

修士学位論文
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

物理学専攻 粒子物理学研究室
109s111s
鈴木 雄太
神戸大学大学院理学研究科博士前期課程

平成 24 年 2 月 23 日

概要

2010年に実験を開始した ATLAS 検出器には、陽子陽子衝突によって大量に生成されるイベントの中から、解析対象とされるイベントのみを選別するトリガーシステムが設置されている。このトリガーシステムのひとつであるレベル1エンドキャップミュオントリガーは、3段階にまたがるトリガーシステムの初段に位置し、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。運動量の概算には参照表が用いられており、この参照表により初期の段階でイベントの取捨選択が行われるため、ATLAS 実験全体に於いて非常に重要な意味を持つ。本研究では、2011年度の run のデータを用いた、現状のパフォーマンスの評価、新たな参照表の作成と性能評価を行った。

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	ATLAS 実験	3
2.1	LHC : Large Hadron Collider	3
2.2	ATLAS 実験の目指す物理	4
2.2.1	標準模型における Higgs 粒子	4
2.2.2	超対称性粒子 (SUSY)	7
2.2.3	その他の物理	7
2.3	ATLAS 検出器	8
2.3.1	内部飛跡検出器	9
2.3.2	カロリメータ	10
2.3.3	ミュオン検出器	11
2.3.4	超電導磁石システム	12
第 3 章	TGC ミューオントリガーシステム	13
3.1	トリガーシステム	13
3.1.1	レベル 1(LVL1) トリガー	14
3.1.2	レベル 2(LVL2) トリガー	14
3.1.3	イベントフィルター (EF)	14
3.2	Level1 エンドキャップミュオントリガー	14
3.2.1	Thin Gap Chamber(TGC) について	14
3.2.2	TGC システムの読み出し構造	17
3.2.3	TGC エレクトロニクス	19
3.2.4	トリガー判定	21
3.2.5	トリガーシミュレーション	23
第 4 章	TGCLVL1 ミューオントリガーパフォーマンス	24
4.1	LVL1 トリガー効率と LVL1 トリガーレート	24
4.1.1	TGCLVL1 ミューオントリガーとは	24
4.1.2	LVL1 トリガー効率	25
4.1.3	トリガーレート	27
4.2	現状の課題	27
4.2.1	Cross-talk	27
4.2.2	TGC Alignment	28
第 5 章	Coincidence Window の作成と性能評価、改良	29
5.1	Coincidence Window について	29
5.2	作成方法	30

5.3	Coincidence window の変更	32
5.4	Cross-talk を考慮した Coincidence Window	32
5.4.1	Cross-talk の再現方法	33
5.4.2	Coincidence Window の拡大	34
5.4.3	新しい Coincidence Window 作成	35
5.4.4	Coincidence Window の比較	35
5.5	Coincidence Window 性能評価	37
5.5.1	トリガー効率	37
5.5.2	トリガーレート	38
5.5.3	TGC の Alignment による影響	39
第 6 章 まとめ		40

第1章 序論

素粒子物理学における標準模型は、自然界に存在する4つの力（重力相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用）のうち、重力相互作用以外の3つを記述する理論である。1970年代に理論が構築され、1980年代に各種の実験によりその正確さが定量的に確認された。標準模型を構成する基本粒子を図1.1に示す。図1.1左の粒子は我々の身の回りに存在する物質を構成する粒子である。また、それらの物質を構成する粒子に力を伝える粒子として図1.1右上にあるゲージ粒子が存在する。標準模型の枠

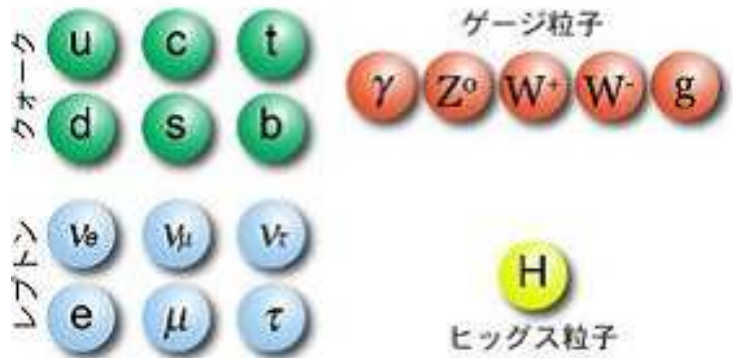


図 1.1: 標準模型を構成する基本粒子

内ではゲージ対称性が成立し、それによりゲージ粒子の質量はゼロであることが要請される。しかし、弱い相互作用を媒介する W 粒子、 Z 粒子は質量を持つ事が実験的に確かめられている。 W 粒子、 Z 粒子に質量を持たせるために導入された理論が Higgs 機構である。真空は Higgs 粒子で満たされた Higgs 場であり、 W 粒子、 Z 粒子は Higgs 粒子の抵抗を受けることで質量を獲得する。これまでに様々な実験で Higgs 粒子の探索が行われているが未だに発見に至っていない。

スイス・ジュネーブにある CERN(欧州原子核機構) 研究所で、大型陽子陽子衝突型加速器 LHC(Large Hadron Collider) が 2010 年 3 月より本格的に運転を開始した。LHC 加速器は周長 27[km] のビームトンネル、8.4[T] の超電導磁石により衝突エネルギーが世界最高の 14[TeV] まで到達可能であり、ルミノシティーは最高で $10^{34}[cm^{-2}sec^{-1}]$ まで達する。LHC 加速器は Higgs 粒子の探索など、TeV 領域の物理の研究、また標準模型の精密測定など様々な研究が行われている。

LHC 加速器の衝突点の 1 つに設置されている ATLAS 検出器は、様々な検出器によって構成されている汎用検出器である。LHC 加速器のバンチ交差は 40.08[MHz]、陽子同士の衝突頻度は 1[GHz] にまで到達する。これらの多量のイベントを高速に処理する必要がある。そのため、ATLAS 検出器ではレベル 1 (LVL1)、レベル 2 (LVL2)、イベントフィルター (EF) からなる 3 段階のトリガーシステムが設定されており、最終的に 100[kHz] まで段階的にイベントを絞り込む。

本研究の対象である、LVL1 エンドキャップミューオントリガーは 3 段階のトリガーシステムのうち、初段に位置する。ミューオンは $2.2[\mu s]$ という長い寿命を持ち、また物質に対する透過性が高いため、ATLAS 検出器の外側に検出器を設置することで有効なトリガー検出器となる。ATLAS 検出器のエンドキャップ部分には TGC(Thin Gap Chamber) が設置されており、TGC ではミューオントリガーを発行する。この時点でイベントの取捨選択が行われるため、終状態にレプトンを含む Higgs 粒子の崩壊モード探索において非常に重要な役割を持つ。

LVL1 エンドキャップミューオントリガーでは、磁場による飛跡の曲がり具合から横方向運動量 (p_T) を概算、トリガー判定を行う。その際に、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。これはシミュレーションを用い、飛来するミュー粒子

の飛跡の曲がり具合と運動量を関連付けた表であり、高速処理が求められる LVL トリガーにおいて重要な役割を果たしている。

TGC のトリガー効率が実データとシミュレーションで一致していることが確認できたが、2010 年途中の run からトリガーレートが急激に増加し、想定されている許容量近くまで迫った。これは、TGC で起こっている Cross-talk 現象によるトリガー効率の低下を防ぐために Coincidence Window に施した応急処置が原因であることがわかっている。2012 年度はルミノシティが 2011 年度に比べおよそ 2 倍に達するため、来年度予想されるレートは想定されている許容量を上回ってしまう。これを防ぐため、まず実データを用い、パターン化した Cross-talk の出現確率を計算した。この値を元にシミュレーションで Cross-talk を再現した。その結果、Cross-talk の効果を含んだ Coincidence Window を作成することが可能になり、数パターンの Coincidence Window を作成した。新たに作成した Coincidence Window に求められる性能は、トリガー効率を保ちながら、トリガーレートを減少させる事である。現行の Coincidence Window と数パターン作成した新たな Coincidence Window をトリガー効率、トリガーレートの点から比較、検証、数パターン作成した Coincidence Window 来年度用いる Coincidence Window を決定した。これによりトリガー効率を維持しながら、トリガーレートを大幅に削減することが可能になり、世界的に注目されている実験が多々行われている ATLAS 実験において、3000 人の共同研究者に対し貢献することができる。

本論文では第 2 章で、ATLAS 検出器における物理と ATLAS 検出器の概要、第 3 章でエンドキャップミュオントリガーについて、第 4 章で 2011 年度の run の TGC の性能検証を述べる。第 5 章で新しく作成した Coincidence Window の検証、来年度の予想を述べ、第 6 章でまとめる。

第2章 ATLAS実験

2.1 LHC : Large Hadron Collider

LHC(Large Hadron Collider) 加速器はスイス・ジュネーブにある CERN(欧州原子核機構) 研究所に於いて現在稼働中の大型陽子陽子衝突型円形加速器である。2000年に運転を終了した大型電子・陽電子衝突型円形加速器 LEP(Large Electron Positron Collider) で使用されていたトンネル内に設置されている。LHC 加速器は2010年3月に本格的に稼働を開始した。現在の運転における主要パラメータを表 2.1 に示す。

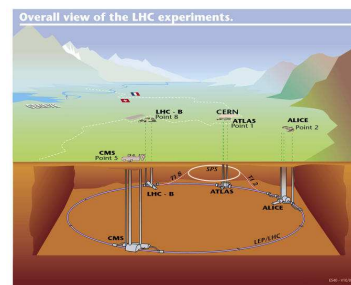


図 2.1: LHC 加速器

表 2.1: 現在の運転における主要パラメータ

主リング周長	26,658.87[m]	重心系エネルギー (陽子+陽子)	3.5[TeV] + 3.5[TeV]
積算ルミノシティ	5.6[fb ⁻¹]	瞬間ルミノシティ	3.65 × 10 ³³ [cm ⁻² sec ⁻¹]
衝突頻度	20[MHz]	バンチ間隔	50[nsec]
1バンチ当たりの陽子数	1.4 × 10 ¹¹ 個	バンチ数	1380 個
衝突点のビーム半径	23[μm]		

図 2.2 は、横軸は時間、縦軸は積算ルミノシティを表している。また、緑が LHC 全体、黄色が ATLAS 検出器で取得出来たデータ量を表しており、ATLAS 検出器単独でおよそ 5.3[fb⁻¹] のデータを2011年までで取得できた。

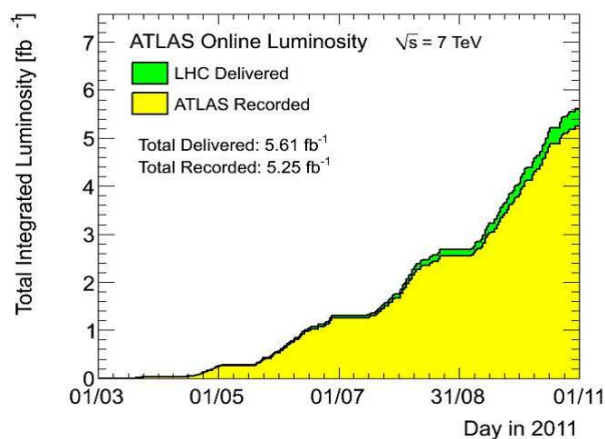


図 2.2: LHC 2011 年までの結果

陽子の質量は電子の約 200 倍あるため、加速される際に円軌道の接線方向に放射放出されるシン

クロトロン放射¹によるエネルギー損失が非常に少ない。そのため衝突時の重心エネルギーは LEP よりもはるかに高い値まで到達可能である。その反面陽子は散乱断面積が大きく、その構成要素であるクォークやグルーオン同士の散乱によるジェット等のバックグラウンドが多量に発生する。この中から目的の事象を選別することは難しい。そのため LHC に設置される検出器は入射粒子数が非常に多い環境に耐え且つ研究目的の事象を選別できることが条件になる。

LHC のビーム衝突点は 4 カ所あり、それぞれ目的に応じた検出器が設置されている。後述する大型汎用測定器 ATLAS(A Toloidal LHC ApparaturS) 検出器、ATLAS 検出器と同じ汎用測定器 CMS(Compact Muon Solenoid) 測定器 2.3(a)、B 中間子の研究に特化した LHC-B 検出器 2.3(b)、重イオン衝突実験用の Alice(A Large Ion Collider Experiment) 測定器 2.3(c) である。

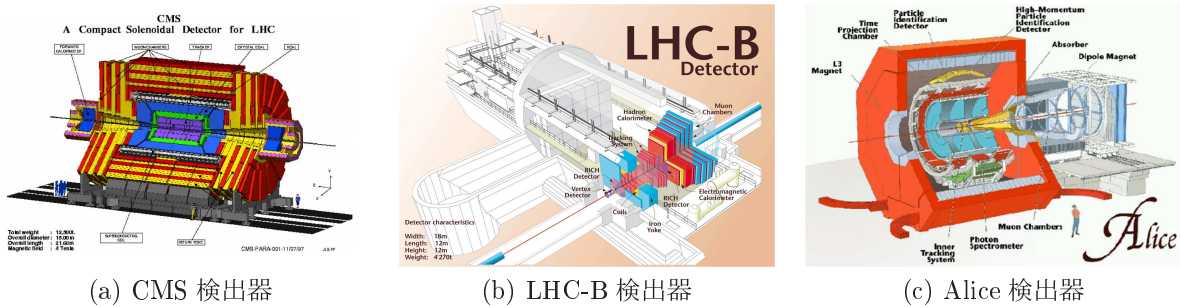


図 2.3: LHC に設置されている検出器

2.2 ATLAS 実験の目指す物理

ATLAS 実験の目的は

- 標準模型の基本粒子であり、唯一未発見である Higgs 粒子の探索
- 超対称性 (SUSY) 粒子の探索
- トップクォークの物理
- B 中間子での C P 非保存の研究

など多岐に渡る。LHC 加速器が世界最高エネルギーを誇る加速器であることから、中でも特に Higgs 粒子の探索に大きな期待が寄せられている。以下これらについて概要を述べる。

2.2.1 標準模型における Higgs 粒子

Higgs 粒子は標準模型の中で唯一未発見の粒子であり、粒子に質量を与える役割を持っている。Higgs 粒子の発見は万物の質量獲得の解明につながるとされており、発見に期待が寄せられている。

図 2.4 は Tevatron における Higgs 探索の結果である。横軸が Higgs の質量を表しており、縦軸は実験から計算された生成断面積を標準理論で予測される Higgs 粒子の生成断面積で割った値である。 $100[GeV/c^2] \leq M_H \leq 114[GeV/c^2]$ 、 $156[GeV] \leq M_H \leq 177[GeV/c^2]$ の範囲は 95% の信頼度で Higgs 粒子が存在しない事が実験で示されている。

また、理論的な制限から Higgs 粒子の質量は $1[TeV]$ 以下であるとされている。

¹磁場中を円運動する荷電粒子が、円軌道を 1 周する時にシンクロトロン放射によりエネルギー ΔE は

$$\Delta E[MeV/turn] = \frac{4\pi\alpha\hbar\beta^3\gamma^4}{3R}$$

で与えられる。ここで $\beta = \frac{v}{c}$ 、 $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2} = E/mc^2$

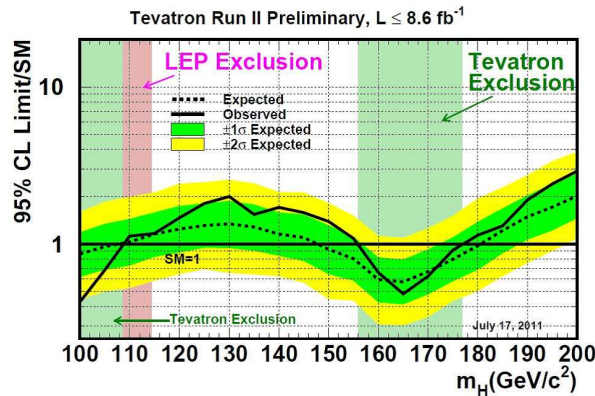


図 2.4: Tevatron での Higgs 粒子探索の結果

2.2.1.1 Higgs 粒子の生成過程

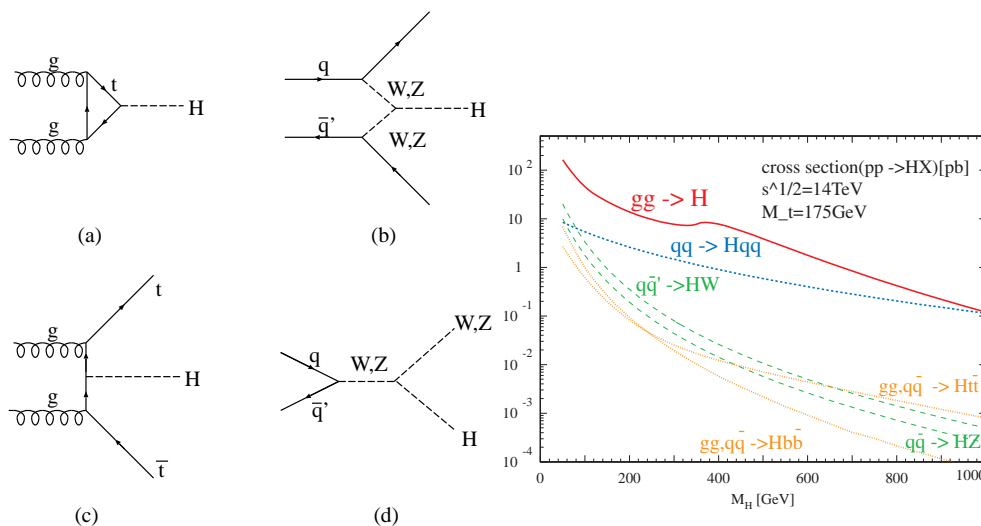


図 2.5: Higgs 粒子の生成過程。(a) グルーオン融合、(b) ウィークボゾン融合、(c)t/b 随伴生成、(d)W/Z 随伴生成

図 2.6: Higgs 粒子の生成断面積

Higgs 粒子の結合定数は質量に比例するため、トップクォーク、Z 粒子、W 粒子など質量の大きな粒子と強く相互作用するとされている。このため LHC 加速器での生成過程は以下の 4 つが考えられている。図 2.5 は Higgs 粒子の生成過程を表し、図 2.6 は生成断面積を表している。

- $gg \rightarrow H^0$ (グルーオン融合)

トップクォーク、ボトムクォークのループを介した生成過程で、もっとも生成断面積が大きい。しかし、Higgs 粒子の崩壊によって生成される粒子以外に大きな横方向運動量 (p_T) を持つ粒子がないため、バックグラウンドとの判別が非常に困難である。

- $qq \rightarrow qqH^0$ (ウィークボゾン融合)

2つのクォークから生成されたゲージボゾンによって Higgs 粒子が生成される。生成断面積が比較的大きく、また散乱角前方にクォークからのジェットが2本生成されることからイベントの判別が容易である。

- $gg \rightarrow (t\bar{t}/b\bar{b})H^0$ (t/b 随伴生成)

グルーオンから対生成されたトップ/ボトムクォークが対消滅し Higgs 粒子が生成される。終状態にトップ/ボトムクォークからのジェットを伴う。

- $qq \rightarrow (W/Z)H^0$ (W/Z 随伴生成)

クォークの対消滅により生成されたゲージボゾンから Higgs 粒子が生成される過程。終状態にゲージボゾンが観測される。

2.2.1.2 Higgs 粒子の崩壊

Higgs 粒子の崩壊過程は Higgs 粒子の質量 M_H に依存しており、各質量領域において特徴的な崩壊過程が存在する。図 2.7 は Higgs 粒子の崩壊分岐比を表している。以下に Higgs 粒子の質量領域別にその探索の概要を示す。

- $114[\text{GeV}] < M_H < 130[\text{GeV}]$

$$H^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad (2.1)$$

図 2.7 から、この質量領域では $b\bar{b}, c\bar{c}, \tau^+\tau^-$ の崩壊過程が主である。しかしこれらの崩壊については陽子陽子の非弾性散乱からのバックグラウンドが非常に大きいため測定が困難である。よって崩壊分岐比 10^{-3} と小さいながらもこの崩壊過程が主な探索チャンネルとなる。ここで光子は質量ゼロであり、Higgs 粒子と結合できない。そのため、トップやボトムクォーク、 W 粒子のループを介することで光子を放出する。

- $130[\text{GeV}] < M_H < 2M_Z$

$$H^0 \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^-, H^0 \rightarrow WW^* \rightarrow l^+\nu l^-\nu \quad (2.2)$$

この質量領域では W 粒子、 Z 粒子の質量を超えるので、 WW^*, ZZ^* の崩壊モードが可能である。主なバックグラウンドとして $pp \rightarrow ZZ^*/Z\gamma^* \rightarrow 4\text{leptons}$ がある。1つのレプトン対の p_T に制限をつけ、もう1つのレプトン対の不変質量に対して制約を付けることで、これらのバックグラウンドを除去することが出来る。

- $2M_Z < M_H < 700[\text{GeV}]$

$$H^0 \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-l^+l^- \quad (2.3)$$

この崩壊モードは”Gold-plated channel”と呼ばれており、崩壊分岐比が大きい。2組のレプトンに対し不変質量が $M_H \sim M_Z$ であることを課すことで、事象の取捨選択が有効である。そのためシグナル/ノイズ比が非常に大きい。 $M_Z = 200[\text{GeV}]$ とした時、高ルミノシティで1年間運転した場合 ($100[\text{fb}^{-1}]$)、100 イベント程度が期待されている。

- $700[\text{GeV}] < M_H < 1[\text{TeV}]$

$$H^0 \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-\nu\nu, H^0 \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj \quad (2.4)$$

この質量領域では崩壊幅が大きくなり、4レプトンモードでは統計が不足する。そのためこれらの崩壊モードを補足する。Higgs粒子の4レプトンモードと比較して、 $H^0 \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-\nu\nu$ は約20倍、 $H^0 \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ は約150倍大きい。Higgs粒子が弱ボゾン融合で生成された時を考え、散乱角度前方のクォークによる2つのジェットを観測することでバックグラウンドを除去できる。

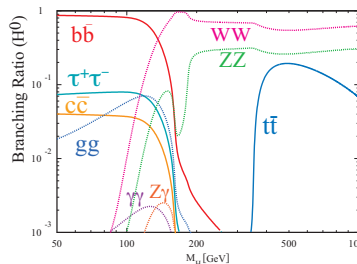


図 2.7: Higgs 粒子の崩壊分岐比

2.2.2 超対称性粒子 (SUSY)

素粒子物理学の究極の目的は、重力も含めた力の大統一であり、超対称性 (SUSY) の発見はこれに向けての大きな一歩であると有力視されている。LEP でのゲージ理論の精密測定の結果から超対称性による力の大統一の可能性が示された。

この超対称性は、ボゾンとフェルミオンが対になって存在するものである。つまり通常知られているボゾンやフェルミオンに対し、スピンの $1/2$ だけ異なるスーパーパートナーと呼ばれる超対称性粒子の存在を予言する。例えばクォークやレプトン (フェルミオン) のスーパーパートナーとして、スクォーク (\tilde{q}) やスレプトン (\tilde{l}) があり、グルーオン (ボゾン) のスーパーパートナーとして、グルイーノ (\tilde{g}) (フェルミオン) がある。もしこの理論が正しければ、LHC では強い相互作用をするスクォークやグルイーノの対が大量に生成され、超対称性粒子が発見できる可能性がある。超対称性粒子の主な崩壊過程の終状態にはレプトンが含まれており、これらの精密な測定は超対称性粒子の物理探索において重要な役割を担っている。

2.2.3 その他の物理

ATLAS 実験の目的は上で述べた新しい素粒子現象の探索以外に標準模型の検証、ボトムクォークの精密検証、量子色力学 (QCD) の精密検証などがある。

標準模型の検証はトップクォークの質量や部分崩壊率の測定などにより行われ、ボトムクォークの精密研究はボトムクォークの稀崩壊現象を探索し標準模型を超える物理を探る手法として行

われる。QCD の精密研究はクォークの内部構造の有無を、高い p_T を持つジェットの生成断面積の測定を通して行われる。

2.3 ATLAS 検出器

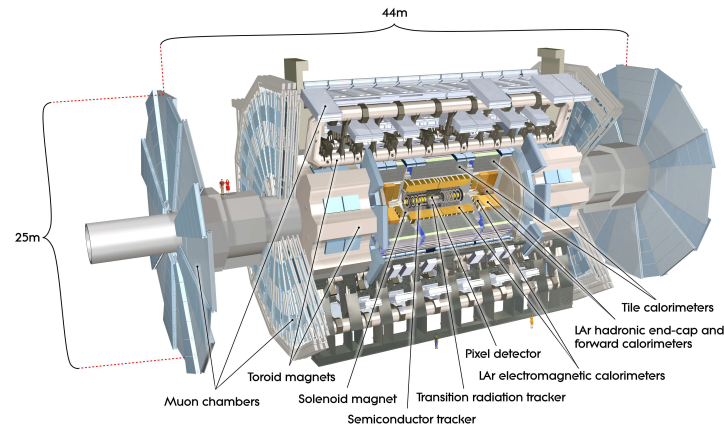
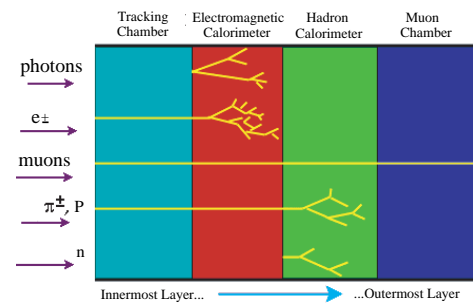


図 2.8: ATLAS 検出器

図 2.8 は、ATLAS 検出器の全体像を表している。ATLAS 検出器は直径 25m、長さ 44m、総重量 7000t の円筒型の汎用検出器である。内部から、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、ミュオンスペクトロメータと設置されており、図 2.9 は各粒子の各検出器に対する透過性を示している。2.2 で述べた物理事象の探索から検出器には以下の事が要求される。図 2.9: 各粒子の透過性



- LHC の高ルミノシティ環境下で対応できる、高速な応答と高い放射線耐性
- 内部飛跡検出器における精密な荷電粒子の運動量測定
- 全方位角と広範囲な擬ラピディティの測定有感領域
- 電磁カロリメータによる電子、光子の高精度な位置とエネルギーの測定、及びハドロンカロリメータによる高精度なジェット、消失横方向エネルギー (E_T) の測定
- ミュオンスペクトロメータによる高精度なミュオンの運動量測定
- 高精度なイベントの高速処理

ATLAS 検出器における座標系は、LHC のリング中心に向かう方向を x 軸、鉛直上向きを y 軸、ビーム軸方向を z 軸と定めている。しかし、解析を行う際には x, y, z ではなく、 R, θ, ϕ を用いる。各々、ビーム軸に垂直な方向に r 方向、ビーム軸を周回する方向に ϕ 方向、衝突点から引いた線とビーム軸の成す角を θ とし、また、擬ラピディティ $\eta = -\ln(\tan(\frac{\theta}{2}))$ を定義する。

円筒型の ATLAS 検出器は、円筒の側面部分をバレル領域 ($|\eta| < 1$)、円筒の底面部分、ビーム軸より外側のドーナツ型の部分をエンドキャップ領域 ($1 \leq |\eta| \leq 1.9$)、ビーム軸を中心とした円をフォワード領域 ($|\eta| > 1.9$) と呼ぶ。

以下各検出器について概要を述べる。

2.3.1 内部飛跡検出器

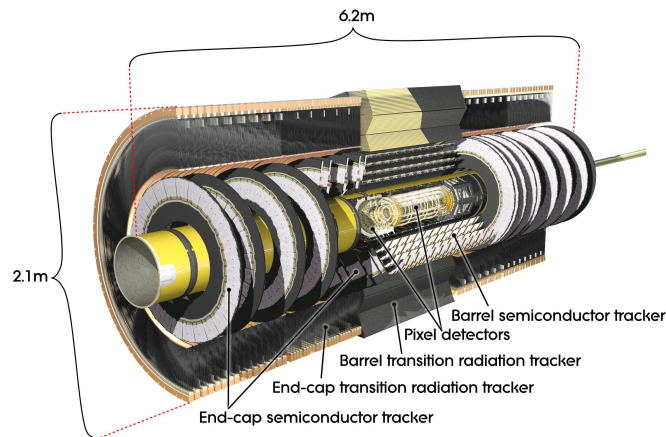


図 2.10: 内部飛跡検出器

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、2 Tの磁場を作る超電導ソレノイド磁石の内部に位置している。粒子の衝突点や崩壊点、また磁場を用いた運動量の測定を行っている。内部飛跡検出器には非常に大量の放射線下に置かれるため、高い放射線耐性が求められる。内側から、ピクセル検出器 (Pixel)、シリコン検出器 (SCT)、遷移輻射検出器 (TRT) の3つで構成されている。

Pixel(Silicon-pixel vertex detector)

最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、占有率を下げる為にピクセル型にしている。

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検出器で、ストリップ間隔は $80[\mu\text{m}]$ である。縦横 $6 \sim 7 [\text{cm}]$ のシリコンウエハーが円筒状に敷き詰められ、2層を互いに $40[\text{mrad}]$ 傾ける事で2次元の位置検出を可能にしている。

TRT(Transition Radiation Tracker)

半径 $4 [\text{m}]$ のドリフトストローチューブ検出器を積層することで構成されている。 $|\eta| < 2.0$ の範囲に渡ってビーム軸と並行に設置されており、 $R - \phi$ 方向のみの位置情報を持つ。ストローチューブは1つ当たり $130[\mu\text{m}]$ の位置分解能を持つ。電子の識別や、シリコン検出器と複合して用いる事で精密な飛跡測定を行う。

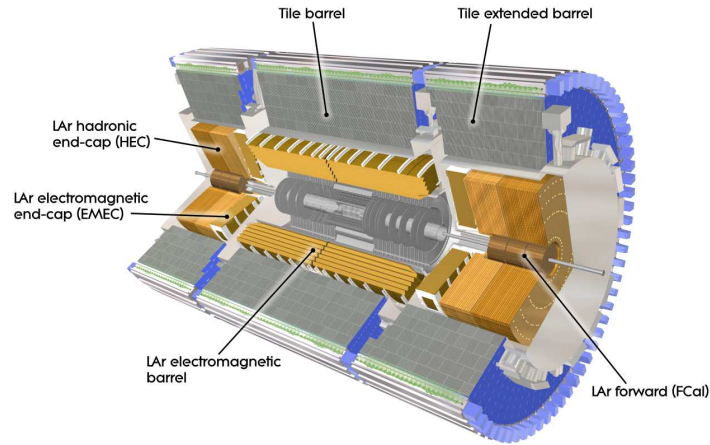


図 2.11: カロリメータ

2.3.2 カロリメータ

カロリメータの主な役割は、電子と光子のエネルギーと位置の精密な測定や、ジェットのエネギーと方向、 \cancel{E}_T の測定である。また、電子や光子、 τ のハドロン崩壊とジェットの識別や、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 種類に大別される。以下に各カロリメータについて概要を記す。

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。超電導ソレノイドマグネットの外側に設置されており、バレルとエンドキャップ両領域を覆い、電子と光子の測定に用いられる。エネルギー分解能は、

$$\frac{\Delta\sigma_E}{E} = \frac{9.5\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\% \quad (E \text{ は GeV 単位}) \quad (2.5)$$

と表され、第 1 項は電子の数 N をエネルギー E に換算したときの統計的な揺らぎ、第 2 項は構成の精度や温度の揺らぎによる定数項である。例えば、 $E = 100[\text{GeV}]$ の場合は約 1% の精度でエネルギーの測定が可能である。

ハドロンカロリメータ

バレル部分は鉄の吸収体とタイル状のシンチレータから成るタイルカロリメータが用いられている。エンドキャップ部分は銅の吸収体と液体アルゴンから成るカロリメータが用いられ、フォワード部分は銅とタングステンの吸収体と液体アルゴンから成るカロリメータが用いられている。ハドロンカロリメータは電磁カロリメータの外側に設置されており、ハドロンの同定、エネルギー測定、ジェットの再構成などを行う。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。

$$\frac{\Delta\sigma_E}{E} = \frac{52.3\%}{\sqrt{E}} \oplus 1.7\%(\text{Barrel}), \quad \frac{62.4\%}{\sqrt{E}} \oplus 3.6\%(\text{Endcap}) \quad (2.6)$$

2.3.3 ミュー粒子検出器

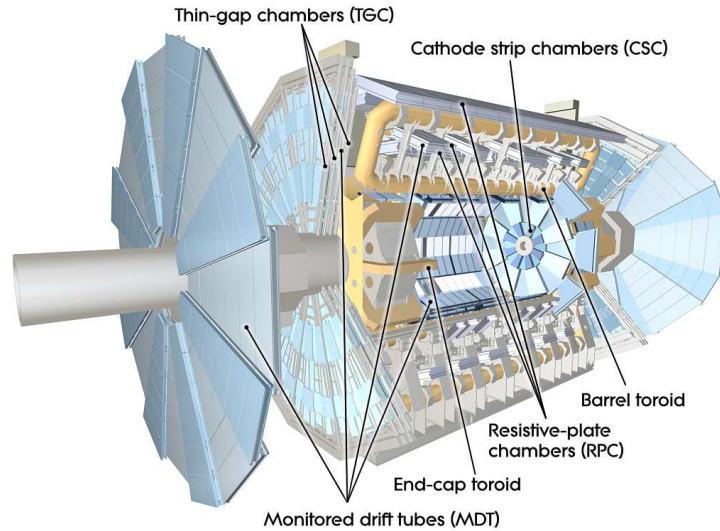


図 2.12: ミュー粒子検出器

終状態に荷電レプトンを含む物理現象は、測定装置で比較的捉えやすく。その中でもミュー粒子は物質の透過性が高く、また寿命が長いため、ATLAS 検出器の外側でも他の検出器に影響されることがなく検出することが可能である。

ミュー粒子検出器は、飛跡精密測定用の MDT(Monitored Drift Tube)、CSC(Cathode Strip Chamber) と、トリガー用の RPC(Resistive Plate Chamber)、TGC(Thin Gap Chamber) の 4 種類の検出器から構成される。ミュー粒子検出器の全体図を図 2.12 に示す。以下に各検出器の構成を述べる。また、トリガー及び TGC については第 3 章でくわしく述べる。

MDT(Monitored Drift Tube)

MDT は $|\eta| < 2$ のバレル・エンドキャップ部分の広い領域に配置されている。直径 $30[\text{mm}]$ のドリフトチューブを俵積みにし、フレームに固定した構造をしている。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できる。

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粒子測定の影響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% 程度となっている。そのため、最も放射線強度の高い超前方領域 ($|\eta| > 2$) に設置される。

RPC(Resistive Plate Chamber)

RPC は $|\eta| < 1$ 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。アノードにもワイヤーを用いず、ストリップから読み出すガスチェンバーである。ストリップが直交するように重ねられ、2次元読み出しが可能である。

2.3.4 超電導磁石システム

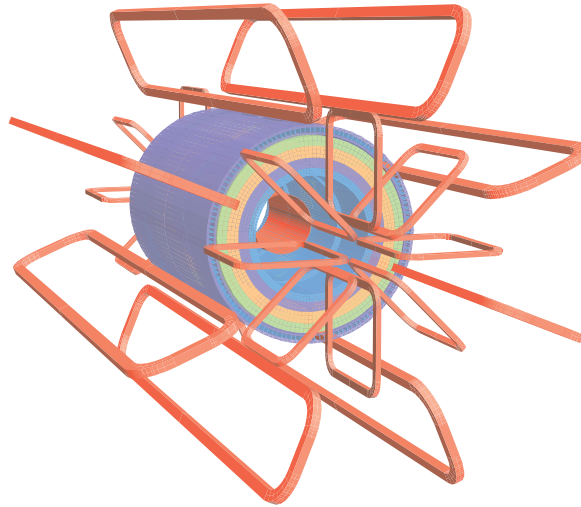


図 2.13: 磁石の構造

ATLAS 検出器の磁石システムは、中央のソレノイド磁石、及びバレルトロイド磁石、エンドキャップトロイド磁石の3つの超電導磁石から成る。磁石の構造を図 2.13 に示す。両トロイド磁石は、8つのコイルがビーム軸に対して8回対称になるように配置されており、積分磁場強度はバレル領域で2～6 [Tm]、エンドキャップ領域で4～8 [Tm] である。トロイド磁場の積分強度の η 分布を図 2.15 に示す。また、図 2.14 はビーム軸に垂直な平面 (X-Y 平面) での磁力線を示したものである。トロイド磁場は ϕ 方向成分が主だが、バレル、エンドキャップの境界部分では磁場の不均一性は避けられないため、R方向成分も存在する。

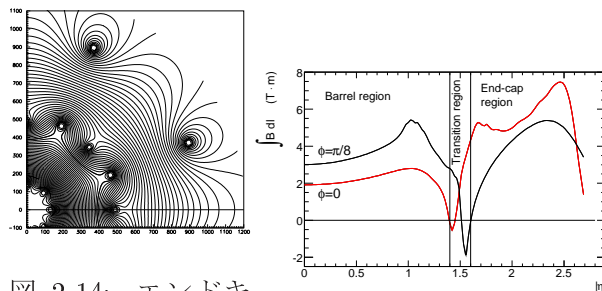


図 2.14: エンドキャップトロイドの中央 ($z=1050[\text{cm}]$) における X-Y 平面の磁力線

図 2.15: 積分磁場強度の η 分布

第3章 TGC ミューオントリガーシステム

3.1 トリガーシステム

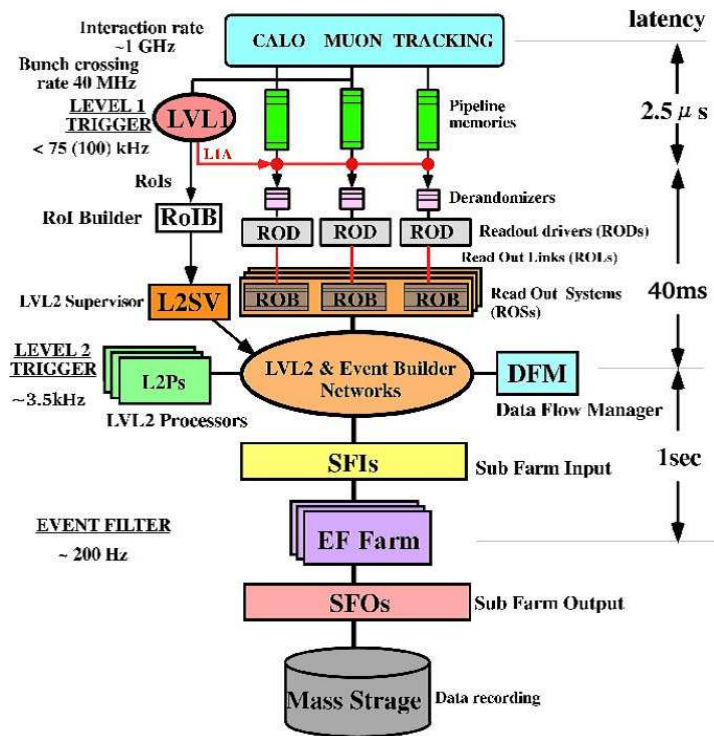


図 3.1: トリガーシステムの流れ

LHC 加速器による高ルミノシティで run を行った場合、1 バンチ当たり平均 2 4 回の陽子陽子衝突が予想される。バンチ間隔は 40.08 [MHz] が想定されており、したがって陽子の衝突は 1 [GHz] に達する。これらのイベントの中から目的とする物理現象から発生するイベントのみを選別するトリガーシステムが必要となる。このトリガーシステムはオンラインで目的の物理現象から来るイベントを判断する。最終的に DAQ システムに送られるイベントレートは、データストレージの制約上 200 [Hz] 程度に制限される。これらの要求を満たすため、ATLAS の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、図 3.1 のように順次イベントを選別してゆく。

LVL1 トリガーは、ミュオンシステム、カロリメータによって事象選別を行う。これは専用の高速トリガー回路を用いて行われる。この時カロリメータ、ミュオンシステムでトリガーが発行された領域を RoI (Region of Interest) と呼ぶ。LVL2 トリガーでは RoI の情報を用いてイベントの精密な選別を行う。さらに EF では全検出器の情報を用いたイベント選別が行われる。

3.1.1 レベル 1(LVL1) トリガー

LVL1 トリガーでは、ミュオンスペクトロメータ (TGC, RPC) から得られる p_T と、カロリメータから得られるエネルギーの情報を元にイベント選別を行う。カロリメータは、トリガー専用の読み出し回路で粗い分割でのエネルギー情報を用いている。陽子衝突がおおよそ 1[GHz] の頻度で発生するので、この段階でのイベントレートはおおよそ 1[GHz] である。これを 75[kHz] まで絞り込む。

3.2 で LVL1 ミュオントリガーのうち特にエンドキャップ部について詳しく述べる。

3.1.2 レベル 2(LVL2) トリガー

LVL2 トリガーでは、LVL1 トリガーで発行された RoI の情報を元に、その周辺の内部検出器、カロリメータの詳細情報およびミュオンの飛跡精密測定データを読み出すことで行われる。これにより短時間且つ精度よく選別を行える。イベントレートは 75[kHz] から 3.5[kHz] 程度まで絞り込める。

3.1.3 イベントフィルター (EF)

全検出器の位置情報、トリガー判定を元にイベント選別が行われる。選別されたイベントはオフライン解析のため、データストレージに書き込まれる。イベントレートは 200[Hz] 程度にまで絞り込まれる。

3.2 Level1 エンドキャップミュオントリガー

LVL1 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 $|\eta| < 1.05$ (バレル部) を RPC、 $1.05 < |\eta| < 2.42$ (エンドキャップ部) を TGC がカバーしている。LVL1 ミュオントリガーの役割は、高い p_T のミュオン粒子事象の選別である。

3.2.1 Thin Gap Chamber(TGC) について

TGC は高エネルギー実験ではよく用いられる多線式比例計数箱 (Multi Wire Proportional Chamber: MWPC) の 1 種である。一般的な MWPC よりアノード、カソード間の間隔が狭い。そのため入射粒子によって形成された陽イオンが短時間でカソードに到達、吸収され、高頻度の入射粒子がある環境下でも検出効率の低下を抑えることができる。

ATLAS 検出器ではエンドキャップ部に用いられ、飛来するミュオン粒子の同定を行っている。

3.2.1.1 構造

図 3.2 は ATLAS 検出器における TGC の配置とその構造を示している。

R 方向の読み出しをワイヤー、 ϕ 方向の読み出しをストリップで行い、2次元の位置情報を測定できる。ワイヤーは各チャンネルのカバーする η 領域の大きさが一定になるように、6 ~ 31 本毎 (幅 10.8 ~ 55.8[mm]) にまとめられた単位で読み出しを行う。またストリップ (幅 15 ~ 53[mm]) はチェンバーを ϕ 方向に 32 分割するように配置されて、1チャンネルとして読み出しを行う。チェンバーの大きさは配置場所により異なるが、1辺が 1 ~ 2 [m] 程度である。図 3.3 は TGC の断面図である。カソード面に挟まれた領域に $CO_2/n-pentane(55/45)$ が封入されている。TGC を通

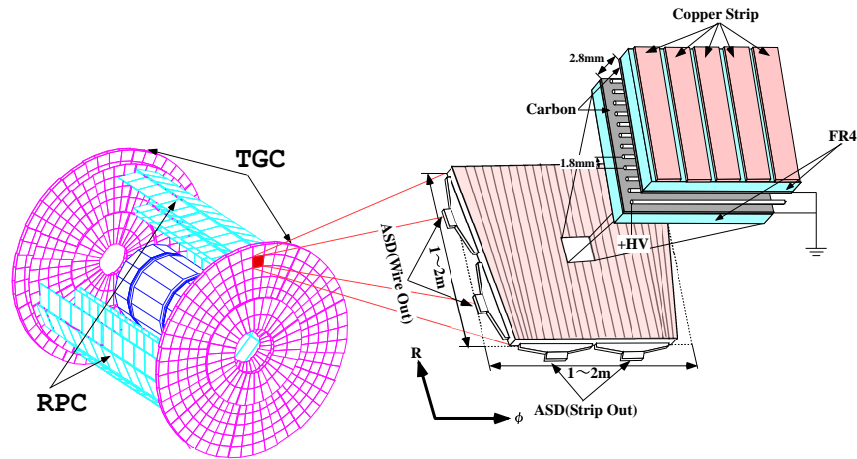


図 3.2: TGC の配置と構造

過した荷電粒子は CO_2 を電離し、電子・陽イオン対を作りだす。ワイヤーには通常 $2.9[kV]$ の高電圧が印加されており、電離により発生した電子（一次電子）がアノードワイヤーに向かってドリフトする。印加電圧によって加速され、運動エネルギーがガス分子の電離エネルギーを超えると、周りのガス分子をイオン化し二次電子を生成する。これを繰り返すことによりワイヤー近傍で電子雪崩を起こし、増幅された信号を得る事が出来る（ガス増幅）。ワイヤー間が $1.8[mm]$ と狭いのは、最も近いワイヤーまでの距離を短くすることで、一次電子のドリフト時間を約 $25[nsec]$ のバンチ衝突頻度に対応するためである。またワイヤーとカソード間が $1.4[mm]$ と狭いため全領域にわたり非常に強い電場がかかり、ほぼ全域でガス増幅が起こる。その結果、入射粒子の通過距離が短い、すなわち電離電子が少量の場合でも信号を検出することが可能となる。ガス増幅率は 3×10^5 である。

電子がアノードワイヤーにドリフトすると同時に、陽イオンがイオン雲となってカソード面に向かってドリフトする。カソード面に塗布された高抵抗のカーボン面とストリップに電荷が誘起され、信号が出力される。イオン雲は TGC の検出効率を低下させるため、出来るだけ早くカソード面に到達する必要がある。そのため、TGC はカソード面間隔が狭い（ドリフト距離が短い）構造をとり、高レートの粒子の入射に対応している。

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して発生する電子は、自己放電を引き起こす可能性がある。そこで、n-pentane を封入し紫外線を吸収することで放電を抑えている。

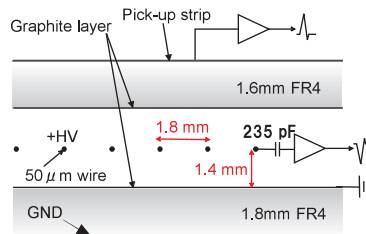


図 3.3: TGC の断面図

ATLAS 実験では TGC は 1 層 (singlet) では用いず、チェンバー 1 枚あたりに 2 層 (doublet) または 3 層 (triplet) を重ねた構造がとられている。多層構造にすることで、各層のコインシデンス

をとり、バックグラウンドなどから来るノイズを抑えている。また、チェンバーの補強部分であるワイヤーサポートの不感領域による影響を抑えている。これらにより検出効率は 99% を達成している。doublet は 2 層のワイヤー面と、2 層のストリップ面から信号の読み出しを行う。triplet は 2 層目のストリップがなく、3 層のワイヤー面と 2 層のストリップ面から読み出しを行う。

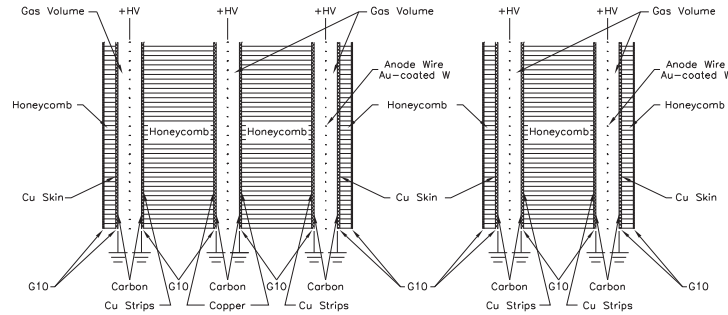


図 3.4: triplet(左) と doublet(右) の構造

3.2.1.2 配置

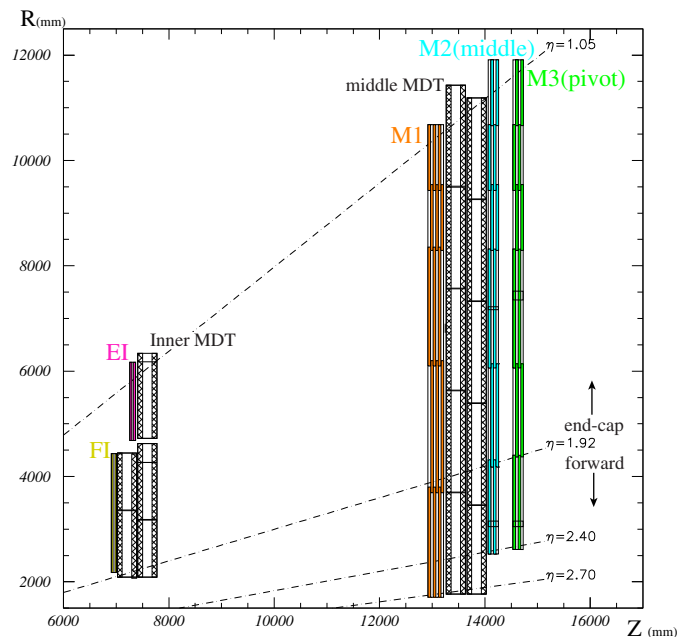


図 3.5: R-Z 平面での TGC の配置

TGC システムは M1, M2(middle)、M3(pivot) station と EI(Endcap Inner)、FI(Forward Inner) の 5 つから構成され、ATLAS 検出器の両側のエンドキャップで円盤状に並べられて配置されている (図 3.5)。 $1 < |\eta| < 1.9$ の領域をエンドキャップ、 $1.9 < |\eta| < 2.7$ の領域はフォワードと呼ばれる。

M1は3層(triplet)、M2,M3は2層(doublet)のチェンバーからなり、トリガー判定にはこの計7層が使われる。これらの7層は衝突点側から、M1では(T1,T2,T3)、M2では(D4,D5)、M3では(D6,D7)と呼ばれる。このように2次元読み出しが可能なTGCのstationを並行に配列することで、3次元での飛跡測定を可能にしている。図3.6(a)にM3の全体図を示す。黒い線で示されているセルが1つのTGCチェンバーを表している。

TGCは1/12円(円形状に配置したTGCを ϕ 方向に12等分したもの)が1つの大きな単位となっており、データの処理はこの単位で行われている(図3.6(a)の赤い線で示された扇型の部分)。LVL1トリガーに関連する部分では、1/12はトリガーセクターと呼ばれる単位で分割され、エンドキャップ領域は ϕ 方向に4等分、フォワード領域は ϕ 方向に2等分される(図3.6(a)水色の部分、及び(b)緑色の部分)。トリガーセクターの ϕ 方向の幅がちょうどTGC1枚の幅と一致する。さらにトリガーセクターをエンドキャップ領域では η 方向に37分割、 ϕ 方向に4分割、フォワード領域では η 方向に16分割、 ϕ 方向に4分割された単位をサブセクターと呼ぶ(図3.6(a)黄色の部分、(b)左右のマス目の1つ)。サブセクターは8ワイヤグループと8ストリップに対応しており、これらはトリガー処理の最小単位であり、1つのRoIでもある。ATLAS実験に設置される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10万になる。

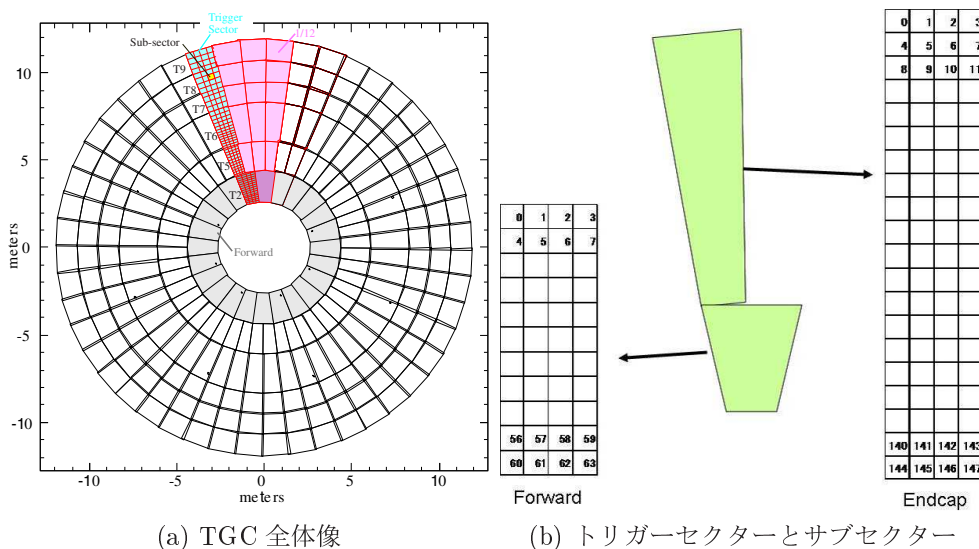


図 3.6: TGC の全体図とトリガーセクター

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全体像を図 3.7 に示す。TGC システムの読み出しにはトリガー系とリードアウト系がある。赤線、青線はそれぞれ、トリガー系、リードアウト系読み出しを表す。

3.2.2.1 トリガー系の読み出し

信号はASD(Amplifier-Shaper-Discriminator)ボード、PP ASIC(Patch Panel ASIC)、SLB ASIC(Slave Board ASIC)、HPT(High-Pt ボード)、SL(Sector Logic)の順に送られ、信号の増幅・整形・デジタル化が行われた後、PP ASICへ送られる。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やケーブル遅延などから生じるタイミングのずれを調整し、バンチ識別(信号をLHC

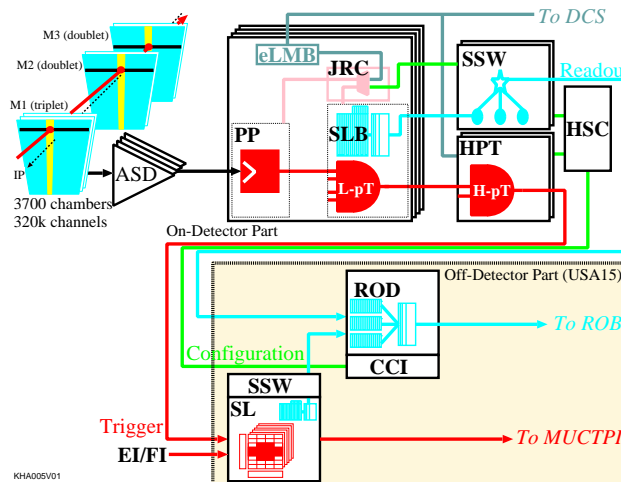


図 3.7: TGC エレクトロニクスの概要

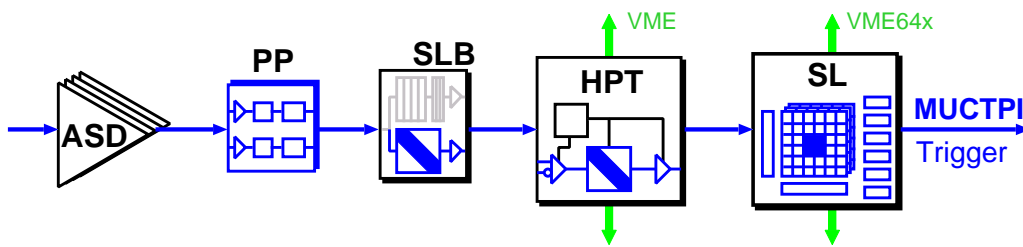


図 3.8: トリガー系のデータフロー概略図

クロックに同期させる) を行う。SLB ASIC では、PP ASIC からの信号を受け取り、M2 および M3 からなる 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: 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 ASIC で測定した M3、M2 および M1 のコインシデンス処理の結果を基に、 $High-p_T$ コインシデンス情報が生成される。SL では、それ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括し、コインシデンス処理及び p_T が大きな 2 つのトラックをセクター毎に選び出す。これらのエレクトロニクスの詳細は 3.2.3 で述べる。SL の結果は、MUCTPI (Muon Central Trigger Processor Interface) に送られ、RPC の情報と併せてミュオンシステムの最終的なトリガー判定が下される。

3.2.2.2 リードアウト系の読み出し

PP ASIC から送られてきたデータは、SLB ASIC の中にかかる LVL1 バッファに蓄えられる。このバッファの保持時間は $2.5[\mu sec]$ である L1A (トリガー判定) 信号を受けたデータのみが SSW (Star Switch) へと送られる。SSW では、データの圧縮を行い、規定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 に送られる。変換されたデータは ROD (Readout Driver) に送られ、それらのデータと TTC (Time Transfer Control) から送られてくる情報との整合性を確認する。データが正しいものであれば、要求されるフォーマットにデータを変換して ROB (Readout Buffer) へ送られる。ROD では最大 8 個の SSW からの情報を収集する。

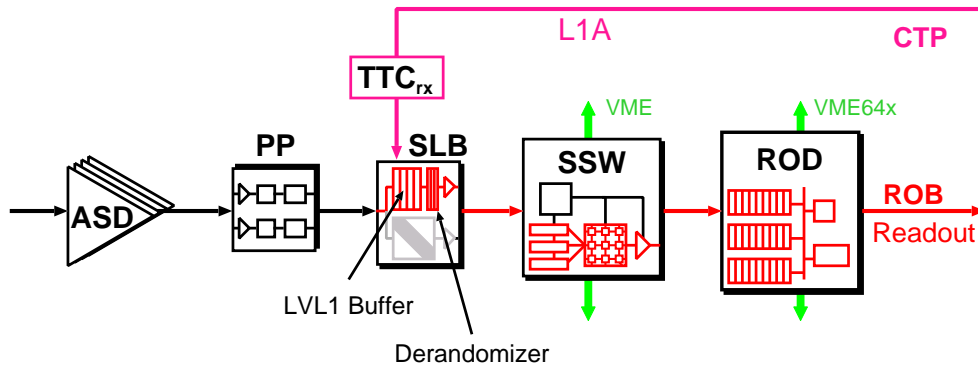


図 3.9: リードアウト系のデータフロー概略図

3.2.3 TGC エレクトロニクス

トリガー系、及びリードアウト系に用いられる各モジュールについて概要を記す。

Amplifier Shaper Discriminator Board(ASD)

ASD Board は TGC の側面に取りつけられ、4 チャンネル分の処理が出来る ASD ASIC が 4 個搭載されている。1 つのボードで 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 LVDS(Low Voltage Differential Signal:低電圧作動信号) レベルの信号で出力する。また、ASD ボード以降のエレクトロニクスの診断やタイミング調整のために、擬似的な TGC の出力信号を出力する機能も持っている。

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 の重なった部分でのダブル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できる。また、ASD Board に向けてテスト用の擬似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 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 ASIC の段階では、ワイヤとストリップ、doublet と triplet は別々に扱うため、設定により 5 種類のコインシデンス処理 (ワイヤ doublet、ストリップ doublet、ワイヤ triplet、ストリップ triplet、EI/FI) を切り替えられるようになっている。doublet ではワイヤ、ストリップ共に M2, M3 からの信号を使い、4 層中 3 層以上での検出を要求する。そして M3 を基準にして M2 上でワイヤ、ストリップ方向の無限運動量の飛跡からのズレを計算する、このズレは $low-p_T$ 判定に用いられる。また、triplet はワイヤとストリップで層の数が違うため、ワイヤでは 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 ではワイヤストリップ共に 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 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にヒットがあった時にその中の 1 つの

チャンネルだけから信号を出力させる (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診断やタイミング調整を行うための擬似信号を出力する機能がある。

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 (Central Trigger Processor) 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 を用いることにより磁場によってあまり曲げられることがなかった大きな p_T を持つミュオン粒子を選別できる。HPT ではワイヤとストリップは独立して処理が行われ、最終的にはミュオン粒子の p_T 判定に使用される $\Delta R, \Delta\phi$ を出力する。ただし、HPT でコインシデンスが見つからなかった場合、SLB のコインシデンス結果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。エンドキャップ領域用には 4 つ、フォワード領域用には 3 つの HPT ASIC が搭載される。

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。HPT まで独立に処理されていた R 方向 (ワイヤ)、と ϕ 方向 (ストリップ) の HPT 信号両者のコインシデンス ($R - \phi$ コインシデンス) を取ることにより、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 Coincidence Window と呼ばれる参照表 (Look-up Table; LUT) が用いられる。これは書き換え可能な集積回路に実装され、要求される閾値に対応することが可能である。プレセクターは、各閾値毎に用意される。 p_T の大きい順に 2 つのトラックを選択し、計 1 2 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後 ROD へ送信する。1 つの SSW で最大 2 3 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基に同じイベントごとにまとめ、ROB (Read Out Buffer) に送信する。

3.2.4 トリガー判定

LVL1 ミューオントリガーでは、検出されたミュー粒子の p_T によってトリガー判定を行う。前述のように p_T はミュー粒子の磁場による曲がりから概算される。以下に横方向運動量の概算、トリガー判定について詳しく述べる。

3.2.4.1 横方向運動量 (p_T) の概算方法

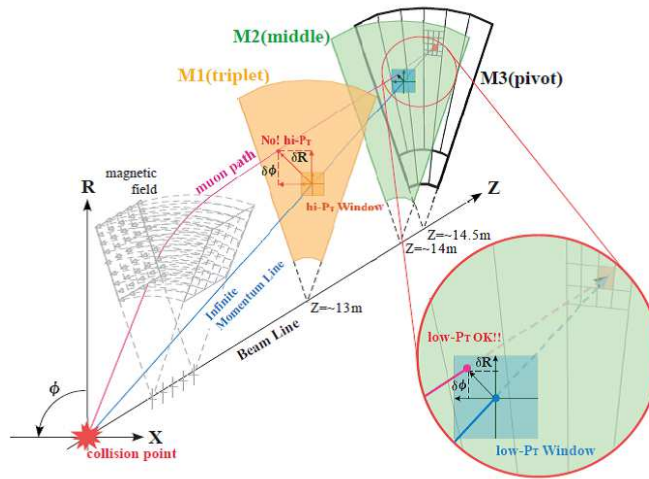


図 3.10: p_T 概算方法の模式図

ビームの衝突により発生したミュー粒子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(pivot)つまりM3での検出と衝突点を直線で結んだものを無限運動量トラックと仮定する。M1およびM2での検出器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。(図3.10)この ΔR 、 $\Delta \phi$ を用いて p_T を概算する。

M1および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 、 $\Delta \phi$ 平面で形成される領域をウィンドウと呼ぶ。ウィンドウはM1,M2共に p_T が6[GeV]以上のミュー粒子がほぼ通過できる範囲になっている。

TGCでは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3.11)。M3,M2の2つを使用して決定される情報は、2つのstation間のコインシデンスであるため2-station コインシデンスと呼ばれる。M1を用いたコインシデンスは、3つのstation間になるので3-station コインシデンスと呼ばれる。2-stationで用いるM3とM2より3-stationで用いるM3とM1は測定点間の距離が長く、より精密な運動量測定が可能となる。このため、3-station コインシデンスは曲がりの小さい運動量の高いミュー粒子の運動量概算に用いられる。2-station、3-station コインシデンスがとられたイベントをそれぞれlow- p_T ,high- p_T イベントと呼ぶ。

測定された ΔR 、 $\Delta \phi$ はSLへ送られ、これまで独立して処理されてきたR方向と ϕ 方向のコインシデンスがとられる。この $R-\phi$ コインシデンス情報を用いてCoincidence Windowと呼ばれるLook-up Tableを参照し、6段階の閾値に分類する。

トロイド磁場による磁場が理想的な ϕ 方向のみであれば、ミュー粒子の飛跡の曲がりにはR方向のみになる。しかし実際の磁場は図2.14で示したように一様ではなく、 ϕ 方向への曲がり成分を持つ。

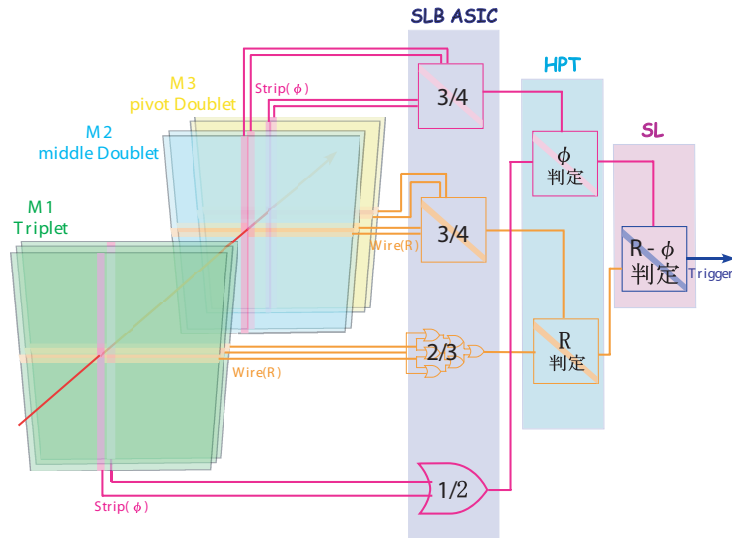


図 3.11: 各層におけるコインシデンスの概要

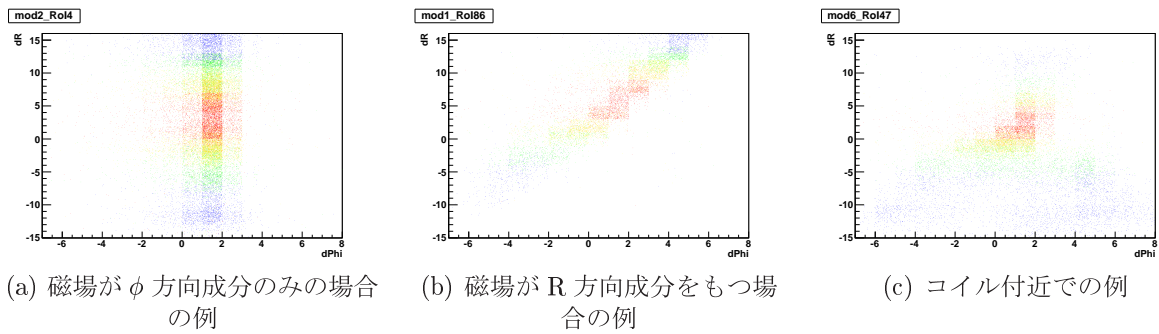


図 3.12: $\Delta R, \Delta\phi$ 分布

シミュレーションによって作成された $\Delta R, \Delta\phi$ 分布を図 3.12 に示す。青から赤のプロットになるにつれミュオンの p_T が大きくなる。図 3.12(a) では p_T が小さくなるにつれて ΔR が正負に拡大しており、R 方向に強い相関関係が見られる。粒子の曲がる方向は、トロイド磁場が衝突点を挟んだ2つのエンドキャップトロイドで同じであることから $C_{rapidity} = \text{電荷} \times \eta$ で決まる。 $C_{rapidity}$ が正のとき、荷電粒子は Z 軸から離れる方向へ曲げられるため ΔR は負になる。逆に $C_{rapidity}$ が負であれば、 ΔR は正になる。これに対し図 3.12(b) では ϕ 方向への変位が見られる。これは図 2.14 で示した様に、エンドキャップの η が小さい領域では、バレルコイルとエンドキャップコイルの2系統のトロイド磁場の境界部分の磁場が R 方向成分を持つためである。さらにトロイドコイル付近では磁場が強く、また方向も揃っていないため図 3.12(c) のようになる。また、図 2.15 が示す積分磁場が小さい領域では、飛跡の曲がりと p_T に相関がほとんど無い。

TGC は本来、無限運動量が $\Delta R, \Delta\phi$ 平面の原点となるように設計された。しかし TGC を Z 方向に移動する必要が出たため、現在は無限運動量は ΔR 正の方向へずれている。また、 ϕ 方向の無限運動量は検出器周りのエレクトロニクス作用により $\Delta\phi = +1$ となっている。

3.2.5 トリガーシミュレーション

ATLAS 検出器では、シミュレーションを用いた各検出器の動作確認やトリガーシステムのアルゴリズムの開発がなされている。

シミュレーションには、大別して以下の4つのプロセスがある。

ジェネレーション (事象生成)

理論により予測された陽子陽子衝突で起こる物理現象をモデル化して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

geant4 と呼ばれるシミュレータを用いて測定器の詳細な形状と磁場分布を実装している。事象情報を受け取り、衝突点付近から発生したミュオンなどの測定器や構造体中での相互作用をシミュレートし、飛跡を求める。ミュオン粒子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。

デジタル化

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、実際の測定器の出力に変換する。ここでは実験データから得られた検出効率の位置依存性や、粒子の入射角度による信号の時間差も考慮される。このプロセスを経て、シミュレーションデータは実際の ATLAS 検出器の測定データと対等な情報となる。

トリガーシミュレーション

TGC エレクトロニクスロジックが再現される。

これらのシミュレーションを用いて SL での LUT が作成される。シミュレーションには、ミュオン粒子の運動量、コインシデンスのあったサブセクター、 $\Delta R, \Delta\phi$ などがイベント毎に含まれている。このデータから p_T と $\Delta R, \Delta\phi$ の対応関係を調べて LUT を作成する。

第4章 TGCLVL1 ミューオントリガーパフォーマンス

4.1 LVL1 トリガー効率と LVL1 トリガーレート

LHC 加速器は 2010 年より当初のデザインの半分のエネルギーである、 $3.5[\text{TeV}] + 3.5[\text{TeV}]$ 、重心系エネルギー $7[\text{TeV}]$ で運転を開始した。2011 年までの 2 年間で積算ルミノシティおよそ $5.3[\text{fb}^{-1}]$ のデータを取得した。このデータを用いて、TGCLVL1 ミューオントリガーのパフォーマンスを LVL1 トリガー効率、LVL1 トリガーレートの点から示す。

4.1.1 TGCLVL1 ミューオントリガーとは

LVL1 で発行されたトリガーのうち、ミューオンスペクトロメータで発行されるものが LVL1 ミューオントリガーである。LVL1 ミューオントリガーとして以下のトリガーメニューが用意されている。

- L1_mu0
- L1_mu6
- L1_mu10
- L1_mu11
- L1_mu15
- L1_mu20

TGC では、後述する Coincidence Window に従って、上記いずれかのトリガーが発行される。各トリガーメニューに示されている数字は概算したミュー粒子の p_T を表しており、例えば L1_mu6 が発行されたイベントは、 p_T が $6[\text{GeV}/c]$ 以上ミュー粒子がミューオンスペクトロメータを通過したと LVL1 で認識されたことを意味する。これらのトリガーは high- p_T イベントに対して発行されるが、L1_mu0 は異なる。L1_mu0 は high- p_T だけでなく、low- p_T イベントに対しても発行される。また L1_mu0 が発行されたイベントのうち、high- p_T イベントは L1_mu4 というトリガー名で使い分けている。

上記のトリガーの名称は 3 段階のトリガーを通過し、残ったイベントに対して付けられる。LVL1 で処理が行われている段階では、この名称ではなくトリガー 1 つひとつに対して与えられている bit 列の名称を用いる。各々表 4.1 のような関係になっている。

トリガー名称	L1_mu0	L1_mu6	L1_mu10	L1_mu11	L1_mu15	L1_mu20
bit 名称	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt6

表 4.1: トリガーの名称、bit 列の名称の対応関係

4.1.2 LVL1 トリガー効率

LVL1 トリガー効率の定義は以下の通りである。

$$\text{LVL1 トリガー効率} = \frac{\text{LVL1 トリガーが発行されたミュー粒子の数}}{\text{TGCに入射したミュー粒子の数}} \quad (4.1)$$

トリガー効率を測定するための方法を以下で述べる。

4.1.2.1 tag-and-probe 法

LVL1 トリガー効率を求める為に tag-and-probe 法を用いる。これは、 $J/\psi, Z$ などの崩壊により飛来したミュー粒子を選び出し、トリガー効率を測定する方法である。この手法により、トリガーのバイアスがかからないミュー粒子を用いる事が出来るとともに、ミュー粒子の同定及び運動量測定に対して確実性を高めることができる。以下に $Z \rightarrow \mu + \mu$ 事象を用いた tag-and-probe 法の手順を説明する。

1. m_z 再構成

一つの衝突事象毎に、内部飛跡検出器でいくつかの飛跡が再構成される。また、ミューオンスペクトロメータでも飛跡が再構成されており、内部飛跡検出器での飛跡を起源にして、ミューオンスペクトロメータの飛跡と適合するものを選び出す。このようにしてミュー粒子の飛跡を選び出すアルゴリズムを staco と呼んでおり、staco によって選ばれた飛跡を staco muon と呼んでいる。

一つの衝突事象内に staco muon が 2 つ以上あるイベントを選び出す。その中から畏怖号の電荷を持つ 2 つの staco muon を選び出し不変質量を算出する。図 4.1 は実データを用いて求めた Z の不変質量である。算出した不変質量 m_x が、 $m_Z - 10[\text{GeV}/c^2] \leq m_x \leq m_Z + 10[\text{GeV}/c^2]$ であればその 1 組は Z の崩壊から発生したミュー粒子であるとみなす。

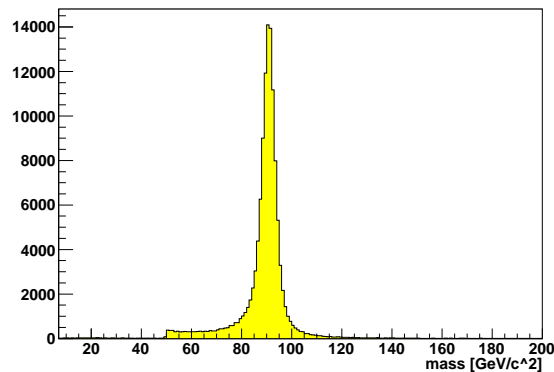


図 4.1: $Z\text{Mass}[\text{GeV}/c^2]$

2. tag muon

2 つのうち任意の片方の staco muon を選び出す。この staco muon の向いている方向を、 η_μ 、 ϕ_μ と表す。また、このイベント内において LVL1 ミューオントリガーが発行されている RoI

の場所を η_{RoI} 、 ϕ_{RoI} と表す。これら4つの値 (η_μ 、 ϕ_μ 、 η_{RoI} 、 ϕ_{RoI}) を用い、staco muon と RoI の距離 ΔR を以下のように定義する。

$$\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2} \quad (\text{where } \Delta\eta = \eta_\mu - \eta_{RoI}, \Delta\phi = \phi_\mu - \phi_{RoI})$$

$\Delta R \leq 0.2$ を満たした場合、このミュオン粒子を tagged muon と呼び、以下のプロセスに移る。

3. probe muon

$\Delta R \geq 0.2$ の場合、この処理はパスされる。不変質量を組んだ1組の staco muon のうち、もう片方を probe muon と呼ぶ。内部飛跡検出器で再構成された probe muon の飛跡が TGC の方向 ($1.05 \leq |\eta| \leq 2.42$) を向いていれば分母に加える。さらにこの probe muon に対して tag muon と同様の ΔR を計算し $\Delta R \leq 0.2$ を満たした場合、分子に加える。

以上のようにしてデータ中から muon を選び出し TGCLVL1 トリガー効率を算出する。

4.1.2.2 トリガー効率

図 4.2 は L1_mu20 のトリガー効率を p_T の関数で表した図である。

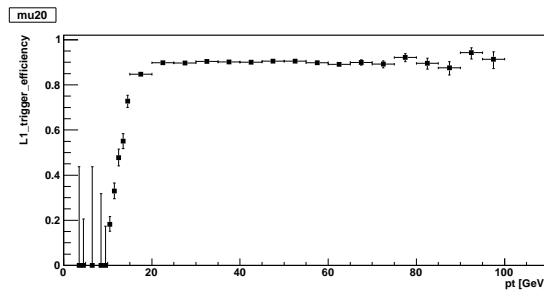


図 4.2: L1_mu20 トリガー効率

p_T が 20[GeV/c] 付近から緩やかに立ち上がり、高い p_T の部分では平ら (plateau) になっている。この平らな部分のトリガー効率の平均をとったものを plateau efficiency と呼んでいる。この図では、plateau efficiency = 90.15 ± 0.11 [%] である。理想的には、L1_mu20 のトリガー効率を p_T の関数として図示した場合、 $p_T=20$ [GeV/c] を境とした階段関数になる。しかし検出器の分解能、TGC の Alignment などの影響で図 4.2 のように緩やかなカーブを描く分布になる。

表 4.2 に各トリガーの plateau efficiency を示す。L1_mu10 は TGC では使われていないため省略する。

トリガー	L1_mu0	L1_mu6	L1_mu11	L1_mu15	L1_mu20
plateau efficiency[%]	95.69 ± 0.08	91.50 ± 0.10	91.10 ± 0.10	90.65 ± 0.11	90.15 ± 0.11

表 4.2: plateau efficiency

4.1.3 トリガーレート

2011 年の run では、Peak Luminosity = $3 \times 10^{33} [s^{-1}cm^{-2}]$ に達した。来年度の run ではこの 2.7 倍、Peak Luminosity = $6.8 \times 10^{33} [s^{-1}cm^{-2}]$ に到達する見込みである。さらに、来年度は重心系エネルギー 8[TeV] での運転が決定しており、その影響によりトリガーレートも増大する。そのため LVL1 トリガーレートも現在よりおよそ 2.7 倍になることが予想される。以下に L1_mu11, L1_mu15, L1_mu20 の今年度のレート、来年度の予想レートを示す。

Peak Luminosity [$s^{-1}cm^{-2}$]	L1_mu11 [kHz]	L1_mu15 [kHz]	L1_mu20 [kHz]
3×10^{33} (2011)	8.2	4.4	3.2
6.8×10^{33} (2012)	22.1	11.9	8.6

表 4.3: トリガーレート

LVL1 を通過するまでにトリガーレートは、75~100[kHz] まで落とされる。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 4.3 にあるように、現状のままでは来年度は L1_mu11 トリガーは想定されている値を超えてしまう。来年度は、L1_mu15 トリガーが primary トリガーとして用いられるが、それでも余裕のないトリガーレートで run を行わなければならない。

4.2 現状の課題

上で述べたトリガーレートの問題だけでなく、Cross-talk、TGC Alignment が TGCLVL1 ミューオントリガーにおいて問題になっている。この Cross-talk、TGC Alignment の問題について述べる。

4.2.1 Cross-talk

図 4.3、はミュオン粒子が TGC を通過する様子を模式的に表した図である。緑の丸が荷電粒子、緑矢印が飛跡を表している。また、縦に並べた長方形が TGC のチャンネルを表し、青で塗りつぶされたチャンネルが信号を出している事を示している。左側は荷電粒子が通過したチャンネルのみが信号を出す例を表している。一方右側は、荷電粒子が通過したチャンネルのみでなくその近傍のチャンネルも信号を出していることを表している。これは、荷電粒子が通過したチャンネルが、近傍のチャンネルにも電荷を誘発し、複数のチャンネルが信号を出してしまうためである。この現象が Cross-talk である。複数のチャンネルが信号を出した場合、複数チャンネルのうち、端から 2 番目のチャンネルを荷電粒子が通過したチャンネルとして採用するよう TGC のロジックが組まれている。そのため、荷電粒子が通過していないはずのチャンネルを採用し後述する Coincidence Window で誤ったトリガーが発行されてしまいトリガー効率を悪化させた。これを回避するため、Coincidence Window に後述する処置を施した。第 5 章で詳細を述べる。

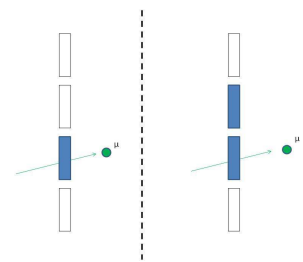


図 4.3: Cross-talk

4.2.2 TGC Alignment

シミュレーションにおいて TGC は計画通りの場所に設定されているが、実際の検出器ではずれが生じている。Coincidence Window はシミュレーションから作成するため、ずれを考慮せずに作成した Coincidence Window を実際の検出器に組み込むと、トリガー効率を p_T の関数で見た場合に立ちあがり鈍る原因になる。図 4.4(a),(b),(c),(d) は TGC のチェンバーが R 方向、 ϕ 方向にどの程度ずれているかをチャンネル単位に変換、チャンネル何個分ずれているかを表した図である。(a) は Aside、R 方向のズレを示した図、(b) は Cside、R 方向のズレ、(c) は Aside、 ϕ 方向のズレ、(d) は Cside、 ϕ 方向のズレを表している。この値を元に Coincidence Window に変更を加える。第 5.5.3 章で詳細を述べる。

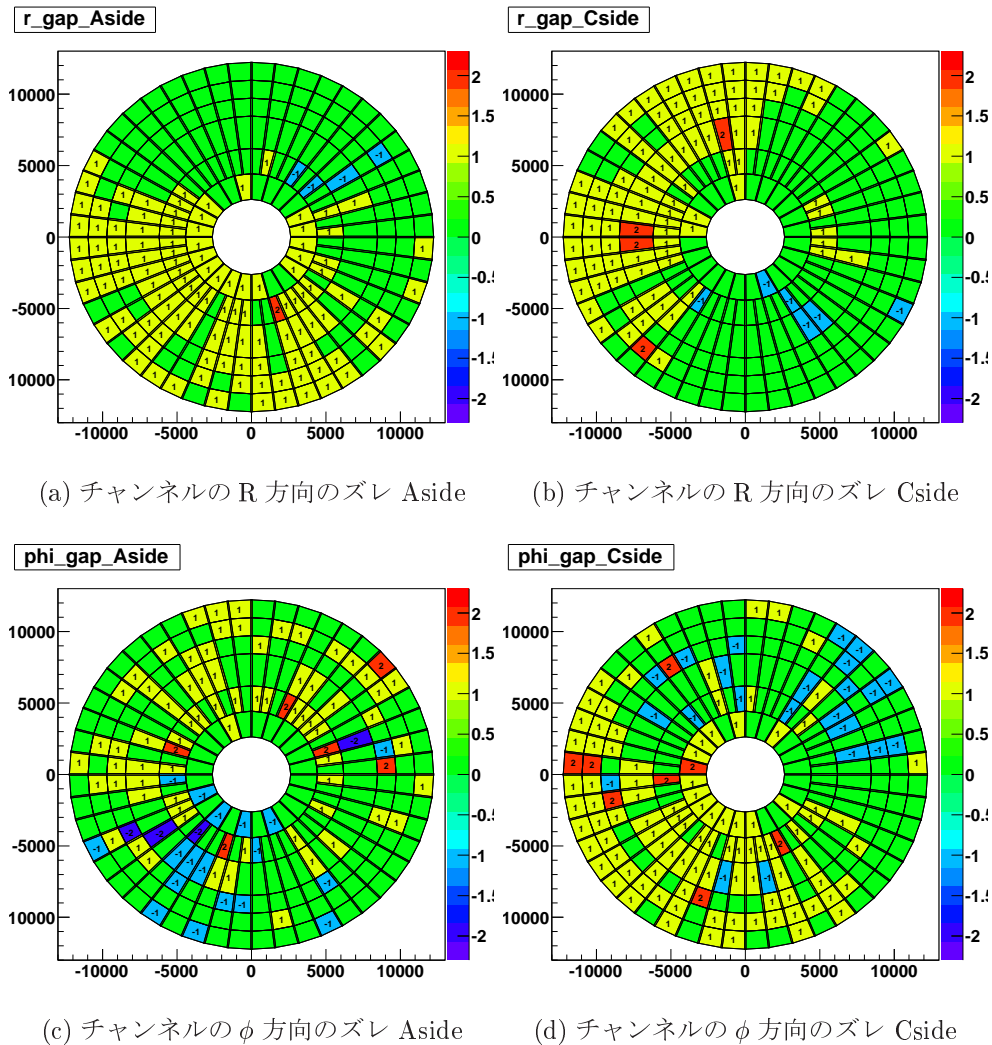


図 4.4: チャンネルのズレに変換した TGC の Alignment

第5章 Coincidence Window の作成と性能評価、改良

5.1 Coincidence Window について

Coincidence Window は SL に実装され、HPT から送信されてくるトラックのヒット位置、及び曲がり具合 (ΔR , $\Delta\phi$) を用いて p_T を判定するために用いられる。

LVL1 トリガーシステムでは、トリガー判定を短時間且つバンチ間隔内に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の影響を考慮しなければならない、複雑になり LVL1 の処理時間に収まらない。そこで、 p_T 判定には Look-up Table(LUT) 方式が用いられている。LUT とは入力信号の取りうる全てのパターンについて予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。

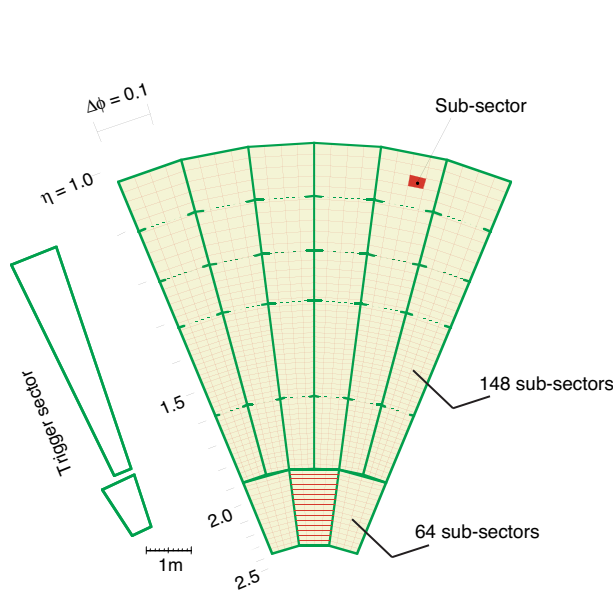


図 5.1: TGC Octant

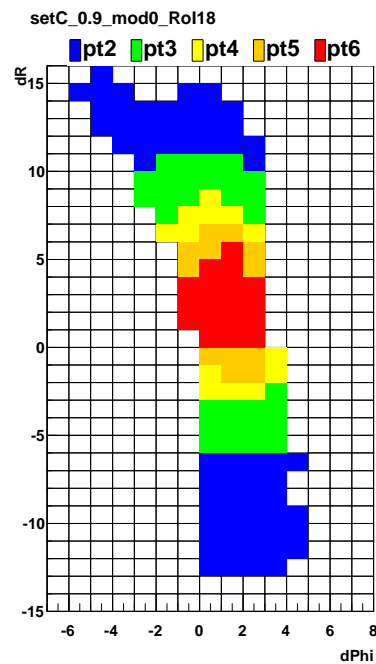


図 5.2: Coincidence Window 例

Coincidence Window は各 RoI 毎に用意される。RoI の数はトリガーセクター1つ当たり Endcap 領域では 148 個、Forward 領域では 64 個ある。ATLAS 検出器のトロイド磁場は 8 つのコイルによって作られているため、磁場は Octant 対称になっている。1 つの Octant は Endcap 領域ではトリガーセクター 6 個分、Forward 領域では 3 個分に相当する (図 5.1)。つまり計 1080 の RoI につ

いて固有の Coincidence Window を用意する必要がある。

ΔR と $\Delta\phi$ の範囲は HPT でコインシデンスが取れた場合 (high- p_T) はそれぞれ-15~+15 と-7~+7、コインシデンスが取れなかった場合 (low- p_T) は-7~+7 と-3~+3 となる。

図 5.2 は Coincidence Window の ΔR 、 $\Delta\phi$ と p_T の対応を図示したものである。各 p_T に対し、図に示す様に色を振り分けている。

5.2 作成方法

磁場や構造物など様々な要素が関わるため、複雑で多様な Coincidence Window を数式によって計算・作成することは困難である。よって、ビーム衝突点から飛来するミュオン粒子に対する検出器、及びトリガーロジックのシミュレーションを行い、各 RoI における p_T と ΔR 、 $\Delta\phi$ の対応を調べることで Coincidence Window を作成する。

以下、Coincidence Window 作成方法について述べる。

1.HitMap の作成

電荷、 p_T 毎にミュオン粒子イベントを生成し、検出器の応答をシミュレートする。6 段階の閾値に対応する各 p_T 、各 RoI 毎に ΔR 、 $\Delta\phi$ を抜き出し、 $\Delta R - \Delta\phi$ の分布図 (HitMap) を作成する (図 5.3)。

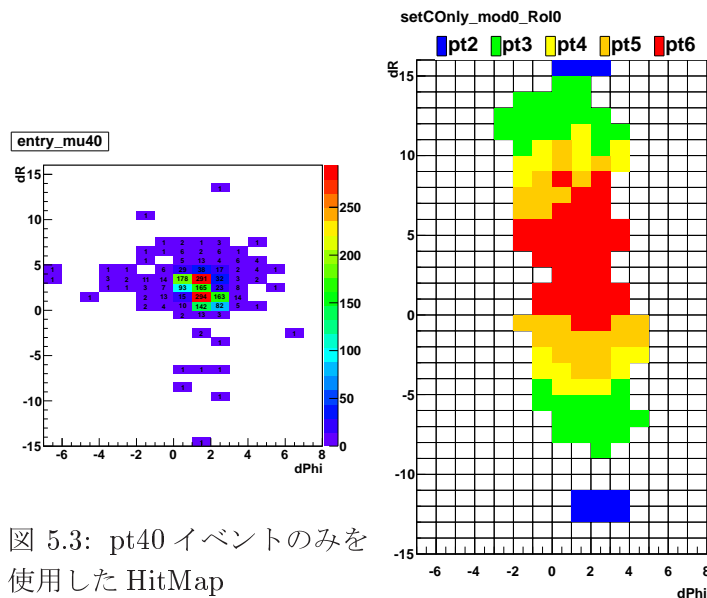


図 5.3: pt40 イベントのみを使用した HitMap

図 5.4: 単一の p_T のみで作成した Coincidence Window

図 5.3 は、 $p_T = 40[\text{GeV}/c]$ のミュオン粒子イベントをシミュレーションし作成した HitMap である。以下 HitMap の ΔR 、 $\Delta\phi$ で区切られた 1 マスをセルと呼ぶ。単一の p_T で HitMap を作成すると、図 5.4 のように、しきい値の異なるウィンドウに隙間ができてしまう。しかし、実際に飛んでくるミュオン粒子の 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。そこで、作成するしきい値よりひとつ上のしきい値を持つ p_T イベントを半分混ぜ合わせて、HitMap を作成する。図 5.5

はひとつ上のしきい値を半分混ぜて作成した HitMap で、図 5.6 はその HitMap を用いて作成した Coincidence Window である。図 5.4 と比較して隙間が埋まっていることがわかる。

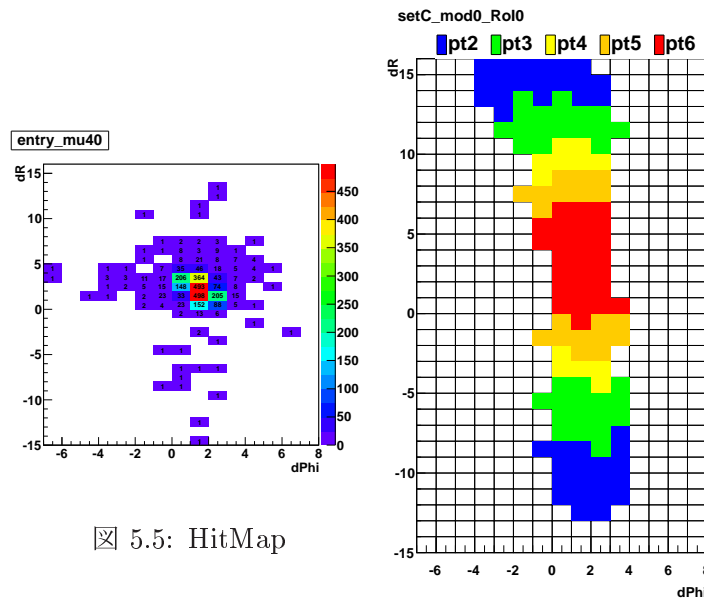


図 5.5: HitMap

図 5.6: Coincidence Window

window を開ける

作成された HitMap を元に、エントリーの大きいセルから順次ウィンドウを開け、その際、開けたセルに含まれるイベント数を足してゆく。HitMap 全体に含まれるイベント数に一定の割合を掛け、その値を上限として設定、上限に達したらウィンドウを開ける処理を止める。この割合を変えることでトリガー効率を操作することができる。以下、一定の割合を 95% に設定する。[1] また、ウィンドウを開ける際、異なる p_T で同じセルが開けられた場合、高い方の p_T を優先する。これを逆に設定すると、高い p_T イベントを低い p_T イベントとしてトリガーしてしまい、高い p_T イベントを取りこぼしてしまう。そのため高い p_T を優先する。

統計による揺らぎの処理

図 5.7 は上記のプロセスで作成した Coincidence Window である。統計的な揺らぎにより、孤立して開いたウィンドウ ($\Delta R: -8, \Delta\phi: 4$) や、周囲のウィンドウが開いている中、開かずに残ってしまったウィンドウ ($\Delta R: -13, \Delta\phi: 0$) が発生する。 p_T の連続性から、前者は閉じるべきウィンドウであり、後者は開くべきウィンドウである。そのため以下の処理をセルのエントリー数に関係なく施す。

- 開いたセルに於いて、周囲に開いたセルが 3 つ以上ないセルは閉じる。
- 開いていないセルに於いて、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しきい値で開く。¹

¹Coincidence window 側面に関しては、隣の列(行)が Coincidence window 外側に存在すると仮定した。例えば $\Delta R=15$ の行について見ている時、 $\Delta R=14$ の行が $\Delta R=16$ として存在していると仮定した。

以上の処理を施した Coincidence Window が図 5.8 である。統計による揺らぎを排除することにより、低い p_T イベントに高いしきい値のトリガーを発行してしまう、もしくは高い p_T に低いしきい値のトリガーを発行してしまうなどの影響を防ぐ事ができる。

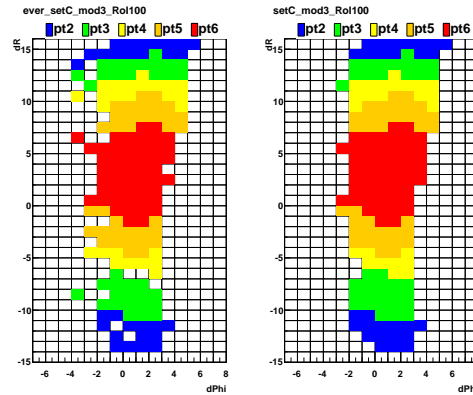


図 5.7: 処理前

図 5.8: 処理後

5.3 Coincidence window の変更

以上のようにして作成された Coincidence Window は、setC と名付けられている。その後 Coincidence Window に対していくつかの変更が加えられている。その変更についてまとめる。

- setC (トリガーマニュー;L1_mu0,L1_mu6,L1_mu10,L1_mu15,L1_mu20,L1_mu40)
上記の方法で作成された Coincidence Window
- setD (トリガーマニュー;L1_mu0,L1_mu6,L1_mu10,NONE,L1_mu15,L1_mu20)
setC の L1_mu20,L1_mu40 を結合し L1_mu20 として pt6 に移動する。さらに L1_mu15 を pt5 に移動し pt4 は使用しない。
- setF (トリガーマニュー;L1_mu0,L1_mu6,L1_mu10,NONE,L1_mu15,L1_mu20)
第 4 章で述べた Cross-talk の影響を考慮し、 $\Delta\phi$ の + 方向にセル 2 つ分、- 方向にセル 2 つ分広げる。
- setH (トリガーマニュー;L1_mu0,L1_mu6,NONE,L1_mu11,L1_mu15,L1_mu20)
L1_mu10 を L1_mu11 として pt4 に移動し、pt3 は使用しない。
- setI (トリガーマニュー;L1_mu4',L1_mu6,NONE,L1_mu11,L1_mu15,L1_mu20)
L1_mu0 に於いて、一部の領域では Low- p_T Coincidence が発行されないように L1_mu0 を L1_mu4' に変更。現在の run で使用されている Coincidence Window。
- setJ (トリガーマニュー;NONE,L1_mu0,L1_mu6,L1_mu11,L1_mu15,L1_mu20)
Heavy Ion run 用に L1_mu6p を t3 に、さらに L1_mu0 を pt2 に移し、pt1 は使用しない。

5.4 Cross-talk を考慮した Coincidence Window

以前のシミュレーションには Cross-talk の影響が考慮されていなかった。そのため、setC、setD では、ミュオン粒子が通過していないチャンネルを採用、Coincidence Window で参照しトリガーを発行していたため、トリガー効率を悪化させた。これを防ぐため、setD を $\Delta\phi$ 正、負の方向

にそれぞれ 2 マス広げる操作を行った。図 5.9、図 5.10 はそれぞれ $\Delta\phi$ 方向に 2 マス広げる前の Coincidence Window、2 マス広げた後の Coincidence Window である。

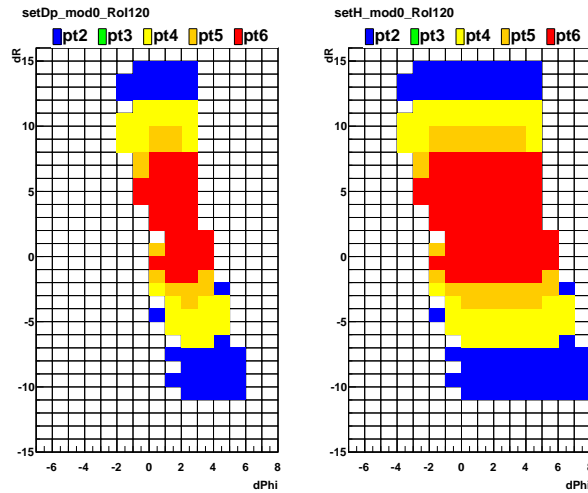


図 5.9: 広げる前

図 5.10: 広げた後

この操作によりトリガー効率は回復した。

現在のシミュレーションでは Cross-talk を再現出来るようになっている。そのため図 5.10 のように $\Delta\phi$ 方向に 2 マス広げずに正しいトリガーを発行できる Coincidence Window を作成することが可能である。

5.4.1 Cross-talk の再現方法

現在のシミュレーションでは Cross-talk が再現可能であるため新たに Coincidence Window を作成し直した。それに当たっていくつか作成方法に変更を加えた。

Cross-talk のシミュレーションでの再現方法と、Coincidence Window の作成方法変更点について述べる。

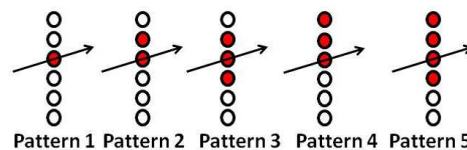


図 5.11: Cross-talk パターン

第 4.2.1 章で述べたように、Cross-talk とは荷電粒子が通過した TGC のチャンネルが近傍のチャンネルに電荷を誘発する現象である。そこで、TGC の複数のチャンネルが信号を出すパターンを想定し、実データからそのパターンが出現する確率を計算する。その値をシミュレーションに組み込む事で Cross-talk を再現する。図 5.11 はチャンネルが複数信号を出すパターンを図示したものである。黒丸が TGC のチャンネルを表し、赤丸がチャンネルが信号を出している事を表している。黒矢印は荷電粒子の飛跡を表している。

図 5.12 は、データを元に計算した、TGC のチェンバー毎のストリップ、及びワイヤーにおける Cross-talk 出現確率を表しており、左から M1,M2,M3 の確率である。横軸はレイヤー、縦軸はチェンバーを表しており、縦軸は上から下に行くにつれ、 $|\eta|$ が大きくなっていく。

$|\eta|$ が大きくなると Cross-talk の出現確率が高くなっている。これは $|\eta|$ が大きい所のチェンバーはストリップ、ワイヤーの間隔が狭くなり、隣のチャンネルに電荷を誘発しやすいためである。

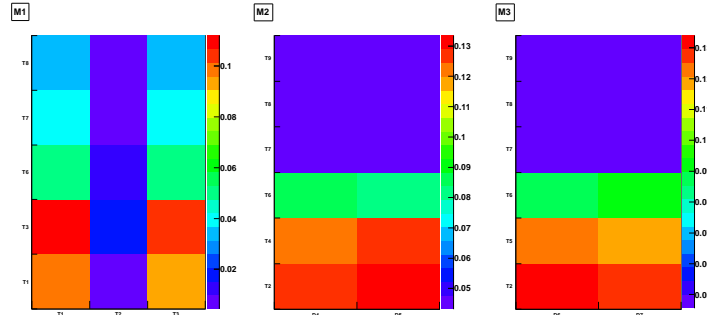


図 5.12: Chamber 毎の Cross-talk 出現確率

5.4.2 Coincidence Window の拡大

本章で冒頭に述べたように Cross-talk による影響を補うため、Coincidence Window を $\Delta\phi$ 正、負方向に 2 マス広げた。その影響を述べる。

図 5.13 は L1_mu20 のトリガー効率を p_T の関数で表している。赤は Coincidence Window を広げる前 (setD)、黒は広げた後 (setF) である。表 5.1 は各々の plateau efficiency である。およそ 7% トリガー効率が向上している。

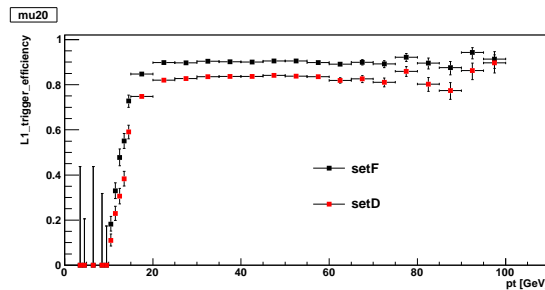


図 5.13: トリガー効率比較

	広げる前	広げた後
plateau efficiency[%]	83.52 ± 0.14	90.15 ± 0.11

表 5.1: plateau efficiency 比較

問題点

Coincidence Window を広げたことでトリガー効率は回復した。しかしその一方で、低い p_T イベントを高い p_T としてトリガーしてしまい、高い p_T のトリガーレートを急激に押し上げた。表 5.2 は Coincidence Window を広げる前と後でも L1_mu20 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。

トリガーレートが 2 倍以上に膨れ上がっている。第 4 章でも触れたように、ルミノシティが上昇すると、トリガーレートも同様に上昇してしまうため、来年度の run ではこの影響が致命的になる。

	広げる前	広げた後
トリガーレート ¹	0.0035	0.0084

表 5.2: トリガーレート比較

5.4.3 新しい Coincidence Window 作成

Cross-talk を再現できるシミュレーションを用い、新たな Coincidence Window を 5 パターン作成した。以下に名称と、簡単な概要を示す。

詳しい概要については次章で順次述べる。

- setTight
Cross-talk を考慮しないシミュレーションを用い、作成した Coincidence Window
- setFat
setTight を $\Delta\phi$ 正、負の方向に 2 つ広げた Coincidence Window
- setCrossTalk95
Cross-talk を考慮したシミュレーションを用い、作成した Coincidence Window の総エントリーの 95% を上限としてウィンドウを開いた Coincidence Window
- setCrossTalk98
Cross-talk を考慮したシミュレーションを用い、作成した Coincidence Window の総エントリーの 98% を上限としてウィンドウを開いた Coincidence Window
- setCrosstalk95+98
Endcap 側で、setCrosstalk98、Forward 側で、setCrosstalk95 を採用した Coincidence Window

setTight、setFat については各々、setD、setI に対応するため、次章では setCrossTalk95、setCrosstalk98、setCrosstalk95+98 の詳細について述べる。

5.4.4 Coincidence Window の比較

第 4.2.1 章で述べた方法を用い、シミュレーションで Cross-talk を再現した。setTight は Cross-talk を再現しないシミュレーションを用いて作成した Coincidence Window であり、setCrossTalk95 は Cross-talk を再現したシミュレーションを用い、従来の方法で作成した Coincidence Window である。

¹ = $\frac{\text{L1_mu20 のトリガーカウント}}{\text{積算ルミノシティ}}$

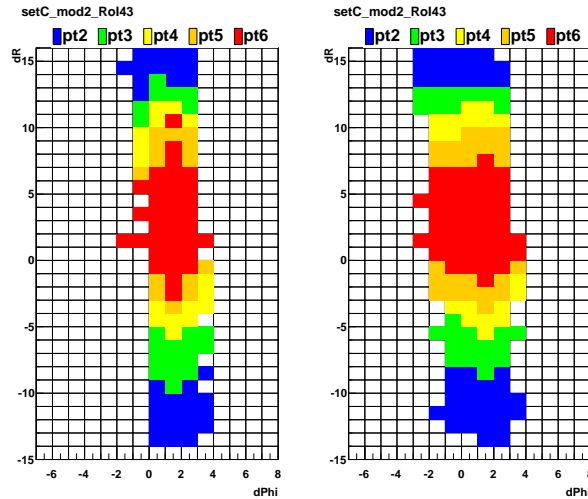


図 5.14: Cross-talk なし 図 5.15: Cross-talk あり

図 5.14 は setTight、図 5.15 は setCrossTalk95 である。 $\Delta\phi$ が負の方向のみに広がっており、正の方向にはあまり広がっていない。これは TGC のロジックによる影響であり、Cross-talk によって複数のチャンネルから信号が出た場合は $\Delta\phi$ が小さい方から優先して採用していることを示している。

図 5.16 は横軸に $|\eta|$ 、縦軸に Coincidence Window の pt6 のウィンドウの数をカウントした値である。赤が setFat、黄が setCrossTalk95、青が setTight である。図 5.12 で、 $|\eta|$ が小さい所では Cross-talk の出現確率が小さかったため、図 5.16 の $|\eta|$ が小さい所では setCrossTalk95 の pt6 のカウント数が setTight のものとほぼ同様の値を示している。

Coincidence Window の大きさは、トリガー効率、トリガーレートに影響を与える。そのため setCrossTalk95 の大きさと setTight の大きさにあまり差がない事で、トリガー効率が大きく減少してしまう可能性がある。そのため、第 5.2 章で述べた、HitMap の総エントリーに掛ける割合を 95% から 98% に変更し、新たな Coincidence Window を作成した。これが setCrossTalk98 である。図 5.16 の緑は 98% に変更した Coincidence Window のカウント数である。

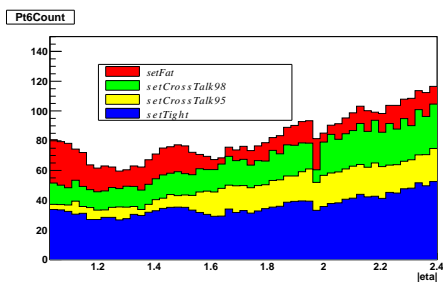


図 5.16: Pt6 window 数

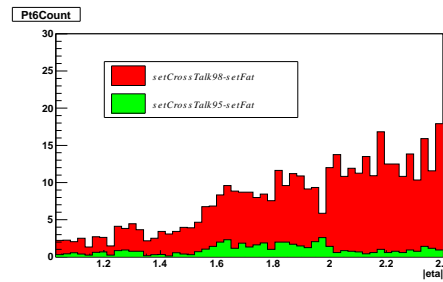


図 5.17: 新しい Coincidence Window において setFat にない Pt6 window 数

図 5.17 は新たに作成した Coincidence Window に存在し、setFat に存在しない pt6 のウィンドウの数をカウントした図である。横軸は、図 5.16 と同じく $|\eta|$ である。赤が setCrossTalk98、青が setCrossTalk95 を表している。また図 5.18、図 5.19 は各々 $|\eta|$ が大きい所にある setFat、

setCrossTalk98 の Coincidence Window である。

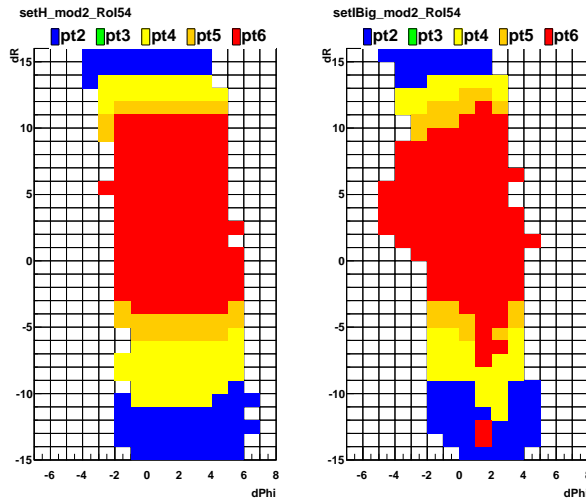


図 5.18: setFat

図 5.19: setCrossTalk98

setCrossTalk98 では $|\eta|$ が大きい所で、setFat よりも広がりが大きくなってしまっており、トリガーレートを増加させる原因になる。これを回避するため、Endcap 側には setCrossTalk98 を、Forward 側には setCrossTalk95 を採用した Coincidence Window が setCrossTalk95+98 である。

5.5 Coincidence Window 性能評価

5 パターンの Coincidence Window について性能を評価、比較し来年度の run に使用する Coincidence Window を決定する。実データを用い、トリガー効率、トリガーレートの 2 点を比較し性能を評価する。来年度は L1_mu15 トリガーが primary トリガーとして運転を行うため、トリガー効率、トリガーレートの評価には pt5 トリガーについて考える。

5.5.1 トリガー効率

第 4.1.2.1 章で述べた tag-and-probe 法を用いてトリガー効率を計算した。図 5.20 は L1_mu15 のトリガー効率を p_T の関数として図示したものである。表 5.3 は図 5.20 の各 Coincidence Window における plateau efficiency を表しており、最下段は setFat の plateau efficiency との差を表している。

Coincidence Window	setFat	setCrossTalk98	setCrossTalk98+95
plateau efficiency[%]	90.65 ± 0.11	90.41 ± 0.11	90.1 ± 0.11
setFat との差 [%]	± 0	-0.24	-0.55
	setCrossTalk95	setTight	
	89.07 ± 0.11	84.26 ± 0.13	
	-1.58	-6.39	

表 5.3: setFat との plateau efficiency 比較

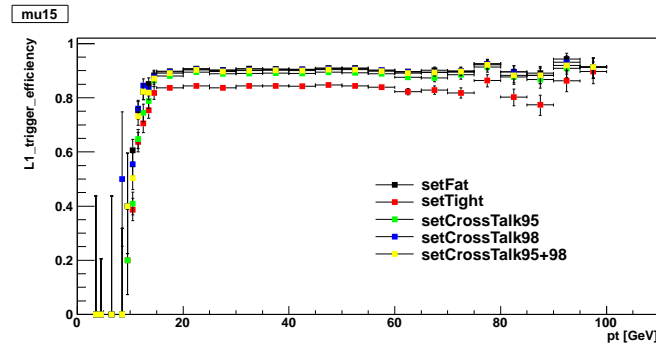
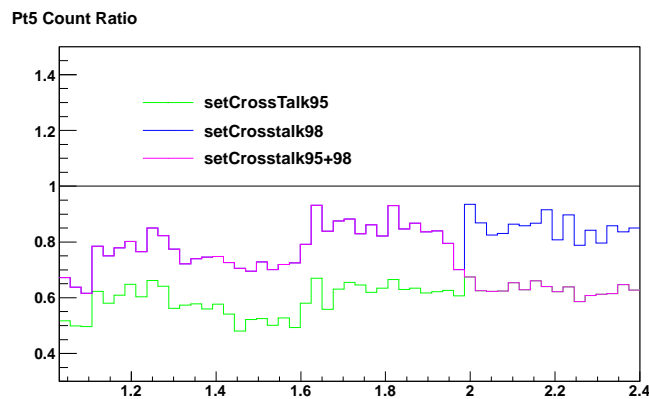


図 5.20: トリガー効率

5.5.2 トリガーレート

新しく作成された Coincidence Window を使用した実データは存在せず、それらのトリガーレートを確認することができない。そのため、実データから LVL1 ミューオントリガーの $RoI, \Delta R, \Delta \phi$ 情報を抜き取り、5 パターンの Coincidence Window が各々のトリガーを発行するかをそれぞれカウントする。これにより、現在のトリガーレートからどの程度減らすことができるかがわかる。

図 5.21 は横軸に $|\eta|$ 、縦軸に各々の Coincidence Window のトリガーカウントを setFat と比較した場合の割合を示した図である。黒が setFat、緑が setCrossTalk95、青が setCrossTalk98、ピンクが setCrossTalk95+98 を表している。

図 5.21: $|\eta|$ 毎のトリガーレート

$|\eta|$ が大きい Forward 領域では setCrosstalk98 のトリガーカウントが現行の setFat と比較してあまり変化がない。そのためルミノシティが 2011 年の 2.7 倍になる来年の run において (表 4.3) トリガーレートのひっ迫が予想される。

表 5.4 は図 5.21 各 $|\eta|$ における値を Endcap、Forward、Total(Endcap+Forward) 毎に平均を取った値、その値を元に算出した 2012 年度 run で予想されるトリガーレートを示した表である。

Coincidence Window	setFat	setCrossTalk98	setCrossTalk98+95
トリガーレート Endcap 領域 (Pt5,setFat との割合)	100%	77.99%	77.99%
トリガーレート Forward 領域 (Pt5,setFat との割合)	100%	85.26%	63.04%
トリガーレート (Pt5,setFat との割合)	100%	81.63%	70.52%
トリガーレート (2012 年度 run 予想)	11.9[kHz]	9.7[kHz]	8.4[kHz]

setCrossTalk95	setTight
58.71%	56.13%
63.04%	51.83%
60.88%	54.51%
7.3[kHz]	6.5[kHz]

表 5.4: トリガーカウント比較

5.5.3 TGC の Alignment による影響

今までの setFat は $\Delta\phi$ 正、負の方向に 2 マス広げていたため、TGC のずれによる影響を補っていた。しかし、setCrossTalk95+98 は図 5.16 からわかるように、setFat よりも Coincidence Window の面積が小さい。そのため図 4.4 の値に従い、Coincidence Window をずらす必要がある。図 5.22 はずらす前の Coincidence Window、図 5.23 は図 4.4 の値に従いずらした Coincidence Window である。図 5.23 は dR 方向に +1、 $d\phi$ 方向に +1 ずらしていることがわかる。

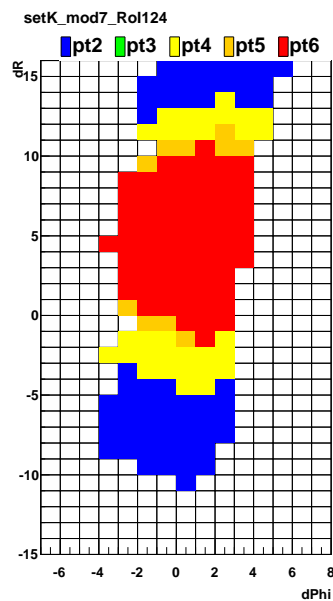


図 5.22: ずらす前

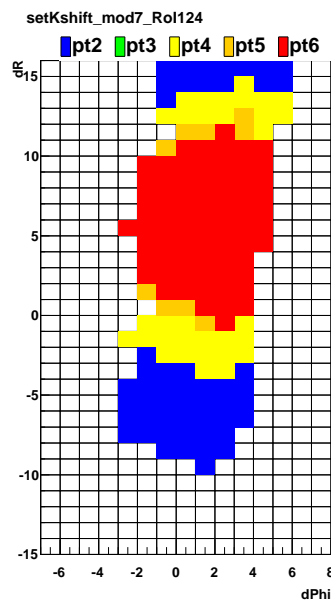


図 5.23: ずらす後

第6章 まとめ

2011年度のrunにおいて、トリガーレートの増大が問題となっていた。LVL1で想定されているトリガーレートの値に近い値まで迫っており、ルミノシティが2011年度のおよそ2.7倍になる2012年度のrunにおいては、この問題が深刻化する。そもそのこの問題は、TGCで起こるCross-talk現象によるトリガー効率の減少を防ぐため、Coincidence Windowを $\Delta\phi$ 正、負方向に2マス広げたために起こった問題である。これは当時のシミュレーションではCross-talkが再現できなかつたためであり、シミュレーションから作成するCoincidence Windowにはその現象の効果を反映することができなかった。そのため、実データを用い、パターン化したCross-talkの出現確率を計算、シミュレーションで再現可能にした。これによりCross-talk現象を反映したCoincidence Windowの作成が可能になった。ルミノシティが2011年度のrunに比べおよそ2倍に増える2012年度のrunに備え、最適なCoincidence Windowを選ぶためCross-talk現象を反映したものではないものを含め、5パターンのCoincidence Windowを用意し、各々のCoincidence Windowを用いた時のトリガー効率、トリガーレートを比較した。表6.1は、各Coincidence WindowL1_mu15におけるトリガー効率、トリガーレートをsetFatと比較した値、2012年度runで予測されるトリガーレートの値である。また、図6.1は横軸にトリガー効率、縦軸にトリガーレートをsetFatと比較した時の割合を取った時の各Coincidence Windowの位置関係を示した図である。

Coincidence Window	setFat	setCrossTalk98	setCrossTalk98+95
トリガー効率 [%]	90.65 ± 0.11	90.41 ± 0.11	90.10 ± 0.11
トリガー効率 (setFat 差)	±0	-0.24	-0.55
トリガーレート (setFat 比)	100%	81.63%	70.52%
トリガーレート (2012年度 run 予測)	11.9[kHz]	9.7[kHz]	8.4[kHz]

setCrossTalk95	setTight
89.07 ± 0.11	84.26 ± 0.13
-1.58	-6.39
60.88%	54.51%
7.3[kHz]	6.5[kHz]

表 6.1: トリガー効率、トリガーレート比較

新たな Coincidence Window に求められる要求は、

- トリガー効率維持
- トリガーレート減少

である。これらの要求から最善の Coincidence Window は、

- トリガー効率の減少が一番少ない
- 2012年度runで予測されるトリガーレートがLVL1 ミューオントリガーの要請を満たしている

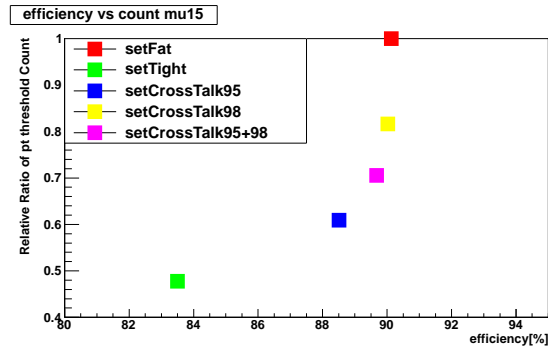


図 6.1: トリガー効率対トリガーレート

という理由から、setCrossTalk98 である。しかし、図 5.21 より setCrossTalk98 は Forward 領域においてトリガーレートが現行の Coincidence Window とほぼ変わらない事がわかった。これは、ルミノシティがおおよそ 2011 年度の 2.7 倍に増える 2012 年度の run において、Forward 領域でトリガーレートをひっ迫する恐れがある事を示している。そのためトリガー効率は setCrossTalk98 より減少してしまうが、setCrossTalk98+95 が最適であるという結論に至った。2012 年度は setCrossTalk98+95 にする事で 2011 年度と比較し、L1_mu15 トリガーにおいて、トリガー効率がおよそ 0.55[%] 減少するが、トリガーレートは 70.52[%] にまで減少する。これにより 2012 年度は、2011 年度と比較しより多くのデータを効率よく蓄積することができ、3000 人の共同研究者に貢献することができる。

今後は、2012 年度のデータを解析し、新たな Coincidence Window の評価を行う必要がある。また、Coincidence Window が 2011 年時と比較して狭くなったため、TGC の Alignment による効果を適用し実データで評価する必要がある。

謝辞

ATLAS 実験の基礎指導、困難に直面した時の適切な指導、またスイス・ジュネーブという不慣れな場で研究を行うための指導など私が大学院で研究を行う上でほぼ全ての事に於いて指導して頂いた藏重 久弥教授に心より感謝いたします。また、山崎 祐司准教授には、普段の研究生活はもちろん、私の CERN 研究所への初出張の際、現地での生活の方法から、研究活動まで様々な面で多大なお世話になり、深く感謝致します。越智 敦彦助教授には普段の研究において様々な助言を頂きました。深く感謝いたします。松下 崇助教授には、私の CERN 研究所における研究活動で多大なお世話になりました。2年間研究を行ううえで常に適切な助言を頂き、心より感謝いたします。さらに素粒子物理国際研究センター特任研究員織田 勸様には、私の研究活動において多大なお世話になりました。深く感謝いたします。博士後期課程3年、早川 俊様、同課程2年 Matthew King 様には研究活動において、また CERN 研究所における生活面においても様々な助言をしていただきました。心より深く感謝いたします。博士前期課程2年岸本 巴様には、同じ学年として様々な手助けをして頂き、心より感謝します。また、博士前期課程2年谷 和俊様には研究活動の先輩として多くの助言を頂きました。深く感謝いたします。神戸大学粒子物理学研究室秘書横山 有美様には、普段の研究活動における諸手続き、出張における手続き等をこなしていただきました。心より感謝申し上げます。その他にも、粒子物理学研究室の方々一同、ATLAS Japan グループの皆さま、知人、友人の皆さま、そして何より家族に対し、この場をかりて感謝の意を表したいと思います。2年間の大学院生活を支えて頂きありがとうございました。

参考文献

- [1] 掘 卓也著 神戸大学修士論文「アトラス実験レベル1 ミューオントリガーのシミュレーションによる性能評価」
- [2] 岡田 勝吾著 神戸大学修士論文「ATLAS 実験における質量が縮退した超対称性粒子の発見可能性に関する研究」
- [3] The CDF,D0 Collaborations, the Tevatron New Phenomena, Higgs Working Group,"Combined CDF and D0 Upper Limits on Standard Model Higgs Boson Production with up to $8.6 fb^{-1}$ of Data"
- [4] The ATLAS Collaboration,"The ATLAS Experiment at the CERN Large Hsdron Collider"
- [5] The ATLAS Collaboration,"The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider"

目 次

1.1	標準模型を構成する基本粒子	1
2.1	LHC 加速器	3
2.2	LHC 2011 年までの結果	3
2.3	LHC に設置されている検出器	4
2.4	Tevatron での Higgs 粒子探索の結果	5
2.5	Higgs 粒子の生成過程。(a) グルーオン融合、(b) ウィークボゾン融合、(c)t/b 随伴生成、(d)W/Z 随伴生成	5
2.6	Higgs 粒子の生成断面積	5
2.7	Higgs 粒子の崩壊分岐比	7
2.8	ATLAS 検出器	8
2.9	各粒子の透過性	8
2.10	内部飛跡検出器	9
2.11	カロリメータ	10
2.12	ミュー粒子検出器	11
2.13	磁石の構造	12
2.14	エンドキャップトロイドの中央 ($z=1050[\text{cm}]$) における X-Y 平面の磁力線	12
2.15	積分磁場強度の η 分布	12
3.1	トリガーシステムの流れ	13
3.2	TGC の配置と構造	15
3.3	TGC の断面図	15
3.4	triplet(左) と doublet(右) の構造	16
3.5	R-Z 平面での TGC の配置	16
3.6	TGC の全体図とトリガーセクター	17
3.7	TGC エレクトロニクスの概要	18
3.8	トリガー系のデータフロー概略図	18
3.9	リードアウト系のデータフロー概略図	19
3.10	p_T 概算方法の模式図	21
3.11	各層におけるコインシデンスの概要	22
3.12	$\Delta R, \Delta\phi$ 分布	22
4.1	$ZMass[GeV/c^2]$	25
4.2	L1_mu20 トリガー効率	26
4.3	Cross-talk	27
4.4	チャンネルのズレに変換した TGC の Alignment	28
5.1	TGC Octant	29

5.2	Coincidence Window 例	29
5.3	pt40 イベントのみを使用した HitMap	30
5.4	単一の p_T のみで作成した Coincidence Window	30
5.5	HitMap	31
5.6	Coincidence Window	31
5.7	処理前	32
5.8	処理後	32
5.9	広げる前	33
5.10	広げた後	33
5.11	Cross-talk パターン	33
5.12	Chamber 毎の Cross-talk 出現確率	34
5.13	トリガー効率比較	34
5.14	Cross-talk なし	36
5.15	Cross-talk あり	36
5.16	Pt6 window 数	36
5.17	新しい Coincidence Window において setFat にない Pt6 window 数	36
5.18	setFat	37
5.19	setCrossTalk98	37
5.20	トリガー効率	38
5.21	$ \eta $ 毎のトリガーレート	38
5.22	ずらす前	39
5.23	ずらす後	39
6.1	トリガー効率対トリガーレート	41

表 目 次

2.1	現在の運転における主要パラメータ	3
4.1	トリガーの名称、bit 列の名称の対応関係	24
4.2	plateau efficiency	26
4.3	トリガーレート	27
5.1	plateau efficiency 比較	34
5.2	トリガーレート比較	35
5.3	setFat との plateau efficiency 比較	37
5.4	トリガーカウント比較	39
6.1	トリガー効率、トリガーレート比較	40