1 トリガーの発行に応じてデータを渡す。図 3.10 の青線で表される。

の 2 つがある。

トリガー系

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(図 3.11)。TGC から出力されるアナログ信号は ASD に送られ、信号の増幅・整形・デジタル化が行われた後、PP ASIC に送られる。PP ASIC では、各チャンネルへ粒子が到達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 ASIC は PP ASIC からの情報を受け取り、M2 及び M3 の 4 層からの信号を元にコインシデンス処理が行われ、トリガーが判定される(low- p_T トリガー)。また M1 からの信号についてもコインシデンス処理が行われる。HPT では SLB ASIC で行われた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及び横方向運動量 p_T の概算が行われる。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、RPC の情報と共にミュオン最終的なトリガー判定に用いられる。

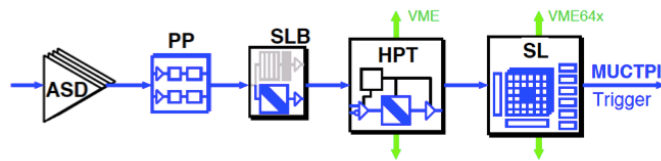


図 3.11: トリガー系のデータフロー概略図

リードアウト系

PP ASIC から送られてきたデータは、SLB ASIC 中にあるレベル 1 バッファに蓄えられる。このバッファの保持時間は $2.5[\mu\text{sec}]$ であり、保持時間内に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) へ送られる。SSW ではデータの圧縮を行い、規格フォーマットにデータを変換する。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 ASIC 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、Timing, Trigger and Control(TTC) の情報との整合性が確認される。データが正しいければ、要求されるフォーマットへ変換し Read Out Buffer(ROB) へ送られる。

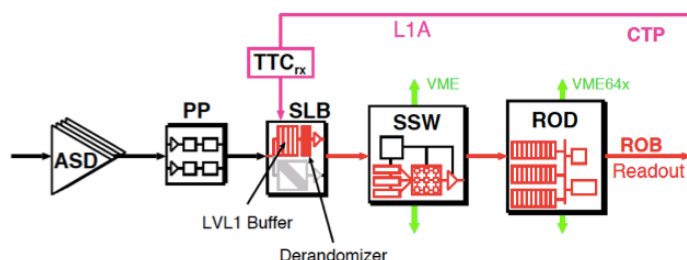


図 3.12: リードアウト系のデータフロー概略図

3.2.3 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 を基にトリガー判定を行う。 p_T はミューオンの磁場による曲がりから概算される。以下に p_T の概算方法及びトリガー判定について述べる。

横方向運動量 p_T の概算方法

陽子衝突により生じ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(図 3.13 の赤線)。最外層の TGC(M3:pivot) での検出点とビームの衝突点を結ぶ直線を無限運動量を持つミューオンのトラックと仮定する(図 3.13 の青線)。M1(triplet)

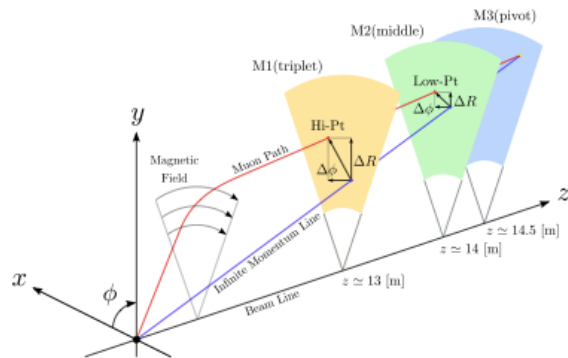


図 3.13: p_T 概算方法の模式図

及び M2(doublet) での検出点と無限運動量トラックの通過点の差を R 、 ϕ それぞれの方向について測定し、その差を ΔR 、 $\Delta\phi$ とする。この ΔR 、 $\Delta\phi$ を用いて p_T を概算する。

M1 及び 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 、 $\Delta\phi$ で形成される領域をウィンドウと呼び、M1・M2 共に p_T が 6[GeV/c] 以上のミュオンがほぼ通過できる範囲に設定されている。

トリガー判定の流れを図 3.14 に示す。ミュオントリガーシステムではまず、M2、M3 のヒット情報に対して R 方向、 ϕ 方向独立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)。さらに 2-station コインシデンスの条件に M1 のヒット情報を加えた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。このコインシデンス情報 (ΔR 、 $\Delta\phi$) を用いて Coincidence Window(CW) と呼ばれる参照表 (Look Up Table:LUT) を参照することでトリガーを発行する。また low- p_T トリガーが設定されている場合、3-station コインシデンスの条件を満たさなくても M2 での ΔR 、 $\Delta\phi$ 情報を用いることでトリガーが発行される。

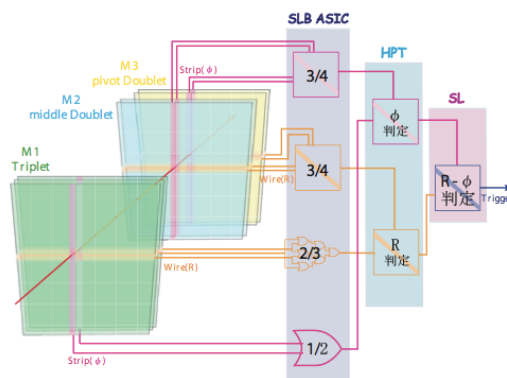


図 3.14: TGC トリガーの判定方法

3.2.4 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 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) レベルの信号で出力する。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の調整のためにテスト信号を出力する機能を持つ。

Patch Panel ASIC(PP ASIC)

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 の重なった部分での二重カウントを防ぐため、その部分に対しては OR ロジックを通して信号を出力する。PP ASIC 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 ASIC)

SLB ASIC は大きく分けてトリガー部と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を行う。SLB ASIC の段階ではワイヤーとストリップ、doublet と triplet は別々に扱うため、5 種類のコインシデンス処理 (wire-doublet、strip-doublet、wire-triplet、strip-triplet、EI/FI) の設定を切り替えることが可能である。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からのズレを計算し、low- p_T 判定を行う。triplet ではワイヤーとストリップで層の数が異なるため、ワイヤーでは 3 層中 2 層以上、ストリップでは 2 層中 1 層以上での検出を要求する。EI/FI ではミューオンのヒット情報及びトリガー情報が作成される。また、トリガー部には PP ASIC からの信号に 1/2clock 単位で遅延をかける機能や、各チャンネルをマスクする機能、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 つに絞り込む(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の動作確認やタイミング調整を行うためにテスト信号を出力する機能を持つ。

リードアウト部では、レベル 1 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 ASIC まで独立に処理されてきた M2・M3 と M1 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 (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 はエンドキャップ領域用に 4 つ、フォワード領域用に 3 つ搭載されている。

Sector Logic(SL)

TGC エレクトロニクス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- ϕ 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- ϕ 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) の信号から両者のコインシデンス (R- ϕ コインシデンス) をとることにより、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参照表が用いられる (詳細は次章)。この CW は ΔR 、 $\Delta\phi$ の組み合わせに応じた p_T 閾値が記述しており、実験状況に臨時対応できるように書き換え可能な集積回路に実装されている。

プレトラックセクターでは、各閾値毎に p_T の大きい順に 2 つのトラックを選択し、計 12 トラックがファイナルトラックセクターに送られる。

ファイナルトラックセクターでは、プレトラックセクターから送られた 1 トリガーセクター分のトラックから 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変換し ROD へ送る。1 つの SSW で最大 23 個の SLB ASIC のデータを受け取る。

Read Out Driver(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まるモジュールで、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。

3.3 トリガー性能

レベル1 ミューオントリガーの性能はトリガー効率とトリガーレートの2点で評価する。以下ではその2点について定義と測定方法を述べる。

3.3.1 トリガー効率

レベル1 トリガーにおけるトリガー効率 ε を以下の式で定義する。

$$\varepsilon = \frac{\text{レベル1 トリガーが発行されたミュオンの数}}{\text{TGCに入射したミュオンの数}} \quad (3.1)$$

このトリガー効率 ε は、Tag and Probe 法と呼ばれる手法を用いて測定する。

Tag and Probe 法

Tag and Probe 法とは、 J/ψ や Z などのダイミュオン崩壊から生成されたミュオンを選び出し、トリガー効率を測定する手法である。この手法によりイベントトリガーとは独立なミュオンを用いることが可能となり、ミュオンの同定及び運動量測定の実確性を高めることができる。本研究では $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事象 (図 3.15) を用いた Tag and Probe 法によりトリガー効率を算出する。以下にその手順を述べる。

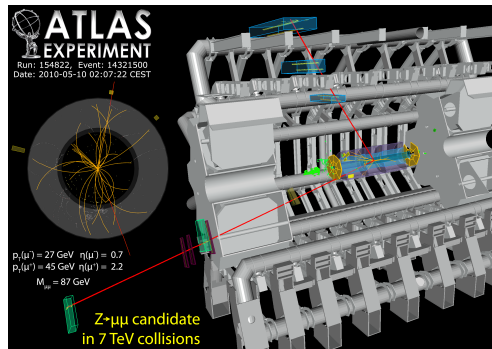


図 3.15: Z boson のダイミュオン崩壊

1. Z boson mass (m_Z) の再構成

ATLAS 実験では、1 回のバンチ衝突毎に内部飛跡検出器の情報からいくつかの飛跡が再構成される。同様にミュオンスペクトロメータでも飛跡が再構成され、内部飛跡検出器で再構成された飛跡と適合するものを選び出している。このようにしてミュオンの飛跡を選び出すアルゴリズムを staco と呼び、staco によって選ばれたミュオンの飛跡を staco muon と呼ぶ。まず、1 回のバンチ衝突でこの staco muon が 2 つ以上あるイベントを選ぶ。そのイベントの中で異符号の電荷を持つ 2 つの staco muon を選び出し、不変質量 $M_{\mu\mu}$ を算出する (図 3.16)。この算出した $M_{\mu\mu}$ が $m_Z - 10[\text{GeV}/c^2] \leq M_{\mu\mu} \leq m_Z + 10[\text{GeV}/c^2]$

($m_Z = 91.1876[\text{GeV}/c^2]$) を満たすとき、これらのミュオンは Z の崩壊から発生したものとみなす。

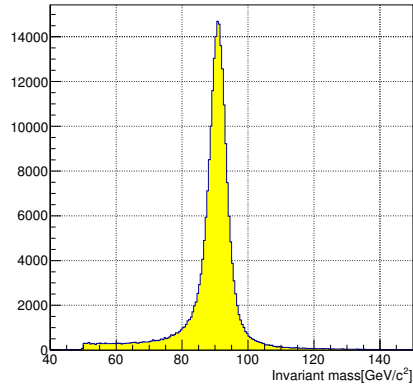


図 3.16: $M_{\mu\mu}$ の分布

2. Tag muon の選択

次に、選別した 2 つの staco muon のうち任意の片方を選ぶ。この staco muon の衝突点での運動量方向を η_μ 、 ϕ_μ と表す。また、EF(イベントフィルター) で再構成された飛跡の衝突点での運動量方向を η_{EF} 、 ϕ_{EF} と表す。このとき、 $\Delta\eta = \eta_\mu - \eta_{EF}$ 、 $\Delta\phi = \phi_\mu - \phi_{EF}$ として、2 つの飛跡の衝突点での運動量方向の差 ΔR を次のように定義する。

$$\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2} \quad (3.2)$$

また、このときの ΔR の分布を図 3.17 に示す。

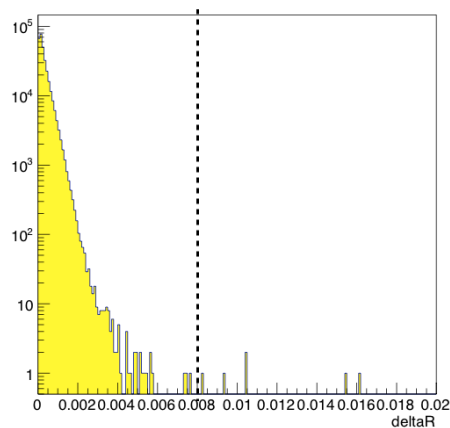


図 3.17: Tag muon 選択における ΔR の分布

ここで $\Delta R \leq 0.008$ を満たす場合 (図 3.17 の黒の破線で区切られた左側)、この staco ミューオンに対して 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る場合、同イベント内に含まれる他の staco muon は発行されているトリガーに関係なく保存されるため、Tag muon と対となるもう一方の staco muon はイベントトリガーとは独立なミューオンサンプルだとみなせる。

3. Probe muon の選択

Tag muon と不変質量を組んだもう一方の staco muon を Probe muon と呼ぶ。Probe muon の方向が TGC の設置されている向き ($1.05 \leq |\eta| \leq 2.42$) であれば式 (3.1) の分母に加える。さらに、Probe muon に対してレベル 1 トリガーが発行された RoI との距離を計算する。RoI の方向を η_{RoI} 、 ϕ_{RoI} と表し、 $\Delta\eta = \eta_\mu - \eta_{RoI}$ 、 $\Delta\phi = \phi_\mu - \phi_{RoI}$ として式 (3.2) に代入して ΔR を計算する (このときの ΔR の分布を図 3.18 に示す)。ここで $\Delta R \leq 0.2$ を満たす場合 (図 3.18 の黒の破線で区切られた左側)、式 (3.1) の分子に加える。

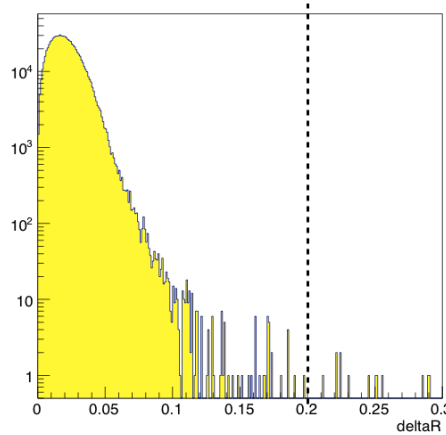


図 3.18: Probe muon 選択における ΔR の分布

1~3 の手順でデータからミューオンを選び出し、トリガー効率を算出する。図 3.19 は 2012 年のデータを用いて算出した $pt_6(20[\text{GeV}/c]$ 以上と判定されたトリガー) のトリガー効率である。

ここで、トリガー効率を次のように定義したフェルミ関数によってフィットした。

$$F(p_T) = \frac{P}{1 + \exp\left\{\frac{1}{R}(p_T - T)\right\}} \quad (3.3)$$

式 (3.3) において、P、R、T はそれぞれ Plateau efficiency、Resolution、Threshold を表す。Plateau efficiency とは $p_T \geq 20[\text{GeV}/c]$ の平坦な部分を指し、Threshold はトリガー効率の閾値を指す。また、Resolution は立ち上がりの鋭さを指す。

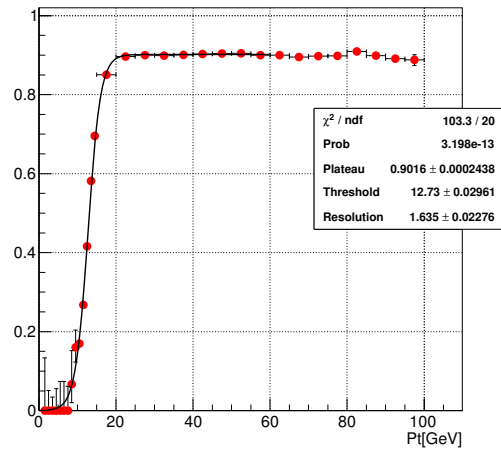


図 3.19: 2012 年のトリガー効率

3.3.2 トリガーレート

トリガーレートとは、実データにおける時間あたり (ルミノシティあたり) のトリガーが発行された事象数である。ここではルミノシティあたりの pt6 トリガーの発行回数の η 分布を示す。図 3.20 は 2012 年の Run で取得されたデータを用いて算出したトリガーレートである。

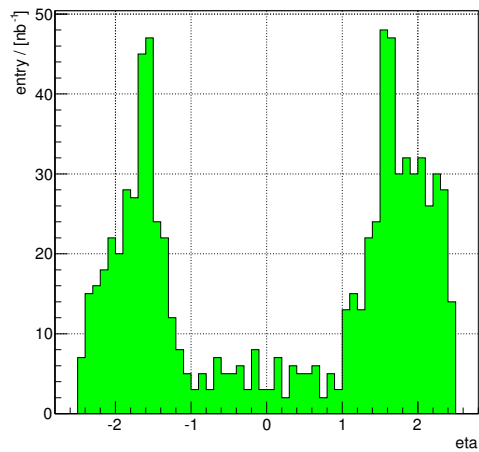


図 3.20: 2012 年のトリガーレート

第4章 Run2

4.1 フェイクトリガー

ATLAS 実験で取得されたデータを用いて、レベル1 ミューオントリガーにおいて p_T が 20[GeV] 以上と判定されたイベントを解析した結果、ミューオン由来ではない信号によってトリガーが発行されていることが判明した。このようなトリガーはフェイクトリガーと呼ばれる。

4.1.1 フェイクトリガーの影響

2012 年の Run で取得されたデータにおいて、 $p_T \geq 20$ [GeV] のトリガーが発行された回数の η 分布を図 4.1 に示す [13]。黒線のヒストグラムは L1_MU20 が発行された (レベル1 ミューオントリガーで 20[GeV] 以上と判定された) 回数を表している。青のヒストグラムは L1_MU20 が発行された中から、オフライン解析で再構成された飛跡とのマッチングがとれたものを表している。黄色はオフライン解析で再構成された飛跡の中から $p_T \geq 20$ [GeV] と判定されたものを表している。

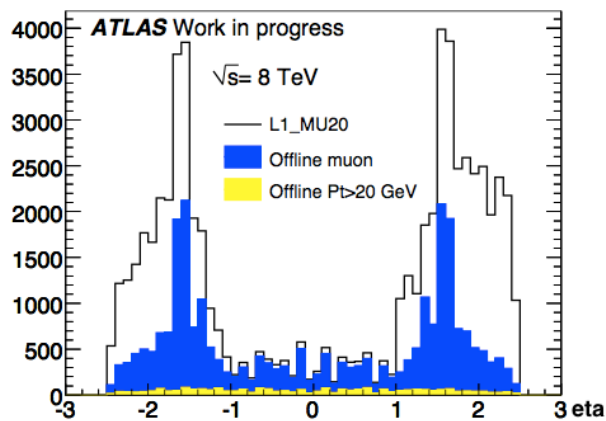


図 4.1: L1_MU20 の η 分布

この結果から、L1_MU20 が発行されたものの約 60[%] はオフライン解析で再構成されたミューオンの飛跡とマッチングがとれておらず、ミューオン由来でない信号によってトリガーが発行された (=フェイクトリガーである) ことが分かる。

現在のレベル1 ミューオントリガーシステムは処理限界に達している (75[kHz]) ため、このようにトリガーの多くの割合を占めるフェイクトリガーを削減することが課題となっている。

4.1.2 フェイクトリガーの原因

フェイクトリガーの原因に次の2つが考えられる。

- 2次生成粒子

陽子陽子衝突後に ATLAS 検出器内を漂う陽子や中性子が、磁場領域付近のビームパイプや磁石といった物質に衝突することで荷電粒子が生じる。この衝突点由来ではない2次生成粒子と p_T の高い衝突点由来の粒子の飛跡が似ている場合、フェイクトリガーが発生する。図 4.2 は衝突点由来の粒子と2次生成粒子の飛跡を描いた模式図である。A は衝突点由来の粒子を表し、B 及び C は2次生成粒子を表す。また図 4.3 に磁場領域付近で生成された2次生成粒子がフェイクトリガーを発生させる様子を示す。赤線は磁場によって曲げられた2次生成粒子の飛跡を表し、青の破線は p_T の高いミューオンの飛跡を表す。

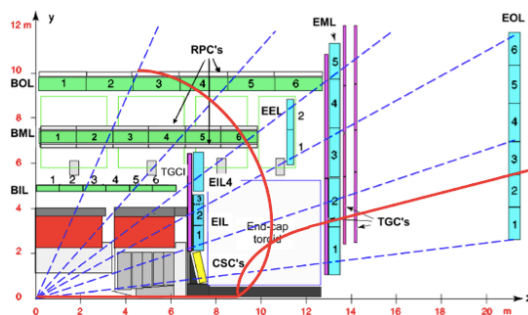
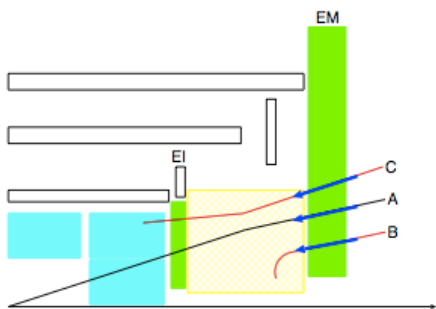


図 4.2: 衝突点由来の粒子と2次生成粒子 図 4.3: 磁場領域付近で生成された荷電粒子

- ビームパイプから飛来する粒子

図 4.4 は、シミュレーションによって作成されたバレル部最内層のMDT(Barrel Inner:BI)におけるヒットのヒストグラムである。赤線のヒストグラムが光子、青線が中性子のヒットを表している。このヒストグラムから、 $z \approx 700$ [cm] で粒子の量が増加していることが分かる。これはビームパイプがシールドされていない領域から飛来してきたためだと考えられる。これらの粒子が高い p_T を持つ衝突点由来のミューオンと似た飛跡を作る様子を図 4.5 に示す。赤の曲線が、ビームパイプがシールドされていない部分から飛来してきた光子や中性子によって生成された荷電粒子の飛跡を表している。

現在のレベル1 ミューオントリガーでは、上述の原因で生じた粒子がTGCに残す情報とトリガーを発行したいイベント (p_T の高い衝突点由来の粒子) を区別できない。そのため、Run2からはこれらを区別してフェイクトリガーを削減することが必要となる。

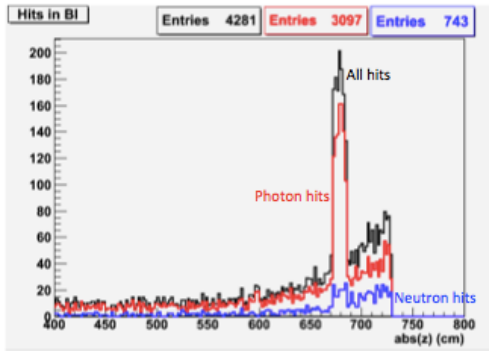


図 4.4: BI におけるヒット

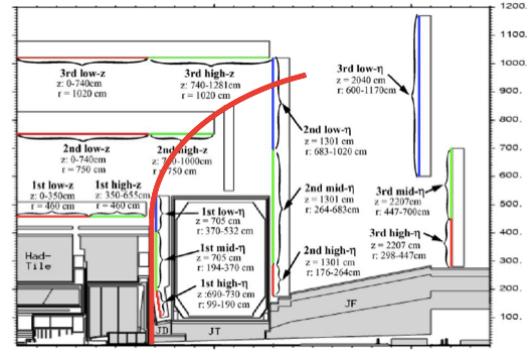


図 4.5: ビームパイプから飛来する粒子

4.2 Run2 に向けての変更

4.2.1 概要

LHC の改良

LHC では重心系エネルギーとルミノシティ増強のため、2013 年-2014 年のシャットダウン期間中に次の変更が計画されている。

- 超伝導マグネットの修理
現在の超伝導マグネットは一部で接合部の電気抵抗が大きく、高い電流を流すことが出来なくなっている。その超伝導マグネットを修理・交換し、内部抵抗をより小さくする。
- ビームパイプ内の真空度の向上
空気が漏れている箇所を交換することで、ビームパイプ内の真空度を向上させる。

ATLAS 検出器の改良

ATLAS 検出器では、Run2 に向けて次の変更が計画されている。

- Pixel 検出器の増設
b クォーク同定の効率向上のため、シャットダウン中に最内層に新たな Pixel 検出器 (Insertable B Layer: IBL) が挿入される。
- ビームパイプの交換とシールドの追加
フェイクトリガーを抑えるため、ビームパイプを現在のステンレスからより質量数の小さいアルミニウムへ交換する。これによって 2 次生成粒子との相互作用を抑える。またビームパイプから飛来する粒子を止めるため、シールドを追加する。

4.2.2 レベル1 ミューオントリガーの変更

レベル1 ミューオントリガーにおいて、Run2からはこれまで使用されていなかった TGC Small Wheel(=EI/FI) がコインシデンスに導入される。この新しく導入されるコインシデンスを Inner Coincidence と呼ぶ。Inner Coincidence の導入によってフェイクトリガーの削減が期待される。

Inner Coincidence

Inner Coincidence は TGC Big Wheel(M1, M2, M3) と EI/FI との間でとられるコインシデンスで、エンドキャップ部の RoI でトリガーが発行されたイベントに対し、ワイヤー (R 方向) とストリップ (ϕ 方向) のコインシデンスが取られた後に課せられる。

TGC の配置と形状を図 4.6 に示す。なお、EI が設置されている位置とバレルトロイドコイルが設置されている位置は重なる部分がある。そのため、EI には TGC が設置されていない部分がある。

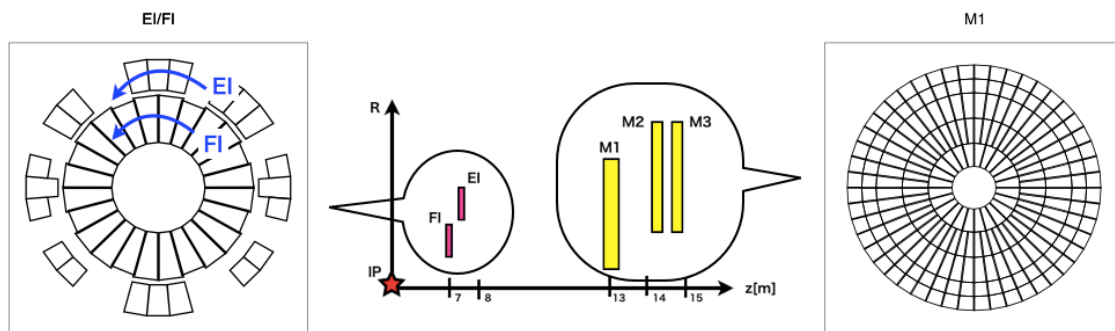


図 4.6: TGC の配置と形状

Inner Coincidence は全ての RoI に対して要求されるのではなく、予め Inner Coincidence を要求する RoI を決定し、それ以外の RoI は現行のトリガーを用いるという特徴がある (詳細は次章)。これは図 4.6 のように、EI/FI は Big Wheel と比べカバーする領域 (η - ϕ 平面) が小さく、全ての RoI に Inner Coincidence を要求することは出来ない (トリガーが発行できなくなる RoI が発生する) からである。

さらに、Inner Coincidence はサブセクター (RoI) を 8 つまとめたサブセクタークラスタ (Sub Sector Cluster:SSC) 毎に、EI/FI のどのチャンネル (ワイヤー、ストリップそれぞれ) にヒットを要求するかを決める。また、SL で発行されるどの p_T 閾値に対してコインシデンスを要求するかも決める。

第5章 Coincidence Windowの作成

レベル1 ミューオントリガーの発行には Coincidence Window(CW) と呼ばれる参照表が用いられる。本章ではこの CW について述べ、その後作成方法について説明する。

5.1 Coincidence Window(CW)

CW は SL に実装され、HPT から送られてくるミュオントラックの検出位置及び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。

レベル1 トリガーシステムではトリガー判定を短時間かつ一定のバンチ間隔内で処理しなければならない。しかし p_T の値を導き出す回路を組む場合、磁場の不均一性や磁石などの構造物を考慮しなければならず、複雑になりレベル1 の処理時間内に取まらない。そこで、 p_T 判定には Look Up Table(LUT) 方式が用いられる。LUT 方式とは、入力信号の取りうる全てのパターンについてあらかじめそれぞれの出力信号をメモリに格納し、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によって結果を得る方式である。また実験状況に応じた変更に対応するために、書き換え可能な集積回路によって実装されている。

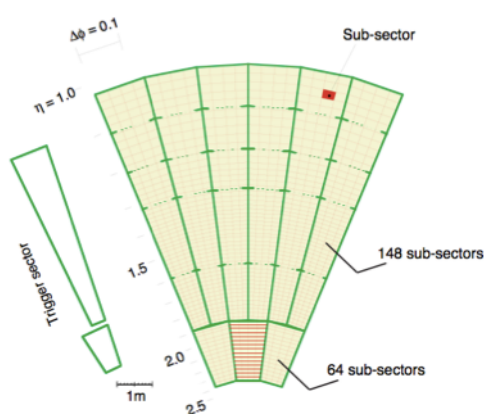


図 5.1: TGC オクタン

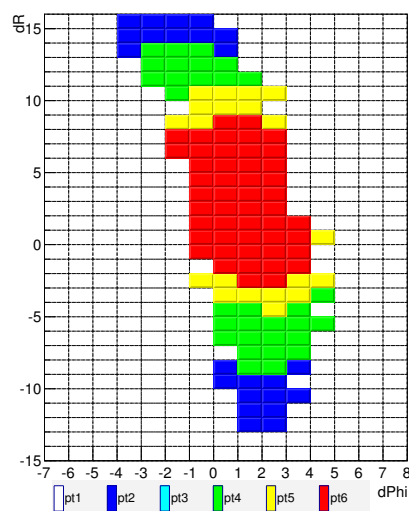


図 5.2: CW の例

CW は各 RoI(サブセクター) 毎に用意される。RoI の数は 1つのトリガーセクターにつきエンドキャップ領域で 148 個、フォワード領域で 64 個存在する。ATLAS 検出器のエン

ドキャップ部のトロイド磁場は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8回対称となっている。1/8円(オクタント)はエンドキャップ領域でトリガーセクター6つ分、フォワード領域でトリガーセクター3つ分に相当する(図5.1)。このオクタントを基準として計1080個のRoIに対してそれぞれ固有のCWを作成した(~2012年。TGCのジオメトリーを考慮するとフォワード領域は1/4円を基準とすべきなので、本研究では作成方法を変更した。詳細は第6章)。CWの例を図5.2に示す。

表5.1に3-station コインシデンス及び2-station コインシデンスにおける ΔR と $\Delta\phi$ の範囲を示す。

	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

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・作成するのは困難である。そこで、衝突点から飛来するミューオンに対する検出器やトリガーシステムの挙動をシミュレーションし、ミューオンの 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実験におけるデータの処理・解析はAthenaと呼ばれるソフトウェアフレームワークに従って行われる。Athenaによるシミュレーションは大別して4つのプロセスから構成されている。以下にその流れを説明する。

イベント生成 (Generation)

理論によって予測される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。

検出器シミュレーション (Simulation)

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。イベント生成のプロセスによって生成された事象情報を受け取り、衝突点付近から発生した粒子の測定器や構造物中での相互作用をシミュレートし、飛跡を求める。ミューオンが検出器の有感領域に作ったヒットはエネルギーや時間、位置などの情報を持つ。

デジタイゼーション (Digitization)

ヒットに対する検出器の反応のシミュレーションを行い(検出器の振る舞いを再現し)、実際の測定器の出力に変換する。ビームテストや実データの解析による結果から、各検出器の検出効率や信号の時間差といったパラメータを設定する(特にクロストークの効果を含むパラメータ)。この過程を経て、シミュレーションデータは実際の ATLAS 検出器で得られる測定データと等価な情報となる。

※クロストーク

図 5.3 はミューオンが TGC を通過する様子を表した模式図である。赤色の丸がミューオン、矢印がミューオンの飛跡を表している。また縦に並べた長方形が TGC のストリップを表し、青く塗られた長方形は信号を出力していることを表す。図 5.3 の右側のように、ミューオンが通過したストリップのみでなく、その近傍のストリップも信号を出力することをクロストークと呼ぶ。これは、荷電粒子が通過したストリップが近傍のストリップにも電荷を誘起し、複数のストリップで信号が生じてしまうためである。この信号が ASD の閾値を超えた場合、偽のヒット情報として記録されクロストークとなる。

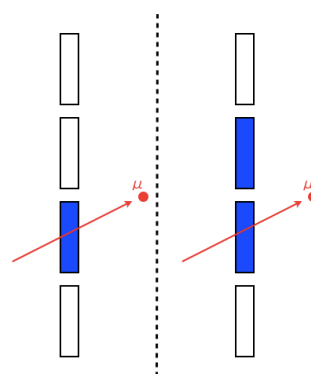


図 5.3: クロストークの模式図

再構成 (Emulation)

前章で述べた TGC エレクトロニクスのロジックが再現される。検出器で読み出された信号からコインシデンス処理が行われ、荷電粒子の飛跡、運動量、エネルギーや、コインシデンスのとれた RoI(サブセクター)、 ΔR 、 $\Delta\phi$ といった後の解析に必要な情報が再構成される。

5.2.2 CW の作成

上述したトリガーシミュレーションで得られた結果から CW を作成する流れを以下で説明する。

1. ヒットマップの作成

電荷 $\cdot p_T$ 毎にシングルミュー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。そこで得られた結果から、各 p_T 、各 RoI 毎に ΔR と $\Delta\phi$ の情報を抜き出し、 ΔR - $\Delta\phi$ の分布図(=ヒットマップ)を作成する。

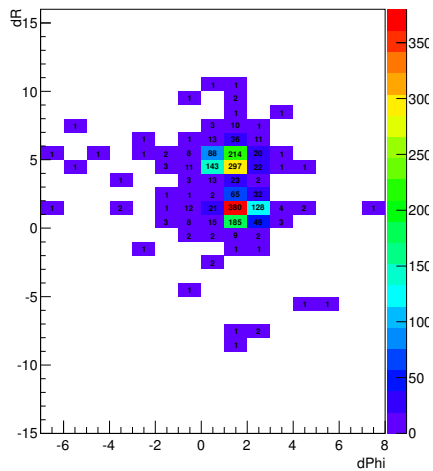


図 5.4: $p_T=40[\text{GeV}]$ のヒットマップ

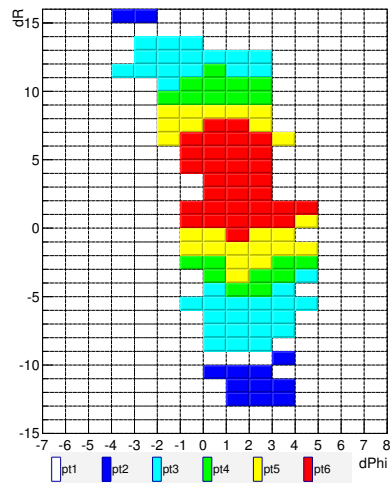


図 5.5: 単一 p_T で作成した CW

図 5.4 は $p_T=40[\text{GeV}]$ のシングルミュオンイベントから作成したヒットマップである。このように単一 p_T のミュオンイベントのみでヒットマップを作成すると、閾値毎のウィンドウ間で隙間が出来てしまう (図 5.5)。しかし、実際の実験で飛来するミュオンの p_T は連続に分布するため、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 つ上の閾値を持つイベントを元のイベントの半数加えてヒットマップを作成する。図 5.6 はそのようにして作成したヒットマップで、図 5.7 はそのヒットマップを用いて作成した CW である。

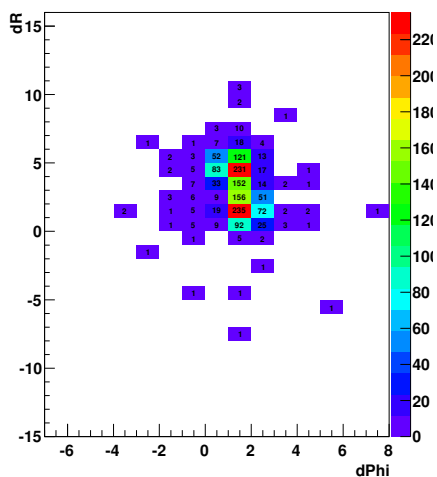


図 5.6: $p_T=40, 100[\text{GeV}]$ のヒットマップ

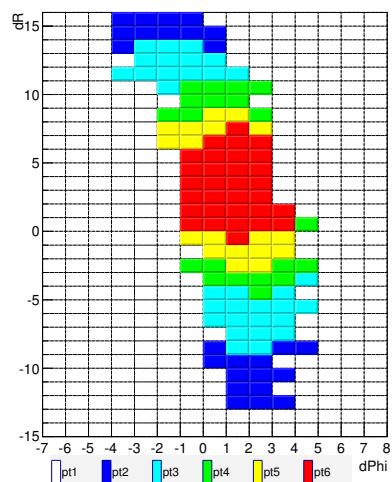


図 5.7: 異なる p_T を加えて作成した CW

また、各閾値 (pt1~6) と作成する際に使用したミュオンイベントの p_T の対応関係を表 5.2 に示す (ここで閾値を超えなかったイベントを NON としている)。

閾値	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt6
ミュオンの p_T [GeV]	NON	6+8	10+15	15+20	20+40	40+100

表 5.2: 閾値とミュオンの p_T の関係

2. ウィンドウを開く

作成したヒットマップを元に、ミュオンのエントリー数の多いセル (ΔR 、 $\Delta\phi$ で区切られた 1 マス) から順次ウィンドウを開いていく。この際、開いたセルのエントリー数の合計が、ヒットマップ全体のエントリー数に対してある一定の割合 (エンドキャップ領域:98%、フォワード領域:95%) に達するまで処理を続ける。また、異なる p_T で同じセルを開く場合は、 p_T の高い方を優先する。これは、 p_T の高いミュオンに対して p_T の低いミュオンイベントとしてトリガーを発行してしまい、 p_T の高いイベントを取りこぼしてしまうことを防ぐためである。

3. 統計による揺らぎの処理

CW を作成する際、統計的な揺らぎによって周囲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 の連続性を考慮すると前者は閉じるべきセルであり、後者は開くべきセルである。この統計の揺らぎによる効果を減らすため、以下の処理をセルに施す。

- 開いたセルにおいて、周囲に開いたセルが 3 つ未満のセルは閉じる。
- 閉じたセルにおいて、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 $\Delta R=14$ と同じ配列の行が $\Delta R=16$ にも存在すると仮定した。また、閉じたセルを開く際に周囲の分布する閾値の数が等しい場合、高い閾値でセルを開くように設定した。図 5.8 と図 5.9 はこの処理を施す前後の比較である。

最後にトリガー状況に応じて各 pt を統合する。2012 年の Run ではもともとの pt5 と pt6 を統合して pt6 とし、pt4 を pt5、pt3 を pt4 に設定した CW が使用された。

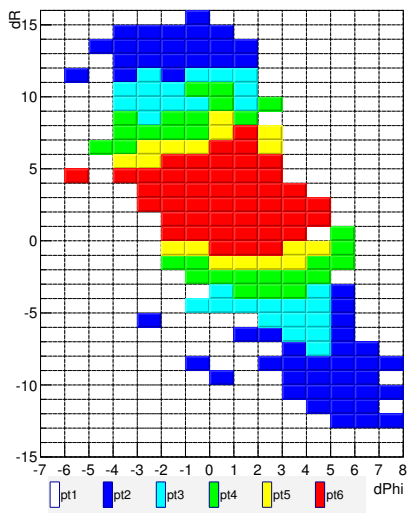


図 5.8: 処理前の CW

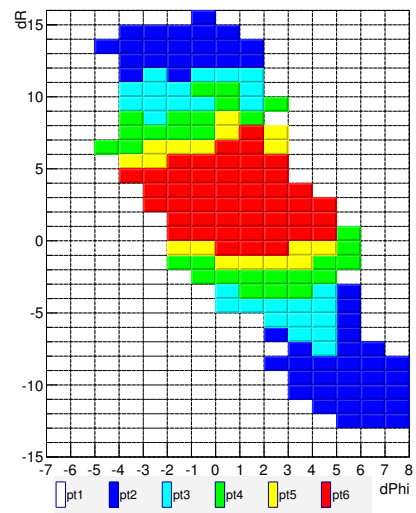


図 5.9: 処理後の CW

第6章 Coincidence Windowの改良及びInner Coincidence Windowの作成

6.1 Coincidence Windowの改良

トリガーパフォーマンスを向上させるため、TGCのアライメントとジオメトリーに着目してCWに変更を加えた。以下ではそれぞれの問題点とその対策方法に関して述べる。

6.1.1 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設置されているが、実際の検出器ではその設置位置(アライメント)にズレが生じている。しかし、前述した通りCWはシミュレーションから作成するため、作成されたCWはTGCの設置位置によるズレが考慮されていないものとなる。このCWを適用すると、トリガー効率の p_T 分布において立ち上がり(第3章において定義したResolution)が鈍くなる原因となる。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に補正を加えることでトリガー効率のResolutionについての改善を図った。まずTGCの測定方法について述べ、次に得られた結果からCWに補正を加える方法について説明する。

TGCアライメントの測定

TGCの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確立されており[14]、今回のCW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(ヒットのあったTGCチャンネルの中央位置)と、TGCでのミュオンの検出位置の残差 $\Delta\rho$ 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。そのため、再構成されたミュオンの飛跡がTGCが設計通りに設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。

図6.29はTGCが設計位置に設置されている場合の $\Delta\rho$ の分布であり、図6.30はZ軸方向(ビーム軸と平行な軸)に10[mm]平行移動させたときの $\Delta\rho$ の分布である。図6.29のようにTGCが設計位置に設置されている場合、 $\Delta\rho$ の分布の平均値は0となるが、図6.30のようにズレている場合、 $\Delta\rho$ の分布の平均値は0からズレる。すなわち $\Delta\rho$ のズレはTGCの設計位置からの物理的なズレに対応している。この $\Delta\rho$ をTGCの平行移動や回転に変換することで、TGCのズレをパラメータとして求める。

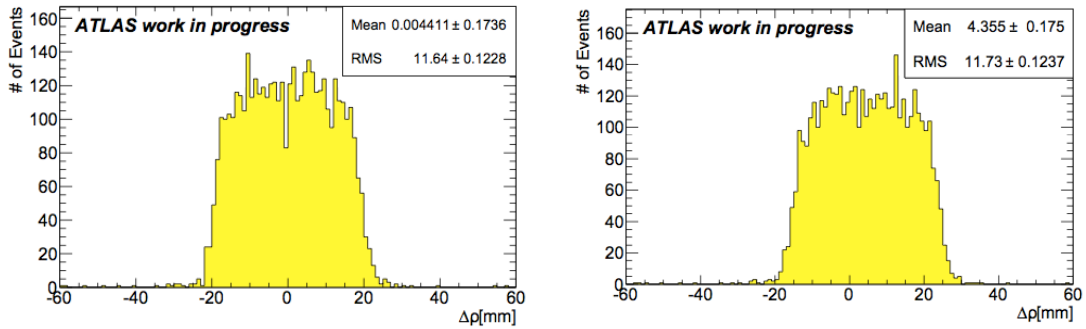


図 6.1: 設計位置に設置されている場合の $\Delta\rho$ 図 6.2: z 軸方向に平行移動した場合の $\Delta\rho$

例えば、動径方向 (ここでは T 軸と定義) への平行移動の影響を考えた場合、図 6.3 に示したように T 方向と逆に移動した分だけ残差の平均値がズレる。なお、 θ は TGC へ入射するミュオンと Z 軸がなす角を表す。

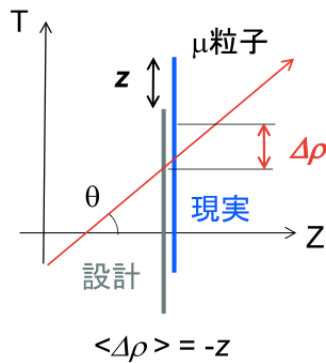


図 6.3: T 方向への平行移動が与える影響

Z 軸への平行移動の影響 (図 6.4) や、T 軸及び Z 軸と直交する軸 (S 軸と定義) まわりの回転の影響 (図 6.5) も考慮し、最大 3 方向のズレのパラメータを算出する。なお、図 6.5 において γ は S 軸まわりの回転角を表す。

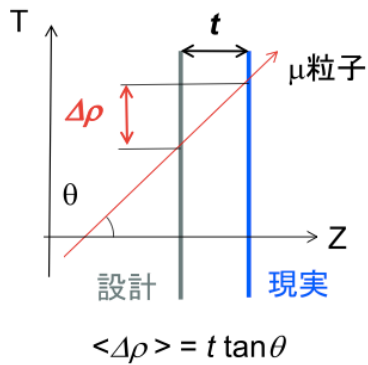


図 6.4: Z 方向への平行移動が与える影響

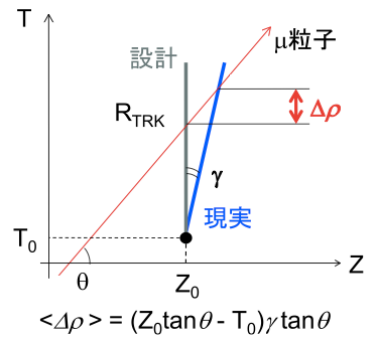


図 6.5: S 軸まわりの回転が与える影響

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・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 、 $\Delta \phi$ を計算する為である。この M1・M3 間のチャンネル間のズレを以下の式で計算する(ここで $\Delta \rho$ は各チェンバーのアライメントのズレ、 W_{ch} はチャンネル幅を表す)。

$$\text{チャンネル間のズレ} = \frac{\Delta \rho_1}{W_{ch1}} - \frac{\Delta \rho_3}{W_{ch3}}$$

この計算の概略図を図 6.6 に示す。

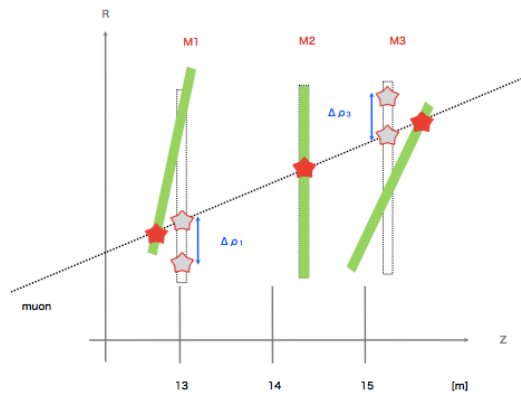


図 6.6: 計算の概略図

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図 6.7 を示す。最大 ± 2 チャンネルのズレがある部分が存在することが分かった(図 6.7 の赤い部分)。この結果に従って CW に補正を加える。

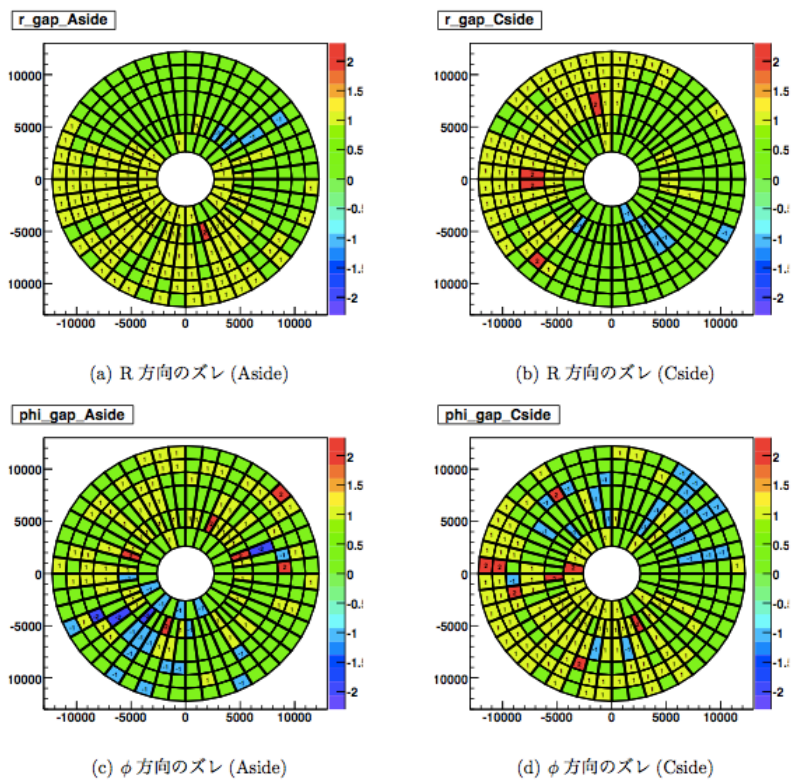


図 6.7: TGC のアライメントのズレ

CW に対するアライメントの補正

CW は各 RoI 毎に作成するため、チェンバー毎のアライメントのズレを M3 のチェンバーを基準として RoI 単位に変換する。チェンバーと RoI の対応関係を表 6.1 に示す(ここで、T5~T9 はエンドキャップ領域、T2 はフォワード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 6.1: チェンバーと RoI の関係

この対応関係に従い、CW を TGC のアライメントのズレの分だけシフトさせる。例として ΔR 方向に+1 シフトさせた CW を以下に示す。

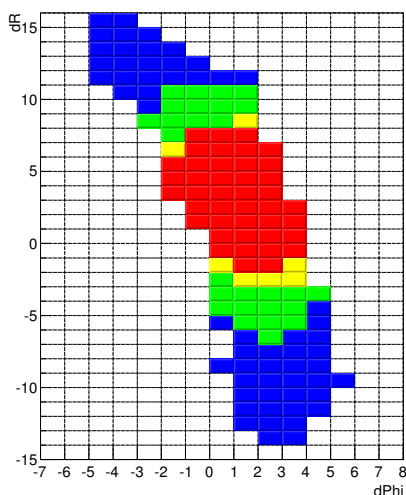


図 6.8: シフト前

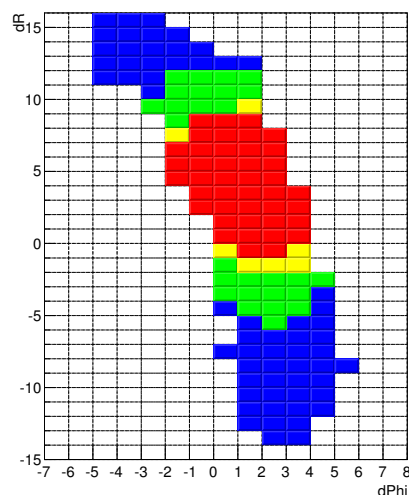


図 6.9: シフト後

また、CW には 1 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。 $|\Delta R| \geq 11$ 、 $|\Delta\phi| \geq 4$ (図 6.10 で茶色で塗りつぶされた部分)が 2 チャンネルに対応する領域である。この 2 チャンネルに対応する領域では、1 つのセルを 2 つに区切りアライメントのシフトを行った。

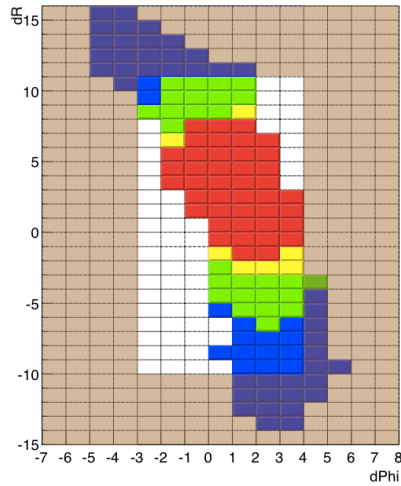


図 6.10: 2 チャンネルに対応する領域

例として、1 部を拡大した模式図を図 6.11 に示す。図 6.11 では左がシフト前、右がシフト後、セルの色が pt 値を表しており、 $|\Delta R| \geq 11$ の領域ではセルを a、b のように 2 つに区切っている。 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 値を持つ。しかし 1 つのセルには 1 つの pt 値しか設定できないため、pt 値が 2 つあった場合は大きい pt 値 (の場合は pt4) を選択し設定するという処理を行った。

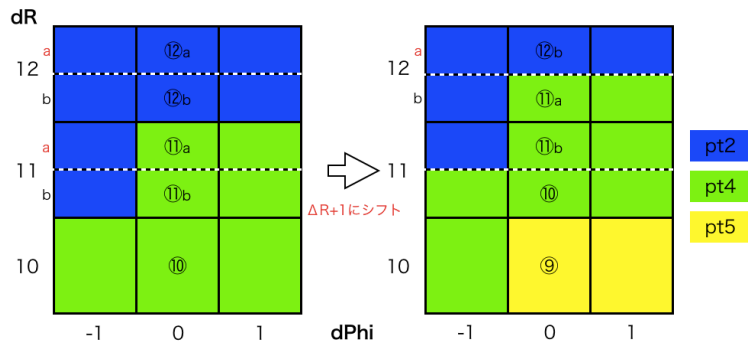


図 6.11: 2 チャンネル対応領域の扱い

6.1.2 TGC ジオメトリー

TGC は隙間が出来ないように、隣り合うチェンバーを前後にズラして一部が重なるように設置されている (図 6.12)。そのため、セクター番号 (エンドキャップ:0~47、フォワード:0~23) が偶数のチェンバーと奇数のチェンバーでは衝突点からの距離 (z 軸上での位置) が異なる。しかし、第 4 章で説明したように CW は磁場の対称性から 1/8 円 (オクタント) を基準として作成するため、フォワード領域では本来区別すべきセクターを統合してしまっていた (エンドキャップ領域では 1 オクタントにセクターが偶数個 (6 個) 存在するため、区別の必要はない)。従ってジオメトリーを考慮せず CW を作成すると、無限運動量トラックの ΔR のズレを平均化したものとなる。そのような CW はジオメトリーを考慮して作成した CW と比べ開いているセルの数が増え、トリガー効率の分解能の悪化やトリガーレートが増加してしまう (詳細は次章で述べる)。



図 6.12: TGC のチェンバーの配置の様子

その対策として、フォワード領域のセクターに関しては、エンドキャップ領域のように 1/8 円 (オクタント) を基準とするのではなく、1/4 円を基準として作成した。つまり、これまで平均化して作成していた 1 つの CW (図 6.13 及び図 6.16) を、衝突点からの距離が近いセクター (図 6.14 及び図 6.17) と遠いセクター (図 6.15 及び図 6.18) の 2 つに分けた。

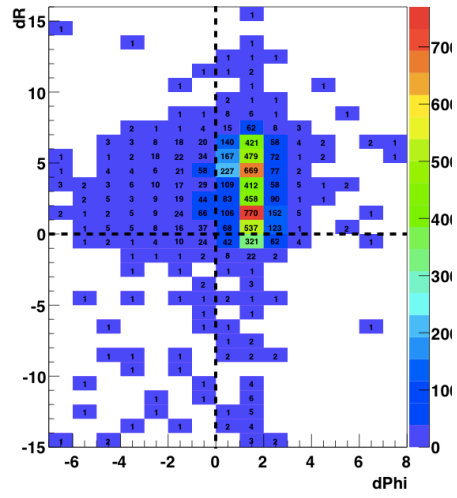


図 6.13: 平均化したヒットマップ (40[GeV])

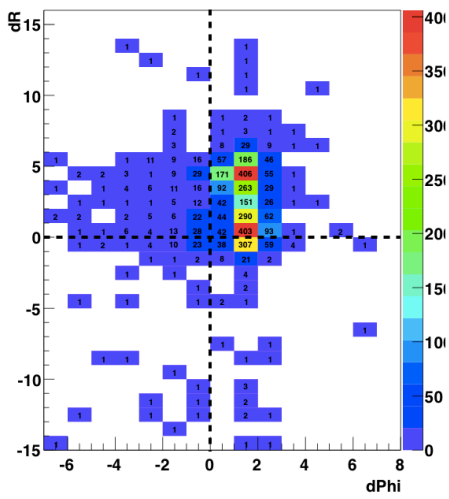


図 6.14: 衝突点からの距離が近い場合

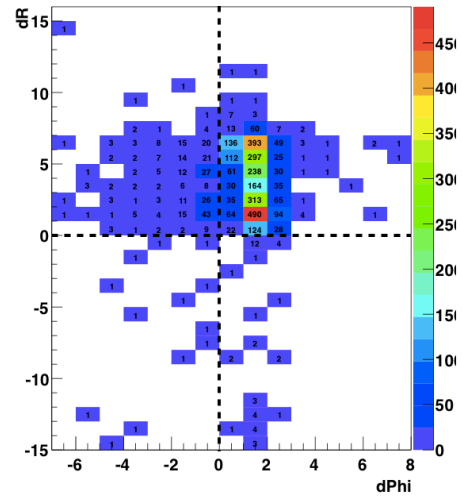


図 6.15: 衝突点からの距離が遠い場合

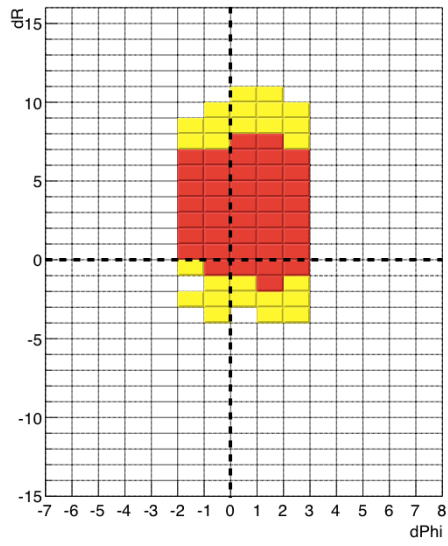


図 6.16: 平均化した CW(pt5&pt6)

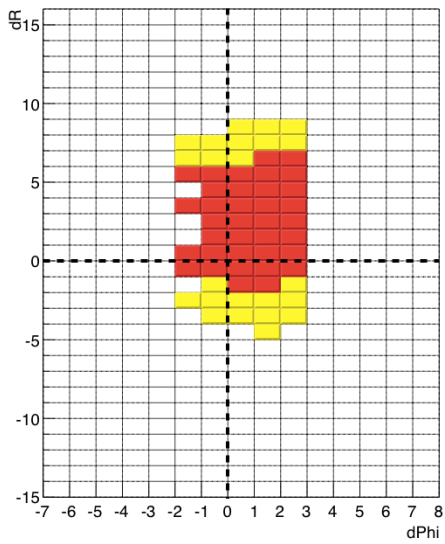


図 6.17: 衝突点からの距離が近い場合

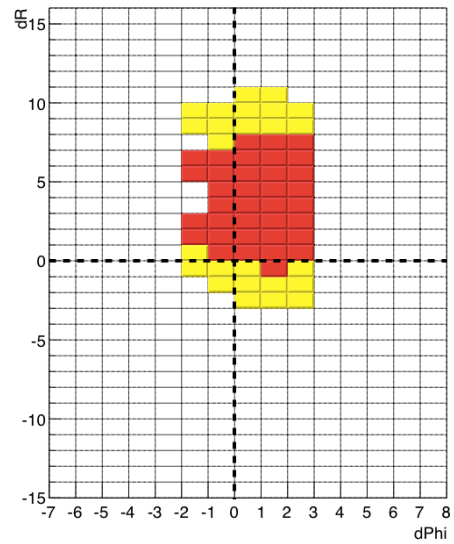


図 6.18: 衝突点からの距離が遠い場合

このようにして区別することで、平均化したために広がってしまっていた CW のウィンドウを最適化することが出来た。

6.2 Inner Coincidence Window

6.2.1 Inner Coincidence Window(ICW) について

Inner Coincidence Window(ICW) は、Inner Coincidence の際にエンドキャップ領域の各 SSC に対して

- SSC 内のどの RoI に対して Inner Coincidence を要求するか
- SL が発行したどの p_T 閾値に対して Inner Coincidence を要求するか
- ワイヤー、ストリップそれぞれ、EI/FI のどのチャンネルにヒットを要求するか

を指定する表で、Run2 から SL に実装される。1つのトリガーセクターにつき SSC は 19 個あり、エンドキャップ領域でトリガーセクターは 48 つあるため、ICW は $48 \times 19 = 912$ 個用意される。

この ICW の性能によって Run2 でのトリガー効率及びトリガーレートが決定するため、最適な ICW を SL に実装することがレベル 1 ミューオントリガーにおいて重要となる。

ヒットを探索する範囲

Inner Coincidence を要求する際、EI/FI それぞれ全 24 セクター中 4 セクターで探索され、その 4 セクターの中でヒットしたチャンネルがあるかどうかでトリガー判定が行われる。探索する範囲の例を以下に示す。

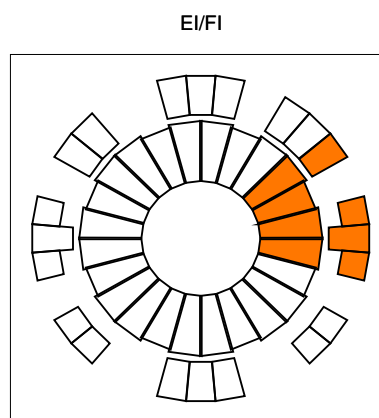
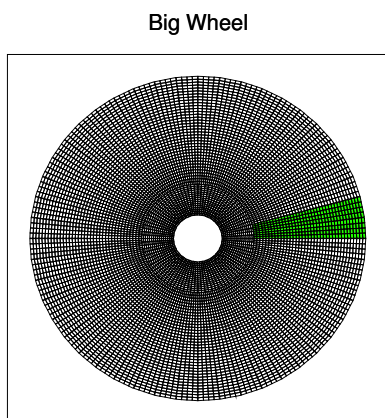


図 6.19: トリガーが発行された RoI

図 6.20: 図 6.19 に対応するセクター

図 6.19 の緑色で塗られた RoI でトリガーが発行された場合、図 6.20 の橙色で塗られたセクターでヒットしたチャンネルがあるかどうか探索される。

6.2.2 作成方法

ICW も CW と同様にシミュレーションを行い、各 RoI と EI/FI のチャンネル(ワイヤー・ストリップ)のヒット情報との対応を調べることで作成する。

以下に ICW の作成手順を説明する。

Inner Coincidence を要求する RoI

EI は、検出器の構造上チェンバーのない領域が存在し、その領域に対応する RoI では Inner Coincidence を要求できない。そこで Inner Coincidence を要求しない RoI を以下のように決定する。

$p_T=20[\text{GeV}/c]$ のシングルミュオンイベントを用いて pt6 トリガーを発行した回数の RoI 分布を図 6.21 に、同じサンプルを用い、フルオープンと呼ばれる最も緩い条件で Inner Coincidence を要求した場合の分布を図 6.22 に示す。

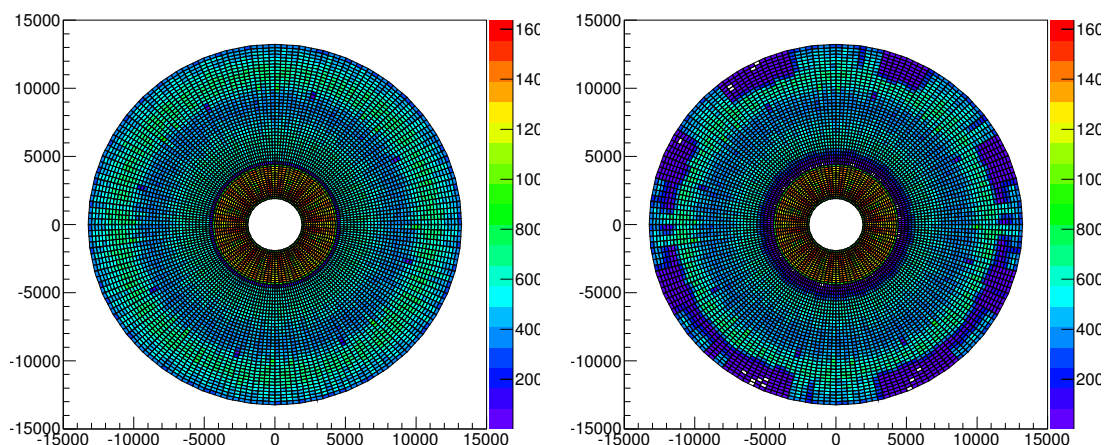


図 6.21: トリガー発行回数の RoI 分布

図 6.22: Inner Coincidence を要求した場合

これらのプロットと EI の形状から、EI のチェンバーが存在しない領域では Inner Coincidence を要求するとトリガー発行回数が極端に減少することが分かる。また図 6.21 の各 RoI 毎のエントリー数を分母に、図 6.22 のエントリー数を分子とした

$$R_{IC} = \frac{\text{InnerCoincidence を要求した場合に pt6 トリガーを発行した回数}}{\text{pt6 トリガーを発行した回数}}$$

を定義し、プロットしたものを図 6.23 に示す。この R_{IC} の値が小さい RoI は、Inner Coincidence を要求した場合にトリガー発行回数が極端に低下する RoI である。そのため閾値 T_{IC} を設定し、 R_{IC} の値が T_{IC} を超えた RoI に関して Inner Coincidence を要求する。

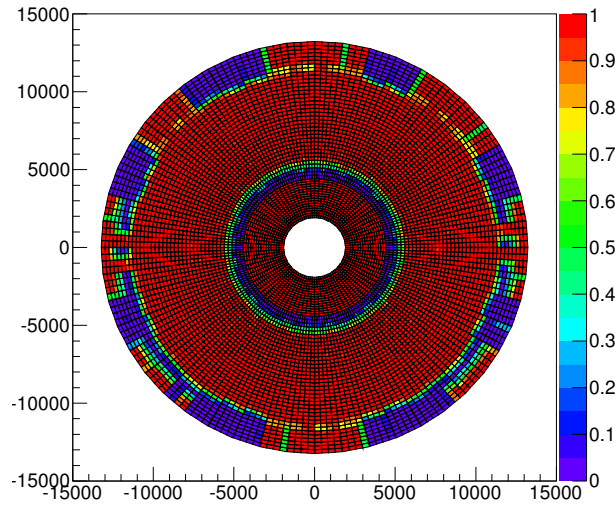


図 6.23: R_{IC} の ROI 分布

ヒットを要求する EI/FI のチャンネル

前述の通り、Inner Coincidence を要求する際は EI/FI の 4 セクターからヒットを探索する。その 4 セクターからさらに、どのセクターのどのチャンネルにヒットを要求するかを決定する手順を以下に説明する。

1. ヒットマップの作成

$p_T=20$ 及び $40[\text{GeV}/c]$ のシングルミュオンイベントを用い、各 SSC 毎に p_T が $20[\text{GeV}/c]$ 以上のトリガーが発行された際のヒットのあったチャンネルの情報を抜き出し、ワイヤーとストリップの分布図 (= ヒットマップ) を作成する。

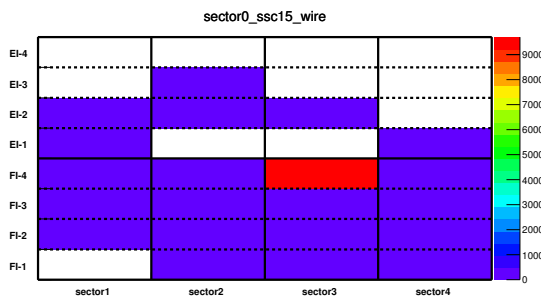


図 6.24: ワイヤーのヒットマップ

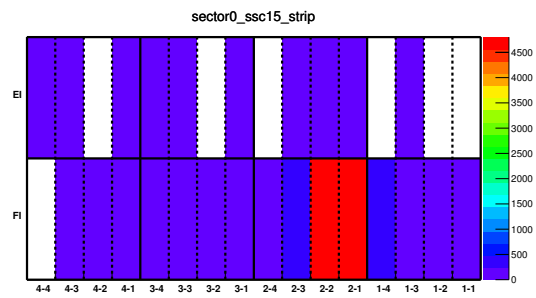


図 6.25: ストリップのヒットマップ

図 6.24 と図 6.25 は作成したヒットマップの一例である。この図において実線で区切られた部分が TGC のチェンバーを表し、破線で区切られた部分がチャンネルを表す。チャン

ネル数はワイヤー、ストリップそれぞれ 32 チャンネルであるが (EI のワイヤーは 24 チャンネル、一部 16 チャンネル)、それらについて OR が取られており (実際に EI/FI の SLB から SL に送られるトリガー情報は OR が取られている) ワイヤー・ストリップ共に 4 チャンネルにまとめられている。

これらのヒットマップから、衝突点由来の粒子が EI/FI を通過した際にヒットするチャンネルは一部に集中することが分かる。

2. ヒットを要求するチャンネルの選択

作成したヒットマップを元に、ワイヤー・ストリップそれぞれミュオンのエントリー数の多いチャンネルから順次ヒットを要求するチャンネルとして選択する。この際、選択したチャンネルのエントリー数の合計がヒットマップ全体のエントリー数に対して一定の割合 (T_R 倍) に達するまで処理を続ける ($0 < T_R \leq 1$)。例として、 $T_R=0.9$ の場合に図 6.24 及び図 6.25 のヒットマップから選択したチャンネルを図 6.26 に示す。

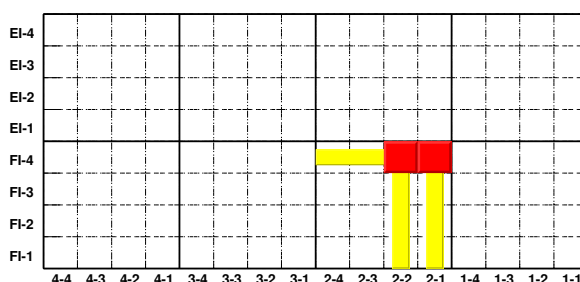


図 6.26: 図 6.24、図 6.25 より選択したチャンネル

図 6.26 において、黄色で塗られた横線が上記の処理によって選択したワイヤー、縦線が選択したストリップを表す。また、赤色で塗られたマスは選択したワイヤーとストリップの交点を表す。すなわち Inner Coincidence では、この赤く塗られた領域を通過したミュオンを衝突点由来とみなし、トリガーを発行する。

3. チャンネルのマスク処理

ここまでの手順で ICW を作成すると、ワイヤーもしくはストリップのチャンネルのみが選択されてしまうチェンバーが存在する (図 6.27)。しかし、衝突点由来の粒子がチェンバーを通過した場合はワイヤー・ストリップ両方が選択されるべきであり、どちらかが単独で選択されるのは不自然である。従って、このように単独で選択されたチャンネルが存在した際は、そのチャンネルをマスクすることにより (図 6.28)、トリガー判定には使用しない設定にする。

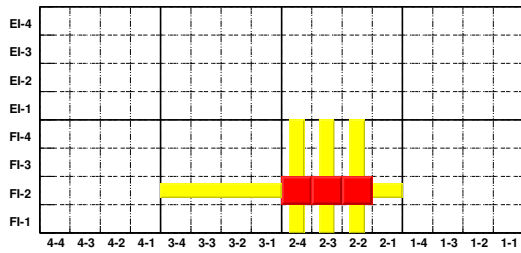


図 6.27: マスク処理前 1

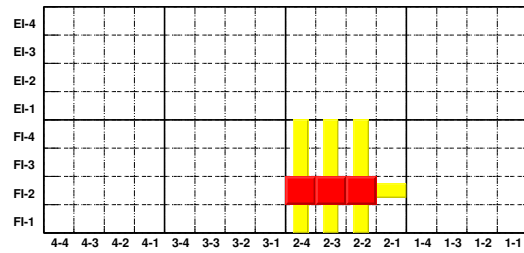


図 6.28: マスク処理後 1

また、EIのワイヤーはFIに比べチャンネル数が少なく、チェンバー毎にチャンネル数が異なる (FIは32チャンネル、EIは24チャンネルで一部16チャンネル)。そのため、選択されたチャンネルの中で実際にワイヤーのない部分に相当する部分もマスクし、トリガー判定には使用しない設定にする (図 6.29、図 6.30 の矢印で示した部分)。

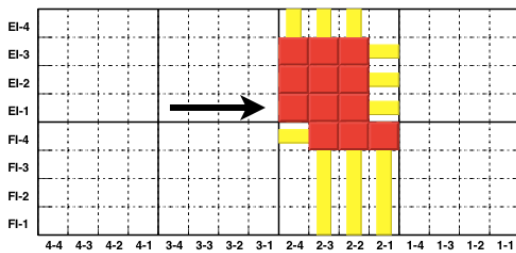


図 6.29: マスク処理前 2

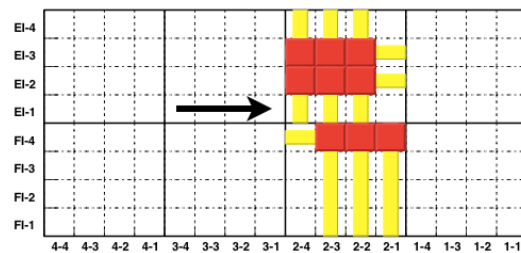


図 6.30: マスク処理後 2

第7章 Coincidence Window 及び Inner Coincidence Window の性能評価

本研究では 2011 年及び 2012 年に ATLAS 実験で取得されたデータを用い、改良した CW を導入した場合と ICW を導入した場合のトリガーシステムの性能を評価した。その際、第 3 章で説明したトリガー効率とトリガーレートの 2 点に着目した。

7.1 トリガー効率の評価

CW にアライメントの補正を加えた場合とジオメトリーの補正を加えた場合、また ICW を導入した場合についてそれぞれのトリガー効率を評価する。

アライメントの補正を加えた CW

第 6 章で述べた TGC のアライメントによる補正を加えた CW のトリガー効率を算出する。図 7.1 は 2012 年のデータを用いて算出した pt6(20[GeV] 以上と判定された) トリガーのトリガー効率である。緑のグラフはアライメント補正前の CW を用いて算出したトリガー効率で、赤はアライメント補正後の CW を用いて算出したトリガー効率である。

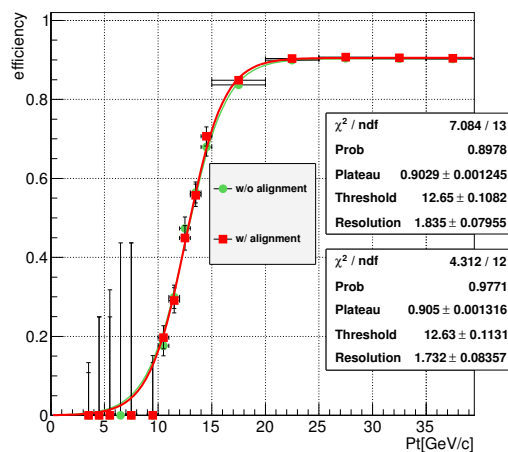


図 7.1: アライメント補正前後のトリガー効率

図 7.1 の Plateau efficiency と Resolution を表 7.1 に示す (Plateau efficiency 及び Resolution は第 3 章で定義した値)。これらの値から、CW にアライメント補正を加えても Plateau

efficiency を維持できていることが分かる。また、CW にアライメント補正を加えることで 1σ の範囲であるが Resolution が改善されているように見える。

CW	Plateau(pt6)[%]	Resolution
補正前	90.29 ± 0.12	1.84
補正後	90.50 ± 0.13	1.73

表 7.1: アライメント補正前後の Plateau と Resolution

ジオメトリーを考慮した CW

同様に第 6 章で述べた TGC のジオメトリーを考慮した CW のトリガー効率を算出する (図 7.2)。緑のグラフがジオメトリー補正前の CW を用いて算出した pt6 トリガーのトリガー効率で、赤はジオメトリー補正後の CW を用いて算出したトリガー効率である。

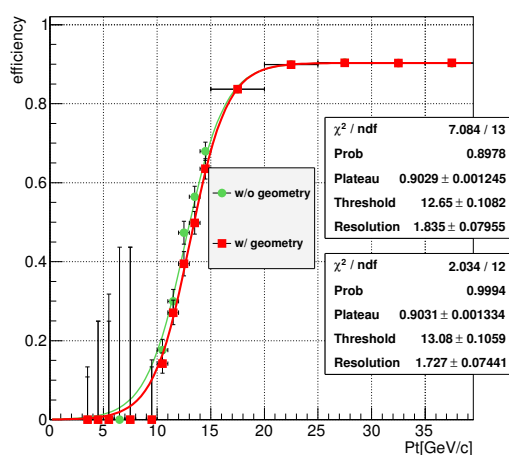


図 7.2: ジオメトリー補正前後のトリガー効率

図 7.2 の Plateau efficiency と Resolution を表 7.2 に示す。アライメント補正時と同じく、CW にジオメトリーの補正を加えても Plateau efficiency は維持できており、Resolution が改善されているように見える。

CW	Plateau(pt6)[%]	Resolution
補正前	90.29 ± 0.12	1.84
補正後	90.31 ± 0.13	1.73

表 7.2: ジオメトリー補正前後の Plateau と Resolution

ICW を導入した場合

また、第6章で述べた ICW を導入した場合のトリガー効率を算出する。第6章で説明したように、ICW を作成する際は T_{IC} 及び T_R と定義した2つの閾値を設定する。ここでは、この閾値の異なるいくつかの ICW を用いた場合の pt6 トリガーのトリガー効率を算出した。例として $(T_{IC}, T_R)=(0.90, \text{フルオープン}(=1.0))$ の設定で作成した ICW を導入した場合のトリガー効率を図7.3に、 $(T_{IC}, T_R)=(0.90, 0.95)$ の設定で作成した ICW を導入した場合を図7.4に示す。

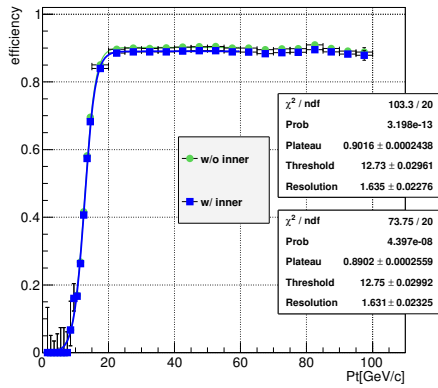


図 7.3: $(T_{IC}, T_R)=(0.9, \text{フルオープン})$

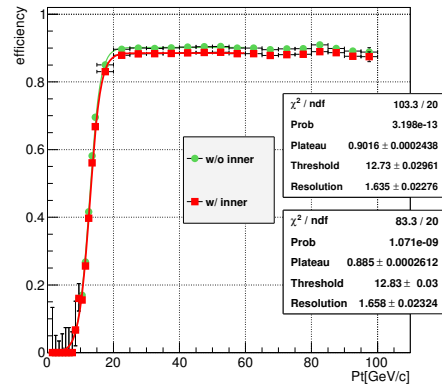


図 7.4: $(T_{IC}, T_R)=(0.9, 0.95)$

図7.3及び図7.4の緑のグラフが現行のトリガー効率 (Inner Coincidence を要求しない) を表し、図7.3では青、図7.4では赤のグラフがICWを導入した場合のトリガー効率を表している。ICWを導入した場合の Plateau efficiency の値と、導入前後での Plateau efficiency の変化量 ΔE を表7.3に示す。

ICW	Plateau efficiency[%]	ΔE [%]
$(T_{IC}, T_R)=(0.9, \text{フルオープン})$	89.02 ± 0.03	-1.14
$(T_{IC}, T_R)=(0.9, 0.95)$	88.50 ± 0.03	-1.66

表 7.3: ICW 導入時の Plateau と ΔE

これらの結果から、ICW を導入した場合の Plateau efficiency の変化量 ΔE は ICW 作成時の閾値に依ることが分かった。そのため、 ΔE と後述するトリガーレートの削減率との兼ね合いから、ICW 作成における最適な閾値を調べた (その結果も後述)。

7.2 トリガーレートの評価

次に CW にジオメトリーの補正を加えた場合と ICW を導入した場合について、それぞれのトリガーレートの評価する。

ジオメトリーを考慮した CW

ジオメトリーを考慮した CW によるトリガーレートを算出する。図 7.5 はその結果で、緑のヒストグラムはジオメトリー補正前の CW によるトリガーレートを表し、赤はジオメトリー補正後のトリガーレートを表す。ジオメトリーによる補正はフォワード領域の CW に加えたため、フォワード領域でのトリガーレートが変化した。

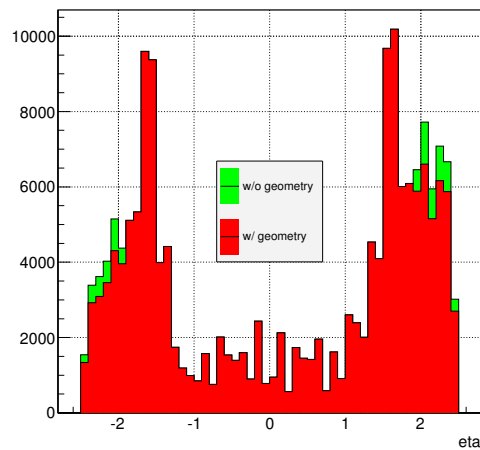


図 7.5: ジオメトリー補正によるトリガーレートの変化

この結果から、CW にジオメトリーの補正を加えることでトリガーレートが約 4[%] 削減することが分かった。

ICW を導入した場合

また、ICW を導入した場合のトリガーレートを算出する。トリガー効率と同様に、ICW 作成時に設定した閾値の異なるいくつかの ICW を導入した場合のトリガーレートを算出した。例として $(T_{IC}, T_R)=(0.90, \text{フルオープン})$ の設定で作成した ICW を導入した場合のトリガーレートを図 7.6 に、 $(T_{IC}, T_R)=(0.90, 0.95)$ の設定で作成した ICW を導入した場合を図 7.7 に示す。

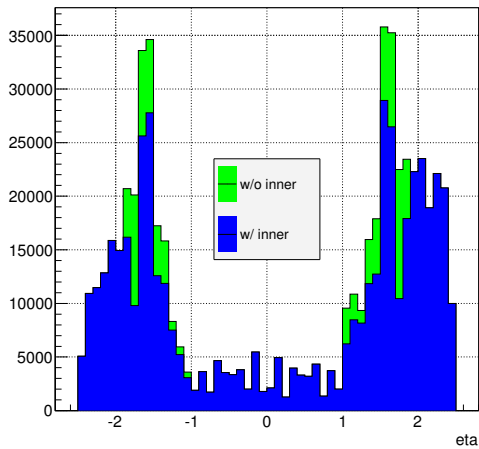


図 7.6: $(T_{IC}, T_R)=(0.90, \text{フルオープン})$

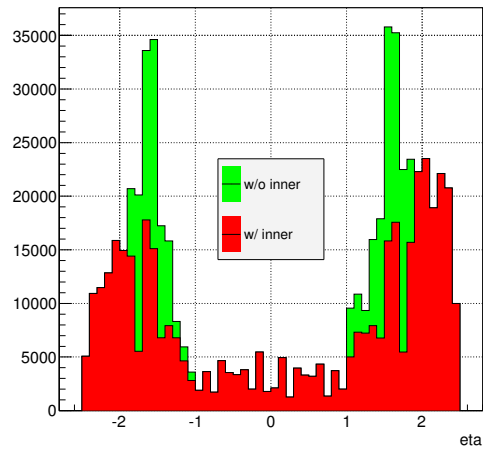


図 7.7: $(T_{IC}, T_R)=(0.90, 0.95)$

図 7.6 及び図 7.7 の緑のヒストグラムが現行のトリガーレート (Inner Coincidence を要求しない) を表し、図 7.6 では青、図 7.7 では赤のヒストグラムが ICW を導入した場合のトリガーレートを表している。どちらの場合も Inner Coincidence を要求するエンドキャップ領域でトリガーレートが変化した。 $(T_{IC}, T_R)=(0.90, \text{フルオープン})$ の ICW を導入した場合約 18[%]、 $(T_{IC}, T_R)=(0.90, 0.95)$ の ICW を導入した場合約 32[%] トリガーレートが削減することが分かった。

図 7.8 は閾値の異なる各 ICW を導入した場合の ΔE と Rate reduction の関係を表したグラフである。

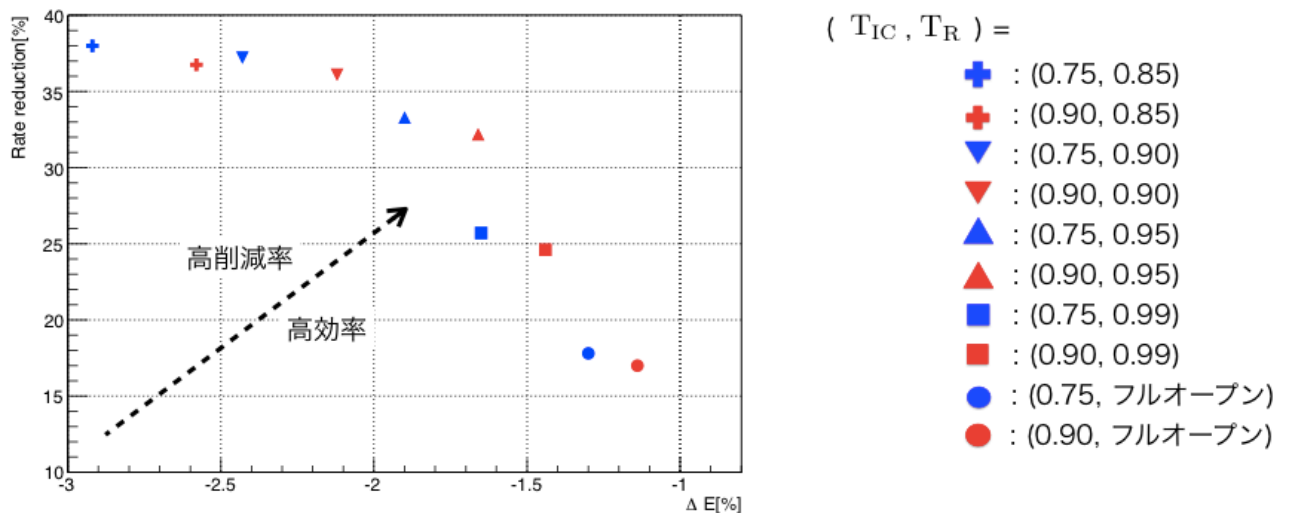


図 7.8: 各 ICW の ΔE と Rate reduction

図 7.8 から、 $(T_{IC}, T_R)=(0.90, 0.95)$ の設定で作成した ICW が最も性能が良い ICW だと判断し、Run2 からはこの ICW を導入することが決まった。

バンチ衝突間隔変更に伴う影響

2012 年はバンチ衝突間隔が 50[ns] で運転が行われたが、Run2 からは 25[ns] に変更される。バンチ衝突間隔の変更に伴いレベル 1 ミューオントリガーではフェイクトリガーの増加が考えられているので、ここではその影響に関して述べる。

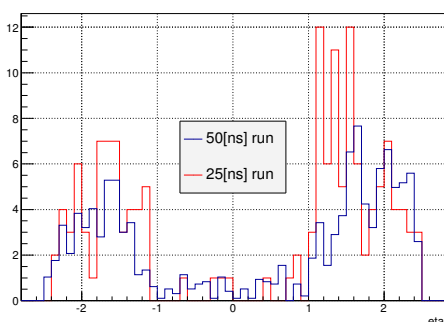


図 7.9: 50[ns] と 25[ns] の比較

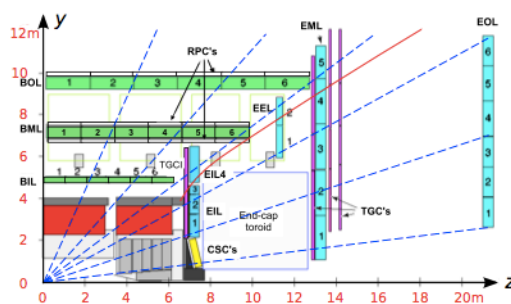


図 7.10: カロリメータ付近で発生した陽子

図 7.9 は 2011 年の Run において、バンチ衝突間隔 50[ns] で取得されたデータと 25[ns] で取得されたデータをルミノシティで規格化することで比較したトリガーレートである。青線のヒストグラムがバンチ衝突間隔 50[ns] で取得されたデータを表し、赤線が 25[ns] で取得されたデータを表す。図 7.9 から、バンチ衝突間隔 25[ns] では $1.0 \leq \eta \leq 1.3$ の領域 (A-Side) でトリガー発行回数が増加していることが分かる。トリガー発行回数はエンドキャップ領域で約 1.6 倍、全体では 1.3 倍となっている。

このようにフェイクトリガーを発生させる原因として、低エネルギーの陽子が考えられている (図 7.10 の赤い曲線)。これらの陽子は β が小さいため、バンチ衝突間隔が 50[ns] の場合は処理時間内に TGC に到達せずトリガーされなかったが、バンチ衝突間隔が 25[ns] の場合は、前のバンチ衝突で発生した陽子が次のバンチ衝突でトリガーされてしまう。そのため A-Side でフェイクトリガーが増加すると考えられる。

次に、2012 年の Run においてバンチ衝突間隔が 25[ns] で取得されたデータを用い、Inner Coincidence を要求した場合のトリガーレートを算出した。

図 7.11 は、図 7.8 で最も性能が良いと結論付けた $(T_{IC}, T_R)=(0.90, 0.95)$ の ICW の導入前後のトリガーレートの比較である。バンチ衝突間隔が 25[ns] の場合は全領域でトリガーレートが約 37.5[%] 削減されるという結果になった (エンドキャップ部では約 41[%] 削減)。上述した通りバンチ衝突間隔が 50[ns] の場合と比べてデータは約 1.3 倍になっているので、トリガーレートは $1.3 \times 62.5 = 81.3[\%]$ 程度になると予想される。

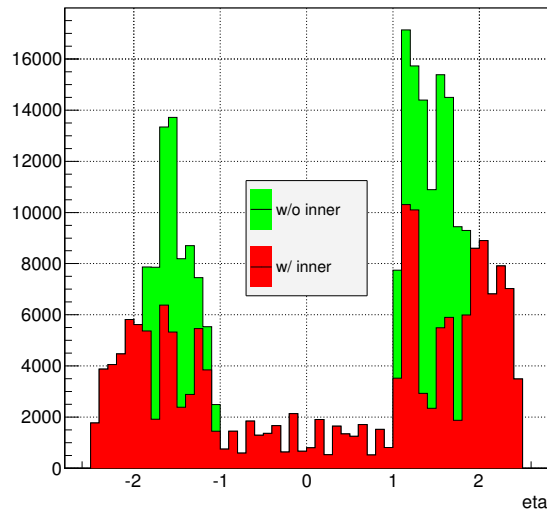


図 7.11: 25[ns] の場合のトリガーレート

CW 及び ICW の実装

以上のアライメントやジオメトリの補正を加えた CW、及び $(T_{IC}, T_R)=(0.90, 0.95)$ の設定で作成した ICW は 2013 年 12 月にテスト用の環境で試験が行われた。試験の手順は

- 全トリガーセクターの中から任意のセクターを選ぶ
- テスト信号を作成・入力する
- CW で指定された p_T が出力されるかを確認する
- ICW で指定されたトリガーが出力されるかを確認する

である (その他にレイテンシー等の確認も)。試験の結果、CW・ICW 共に指定通りの出力が得られることが確認された。よって、本研究で作成・改良した CW 及び ICW を用いたファームウェアが SL に実装され、2014 年 5 月に ATLAS 検出器に組み込まれる予定である。

第8章 まとめ

ATLAS 実験は LHC Run1 の運転において Higgs 粒子の発見という成果をもたらした。LHC は現在はシャットダウン期間中であり、2015 年から重心系エネルギーとルミノシティをさらに増強した Run2 の運転が予定されている。それに伴って ATLAS 検出器では、Run2 における高ルミノシティ環境に対応するための改良が行われている。それと同時に、レベル 1 ミューオントリガーシステムもフェイクトリガー削減のための改良が行われている。

本研究では Run2 に向けて、TGC のアライメントとジオメトリーの補正を加えた Coincidence Window の作成及び Inner Coincidence Window の作成・最適化を行った。また 2012 年に取得されたデータを用い、これらを導入した場合のトリガー性能を評価した。これら全ての効果を見積もったトリガー性能を図 8.1 及び図 8.2 に示す。

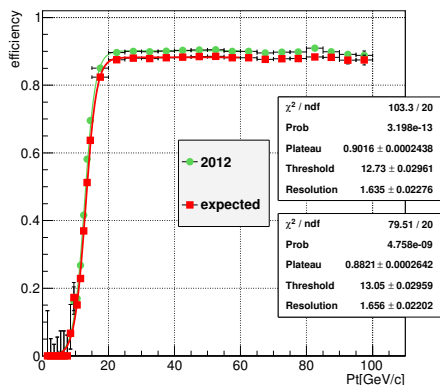


図 8.1: トリガー効率

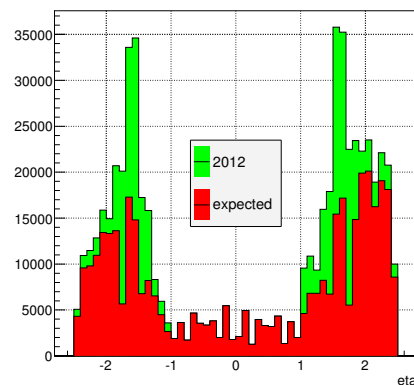


図 8.2: トリガーレート

その結果、トリガー効率を維持しつつトリガーレートを削減することができると分かった。改良した Coincidence Window 及び Inner Coincidence Window はすでに実際の環境を想定したテストをクリアし、ATLAS 検出器に組み込まれる予定となっている。

将来的には Inner Coincidence においてタイルカロリメータを使用することが決定している。ジオメトリーの関係上 EI の TGC が設置されていない領域においては、タイルカロリメータで得られた情報を利用して衝突点由来のミューオンを選別する。そのため、今後はタイルカロリメータ用の Look Up Table の作成とその性能評価を行うとともに、それらを導入する環境を整える必要がある。

謝辞

本研究を進めていく中で多くの方々に助けていただきました。特に指導教官の藏重久弥教授には、研究室配属時から本論文作成の最後に至るまで非常にご丁寧にご指導いただきました。また研究面だけでなく、CERN 出張の際には生活面でも大変お世話になりました。ご迷惑をおかけすることも多々ありましたが、その度に助けていただいたことを心より感謝致しております。まことにありがとうございました。また山崎裕司准教授、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いただきました。まことにありがとうございました。身内賢太郎准教授には研究だけでなくその他様々な相談に乗っていただきました。卒業研究の際に身内先生に指導していただいたことで、素粒子実験の楽しさを知ることができました。まことにありがとうございました。研究室秘書の横山有美様には CERN 等への出張の手続きをはじめ、その他様々なサポートを行っていただきました。心より感謝を申し上げます。まことにありがとうございました。

岸本巴様、谷和俊様、渡邊一平様には研究を進める上で様々な助言をいただきました。皆様の適切かつ丁寧なアドバイスに助けられることが多々ありました。深く感謝致しております。また ATLAS グループの石野雅也准教授、隅田土詞助教、青木雅人特任助教、長野邦浩准教授にも多くの助言をいただき、大変お世話になりました。まことにありがとうございました。道前武様、二ノ宮陽一様、野辺拓也様、永井遼様には CERN 滞在時に生活の様々な場面で大変お世話になりました。皆様のおかげで異国の地でも楽しく充実した日々を送ることが出来ました。まことにありがとうございました。

研究室の先輩である北村拓己様、細川圭志様、江戸勇樹様、村田亜紀様、駒井英俊様、山口貴弘様には研究室配属時よりお世話になりました。皆様に仲良くしていただいたおかげで研究室になじむことが出来ました。研究室同期の大西洋輔くん、来見田史恵さん、鈴木淳くんにも大変お世話になりました。皆様のおかげで日々楽しく過ごすことが出来ました。大学入学時より仲良くしていただいたことを心より感謝致しております。まことにありがとうございました。また後輩の山口祐史郎くんには生活面でお世話になりました。先輩らしいことは何もできなかったけれど、それでも慕ってくれたことを深く感謝致します。

その他にも粒子物理学研究室の皆様、ATLAS グループの皆様、友人、知人の皆様にごこの場を借りて感謝の意を表したいと思っております。皆様のおかげで充実した学生生活を送ることが出来ました。深く感謝致しております。

最後に、これまで支え続けてくれた家族に感謝の意を述べ、謝辞とさせていただきます。まことにありがとうございました。

参考文献

- [1] ATLAS EXPERIMENT, <http://atlas.ch>
- [2] ATLAS EXPERIMENT - Public Results, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/>
- [3] CMS EXPERIMENT, <http://cms.web.cern.ch>
- [4] ALICE EXPERIMENT, <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>
- [5] LHCb EXPERIMENT, <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>
- [6] ATLAS Experiment, "ATLAS Level-1 Trigger:TDR", <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/DAQTRIG/TDR/tdr.html>.
- [7] The ATLAS Collaboration, "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.", Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29, 31 July 2012.
- [8] The ATLAS Collaboration, "Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data", Phys. Lett. B 726 (2013) 120-144, 7 October 2013.
- [9] ATLAS Level-1 Trigger Group, "ATLAS Level-1 Trigger Technical Design Report", ATLAS TDR - 12, August 20 1998.
- [10] ATLAS Thin Gap Chamber Design page, <http://atlas-proj-tgc.web.cern.ch/atlas-proj-tgc/>
- [11] 長野邦浩, "LVL1 muon rate calculations and issues", ATLAS Upgrade Week, November 18 2011.
- [12] 石野雅也, "ATLAS Upgrade 計画 Overview", 「先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学」研究会, January 7 2012.
- [13] Yu Suzuki, "Upgrade of the ATLAS Level-1 Muon Trigger for the High Luminosity LHC", 博士論文, 総合研究大学院大学, 2013.
- [14] 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.
- [15] 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.

- [16] 谷和俊, ”アトラス実験 Phase0 アップグレードに向けた レベル 1 ミューオントリガーの改良” , 修士学位論文, 神戸大学, 2013.
- [17] 渡邊 一平, ” 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” , 修士学位論文, 神戸大学, 2013.