

修士学位論文
ATLAS実験におけるシミュレーションを用いた
エンドキャプトリガーの性能評価

神戸大学大学院 自然科学研究科
博士課程前期課程
物理学専攻
高エネルギー物理学研究室

049S105N

大町千尋

指導教官

蔵重久弥

平成 18 年 3 月 9 日

概要

2007年稼働開始予定の大型陽子陽子衝突型加速器 LHC(Large Hadron Colider) が CERN(欧州原子核研究機構) で建設されている。ATLAS 実験はこの LHC 加速器を用い、Higgs の探索、超対称性粒子の探索等 TeV 領域での物理の研究を目的としている。LHC は陽子陽子衝突反応であり、目的とする物理事象の他に多量のバックグラウンドが生成される。その中から解析対象となるものを効果的に選別する為に、きれいに信号を取り出す事の出来るミュオンを用いたトリガーシステムが LVL1 トリガーに組み込まれている。

ミュオンを検出する為に ATLAS 検出器のエンドキャップ部には TGC(Thin Gap Chamber) が設置されており、検出されたミュオンの情報はミュオントリガーシステムへと送られる。ミュオントリガーシステム内での最終的なトリガー処理を行う SectorLogic 回路では Coincidence Window と呼ばれる Look Up Table を参照してトリガー処理を行っている。

本研究の目的は Coincidence Window の作成とそれを用いたエンドキャップトリガーの性能評価である。まず、ATLAS 検出器を再現したフルシミュレーションによりデータを作成し、それらを用いた Window の作成ロジックを開発した。シミュレーションデータをもとに、高い efficiency を維持しつつバックグラウンドに強い window を作成した。また作成した window の efficiency や、その window を用いた場合のトリガーレート、バックグラウンド efficiency などの評価し、ミュオントリガーに要請される性能を満たしていることを確認した。

目次

第 1 章	Introduction	6
第 2 章	ATLAS 実験	7
2.1	LHC 計画	7
2.2	LHC で期待される物理	8
2.2.1	Higgs 粒子の探索	8
2.3	ATLAS 測定器	11
2.3.1	ATLAS 検出器の概要	11
2.3.2	マグネット	12
2.3.3	内部飛跡検出器	12
2.3.4	カロリメータ	13
2.3.5	ミュオンシステム	13
第 3 章	ミュオントリガーシステム	16
3.1	トリガーシステム	16
3.1.1	トリガースキーム	16
3.2	TGC	18
3.2.1	前後方ミュオントリガーシステム用 TGC の構成と配置	18
3.2.2	Trigger Sector	20
3.3	TGC エレクトロニクス	21
3.3.1	TGC エレクトロニクス	21
3.3.2	TGC エレクトロニクスの配置	23
3.3.3	データフロー	24
3.3.4	$R - \phi$ Coincidence Logic	26
第 4 章	Coincidence Window	27
4.1	Coincidence Window とは	27
4.2	coincidence window の計算方法	29
4.3	coincidence window の作成手順	30
4.3.1	ヒットマップ	30
4.3.2	ヒットマップ解析	33
4.3.3	Coincidence Window	35
第 5 章	Coincidence Window の性能評価	37
5.1	efficiency curve	37
5.2	統計量依存性	39
5.3	トリガーレートの見積もり	41
5.4	cavern background	42

5.5 Pt/Charge 依存性	44
第 6 章 まとめ	47

目 次

2.1	LHC 加速器	7
2.2	Higgs 粒子の生成断面積	8
2.3	Higgs 生成のファインマンダイアグラム	8
2.4	Higgs 粒子の崩壊分岐比	9
2.5	Higgs 粒子の発見ポテンシャル	10
2.6	ATLAS 検出器の全体図	11
2.7	ATLAS 実験の座標系	11
2.8	トロイダルマグネット	12
2.9	Inner Tracker	12
2.10	カロリメーター	13
2.11	ミュオンシステム	13
2.12	MDT(Monitored Drift Tube)	14
2.13	CSC(Cathode Strip Chamber)	14
2.14	RPC(Resistive Plate Chamber)	15
2.15	TGC(Thin Gap Chamber)	15
3.1	トリガーシステム	16
3.2	LVL1 トリガーシステム	17
3.3	TGC の配置と構造	18
3.4	TGC の構造	18
3.5	TGC の構造 (triplet,doublet)	19
3.6	TGC の配置	19
3.7	TGC の配置 (big wheel)	20
3.8	Big Wheel	20
3.9	Trigger Sector	20
3.10	TGC エレクトロニクス (全体図)	21
3.11	TGC エレクトロニクスの配置図	23
3.12	エレキハット	24
3.13	データフロー	24
3.14	読み出しの流れ	25
3.15	制御システム	25
3.16	Pt 判定に用いる $\delta R\delta\phi$	26
3.17	TGC トリガーのコインシデンスと判定	26
4.1	理想的な磁場 ($B_\phi=0$) における coincidence window の概念図。	28
4.2(a)	ヒットマップ (sector2 subsector7)	30
4.2(b)	ヒットマップ (sector0 subsector55)	31
4.2(c)	ヒットマップ (sector7 subsector74)	31

4.2(d)ヒットマップ (sector7 subsector72)	32
4.3 subsector に入射したミューオンの統計のばらつき	33
4.4(a)ヒットと認識される場合	34
4.4(b)ヒットと認識されない場合	34
4.5 周囲にあるヒット数の分布	34
4.6(a)ヒットマップ (sector2 subsector7)	35
4.6(b)Coincidence Window(sector2 subsector7)	35
4.7(a)ヒットマップ (sector7 subsector72)	36
4.7(b)Coincidence Window(sector7 subsector72)	36
5.1 efficiency curve	37
5.2 efficiency curve の立ち上がり	38
5.3(a)各横方向運動量 (6,20GeV) に対する plateau 部分での efficiency curve の統計依存性	39
5.3(b)efficiency (threshold)	40
5.3(c)efficiency curve の立ち上がり	40
5.4 differential cross section	41
5.5(a)w/wo background による efficiency の変化 (6GeV)	42
5.5(b)w/wo background による efficiency の変化 (8GeV)	42
5.5(c)w/wo background による efficiency の変化 (10GeV)	43
5.6 TGC/RPC におけるオーバーラップ領域 ($\eta > 0$)	44
5.7 ダブルカウントしたミューオンの η, ϕ 分布	45
5.8 TGC/RPC におけるオーバーラップ	46

第1章 Introduction

標準模型は自然界に存在する4種類の力の中で、重力を除いた強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用をまとめた理論であり、実験的に確かめられてきた素粒子相互作用と非常に精度良く一致する。この標準模型が予言する粒子の内、唯一未発見であるものが Higgs 粒子である。Higgs 粒子は電弱相互作用での自発的相互作用の破れを説明する為に必要とされ、素粒子の質量生成を担う。様々な実験で探索が行われてきたが未だ発見されておらず、実験結果から質量の下限値が 120GeV、また理論的に上限値が 1TeV とされており、発見が期待されている。

この Higgs 粒子の探索等を目的とした大型陽子陽子衝突型加速器である LHC(Large Hadron Collider) が 2007 年の稼働開始を目指し、スイスのジュネーブにある CERN(欧州原子核研究機構) に建設されている。LHC は周長 27km のビームトンネル、8.4T の超伝導磁石を用いることで世界最高エネルギーである 14TeV を実現する。またルミノシティーは $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を実現し、Higgs 粒子の探索等の TeV 領域の物理や、標準理論の精密測定等様々な物理の成果が期待されている。

LHC 加速器では 40MHz バンチ衝突、1GHz の陽子陽子衝突による膨大な測定データが生み出される。LHC 加速器の衝突点に設置される ATLAS 検出器はそれらのデータを処理するために、オンラインのトリガーシステムを持つ。ATLAS のトリガーシステムは3段階で構成され、物理的に興味のあるイベントが最終的に 100Hz で保存される。その初段である LVL1 トリガーはその性質上バンチ衝突に同期した高速処理と精密さが要求される。ATLAS 検出器のエンドキャップ部には LHC のバンチ衝突に対応した 25ns 以上の時間分解能を持つ、TGC(Thin Gap Chamber) が設置されており、それらとその読み出しエレクトロニクスにより、LVL1 トリガーを構成する TGC システムとして機能する。

TGC システムは、毎衝突バンチにおいて、一つのトリガーセクター(方向 1/48 又は 1/24 分割)あたり最大2つのミュオン・トラックを見つけ、その横方向運動量 (P_t) と位置情報を LVL1 トリガー CTP(Central Trigger Processor) に送る。この時、最終的なトリガー判断は SectorLogic 回路 (SL) 内で行われる。SL でのトリガー判定の際には P_t と磁場によるミュオンの曲がりに対応付けた Coincidence Window と呼ばれるテーブルが用いられる。Endcap トロイド磁場は不均一であるため、Coincidence Window は単純な計算式では作ることが出来ず、また場所ごとに大きく異なる。そこで、この Coincidence Window は、リアリスティックなシミュレーションによって求められるデータを基に作成する必要がある。

この時、シミュレーションには

- ・ ATLAS 測定器の詳細な形状と磁場分布
- ・ 衝突点から生じるミュオンと測定器内の物質の反応
- ・ Muon Trigger chamber である TGC の応答
- ・ TGC エレクトロニクス・システムでの処理

が含まれていなければならない

本論文の主題は ATLAS 実験のフレームワークである athena を用いたフルシミュレーションデータから Window を作成するアルゴリズムの開発と、その window を用いた物理過程による LVL1 ミュオントリガーの研究である。

第2章では LHC 計画と ATLAS 実験についてまとめ、第3章でミュオントリガーシステムについてまとめる。第4章で Coincidence Window の開発について述べた後、第5章でその性能評価について述べ、第6章をまとめとする。

第2章 ATLAS実験

2.1 LHC計画

スイスのジュネーブにあるCERN(欧州原子核研究機構)では2000年に稼働を停止したLEP(Large Electron Hadron Collider)のビームトンネル内に2007年の稼働開始にむけて大型陽子陽子衝突型加速器であるLHC(Large Hadron Collider)が建設されている。LHC加速器は周長27kmのビームトンネル、多数の8.4T超伝導磁石を用いて14TeVの世界最高エネルギーを実現する。LHCではこの高いエネルギーと $10^{34}cm^{-2}s^{-1}$ のルミノシティを用い、Higgs粒子の発見を始めとする標準模型の検証、Bメソンの崩壊を用いたCPの破れの精密測定、SUSY(超対称性)粒子の探索等のTeV領域の物理の研究等を目的としている。LHCは陽子陽子加速器のため、電子に比べてシンクロトン放射が少なく、高いエネルギーを得ることが出来る。その反面、陽子が内部構造を持つことに起因して非弾性断面積が約100mbと大きく、バックグラウンドが非常に多く発生する。そのため陽子陽子衝突型の加速器ではこの多量のバックグラウンドの中から興味あるイベントのみを選び出す事が実験するにあたって重要となる。

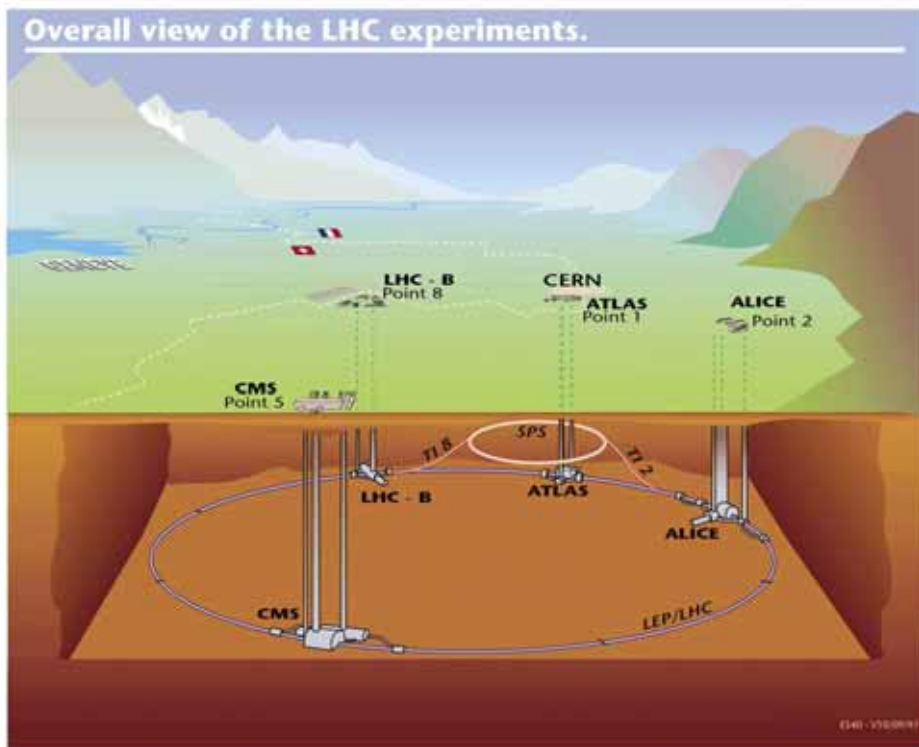


図 2.1: LHC 加速器

LHC 加速器には 4 つの衝突点が存在し、それぞれに検出器が置かれる。

- ATLAS(A Troidal LHC ApparatuS)
- CMS(Compact Muon Solenoid)
- LHC-B
- ALICE(A Large Ion Collider Experiment)

ATLAS、CMS は汎用検出器、LHC-B は B 中間子の研究に特化した検出器、ALICE は重イオン衝突実験の為の検出器である。

2.2 LHC で期待される物理

LHC 計画で期待される物理は Higgs 粒子の発見、SUSY 粒子の探索、top クォークの精密測定、B 中間子による CP 非保存の精密検証等、多岐に渡る。

2.2.1 Higgs 粒子の探索

Higgs 粒子は標準模型において質量生成の起源となる粒子であり、その発見は非常に重要である。現在までに様々な実験で探索が行われ、それらの実験結果から下限値は 100GeV とされている。また理論からは上限値として 1TeV が予言されており、LHC 計画ではこの全領域での探索が可能であるため発見が期待される。

LHC における Higgs 粒子生成過程は主に 4 つ存在し、生成断面積はその質量領域によって 0.1 ~ 10pb とことなる。また、崩壊過程もその質量領域によって大きく異なる為、ATLAS 実験においては様々な Higgs 粒子探索のシナリオが考えられている。

生成過程

標準模型における Higgs 粒子の主な生成過程とその断面積を図 2.2 に示し、主な特徴を説明する。

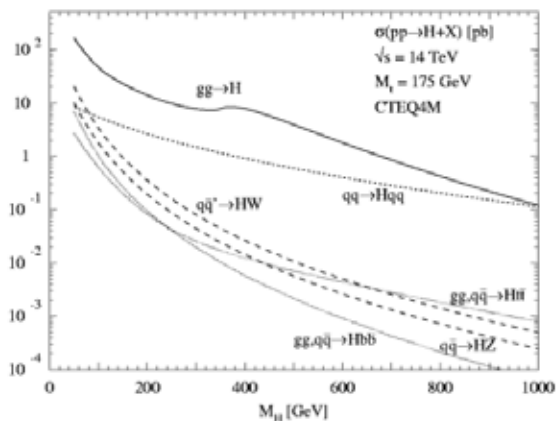


図 2.2: Higgs 粒子の生成断面積

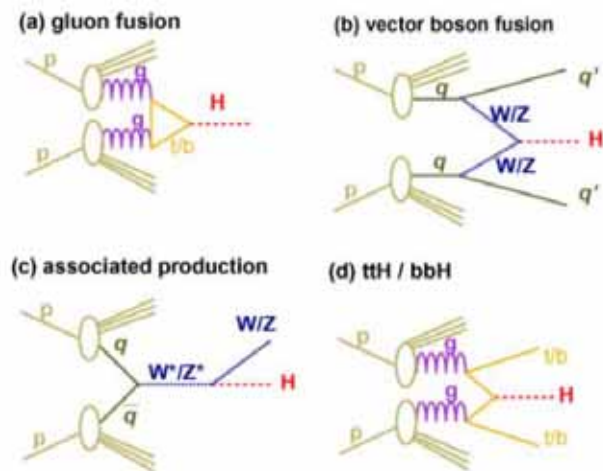


図 2.3: Higgs 生成のファインマンダイアグラム

1) gluon fusion

最大の生成断面積を持つが随伴粒子が存在せず、バックグラウンドからの分離が困難である。但し、崩壊過程が特徴的な $H \rightarrow \gamma\gamma, ZZ(\rightarrow 4l)$ は有望である。

2) vector boson fusion

反跳したジェットが前後方で検出される特徴的な生成過程である。また、これらのジェット間で QCD 過程の影響が少ない。生成断面積が大きく、イベントの選別も比較的用であり、低い Higgs の質量領域で有望である。

3) W/Z associated production

ゲージボゾンから Higgs 粒子が生成される過程である。 $W^\pm \rightarrow ll$ のような特徴的な崩壊ではイベントの選別が容易である。

4) top associated production

随伴する 2 つのトップクォークの特徴的な崩壊により、イベント選別をおこなう。比較的生成断面積が大きいヒッグス質量領域で有効である。また、トップクォークの湯川結合の測定に用いられる。

崩壊過程

ヒッグス粒子はその質量により崩壊過程が異なる。標準模型におけるヒッグス粒子の質量と崩壊分岐比の関係を図 2.4 に示し、質量領域ごとの崩壊過程を説明する。

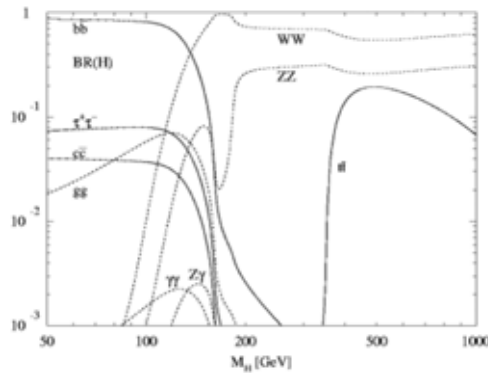


図 2.4: Higgs 粒子の崩壊分岐比

1) $m_H < 150 GeV$

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

この領域での主な崩壊過程は $bb, cc, \tau\tau$ であるが、これらについては陽子陽子素過程によるバックグラウンドの影響が大きく、測定が難しい。それゆえ、分岐比が 10^{-3} と小さいが、 $\gamma\gamma$ への崩壊過程を用いる。この測定には、エネルギー、角度分解能に優れた電磁カロリメーターが要求される。

2) $120 GeV < m_H < 180 GeV (2m_Z)$

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

この質量領域に入ると、 W^\pm, Z の質量を超えるため、 WW^*, ZZ^* の崩壊モードが始まる。この時のバックグラウンドとしては、 $pp \rightarrow ZZ^*/Z\gamma^*, Zbbbar \rightarrow 4lepton$ などがあるが、1 組の l^+l^- 対の横運動量 P_t

に対して制約をつける事により、これらのバックグラウンドを除去することが可能となる。

$$3) 180\text{GeV}(2m_Z) < m_H < 500\text{GeV}$$

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

この崩壊モードは”Gold Plated Channel”と呼ばれ、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{lepton}$ が有効である。終状態に4つのleptonを含むため、2つのZを組むことが出来、最も信頼性が高い。

$$4) 500\text{GeV} < m_H$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-\nu\nu, H \rightarrow WW \rightarrow lj\nu\nu$$

生成断面積が小さく、崩壊幅も100GeVを超える。しかし、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{lepton}$ 及び $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$ 、 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu\nu$ は有効である。

Higgs 粒子の発見能力

ATLAS 測定器における標準模型 Higgs 粒子の発見能力を示す。縦軸は予想される Higgs イベントをバックグラウンドイベントの数の平方根で割ったものである。この値が高い程 Higgs のイベントがあった時にそれがバックグラウンドでは説明できないことを表しており、LHC を高ルミノシティで約1年運転した時(積分ルミノシティで 100fb^{-1}) に10 以上の確からしさで発見できる。

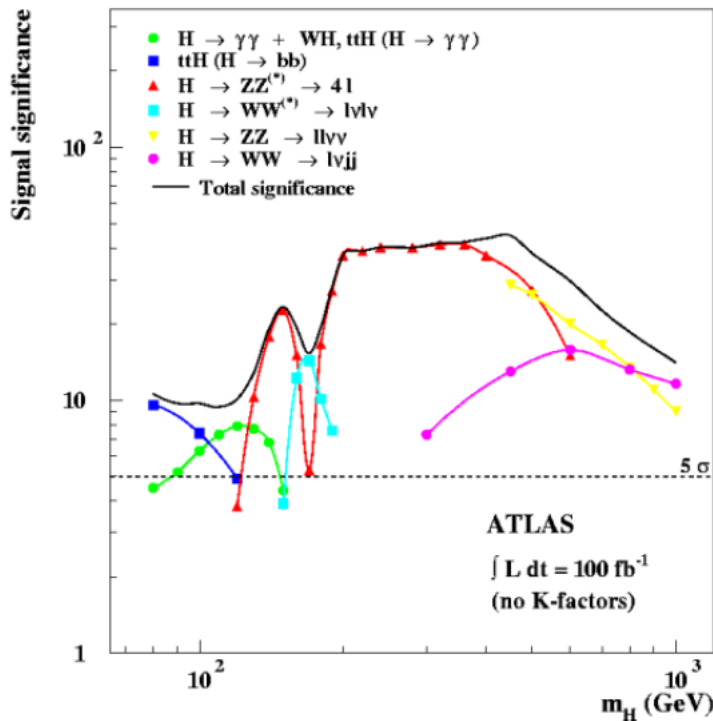


図 2.5: Higgs 粒子の発見ポテンシャル

2.3 ATLAS 測定器

LHC の 4 つのバンチ衝突点の 1 つに設置される全方位型汎用検出器であり、高イベントレート、高ルミノシティー環境下で動作するように設計されている。各検出器により光子、電子、ジェット、ミュオンを識別し、物理現象を再構成する。

2.3.1 ATLAS 検出器の概要

ATLAS 検出器の全体図 (図 2.6) を示す。直径 22m、長さ 44m、総重量 7000t の巨大な検出器であり、マグネット、内部検出器、カロリメーター、ミュオンシステムで構成される。

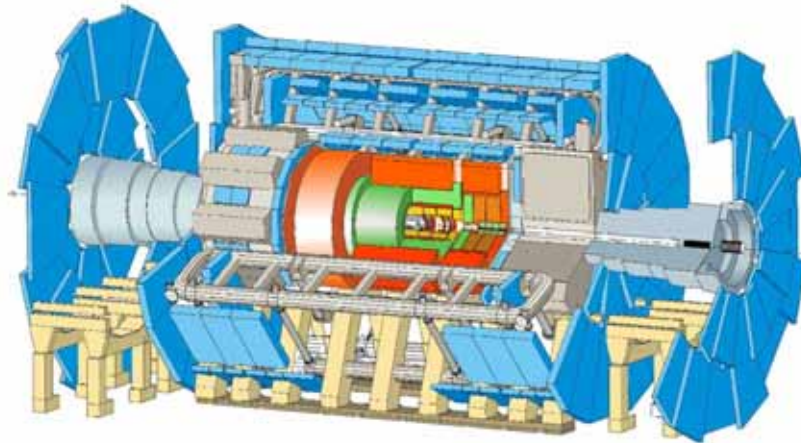


図 2.6: ATLAS 検出器の全体図

ATLAS 検出器における座標軸は、ビーム軸を z 、その垂直方向を r 、ビーム軸周りを ϕ とした円筒座標系を採用する。これを示す。

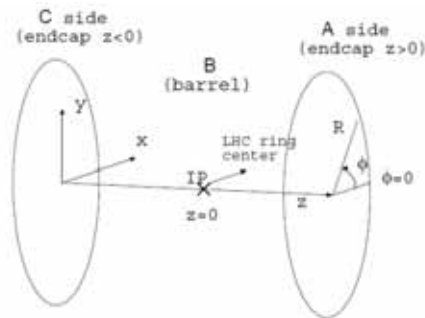


図 2.7: ATLAS 実験の座標系

2.3.2 マグネット

ATLAS 検出器はソレノイド、トロイダルの 2 種類の超伝導磁石が設置され、内部検出器を含むソレノイドは 2T の磁場を作る。ミュオンシステム部に設置されるトロイダルは、オクタント対称な構造を持ち、バレルトロイダルとエンドキャップトロイダルで構成される。トロイダル磁石による積分磁場強度は、バレル部で 2~6Tm、エンドキャップ部で 4~8Tm である。

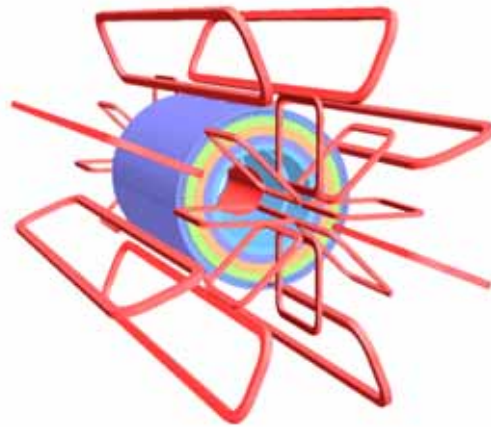


図 2.8: トロイダルマグネット

2.3.3 内部飛跡検出器

荷電粒子のトラッキングを行う内部飛跡検出器は衝突点に最も近い位置から順にピクセル検出器、SCT(SemiConductor Tracker)、TRT(Transition Radiation Tracker) が設置され、2T の磁場によってトラッキングと運動量の測定を行う。ピクセル検出器は $50 \times 400 \mu m$ のエレメントを持つ高精度バーテックス検出器であり、b-tagging などが必要不可欠である。SCT は $80 \mu m$ ピッチの半導体検出器で遷移放射を利用した TRT と共に飛跡測定を行う。内部検出器は $|\eta| < 2.5$ をカバーし、この領域で荷電粒子を識別する。

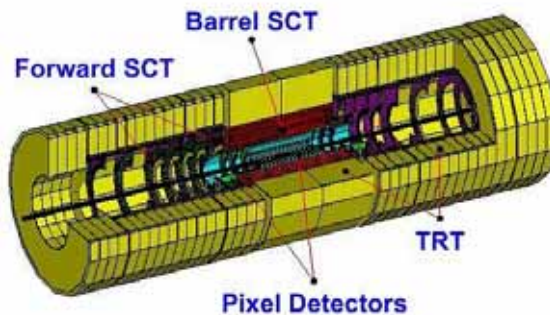


図 2.9: Inner Tracker

2.3.4 カロリメータ

内側に電磁カロリメータ、外側にハドロンカロリメータが設置される。

電磁カロリメータは鉛の吸収体と液体アルゴンで構成され、応答の速いアコーディオン構造の採用が特徴であり、強い放射性耐性、光子、電子に対する高いエネルギー分解能を持つ。

ハドロンカロリメータは、バレル部では鉄の吸収体とシンチレータで構成される。エンドキャップ部は銅の吸収体と液体アルゴン、フォワード部は銅及びタングステンの吸収体と液体アルゴンでそれぞれ構成され、ジェットと消失横方向エネルギーの高精度な測定を行う。

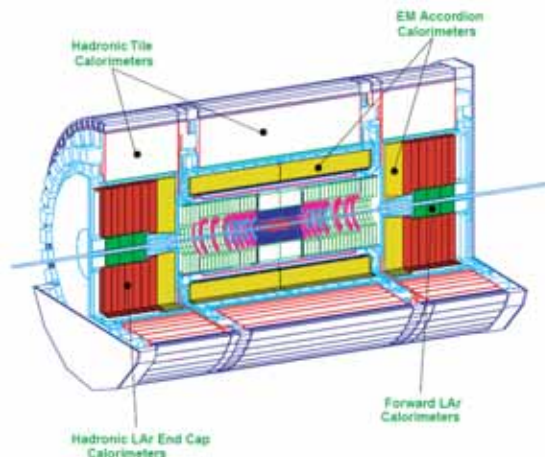


図 2.10: カロリメータ

2.3.5 ミューオンシステム

衝突点で生成したミューオンは他の粒子に比べて透過性が高く、ATLAS 検出器の最外層に設置することでトリガー信号の生成と内部検出器と独立した運動量測定が可能となる。MDT、CSC、RPC、TGCで構成される。

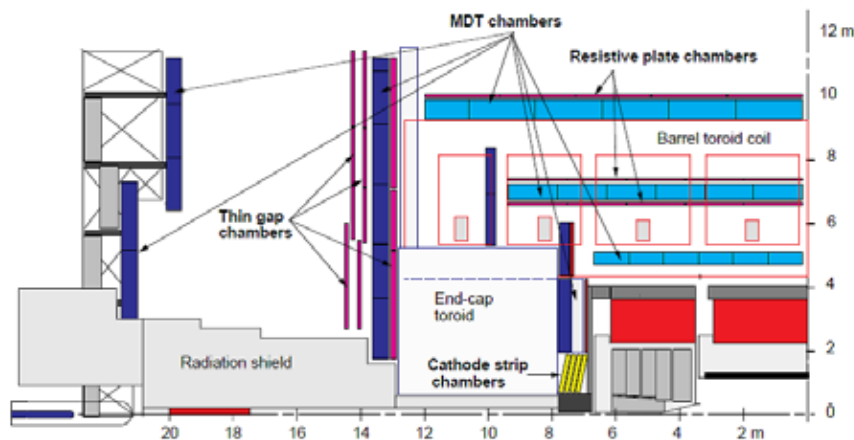


図 2.11: ミューオンシステム

MDT

MDT(Monitored Drift Tube) は直径 30mm の Drift Tube を 6 層又は 8 層依積みにした構造であり $|\eta| < 2$ のバレル・エンドキャップ部分に配置される。ガスの混合比は Ar:CO₂=93:7 であり、3 気圧で用いる。印加電圧は 3070V、位置分解能は 80 μ m である。

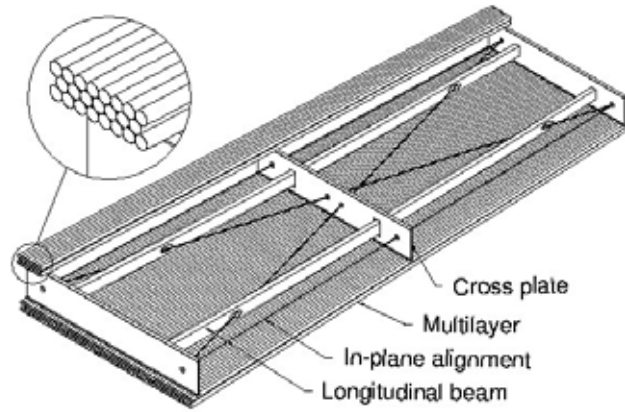


図 2.12: MDT(Monitored Drift Tube)

CSC

Cathode 読み出しの MWPC である CSC(Cathode Strip Chamber) は、中性子感度が 10^{-4} 未満と小さく、 γ 線に対する感度も 1 パーセント 程度のため、最も放射線強度の高い超前方 ($|\eta| > 2$) に設置される。ガスの混合比は Ar:CO₂:CF₄=30:50:20 であり、印加電圧は 2600V、位置分解能は 60 μ m である。

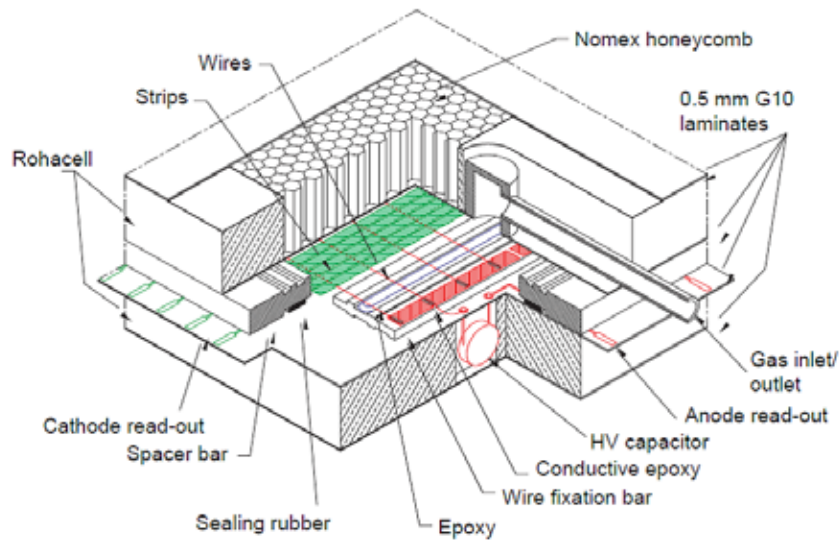


図 2.13: CSC(Cathode Strip Chamber)

RPC

RPC(Resistive Plate Chamber) は Anode にワイヤーを用いないガスチェンバーであり、2枚の並行するベークライト板間に数 kV/mm の電場を印加し、Strip から信号を読み出す。Strip が直行するように配置され、 $|\eta| < 1$ のバレル部をカバーする。ガスの混合比は C2H2F4:C4H10=97:3、印加電圧は 8900V である。

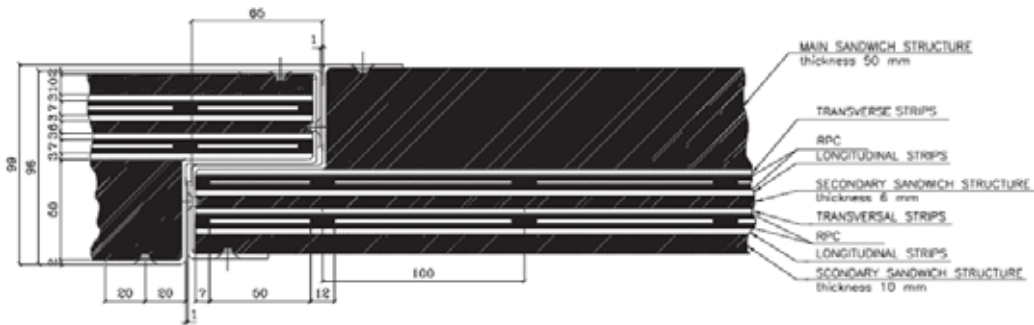


図 2.14: RPC(Resistive Plate Chamber)

TGC

TGC(Thin Gap Chamber) は非常に薄い MWPC であり、Anode Wire と Cathode Strip からシグナルを読み出すことで 2次元位置分解能をもつ。1.05 < $|\eta|$ < 2.4 のエンドキャップ部に設置され、ガスの混合比は CO2:n-Pentane=55:45、印加電圧は 3000V である。

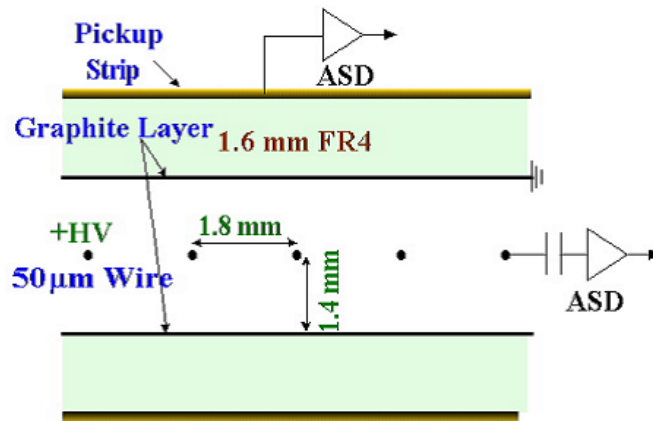


図 2.15: TGC(Thin Gap Chamber)

第3章 ミューオントリガーシステム

3.1 トリガーシステム

LHC 加速器による 40MHz のバンチ交差により ATLAS 検出器の衝突点での陽子陽子衝突率は 1GHz に上る。この膨大なイベントの中から目的とする物理事象のみを収集するトリガーシステムが要求される。ATLAS 実験における最終的なイベントレートは 100Hz であり、このレートを達成するために 3 段階のトリガーシステムが採用されている。

3.1.1 トリガースキーム

ATLAS 実験におけるトリガースキームを図 3.1 に示す。LVL1(レベル1)、LVL2(レベル2)、EF(イベントフィルター)の3段階のトリガーシステムでは各段階で興味あるイベントを選別し、段階的にレートを落とす。

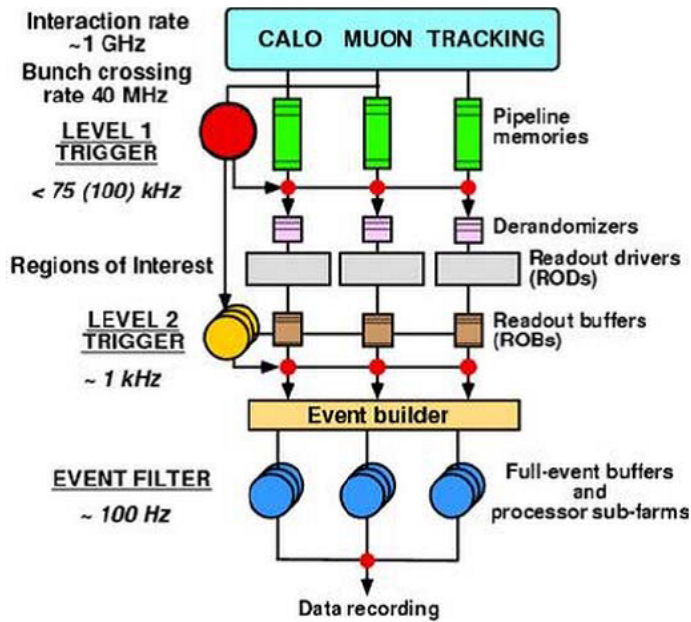


図 3.1: トリガーシステム

LVL1 トリガーシステム

カロリメーターとミュオントリガー検出器の情報を総合し、各バンチに対するトリガー判定を行う。バンチ衝突からこのトリガー信号がフロントエンドに到達するまでの時間が $2.5 \mu\text{s}$ 以内に要請されており、各検出器はこの間データをバッファに蓄えておく。トリガー信号受信後、測定データは各サブシステムの ROD(Read Out Driver) でイベント毎に収集され、ROB(Read Out Buffer) に送られる。LVL1 ではトリガー信号をフロントエンドに送信すると同時に RoI(Region of Interest) と呼ばれるトリガー領域を LVL2 に対して送信する。この RoI により、LVL2 でのデータ処理を大幅に削減することが出来る。LVL1 でのトリガーレートの最大値は 75kHz である。

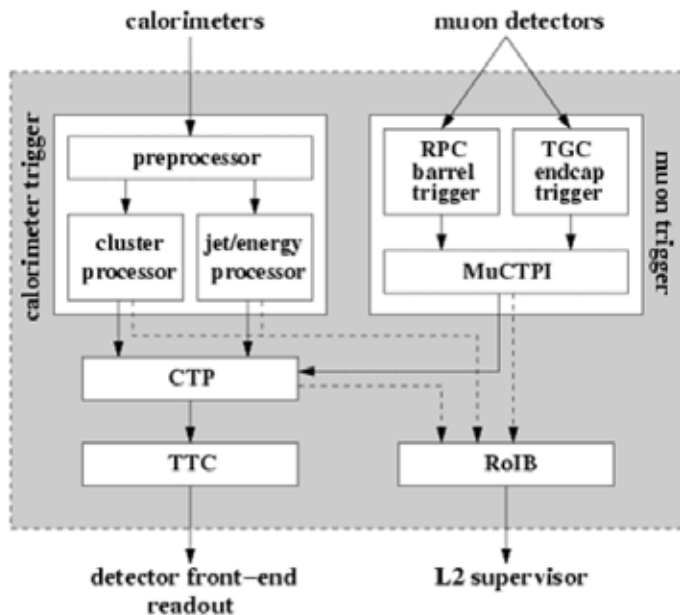


図 3.2: LVL1 トリガーシステム

LVL2 トリガーシステム

カロリメーター、ミュオンシステム、内部検出器の RoI における完全な位置情報を基に、トリガー判定を行う。1 イベントの処理時間は 1msec 以下、イベントレートは 1kHz まで落とされる。

Event Filter

LVL2 アクセプトを受けたデータはイベントビルダーをとり Event Filter に送られる。EF では各検出器の完全な位置情報、トリガー条件を基に最終的な判定がなされる。1 イベントの処理時間は約 1s、イベントレートは 100Hz まで落とされる。

3.2 TGC

3.2.1 前後方ミュオントリガーシステム用 TGC の構成と配置

TGC チェンバーと TGC エレクトロニクスで構成される前後方ミュオントリガーシステムについて説明する。TGC チェンバーは量産が終了し、現在、組み立てとインストールが行われている。TGC エレクトロニクスについては ASIC の量産が終了し、現在、モジュールの量産と組み込みが行われている。

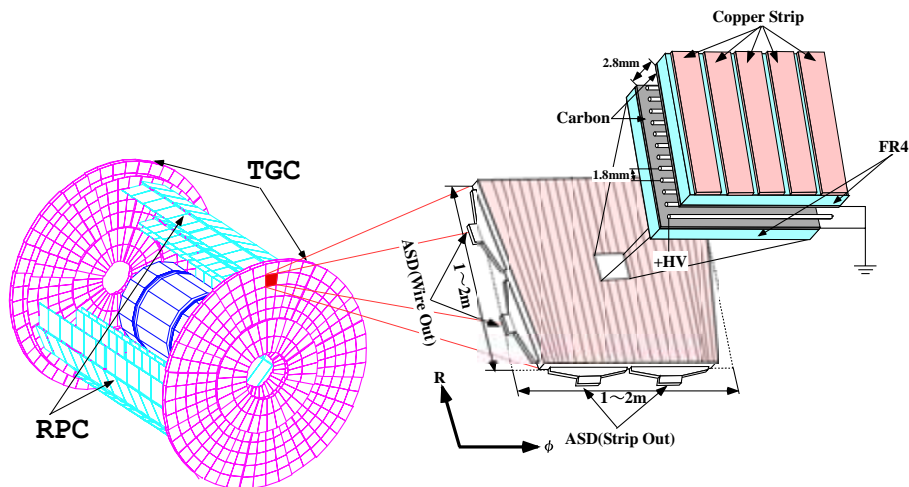


図 3.3: TGC の配置と構造

TGC の構造

エンドキャップのミュオントリガー検出器である TGC(Thin Gap Chamber) は R 方向にワイヤー、方向にストリップを持つ Multi Wire Chamber であり、2 次元読み出しが可能である。ワイヤーには直径 $50 \mu\text{m}$ の金メッキタングステン線が用いられ、wire-wire 間隔は 1.8mm である。Anode-Cathode 間隔は 1.4mm と非常に狭く、 10^6 の高いゲインと 25nsec の時間分解が可能が実現される。読み出しについては、ワイヤーは 4~20 本毎にワイヤーグループとして束ねられ、ストリップはチェンバーを 32 分割するように刻まれており、共に 3~5cm 程度のチャンネルとして読み出される。

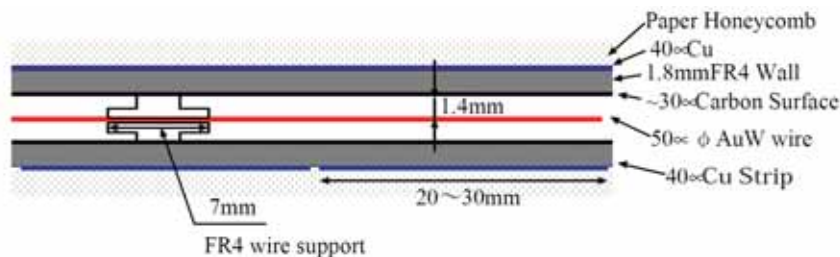


図 3.4: TGC の構造

エンドキャップ部に設置される TGC は紙ハニカムを間に挟んだ 2 層 (ダブルレット) 又は 3 層 (トリプレット) 構造のモジュールを使用する。それぞれの読み出しはトリプレットでワイヤー 3 層とストリップ 2 層、

ダブルレットはワイヤー、ストリップ共に2層である。さらに各層のチャンネルは1/3、又は1/2ずらされており、モジュールでは2倍、3倍の位置分解能を持つ。

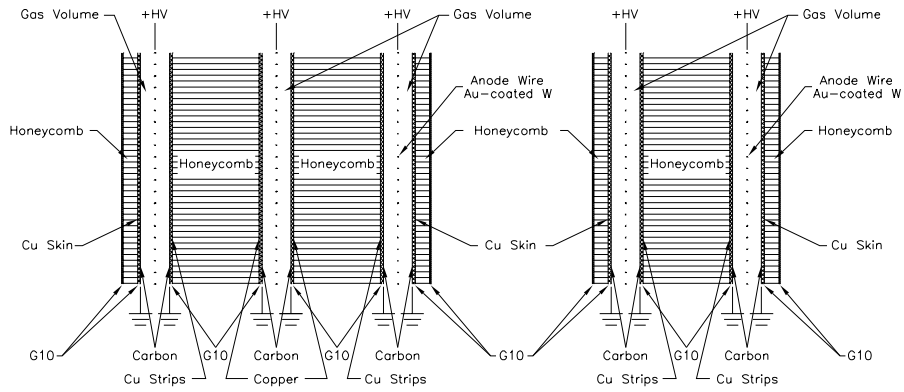


図 3.5: TGC の構造 (triplet, doublet)

TGC の配置

TGC モジュールは衝突点に近いほうから EI(Endcap Inner)/FI(Forward Inner)、M1(Triplet)、M2(Middle Doublet)、M3(Pivot Doublet) の順に設置され、トリガー判定は主に M1、M2、M3 の7層で行われる。EI/FI は場合によってトリガー補助に使われることが考えられている。TGC がカバーする $1.05 < |\eta| < 2.4$ の領域の内、 $|\eta| < 1.92$ をエンドキャップ領域、 $|\eta| > 1.92$ をフォワード領域と呼ぶ。

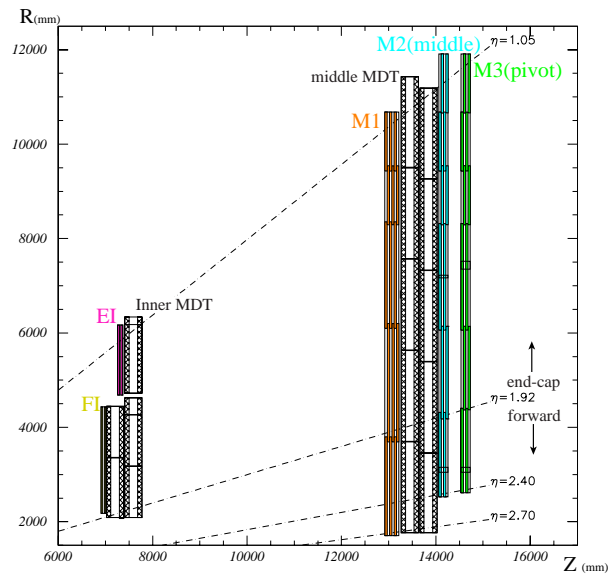


図 3.6: TGC の配置

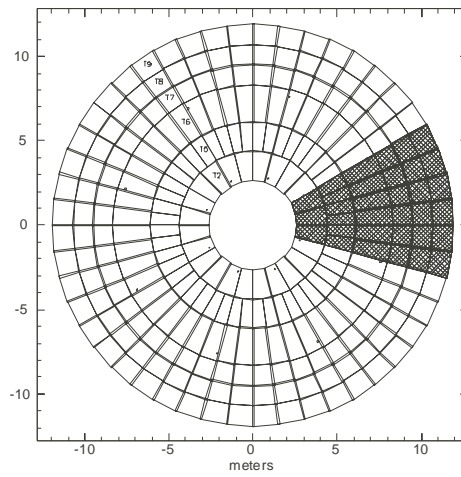


図 3.7: TGC の配置 (big wheel)

TGC は形状の異なるチェンバーを用い、図 3.7 のようにエンドキャップ部を覆うように 3 層設置される。使用するチェンバー数は約 3700 枚、チャンネル数は約 32 万である。

3.2.2 Trigger Sector

各層は 方向にエンドキャップ部を 48 分割、フォワード部を 24 分割したトリガーセクターと呼ばれる領域に分けられる。各セクターはフォワード領域で各層 1 チェンバー、エンドキャップ領域で 4、又は 5 チェンバーで構成されており、セクター単位でトリガー処理が行われる。トリガー領域である Subsector は各セクターをさらに 方向に 4 分割、 方向にエンドキャップ部では 37 分割、フォワード部では 16 分割する。Subsector は 8 ワイヤーグループと 8 ストリップの範囲に相当し、各層の全 Subsector は 8640 になる。

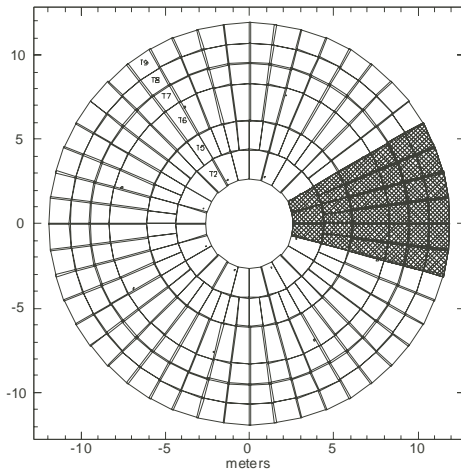


図 3.8: Big Wheel

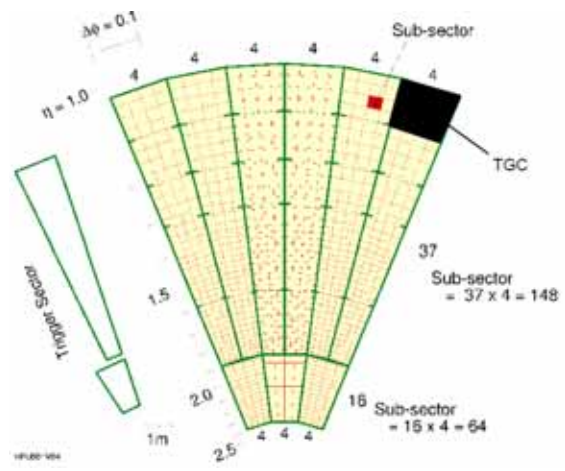


図 3.9: Trigger Sector

3.3 TGC エレクトロニクス

システムの全体図を 3.10 に示す。TGC エレクトロニクスはトリガー、読みだし、制御の 3 つのデータフローを持つ。各モジュールの説明、配置、データフロー等を以下に示す。

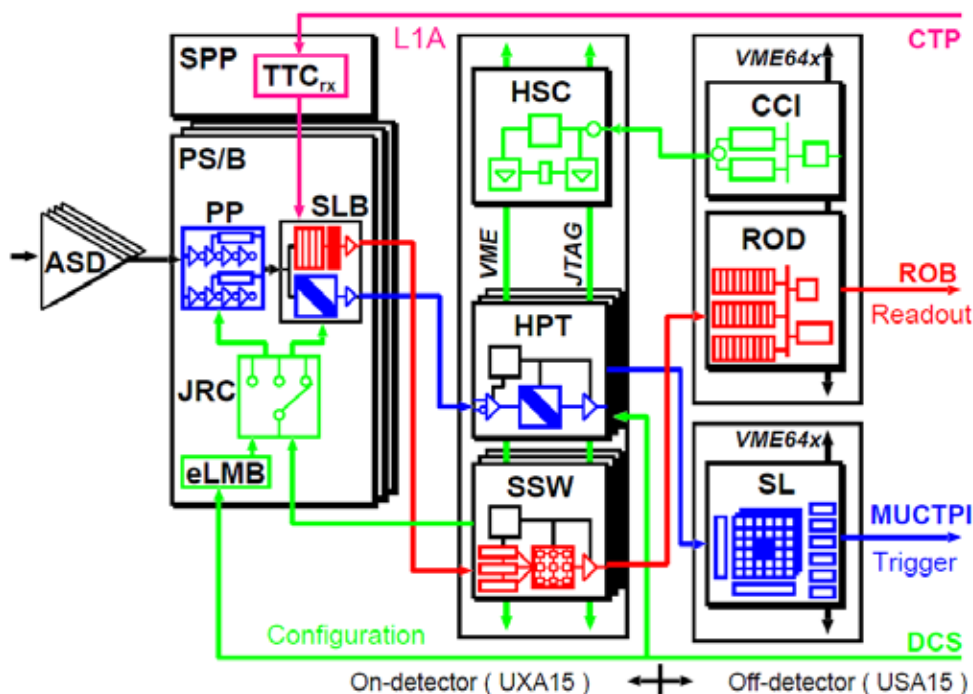


図 3.10: TGC エレクトロニクス (全体図)

3.3.1 TGC エレクトロニクス

ASD

ASD board は TGC 検出器の横に取り付けられ、シグナルを 2 段階で増幅し、整形、ディスクリミネートする。出力は LVDS でノイズに強い。回路の診断、タイミング調整のためのテストパルスを出力する機能を持つ。

PS board

PS board には SlaveBoard ASIC、PatchPanel ASIC、JRC ASIC が載せられており、ボードあたりのチャンネル数は 256 ~ 320 である。PS Board は十数枚がまとめられて PS Pack と呼ばれるケースに収められて設置される。この PS Pack には Service Patch Panel(SPP) が載せられており、クロック、L1A 等のシグナルが PS board に供給される。

Patch Panel ASIC

ASD の信号を LHC クロックに同期させる 32ch ASIC である。TOF(Time Of Flight) やケーブル遅延などによるばらつきは、1ns 以下の制度でタイミング調整することが出来る。また、ゲートも 25ns ~ 50ns で

可変である。PatchPanel ではチャンネル不良等に対処するためのチャンネル毎のマスクや ASD board に向けてのテストパルストリガーを出す機能等ももつ。

Slave Board ASIC

TGC シグナルのコインシデンス処理、読み出し処理を行う ASIC である。Wire、Strip、Doublet、Triplet によって 5 種類のコインシデンスマトリックス (Wire Doublet、Strip Doublet、Wire Triplet、Strip Triplet、EI/FI) を切り替えて使用する。コインシデンスには Triplet、Doublet にそれぞれ、 $2/3$ (Strip は $1/2$)、 $3/4$ の条件が課される。入力の遅延やチャンネル部のマスク、より厳しいコインシデンス条件等を設定することが出来る。さらに入力部にテストパルスパターンを設定し、テストパルスを通す機能を持つ。リードアウト部では、各イベントが L1A のレイテンシーの深さに設定されたパイプラインバッファに溜められ、L1A を受けた後に前後 1 バンチと共に LVDS で StarSwitch へと送られる。

HPT

TGC 外縁上の VME クレートにおかれ、Doublet、Triplet PSBoard からの情報を元にそれぞれの間のコインシデンス処理を行うモジュールである。最終的なミュオン Pt(横方向運動量) 判定に使用される δR 、 $\delta\phi$ (3.3.4 参照) は Wire で ± 15 、Strip で ± 7 にエンコードされる。但し、HighPtBoard のコインシデンスに失敗した場合、SlaveBoard のコインシデンス結果が変わりに出力される。 δR 、 $\delta\phi$ の情報は、トリガー領域 (RoI) に対応する位置情報と共に、光ケーブルでエレキハット内の SectorLogic へと送信される。

SL

SL は $R-\phi$ 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。今まで独立に処理されていた R 方向と ϕ 方向のコインシデンスをとり、6 段階の Pt 閾値で分類する。Pt の判定には 6 段階の閾値に対応した Coincidence Window と呼ばれる Look up table を使用する。これは書き換え可能な FPGA 内に実装され、要求される閾値に対応させることが可能である。プレトラックセクターは 6 段階の Pt 判定にそれぞれ用意され、Pt の大きい順に最大 2 トラックずつ選択される。最大 12 トラックがファイナルトラックセクターに送られ、Pt の大きい順に最大 2 つのトラックが選択される。最後に Pt Level と位置情報 (RoI) が MuonCTPI へと出力される。

SSW

Slave Board の読み出しデータを収集し、エレキハットへ中継するモジュールである。SSW は Slave Board の読み出しデータをゼロサプレスにより圧縮し、決められたフォーマットに整形後、後段の ReadOutDriver へ光ケーブルで送信する。また、JTAG プロトコルにより PS Board の制御、設定が可能である。

ROD

SSW からのデータを収集し、ID の整合性等をチェックした後、イベントデータとして ROS(Read Out System) に送信する。TGC の ROD は、CPU と SDRAM を搭載し、そのロジックは通常の PC と同様にプログラムすることができる。ROD の入出力部には FIFO が搭載されているが入力データ量が処理能力を超えると CTP に busy 信号を送信する。

HSC/CCI

HSC、CCIはホール内のエレクトロニクスを遠隔操作するためのシステムであり、CCIはエレキハット内のクレート、HSCはTGC外縁上のクレートにそれぞれ設置される。それぞれの間は光ケーブルで結ばれており、専用のプロトコルでアドレスと値をやり取りすることで、CCIからHSC経由でSSW、HPTを制御する。

3.3.2 TGCエレクトロニクスの配置

TGCエレクトロニクスは大きく分けて3箇所に設置される。

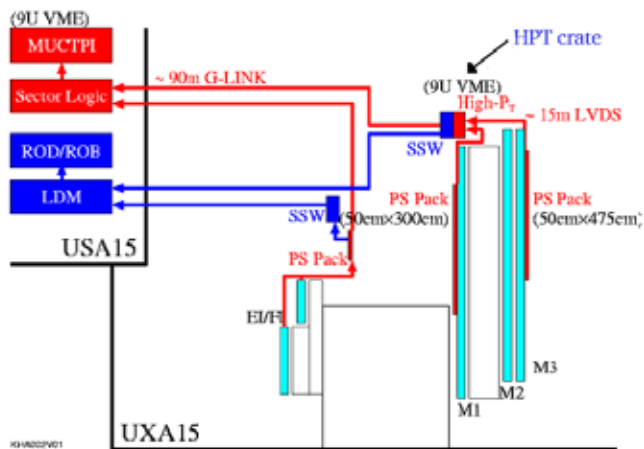


図 3.11: TGC エレクトロニクスの配置図

PS pack

Triplet 正面と pivot Doublet の後ろに設置される。PS Board と Service PatchPanel が収められ、チェンバーと直接 LVDS でリンクされる。TGC エレクトロニクスが設置される中で最も放射線が強く、搭載される IC には十分な放射性耐性が要求される。

HPT crate

TGC 外縁上に設置される VME クレートで、HighPtBoard と StarSwitch、それらのコントローラーである HSC が設置される。PS pack と 15m の LVDS でリンクされ、エレキハットとは 90m の光ケーブルでリンクされる。

ROD crate

エレキハットに設置される VME クレートである。トリガー処理、読み出し処理をそれぞれ統括する SectorLogic、ReadOutDriver、HPT クレートを遠隔制御する CCI が設置される。TGC エレクトロニクスの最下流の位置し、MuonCTPI、ReadOutSystem にデータが渡される。

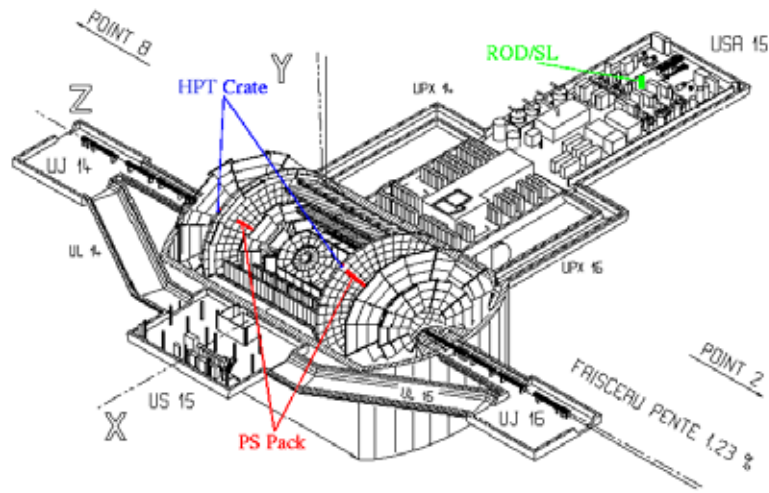


図 3.12: エレキハット

3.3.3 データフロー

TGC エレクトロニクス のデータフローを 図 3.13 に示す。大きく分けてトリガー、読み出し、制御の 3 つに分かれる。

トリガー

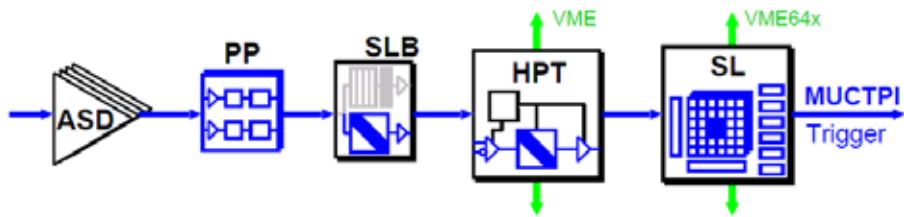


図 3.13: データフロー

トリガー信号は検出器付属の ASD ボードで増幅、整形が行われた後、TGC モジュール面に設置される PS Board に送られる。PS Board 内では Patch Panel でパンチ識別、Slave Board で Triplet、2Dublest のコインシデンスがそれぞれ独立にとられる。TGC の外縁クレート上の HighPtBoard では、Triplet、Doublet 間のコインシデンスがとられ、結果が次のエレキハットの Sector Logic へと送られる。Sector Logic ではワイヤー、ストリップのコインシデンス処理と δR 、 $\delta \phi$ による Pt 判定が行われ、MuonCTPI へと位置情報 (RoI)、Pt レベルを出力する。

読み出し

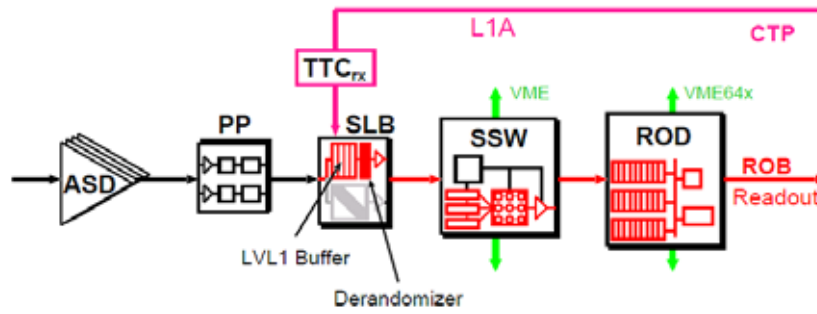


図 3.14: 読み出しの流れ

CTPが出すLVL1トリガー信号は、ServicePatchPanelで受信され、SlaveBoardへ送られる。SlaveBoardはL1Aを受けたバッファ上のデータを、前後合わせて3バンチ分TGC外縁クレート上のStarSwitchにLVDSで送信する。StarSwitchは各SlaveBoardのデータを収集し、光ケーブルでエレキハットのReadOutDriverに送信する。ReadOutDriverはイベントの整合性をチェックし、PCベースのReadOutSystemに出力する。

制御

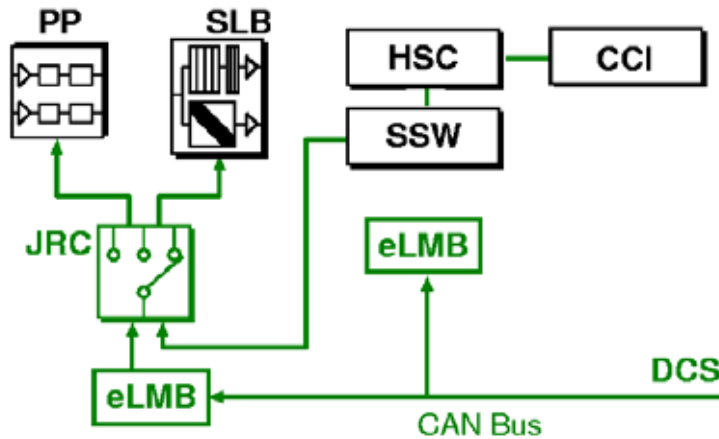


図 3.15: 制御システム

エレキハットのVMEモジュールは直接PCで制御される。ホール内にあるTGC外縁上のVMEクレートにはVMEマスターとしてHSCが置かれ、エレキハットのCCIから光ケーブルで遠隔制御する。また、TGCモジュール面に設置されるPS BoardはStar SwitchからJTAGプロトコルを用いて制御する。このときPS Board上のルーティングには専用のJRCが使用される。さらに別系統として、DCSがTGC外縁上のVMEクレートとPS Boardに制御系を持ち、TGCのHVやASD閾値の設定、監視が行われる。

3.3.4 $R - \phi$ Coincidence Logic

$R - \phi$ コインシデンスについて示す。発生したミュオンは磁場により曲げられた後、TGCで検出される。ビームの衝突点と最外層のTGCでのミュオンの検出点とを直線で結んだものを無限運動量トラックと仮定した場合、その直線と実際の検出位置は、ミュオンが磁場により曲げられるためにズレが生じる。このズレを $\delta R\delta\phi$ とし、その値を用いて Pt の判定を行う。

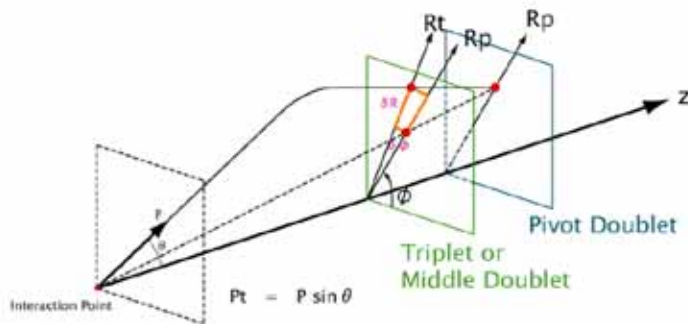


図 3.16: Pt 判定に用いる $\delta R\delta\phi$

TGCで検出されたシグナルは、PS Board 内の Slave Board ASIC でコインシデンス処理が行われる。コインシデンスには Triplet、Doublet にそれぞれ、2/3(Strip は 1/2) 層、3/4 層の hit が要求される。また、pivot、middle Doublet の hit 情報からは LowPt coincidence での $\delta R, \delta\phi$ を決定する。その情報は HighPtBoard へと送られ、PSBoard からの情報を元に Doublet、Triplet それぞれの間のコインシデンス処理を行う。同時に pivot doublet、triplet の情報から HighPt coincidence の $\delta R, \delta\phi$ を求め、位置情報と共に、SectorLogic へと送信される。SL では今まで独立に処理されていた R 方向と ϕ 方向のコインシデンスをとり、6 段階の閾値に対応した Coincidence Window と呼ばれる Look up table を使用し、分類される。分類された 6 段階の閾値については、それぞれについて Pt の大きい順に最大 2 トラックずつ選択される。この最大 12 トラックから Pt の大きい順に最大 2 つのトラックが選択され、Pt Level と位置情報 (RoI) が MuonCTPI へと出力される。

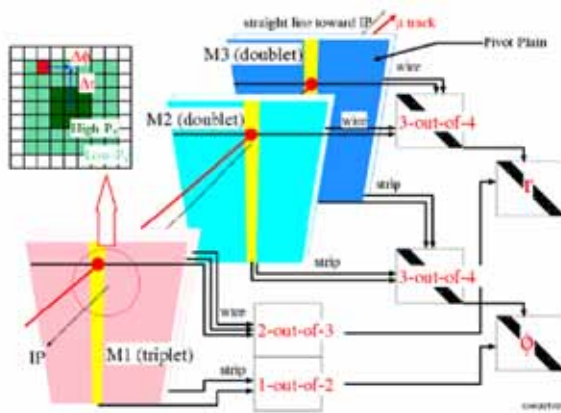


図 3.17: TGC トリガーのコインシデンスと判定

第4章 Coincidence Window

4.1 Coincidence Window とは

Coincidence window は r -方向と ϕ -方向のヒット位置からコインシデンスのとれたトラックの横方向運動量、並びに電荷を判定するために用いられる。

ワイヤグループとストリップ HPT ボードから送られて来たヒット情報、 r と ϕ はセクターロジック (Sector Logic, SL) で無限大横運動量からのずれ、 $\delta r \delta \phi$ に変換され、coincidence window のデータをもとに 6 段階の横方向運動量レベルとして出力される。

各々のサブセクターに 1 つの coincidence window が存在し、 r -方向と ϕ -方向はそれぞれ $-15 \sim +15$ と $-7 \sim +7$ に分割されている。その概念図を図 4.1 に示す。 ϕ -方向に磁場がない理想的な磁場の場合、荷電トラックは r -方向にだけ曲げられるため、図 4.1 に見られるよう、無限大横方向運動量トラックからの "ずれ、 δr は横方向運動量が大きくなるに従って小さくなっていく。

セクターロジックにおける横方向運動量の閾値判定の実装には、各 window における横方向運動量の値をメモリに格納し、ずれ、 δR 、 $\delta \phi$ をインデックスとしてメモリの内容を参照する事によって結果を得る、LUT(Lookup-table) 方式を採用している。Coincidence matrix は FPGAs によって実装されており、バックグラウンドレベルや実験の要求に応じて再構成することが可能となっている。

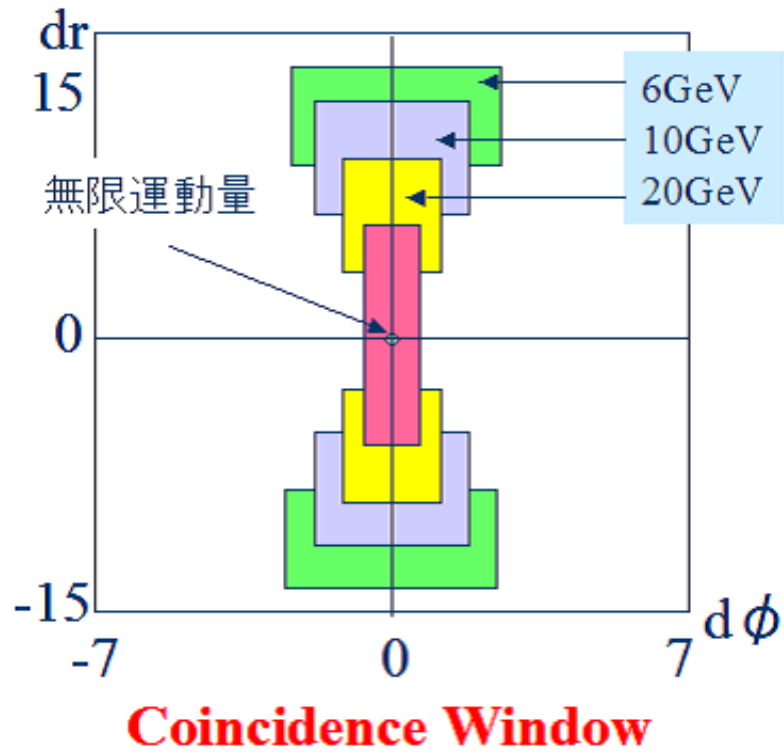


図 4.1: 理想的な磁場 ($B_\phi=0$) における coincidence window の概念図。coincidence window は r - 方向、 ϕ - 方向にそれぞれ $-15 \sim +15$ 、 $-7 \sim +7$ と分割されており、各 window が横方向運動量の閾値を持っている。 $\delta r = 0$ 、 $\delta \phi = 0$ が無限大横方向運動量のトラックの場合に相当する。

4.2 coincidence window の計算方法

アトラス検出器の磁場は8つのトロイドマグネットから作られているため、オクタント対称になっているが、1オクタント内の磁場は構造体などの影響により不均一であり、エンドキャップとフォワード部分の全1,080のサブセクターについて、それぞれ固有の coincidence window を用意する必要がある。

これらの様々なパターンの coincidence window を単純な計算式で計算することは困難である。よって、ミュー粒子に対する検出器、並びにトリガーロジックのシミュレーションを行ない、各サブセクターにおける横方向運動量と δr 、 $\delta \phi$ の対応を調べることによって coincidence window を作成する。

シミュレーションは大別して、以下の3つの部分から構成される：

- 検出器シミュレーション (Detector Simulation)
- デジタル化 (Digitization)
- トリガーシミュレーション (Trigger Simulation)

検出器シミュレーションには Geant4 を用いてアトラス測定器の詳細な形状と磁場分布が実装されている。陽子-陽子衝突点付近から発生したミュー粒子の測定器や構造体中での相互作用をシミュレートし、ミュー粒子の飛跡を求める。

ミュー粒子がトリガーチェンバーの有感領域に作ったヒットはエネルギーや時間、絶対位置などの情報を持っている。これを Digitization によって、実際のトリガーチェンバーの出力に変換する。ここではガス領域からワイヤー、ストリップへのドリフト、並びに読み出しまでの伝播に要する時間も考慮されている。

最後に、TGC エレクトロニクスのトリガーロジックがシミュレートされる。coincidence window を作成するために、ASD 出力から PP--SLB--HPT までの処理を再現し、各サブセクターにおいて δr と $\delta \phi$ の分布と横方向運動量の関係を出力する。

4.3 coincidence window の作成手順

シミュレーション後のデータを用いて coincidence window を作成する手順を以下に示す。トリガーシミュレーション後のデータには、各イベント毎にミュオン粒子の運動量、並びに coincidence のあったサブセクターのアドレス、 $\delta r, \delta, \phi$ 等の情報が保存されている。これらのデータを用いて各サブセクター毎における横方向運動量と $\delta r, \delta, \phi$ の対応関係を調べて coincidence window を作成する。この解析では6つの異なる横方向運動量、6、8、10、11、20 と 40GeV をもつミュオン粒子のデータを用いた。

4.3.1 ヒットマップ

各運動量、各サブセクター毎に $\delta r, \delta, \phi$ の値を抜き出し、図 4.1 のようなヒットマップを作成する。図 4.2(a)-4.2(d) にその一例を示す。ミュオン・スペクトロメータ前方の物質（主としてカロリメータ）との相互作用により、方向や運動量が変化してしまうため、これが $\delta r, \delta \phi$ の広がりの原因になる。フォワード領域の磁場は ϕ 方向成分が小さく、図 4.2(a) のヒットマップに見られるよう、横方向運動量と δr が非常に良い相関を持っている。しかしエンドキャップ領域の η の小さい領域にあるサブセクターにミュオン粒子が入射すると、エンドキャップトロイド磁石の中心部を通らず、エンドキャップとバレルトロイドのフリンジ磁場を通過するため、横方向運動量が ϕ 方向への相関を持ったり（図 4.2(b)）、 ϕ 方向成分のみしか持たなくなる（図 4.2(c)）。またトロイドコイルを通過する部分では、磁場による曲りはほとんどないが、低い運動量領域ではコイルによる多重クーロン散乱が支配的となり、ヒットマップは図 4.2(d) のようになる。

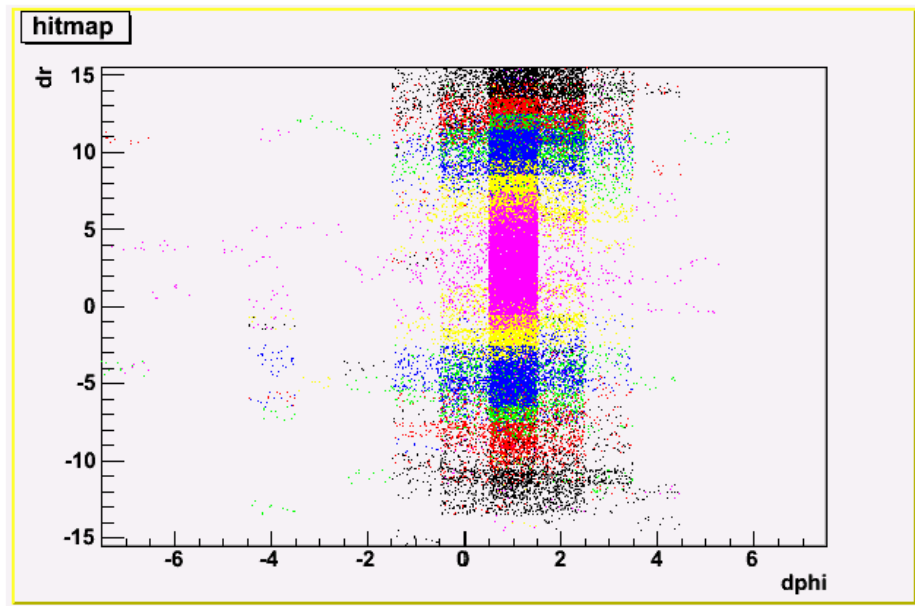


図 4.2(a): ヒットマップ (sector2 subsector7) 図の色はそれぞれ、黒:6GeV 赤:8GeV 緑:10GeV 青:11GeV 黄:20GeV ピンク:40GeV である。

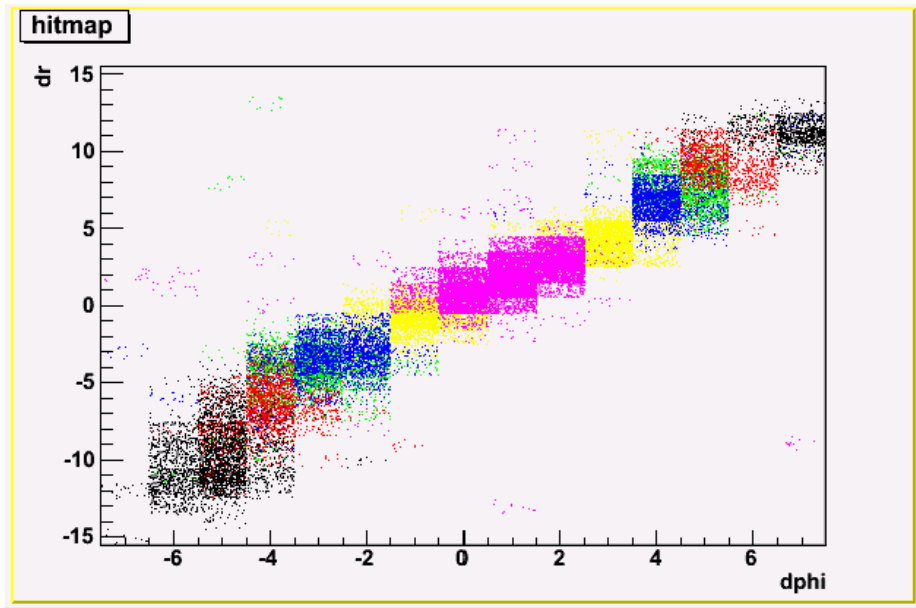


図 4.2(b): ヒットマップ (sector0 subsector55)

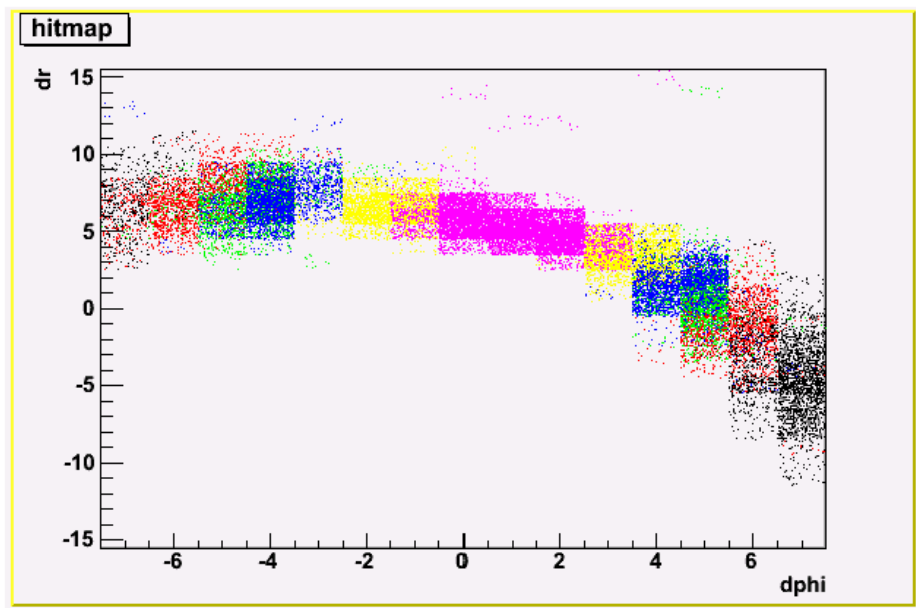


図 4.2(c): ヒットマップ (sector7 subsector74)

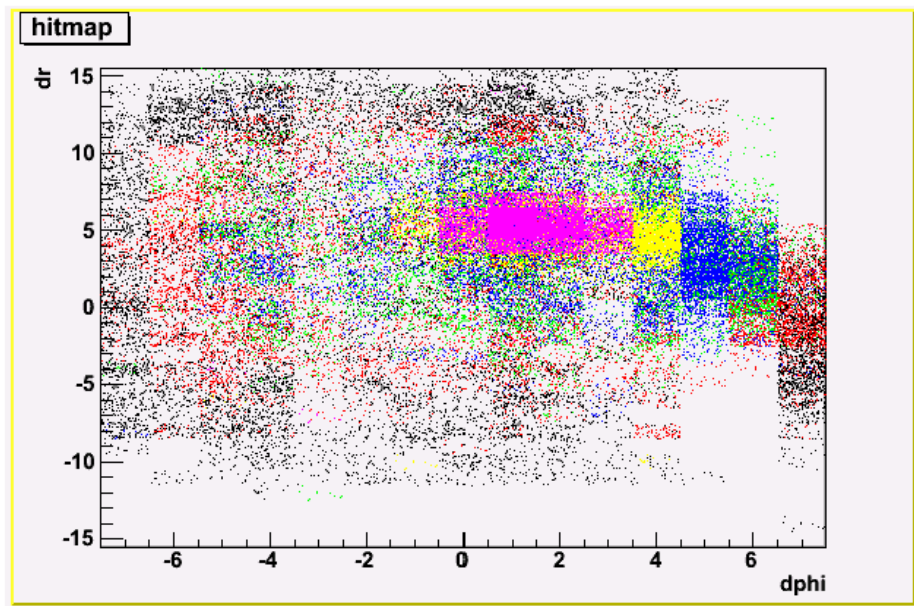


図 4.2(d): ヒットマップ (sector7 subsector72)

このように TGC の各 subsector は領域によって磁場が様々であり、単純な計算では求められないため、subsector 毎に window を作成する必要がある。しかし、数が非常に多いため手作りする事は不可能であり、自動的に作成する手順の開発を行った。

4.3.2 ヒットマップ解析

シミュレーションデータから作成したヒットマップを読み込み、得られた dr 、 $d\phi$ の分布に統計的な処理を行って、Coincidence Window を作成する。まず、分布の裾の寄与を取り除くため様々な cut をかけている。このような領域では、問題とするミュオンに対する検出効率が低く、有効領域として window を開けると、衝突点からのミュオン以外の Background によるトラックを拾う原因となってしまう。シミュレーションの統計量が限られるため、このような統計的な揺らぎの影響を極力少なくすることが必要である。

統計量による cut

各 subsector、各 Pt 毎に保存したヒットマップを読み込む際、その subsector に入射した全ミュオンの数の 0.25% 以下の入射しなかった dr 、 $d\phi$ セルについてはその Pt での入射はなかったとする統計量による cut をかけている。これは多重クーロン散乱等で偶然大きく曲げられてしまったミュオンによって生じたヒット領域を、CW の有効領域として開けない為である。このようなヒットに対して window を開けると noise を拾う原因となってしまう。

図 4.3 に各 subSector に入射したミュオンの数の分布を示す。衝突点から $0.9 < |\eta| < 2.7$ の η 領域に $dN/d\eta = \text{一定}$ となるようミュオンを発生させたため、粒子がまっすぐ進めば、どの subSector にもほぼ同数のミュオンが入射するはずである。しかし、検出器の構造体やマグネットの影響で全入射数が大きく異なるため、cut の基準値を絶対値にすると、入射数の違いにより正確な cut がかけられなくなってしまう。そこで、基準値を統計量による相対的な値として $N_{cell} > xxx\% \times N_{total}$ のように決定した。

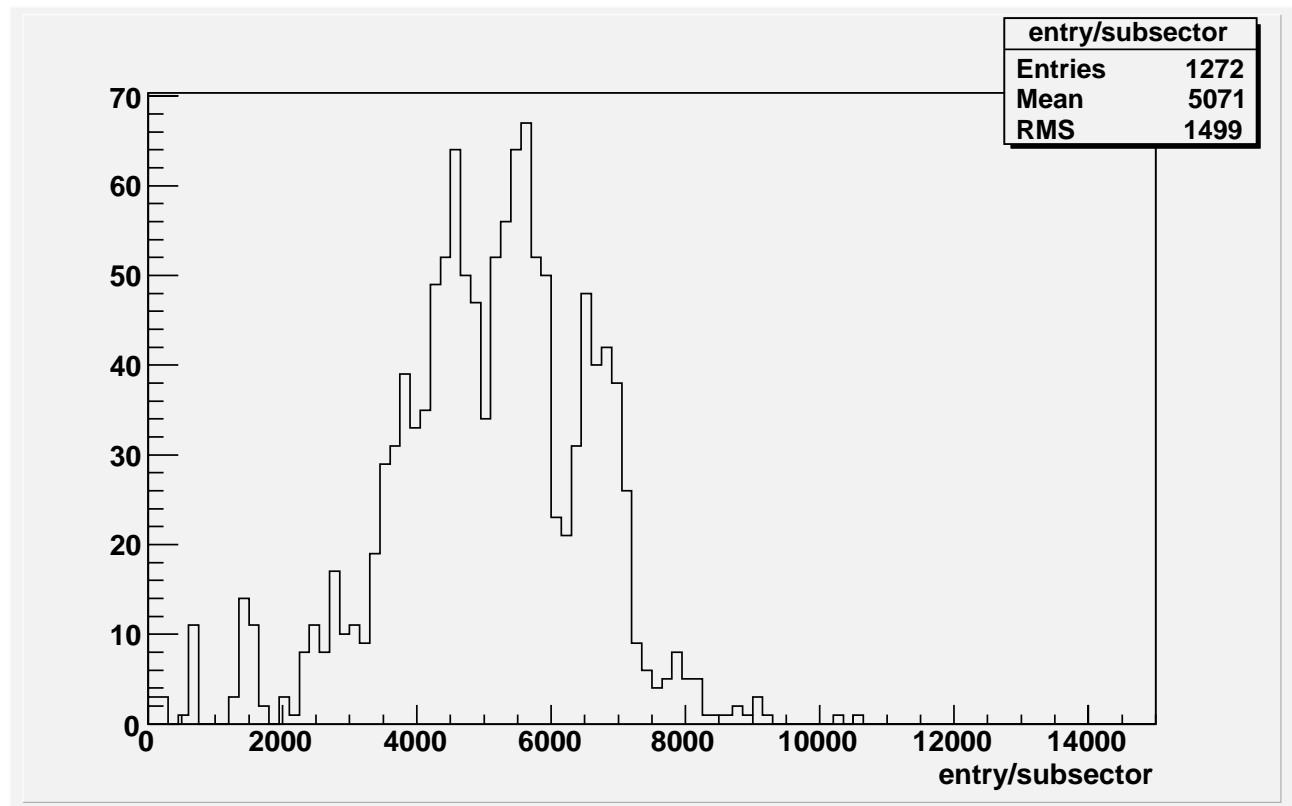


図 4.3: subsector に入射したミュオンの統計のばらつき

周囲の dr 、 $d\phi$ セルのヒット数による cut

dr 、 $d\phi$ セルの周囲には 8 つのセルが存在する。この周囲 8 つのセルのうち、一定数以上にヒットが存在していなければ中心部分のヒットは cut される。これは subsector に入射したミュオンが少なかった場合、統計量による cut の基準値が 0 になる。しかし、そのような場合でも独立したヒットは noise である可能性が高いため、cut をかけて切り落とす必要があるからである。

例を図で示す。赤色のセルが既にヒットであると認識されたセルである場合、ピンク色のセルは、図 4.4(a) であればヒットと認識するが、図 4.4(b) の場合はヒットと認識しない。

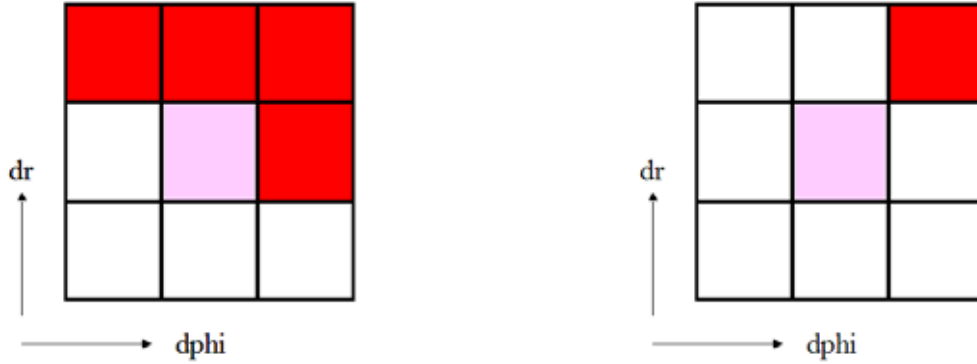


図 4.4(a): ヒットと認識される場合 赤色のセルがヒットのあるセル、このようなヒットパターンの場合、ピンク色のセルはヒットと認識する
 図 4.4(b): ヒットと認識されない場合 赤色のセルがヒットのあるセル、このようなヒットパターンの場合、ピンク色のセルはヒットと認識されない

図 4.5 は 1 つヒットがあった場合に周囲にあるヒット数の分布を示している。3 以上のヒットが多いのが分かるが、これはヒットがクラスターを形成した場合、その構成要素の大半は周囲のヒット数が 3 以上となる為である。つまり、周囲のヒット数が 2 以下であれば noise である可能性が高い。そのため、周囲のヒット数が 2 以下のものは cut した。

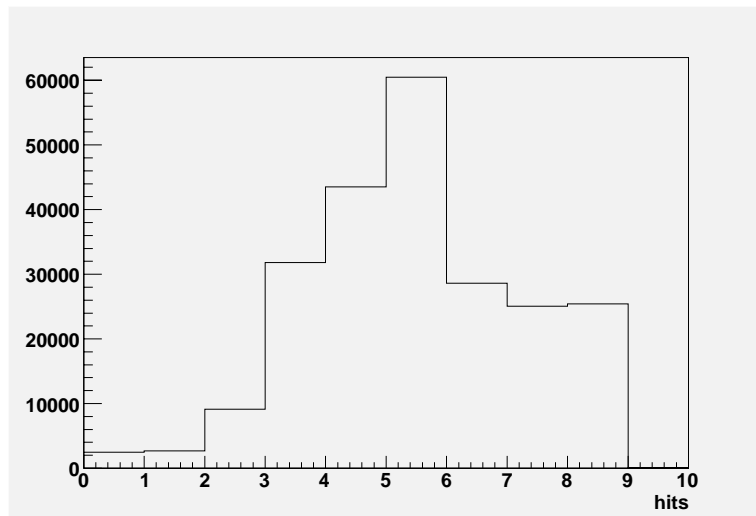


図 4.5: 周囲にあるヒット数の分布 ある 1 つのヒットがあった場合、その周囲 8 つのセルの内、既にヒットと認識されたヒットの数の分布。完全に独立したヒットであれば周囲のヒット数は 0、完全に囲まれていれば 8 となる。

4.3.3 Coincidence Window

cut をかけた後、各 dr 、 $d\phi$ のセルについて、 P_t が高いものを優先して window を開けていく。これは

- 高い P_t はイベントが少ないため、取りこぼしのないようにする必要がある為
- 低い P_t はミュオンを double count しないようにすることが重要である為

である。

ヒットマップとそれから作成された Coincidence Window を示す。

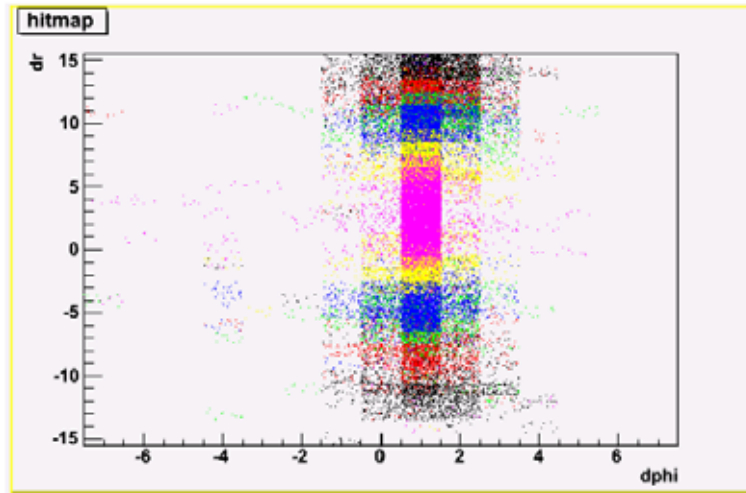


図 4.6(a): ヒットマップ (sector2 subsector7) 図の色はそれぞれ、黒:6GeV 赤:8GeV 緑:10GeV 青:11GeV 黄:20GeV ピンク:40GeV である。

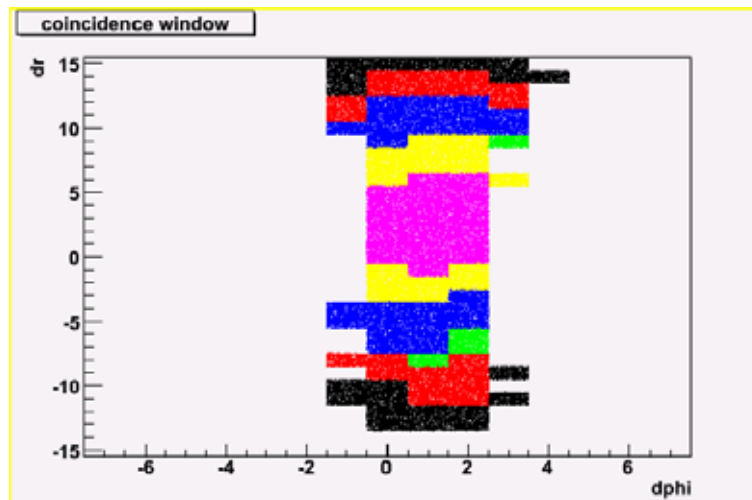


図 4.6(b): Coincidence Window(sector2 subsector7) ヒットマップを基に各セルを、ヒットと認識された P_t のうち最も高い P_t の window として開けていく

次にマグネットのコイルを通過するなど、構造上の問題で磁場の存在しない領域でのヒットマップと Coincidence Window を示す。このような部分は pt に対する resolution がないので、mask することも考慮する必要がある。

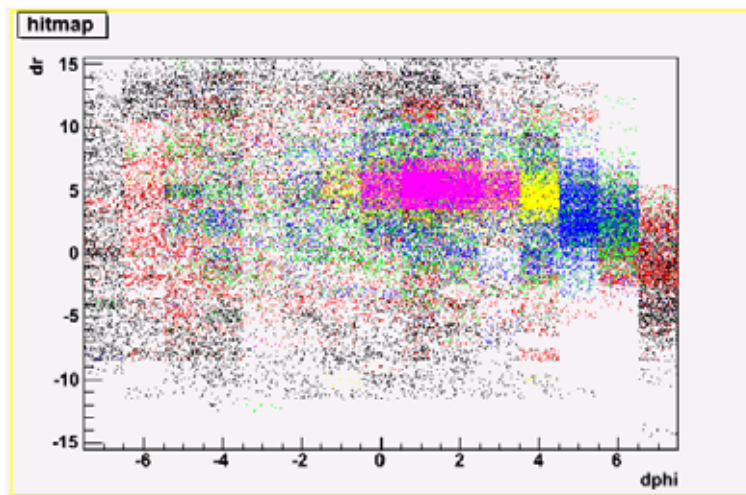


図 4.7(a): ヒットマップ (sector7 subsector72)

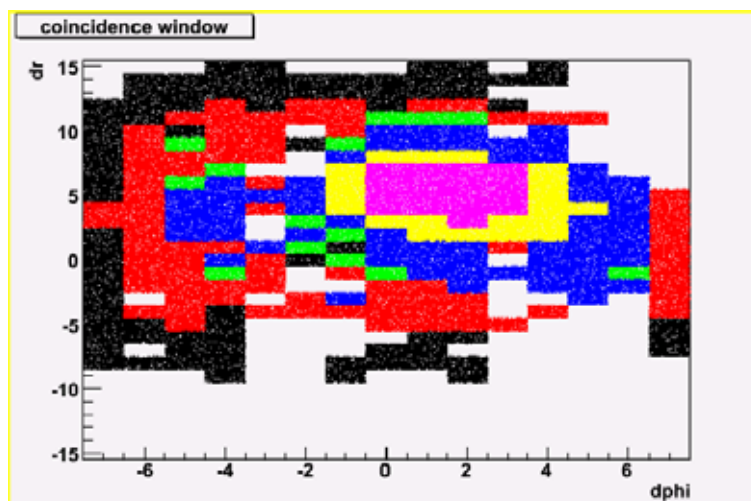


図 4.7(b): Coincidence Window(sector7 subsector72)

第5章 Coincidence Windowの性能評価

5.1 efficiency curve

efficiency

Pt が 0 ~ 100GeV のミュオンを用いた efficiency の評価を行う。CW を作成したときと同じ手順でシミュレートし、入射した subsector、 dr 、 $d\phi$ を求める。入射ミュオンの dr 、 $d\phi$ の値と window の dr 、 $d\phi$ が一致した場合、その window の Pt としてトリガーされたとする。このトリガーされたミュオンを用いて efficiency を

$$\text{トリガーされたミュオン} / \text{全 highPt ミュオン}$$

とする。ここで highPt ミュオンとは、 dr 、 $d\phi$ 共に pivot、middle doublet、Triplet における 3-station コインシデンスが取れたものである。横軸に Pt、縦軸にその Pt での efficiency をとったものを図 5.1 に示す。プラトー部での efficiency は 90 %を超えている。

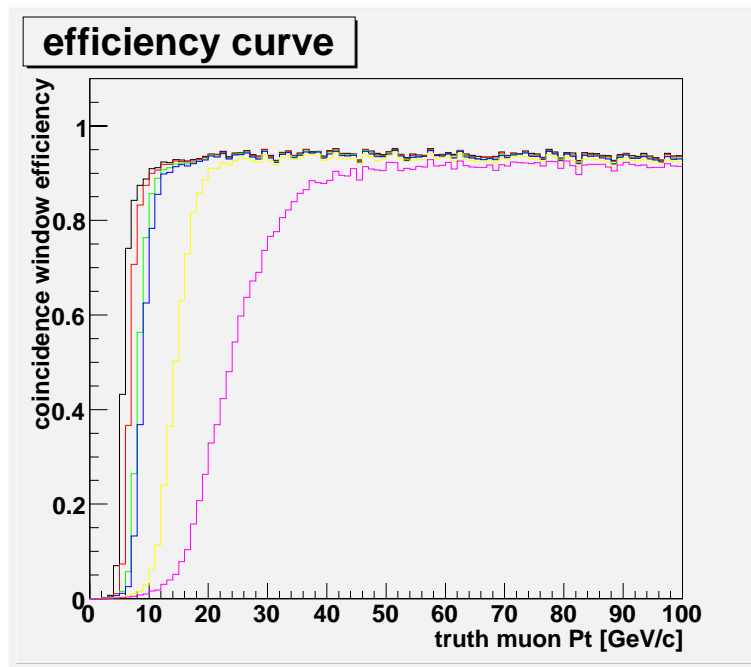


図 5.1: efficiency curve Pt0 ~ 100GeV でシミュレートされたミュオンのうち、3-station コインシデンスが取れたものである highPt ミュオンのみを用いて efficiency を評価する。 dr 、 $d\phi$ の値が Window と一致した場合、一致した Pt 以下でトリガーしたとした。(30GeV のミュオンが 20GeV としてトリガーされた場合は 6,8,10,11,20GeV でトリガーされたとする。) 縦軸にトリガーされたミュオンの比率をとることで、Pt の変化に伴う efficiency の変化がわかる。色はそれぞれ 黒:6GeV 赤:8GeV 緑:10GeV 青:11GeV 黄:20GeV ピンク:40GeV を表している。

efficiency の立ち上がり

理想的な CW であれば、各 Pt の閾値で efficiency が 0 から 1 へと変化する階段関数となるはずである。しかし、実際は低い Pt のミュオンも高い Pt のミュオンと同じ $\delta R, \delta\phi$ の window に入って捉えてしまう。このために、efficiency の立ち上がりは幅を持っている。この評価は efficiency curve の微分をとり、その分布の幅によって評価する。図 5.2 は各 Pt の efficiency curve の微分値をプロットしたものである。6、8、10、11GeV については非常に sharp であるが、20、40GeV は鈍っている。

低い Pt の閾値においては、より Pt の低いミュオンを捉えてしまうことはトリガーレートの大幅な増加につながるため、閾値での efficiency の立ち上がりの早さが問題となる。高い Pt の閾値では、efficiency の立ち上がりが鈍くともトリガーレートの増加にはつながらない。ここでの要請される条件は、閾値以上の Pt を持つミュオンに対する efficiency の高さである。20、40GeV においては threshold の Pt 以降は efficiency の増加量が 0 であるため、十分要請を満たしている。

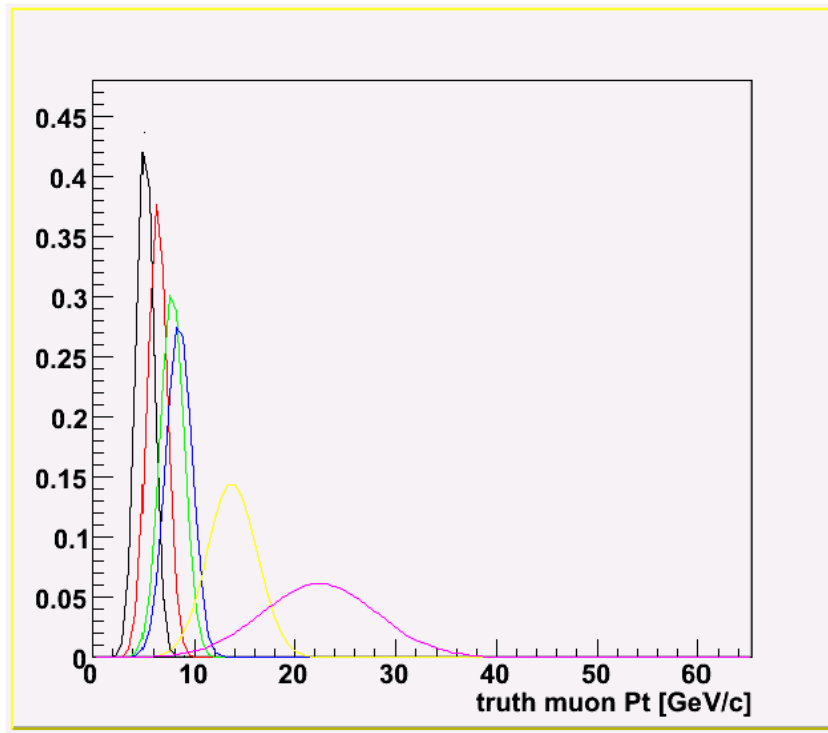


図 5.2: efficiency curve の立ち上がり 図 5.1 を微分したものである。それぞれの幅が efficiency curve の立ち上がりの早さに対応しており (幅が狭いほど早い)、立ち上がりが早いほど理想的な Window に近づく。色は図 5.1 同様 黒:6GeV 赤:8GeV 緑:10GeV 青:11GeV 黄:20GeV ピンク:40GeV である。

5.2 統計量依存性

CW は Charge/Pt 毎にそれぞれ 700k の event を用いて作成した。この 700k というイベント数の妥当性を検証する。window を作る際、entry の少ない subsector が存在する。そのような subsector は window を開けることが出来ず、efficiency を落としてしまうことになる。この影響を調べるために window を 100k 刻みのイベントで作成し、efficiency と立ち上がりの統計依存性を調べた。

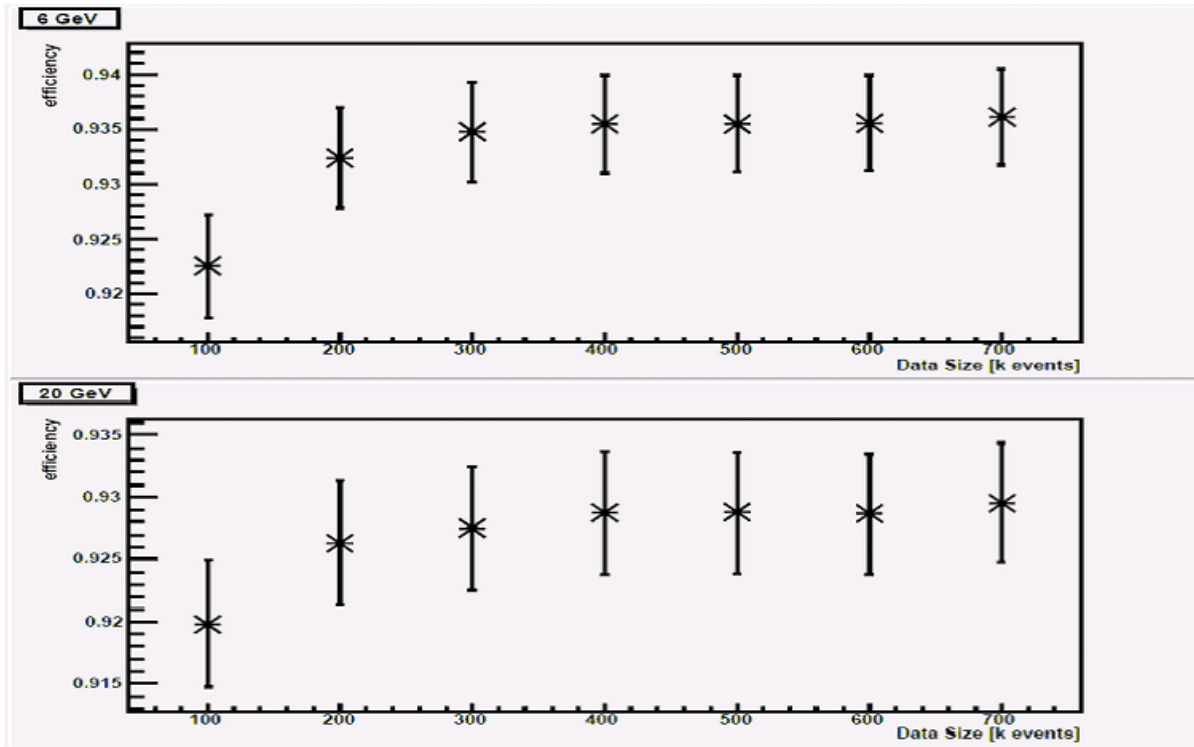


図 5.3(a): 各横方向運動量 (6,20GeV) に対する plateau 部分での efficiency curve の統計依存性 横軸が統計量 (100 ~ 700k events)、縦軸は efficiency である。上下はそれぞれ 6GeV、20GeV の場合。

図 5.3(a)、5.3(b) より efficiency は 300k 以降で安定していることが分かる。また efficiency の立ち上がりは 400k 以降で安定となる。これらより 700k で作成した window は妥当である。

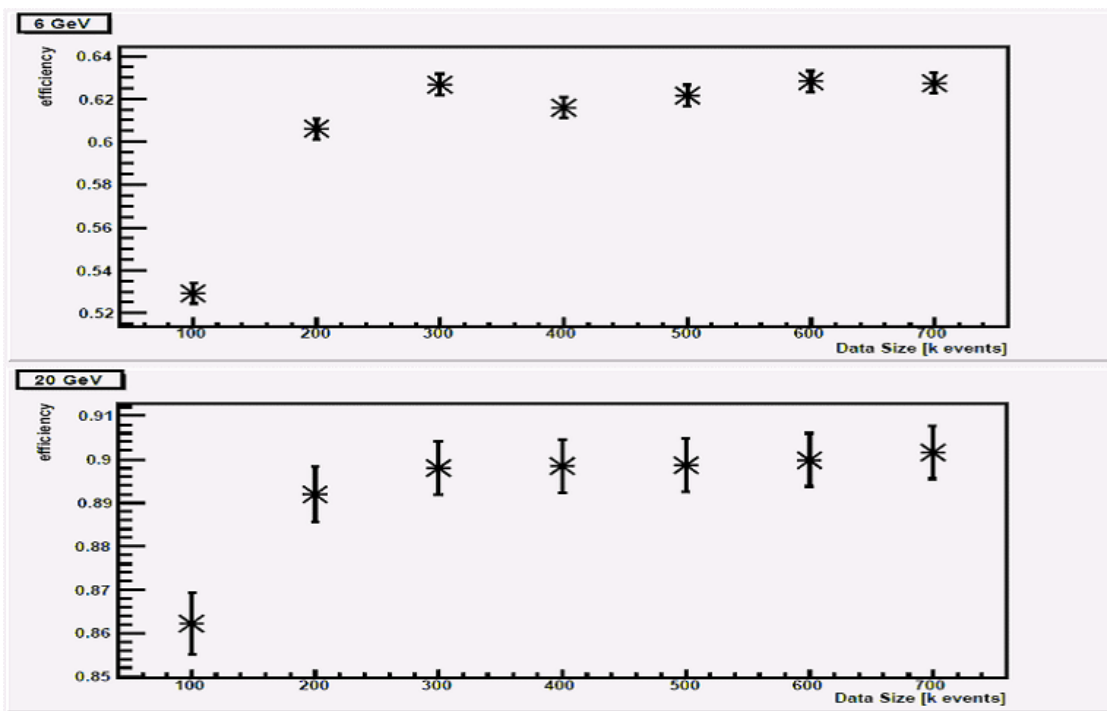


図 5.3(b): efficiency (threshold)

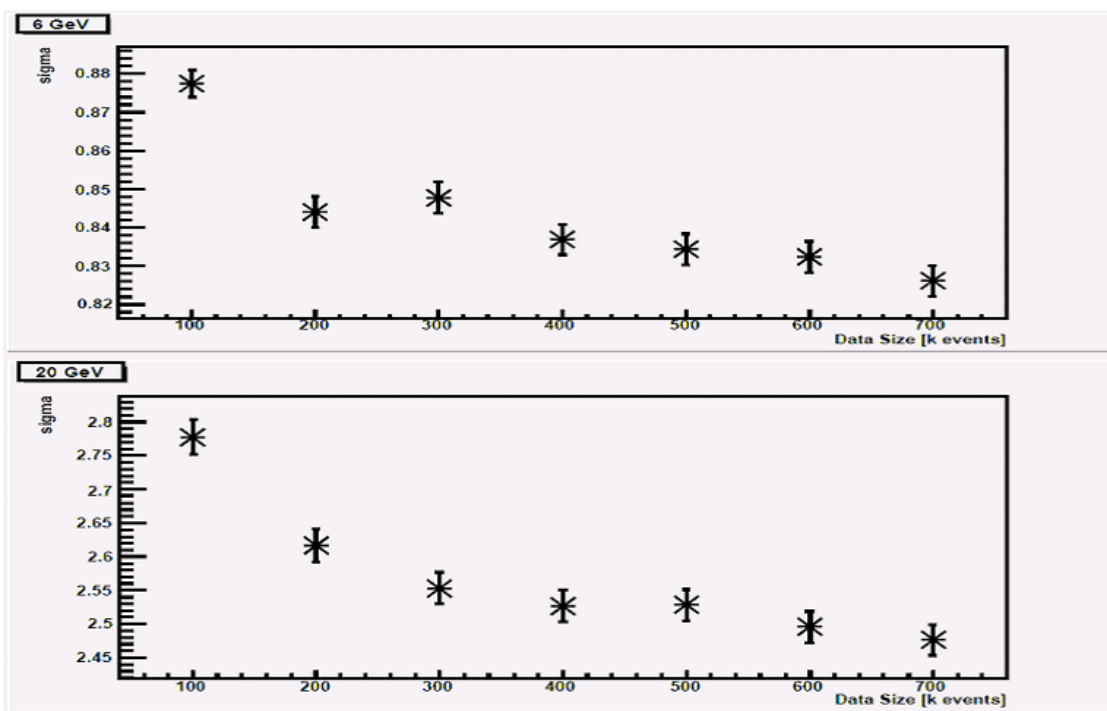


図 5.3(c): efficiency curve の立ち上がり

5.3 トリガーレートの見積もり

作成した window の efficiency を用いてトリガーレートを計算する。まずはじめに、ミューオンの differential cross section のスペクトルを示す。横軸が P_t 、縦軸はその P_t での differential cross section である。

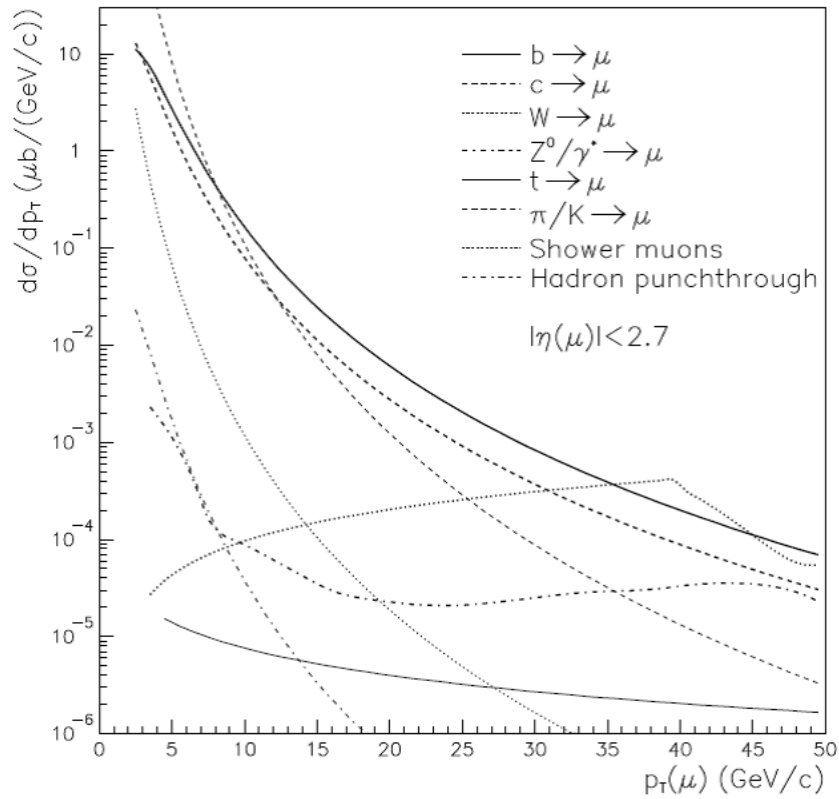


図 5.4: differential cross section

この分布と作成した Coincidence Window の efficiency curve からトリガーレートを計算する。

表 5.1: Pt6,20GeV でのトリガーレート

process	Pt6GeV		Pt20GeV	
	Window efficiency	Sharp Efficiency	Window efficiency	Sharp Efficiency
beauty	1324.02 Hz	1191.04 Hz	601.725 Hz	126.381 Hz
charm	712.16 Hz	608.83 Hz	254.497 Hz	48.672 Hz
top	0.07983 Hz	0.08460 Hz	0.47190 Hz	0.37512 Hz
W	4.41016 Hz	4.71127 Hz	39.6738 Hz	38.2605 Hz
pi/K	3149.75 Hz	2188.12 Hz	433.888 Hz	48.3725 Hz

5.4 cavern background

ミュオンシステムに関するバックグラウンドとして、熱中性子、カロリメータから漏れ出した低エネルギーの光子等によって構成される cavern background がある。このレートが高いと、ミュオンシステムのパフォーマンスを落とす原因となる。そのため、このバックグラウンドのシミュレーションを行い、efficiency の増分を見積もった。

図 5.5(a)、5.5(b) は、バックグラウンドのあり/なしによる efficiency の違いである。黒がバックグラウンド無し、緑がバックグラウンドありである。それぞれ 6GeV、8GeV、10GeV としてトリガーされたものを表している。

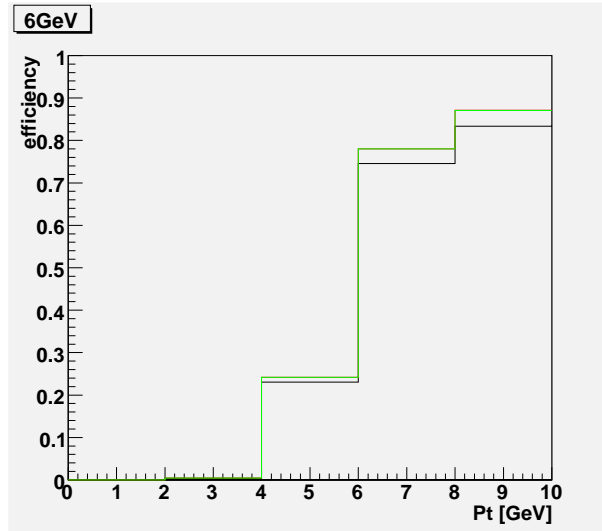


図 5.5(a): w/wo background による efficiency の変化 (6GeV) 黒の線はバックグラウンド無し、緑はバックグラウンドありの場合の efficiency

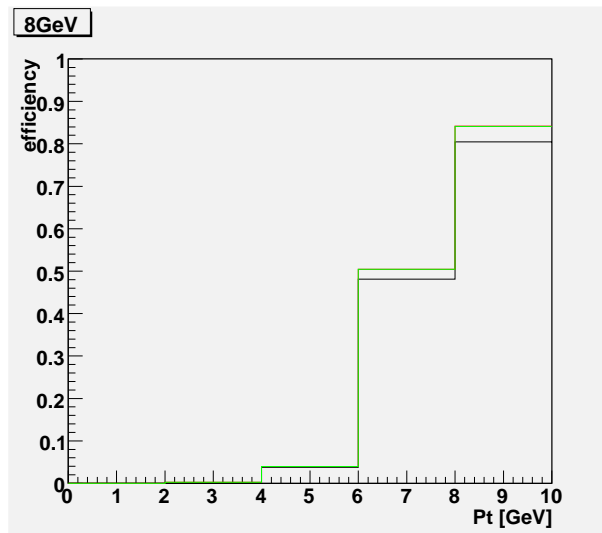


図 5.5(b): w/wo background による efficiency の変化 (8GeV)

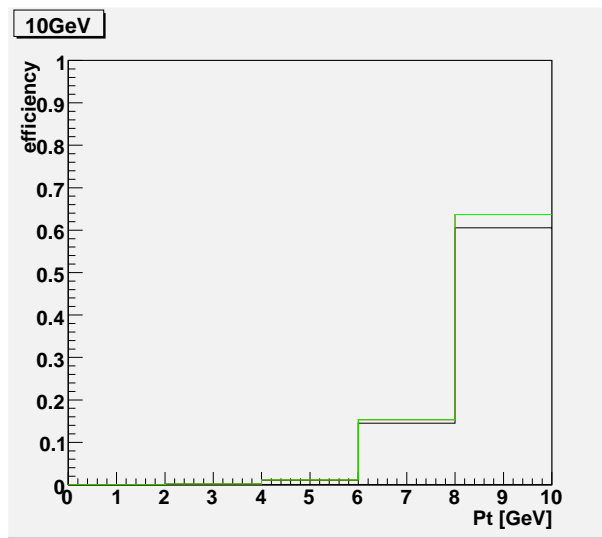


図 5.5(c): w/wo background による efficiency の変化 (10GeV)

どの Pt においても efficiency の大きな上昇は見られなかった。そのため、今回作成した window は非常にバックグラウンドに強いと言える。

5.5 Pt/Charge 依存性

ミュオンシステムでは不感領域をつくらないために TGC と RPC でオーバーラップしている領域が存在している。このような領域では、1つのミュオンをダブルカウントする可能性があるため、TGC と RPC の境界処理を行う必要がある。この処理を行うために、ダブルカウントする可能性のある領域を探し出し、特定する。

まず、ダブルカウントが起こる事象の例を示す。図 5.6 は $\eta > 0$ の領域を示しており、-のミュオンが TGC と RPC でダブルカウントする可能性が高く、+のミュオンはその可能性が低い。これはミュオンの charge により曲がる方向が逆向きになることに依存している。また、 P_t が高くなるにつれ、磁場による曲がり小さくなるため、オーバーラップする領域が小さくなっていく。これらより TGC/RPC におけるダブルカウントは、charge/ P_t に依存することがわかる。

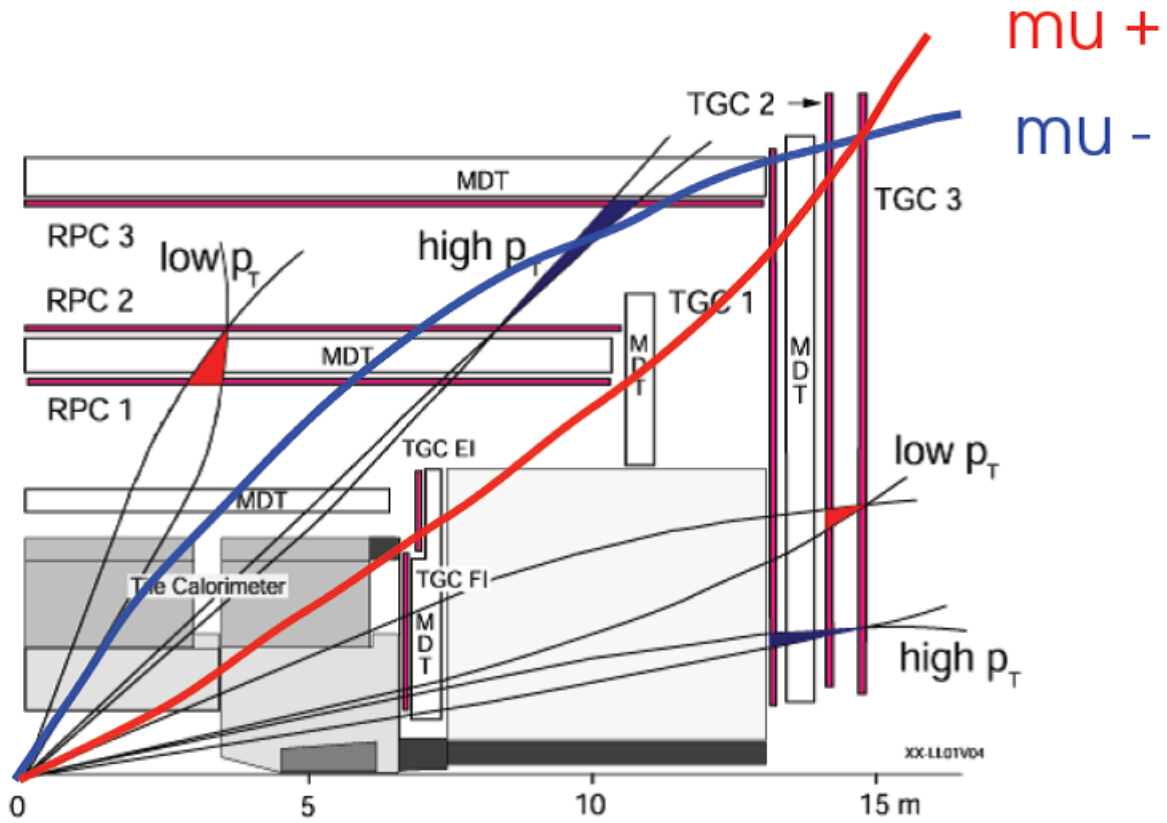


図 5.6: TGC/RPC におけるオーバーラップ領域 ($\eta > 0$)

シミュレーションデータを用いて、ダブルカウントの Pt/Charge による依存性を確認する。まず $|\eta| < 1.2$ 、 $|\phi| < 3.14$ の領域でミュオンのシミュレーションを行い、ダブルカウントしたミュオンの η 分布をとることで領域を特定する。以下に示した図 5.7 より TGC と RPC のオーバーラップ領域は $0.8 < |\eta| < 1.2$ と特定された。これはバレル部とエンドキャップ部の重なる領域に一致する。

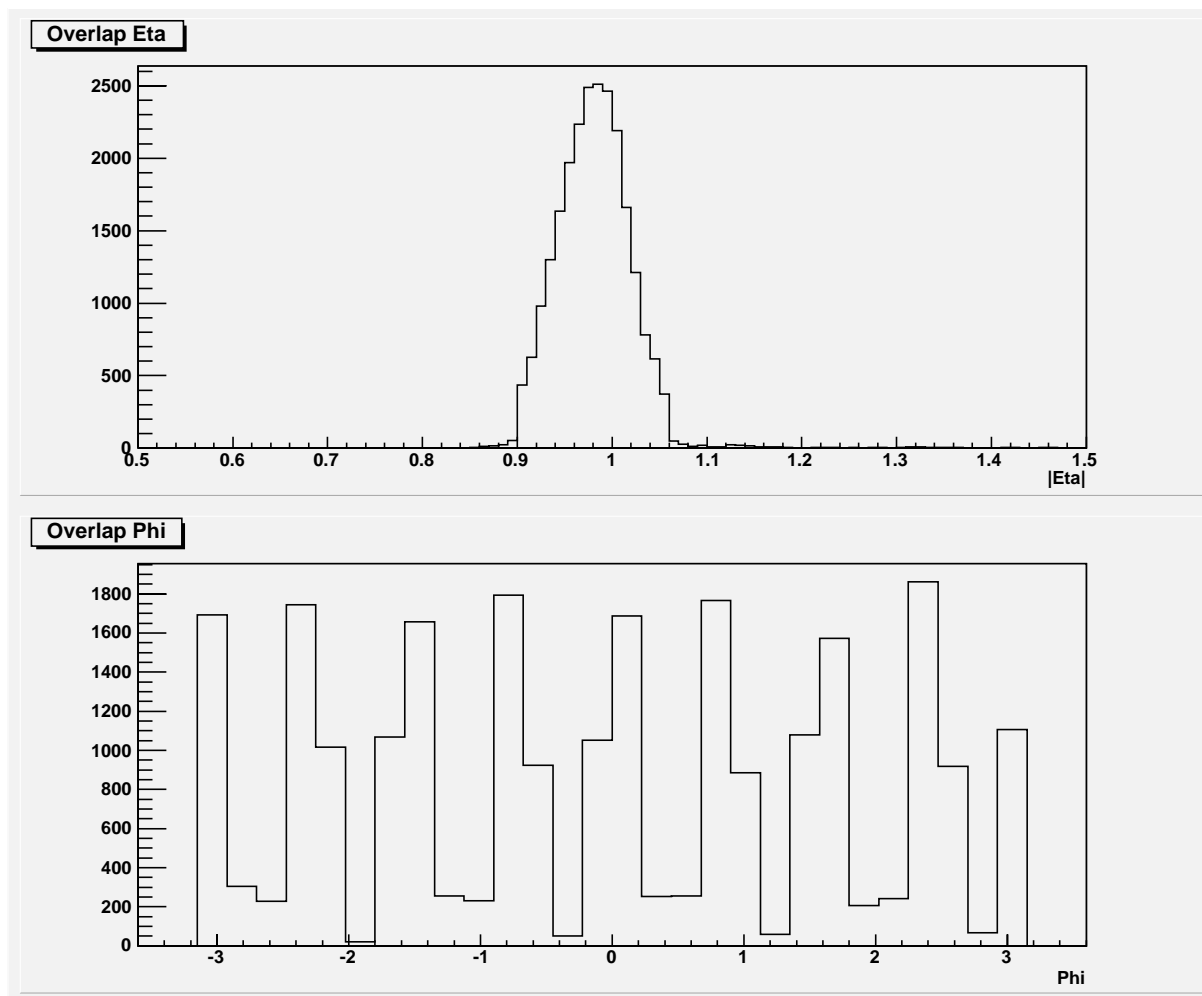


図 5.7: ダブルカウントしたミュオンの η, ϕ 分布

表 5.2: 各 Pt/Charge におけるダブルカウントのレート

Charge	Pt	Range	Range	Sample size	B-E double counts	%
+	40 GeV	0.8-1.2	-3.14 - 3.14	16679	2	0.01
-	40 GeV	0.8-1.2	-3.14 - 3.14	20044	60	0.29
+	20 GeV	0.8-1.2	-3.14 - 3.14	20087	0	0
-	20 GeV	0.8-1.2	-3.14 - 3.14	20087	214	1.06
+	10 GeV	0.8-1.2	-3.14 - 3.14	20111	1	0.005
-	10 GeV	0.8-1.2	-3.14 - 3.14	35700	1270	3.55
+	8 GeV	0.8-1.2	-3.14 - 3.14	19889	1	0.005
-	8 GeV	0.8-1.2	-3.14 - 3.14	19889	968	4.86
+	6 GeV	0.8-1.2	-3.14 - 3.14	26683	1	0.004
-	6 GeV	0.8-1.2	-3.14 - 3.14	21358	1470	6.88

特定した領域でのダブルカウントの比率を求めた。Pt/Charge の依存性が非常に強いことが分かる。

図 5.8 の左はダブルカウントしたミュオンが検出された RPC/TGC の RoI の ID をプロットしたものである。0.8 < η < 1.2 付近の RoI ID でダブルカウントしているのが分かる。右はダブルカウントした sector の ID である。TGC、RPC 共に 1/8 対称性が見えている。

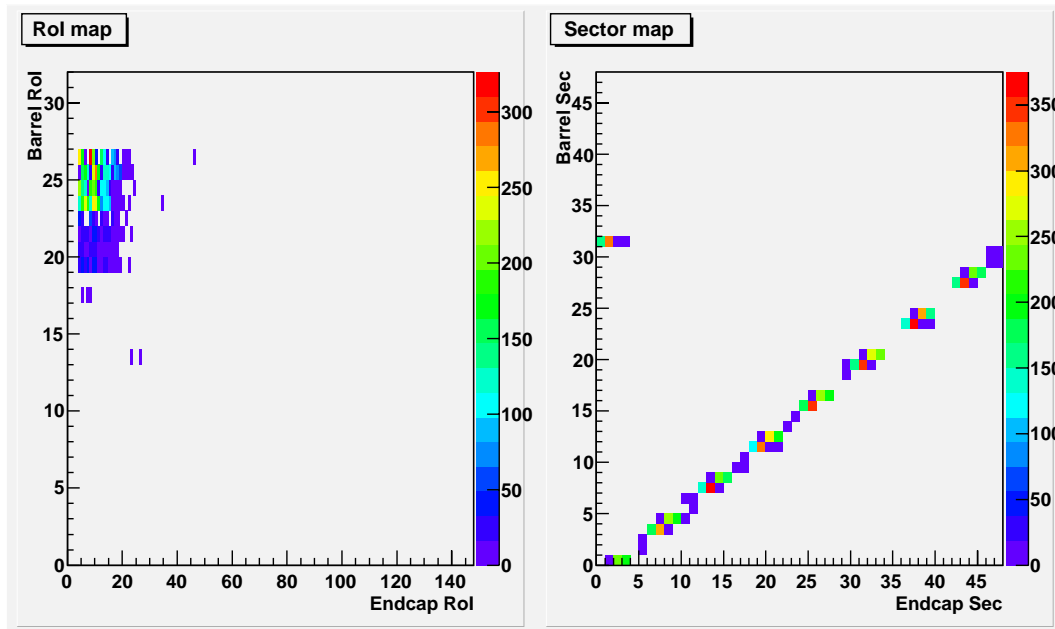


図 5.8: TGC/RPC におけるオーバーラップ

今迄は場所 (RoI) の情報のみを使って TGC と RPC のオーバーラップ領域の処理を行ってきたが、場所と charge と pt の情報を full に使って

- small efficiency loss for real di-muon
- small fake di-muon rate

をより効率よく処理できることが期待できる。

第6章 まとめ

ATLAS 実験のフレームワークである athena を用いたフルシミュレーションのデータを用いた Coincidence Window を作成するアルゴリズムを開発した。磁場の非一様性、必要な window の数が非常に多いことから必要とされる自動生成アルゴリズムを開発した。また、統計量を基にした cut や独立したセルを cut することで、background に強い Window の開発にも成功した。今後、Pt の Resolution の悪い subsector についてはマスクなどの処理を行い、efficiency を大きく下げずに、resolution を上げる方法についての研究が必要である。

次に、作成した window を基に、エンドキャップトリガーにおける様々な性能評価を行った。まず、single mu のシミュレーションデータを用いて、開発した window が要請される性能を満たしていることを確認した。また、統計量の違いによる window の efficiency とその立ち上がりを調べ、window の妥当性の検証を行った。ミュオンのスペクトルから、作成した window によるトリガーレートを計算し、ideal trigger との違いを比較した。バックグラウンドレートの検証を行い、実際の ATLAS 実験でも使用可能な window であることを確認した。

Pt/Charge 依存性を確認し、RPC、TGC でオーバーラップする領域の特定を行った。これにより、今後、効率のよい overlap の処理が可能となることが期待できる。

関連図書

- [1] A.Rimoldi , A.Dell 'Acqua , M.Gallas , A.Nairz , J.Boudreau , V.Tsulaia , D.Costanzo
THE SIMULATION OF THE ATLAS EXPERIMENT: PRESENT STATUS AND OUTLOOK
<http://doc.cern.ch//archive/electronic/cern/others/atlnot/Note/soft/soft-2004-004.doc>
- [2] P.Eerola
The inclusive muon cross-section in ATLAS
- [3] <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/SOFTWARE/OO/simulation/geant4/HowTo.html>
- [4] 片岡洋介 東京大学修士学位論文「ATLAS 実験ミュオントリガーシステムのビームテスト及びシミュレーションによる性能評価」 2004 年 1 月
- [5] 戸塚真義 信州大学修士学位論文「ATLAS 実験ミュオン検出器用トリガーシステム現実的シミュレーターの開発研究」 2002 年 1 月
- [6] 一宮 亮 神戸大学修士学位論文「ATLAS 実験前後方ミュオントリガーシステム用 Sector Logic の開発」 2001 年 1 月
- [7] 緒方 岳 神戸大学修士学位論文「ATLAS 実験前後方ミュオントリガー用 Sector Logic の開発」 2006 年 1 月

謝辞

本研究を行なう機会と適切な指導並びに助言を頂いた指導教官蔵重久弥助教授に深く感謝致します。また本研究において、終始懇切丁寧な御指導と多くの助言を頂きました金谷奈央子氏に深く感謝致します。本研究に際し、多くの助言、ご指導をいただきました、信州大学の長谷川庸司助手、東京大学素粒子物理学国際研究センターの石野雅也助手に感謝致します。多くの助力、助言を与えてくれた、田村勇樹氏、永曽有亮氏、緒方岳氏、に感謝致します。