

修士論文

ATLAS実験における
ミューオントリガー効率の評価

神戸大学大学院 理学研究科

博士前期課程 物理学専攻

粒子物理学研究室 102s106s 岸本 巴

2012年2月24日

Abstract

欧州原子核研究機構 (CERN) において、陽子・陽子衝突型円形加速器 (LHC) を用いた ATLAS 実験が行われている。ATLAS 実験は標準模型で唯一未発見のヒッグス粒子や、超対称性粒子と呼ばれる標準模型を超える新しい粒子の発見を目的としている。2010 年より本格的なデータ取得を開始し、2011 年までで積分ルミノシティ約 5.25fb^{-1} のデータを取得した。

陽子・陽子衝突のようなハドロンコライダーでは構成要素であるクォークやグルーオン同士の散乱によって反応が複雑になる。従って、興味のある物理事象を効率よく取得するトリガーの役割が重要になってくる。本論文ではミューオントリガー効率に注目し、その評価を行った。2011 年の主要なミューオントリガーの効率は 76.9% で概ね期待通りの性能を発揮していた。

さらに、神戸大学が ATLAS 実験開始当初から研究開発を行っているミューオン検出器 TGC に注目し、その性能の評価を行った。TGC はエンドキャップ部におけるレベル 1 ミューオントリガーの発行を担う検出器である。TGC によるレベル 1 トリガー効率は 90% 以上でトリガー発行のタイミングも 99% 以上が LHC のバンチ衝突と同期が取れていた。また、トリガー発行の判断に用いるコインシデンスウィンドウ (CW) と呼ばれる参照表を実データの情報をを用いて作成することでトリガーの性能向上を試みた。その結果、トリガー効率の低下を抑えつつトリガーレートを大幅に削減することが示された。

目次

1	序論	1
2	LHC と ATLAS 実験	2
2.1	LHC 加速器	2
2.1.1	加速器のパラメータと 2011 年における現状	2
2.1.2	検出器	4
2.2	ATLAS 実験が目指す物理	4
2.2.1	Higgs 粒子の探索	5
2.2.2	標準模型の検証	7
2.3	ATLAS 検出器	8
2.3.1	ATLAS 座標系	8
2.3.2	マグネットシステム	9
2.3.3	内部飛跡検出器	10
2.3.4	カロリメータ	12
2.3.5	ミューオンスペクトロメータ	15
3	ATLAS におけるトリガーシステム	18
3.1	レベル 1 トリガー (LVL1)	18
3.2	レベル 2 トリガー (LVL2)	19
3.3	イベントフィルター (EF)	19
3.4	TGC システム	19
3.4.1	TGC の動作原理と構造	19
3.4.2	TGC の配置	21
3.4.3	TGC トリガーシステム	23
3.4.4	クロストークとデクラスタリングルール	25
3.5	2011 の主要なミューオントリガー	26
4	ATLAS におけるミューオンの再構成	27
5	解析におけるデータサンプル	28
5.1	実データについて	28
5.2	シミュレーションサンプルについて	28
6	2011 年 ミューオントリガー効率の評価	31
6.1	$Z \rightarrow \mu\mu$ “Tag and Probe” 法	31
6.2	ミューオンの選別	32
6.3	ミューオントリガー効率	34
6.4	ミューオントリガー効率の系統誤差	45

7	TGC トリガーシステムの評価	48
7.1	2011 年の TGC トリガー	48
7.1.1	TGC トリガー効率	48
7.1.2	TGC トリガー効率の遷移	51
7.1.3	チェンバーの検出効率	53
7.1.4	チェンバーの検出効率の遷移	56
7.1.5	イベントのパイルアップが与える影響	58
7.2	トリガータイミングの評価	60
7.2.1	TGC トリガータイミング	60
7.2.2	TGC トリガータイミングの遷移	62
7.3	コインシデンスウィンドウの評価	63
7.3.1	シミュレーションとの比較	63
7.3.2	アライメントによる影響	65
7.3.3	エレクトロニクスの問題	70
7.4	実データを用いたコインシデンスウィンドウの作成	70
7.4.1	コインシデンスウィンドウの作成方法	71
7.4.2	実データを用いたコインシデンスウィンドウの評価	73
8	まとめ	80

付録

A	参照図と参照表	1
A.1	チェンバーの検出効率	1
A.2	チェンバーの検出効率の遷移	10
A.3	コインシデンスウィンドウにおける η, ϕ 方向の差異	14
A.4	Extrapolator により見積もられた residual	15
A.5	カロリメータによるトリガーパターン	17
B	Z ボゾン生成断面積の測定	18
B.1	生成断面積測定の概要	18
B.2	各効率のスケールファクター	18
B.3	測定における fiducial regions	27
B.4	信号の選別効率	28
B.5	アクセプタンスと信号の選別効率のまとめ	29
B.6	生成断面積測定のまとめ	31

1 序論

素粒子標準模型とは素粒子物理学における三つの基本的な力である強い力、弱い力、電磁力を記述する理論である。標準模型は 1970 年代に構築され、1980 年以降様々な実験によりその検証が行われてきた。その結果、標準模型が我々の世界を驚くほど良く記述していることが確かめられた。その標準模型において唯一未発見の粒子が Higgs 粒子である。標準模型ではゲージ対称性が成立し、3 つの力を媒介する粒子の質量がゼロであることが要請される。しかし、弱い力を媒介する W 粒子と Z 粒子は質量を持つことが実験的に確かめられている。そこでこれらの粒子に質量を与える “Higgs 場” と呼ばれるモデルが提唱された。Higgs 場を直接検出することは出来ないが、質量の大きな粒子を介して場に揺らぎを与えると、その揺らぎが Higgs 粒子として観測されるとしている。

スイスのジュネーブ近郊に建設された Large Hadron Collider(LHC) はこの Higgs 粒子の探索を主な目的としている。LHC は周長約 27km、最高重心系エネルギーが 14TeV の陽子・陽子衝突型円形加速器である。約 10 年間の準備期間を経て 2010 年から本格的な運転が開始した。LHC に設置されている検出器の一つである ATLAS も LHC の運転開始と共にデータ取得を開始し、現在約 5.25fb^{-1} のデータ取得に成功している。

上記の Higgs 粒子の探索においてミューオントリガーが重要な役割を担っている。Higgs 粒子の探索は崩壊に伴う粒子を観測し、その親粒子を同定することで行われる。Higgs 粒子が 2 つの Z ボゾンに崩壊した後、各 Z ボゾンがさらに 2 つのレプトンに崩壊する $H \rightarrow ZZ \rightarrow llll$ というチャンネルでは、終状態としてミューオンを含んでいる可能性がある。従ってクォークやグルーオン同士の散乱等による膨大な背景事象の中からこのミューオンをいかに効率よくトリガーするかということが重要になってくる。これは Higgs 粒子に限らず超対称性粒子などの探索においても同じである。従って、本研究では実際の陽子・陽子衝突によるデータからミューオンのトリガー効率を計算し、検出器もしくはソフトウェアの性能評価を行った。本論文は以下の構成で成り立つ。

- 第 2 章：LHC の現状と ATLAS 検出器について述べる。
- 第 3 章：ATLAS におけるトリガーの仕組みについて述べる。特に TGC と呼ばれるミューオン検出器のトリガーシステムについて詳しく説明する。
- 第 4 章：トリガー効率の評価には offline muon と呼ばれる再構成されたミューオンの情報を用いるため、ここでミューオンの再構成について述べる。
- 第 5 章：解析に用いられる実データとシミュレーションサンプルの取り扱いについて述べる。
- 第 6 章：2011 年に取得されたデータを用いてミューオントリガー効率の評価を行う。
- 第 7 章：この章ではレベル 1 トリガーを発行する TGC に注目し、その評価を行う。また、実データを用いたコインシデンスウィンドウの作成とその評価についても述べる。
- 第 8 章：本論文のまとめとする。

2 LHC と ATLAS 実験

2.1 LHC 加速器

LHC(Large Hadron Collider) とはスイス・ジュネーブの近郊にある欧州原子核研究機構 (CERN) の地下 100m に建設された世界最大の陽子・陽子衝突型の円形加速器である。衝突による重心系エネルギーは 14TeV、最高ルミノシティは $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ の予定であり、テラスケールにおける新たな物理現象が期待されている。

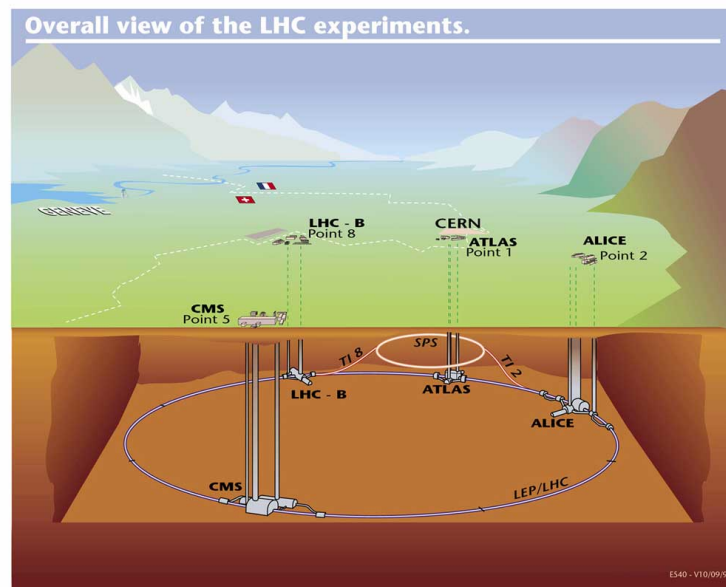


Fig. 2.1 LHC 全体図

陽子の質量は電子の質量の約 2000 倍と大きいので、加速によって生じるシンクロトロン放射のエネルギー損失が電子に比べて少ない。そのため、LHC では重心系エネルギー 14TeV という高エネルギーを実現することができる。しかし、陽子衝突は陽子の構成粒子であるクォーク、グルーオン同士の散乱によって反応が複雑になり、かつ衝突が 25ns 間隔という高頻度で起こることから、膨大な量の背景事象が現れる。そのため背景事象をよく理解し、興味あるイベントを効率よく選び出すことがハドロンコライダーにおいては重要である。

2.1.1 加速器のパラメータと 2011 年における現状

LHC では約 10^{11} 個の陽子を含むバンチと呼ばれる状態になったビームを、各検出器が設置されている 4 つの衝突点で衝突させる。衝突頻度は 40.08MHz で、最大ルミノシティ $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ の際には、1 バンチ当たり平均 23 回の陽子衝突が予想されている。表 2.1 に LHC の所期の性能を表すパラメータを示す。

Table 2.1 LHC の設計パラメーター

Parameter	Design Value
主リング周長	26.55 km
重心系エネルギー (陽子+陽子)	7.0 TeV + 7.0 TeV
ルミノシティ	$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$
ルミノシティ寿命	10 時間
入射エネルギー	450GeV
バンチ間隔	24.95 nsec
1 バンチあたりの陽子数	10^{11} 個
バンチの長さ	75 mm
バンチ数	2835 個
バンチ衝突当たりの陽子衝突数	23
衝突点のビーム半径	$16\text{ }\mu\text{m}$
衝突角度	$200\text{ }\mu\text{rad}$

2011 年は重心系エネルギー 7TeV で運転を行った。図 2.2 と図 2.3 はそれぞれルミノシティとバンチ衝突当たりの平均陽子反応数 $\langle\mu\rangle$ の一日当たりの最高値の遷移を表している。ルミノシティの増加に伴い $\langle\mu\rangle$ も増加し、最高ルミノシティは $3.65 \times 10^{33}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ となった。また図 2.4 は積分ルミノシティの遷移を表す。2011 年 10 月 31 日までに、LHC では 5.61fb^{-1} のデータ量を供給した。このうち ATLAS では 5.25fb^{-1} のデータ取得に成功した。

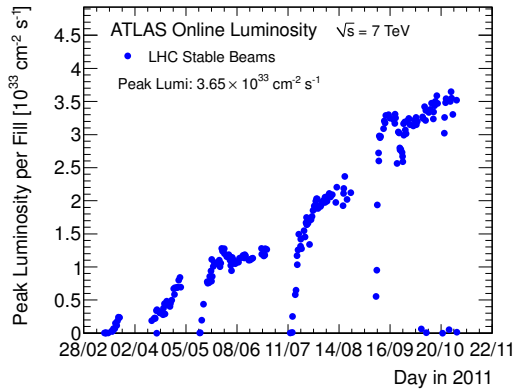


Fig. 2.2 最高ルミノシティの遷移

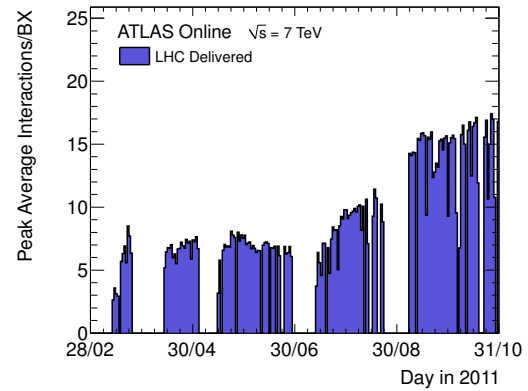


Fig. 2.3 最高“平均陽子反応数”の遷移

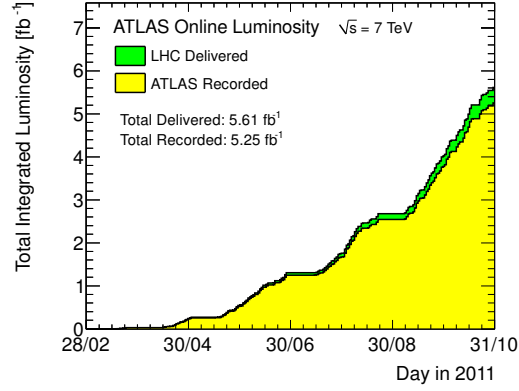


Fig. 2.4 積分ルミノシティの遷移

2.1.2 検出器

LHC には ATLAS、CMS、ALICE、LHCb と呼ばれる 4 つの検出器が設置されている。

- ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)
 - Higgs 粒子と超対称性粒子 (SUSY) の探索を主な目的とした汎用検出器で、2.2 以降で詳細に述べる。
- CMS (Compact Muon Solenoid)
 - ATLAS と同様に汎用検出器で主に Higgs 粒子、超対称性粒子 (SUSY) の探索を目的としている。
- ALICE (A Large Ion Collider Experiment)
 - 重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の究明を目的としている。
- LHCb (Large Hadron Collider beauty)
 - b クォークを含む B 粒子の CP 非保存などの稀崩壊現象を観測することにより、標準理論を超える物理の探索を目的としている。

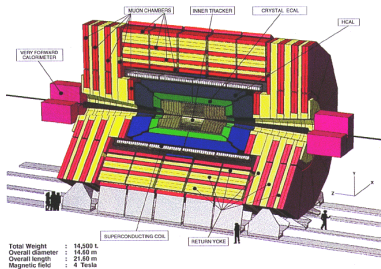


Fig. 2.5 CMS 検出器

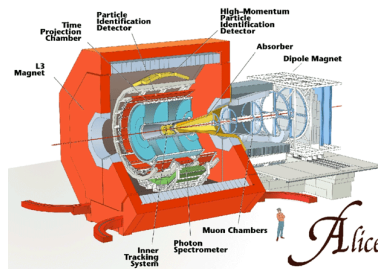


Fig. 2.6 ALICE 検出器

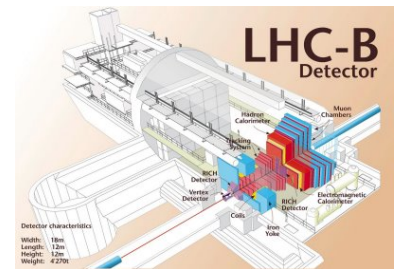


Fig. 2.7 LHCb 検出器

2.2 ATLAS 実験が目指す物理

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

2.2.1 Higgs 粒子の探索

標準模型 Higgs 粒子

現在の素粒子物理学の基礎をなしているのが素粒子標準模型である。標準模型は素粒子とその相互作用を記述する理論で、様々な実験により精密に検証されている。図 2.8 に示されているのが標準模型に現れる粒子で、クォーク、レプトン、力を媒介するゲージボゾン、質量の起源となる Higgs 粒子から成る。この内、Higgs 粒子が唯一未発見の粒子である。Higgs 粒子は素粒子標準模型の他の粒子に質量を与える粒子だと考えられており、LHC で生成されることが期待されている。

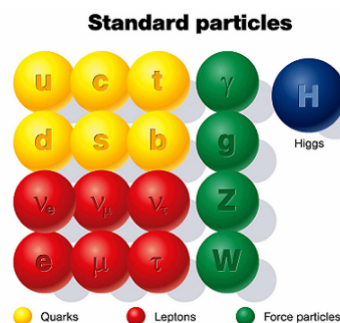


Fig. 2.8 標準模型粒子

Higgs 粒子の生成過程

Higgs 粒子はトップクォークや W,Z 粒子等の重い粒子と結合しやすいため、LHC では主に以下の 4 つの生成過程が予想されている。図 2.9 に Higgs 粒子生成のファインマンダイアグラム、図 2.10 に生成断面積と Higgs 粒子の質量との関係を示す。

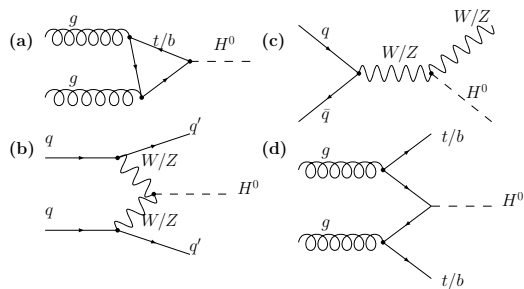


Fig. 2.9 Higgs 粒子生成のファインマンダイアグラム

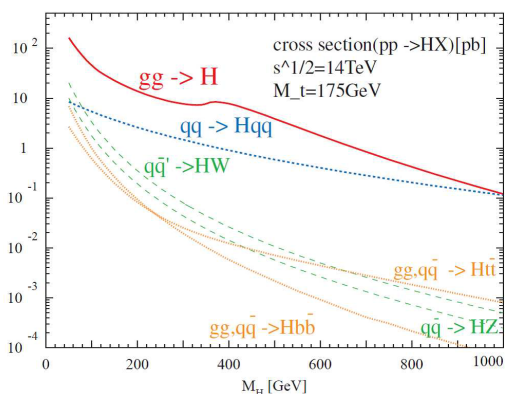


Fig. 2.10 Higgs 粒子の生成断面積

- $gg \rightarrow H$ (gluon fusion (a))

グルーオン同士の反応によって生じるトップクォークやボトムクォークのループを介した反応で、最も生成断面積が大きい。その反面、Higgs 粒子の崩壊に伴う粒子以外に反応を特徴づける粒子が存在せず背景事象との選別が難しい。従って、 $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ のような Higgs の質量が再構成出来る崩壊が主な解析チャンネルである。

- $qq \rightarrow qqH$ (vector boson fusion (b))

クォークから放出されたゲージボゾンから Higgs 粒子が生成される過程。生成断面積は比較的大きく、2

本のジェットが観測されるため事象選別が比較的行き易い。

- $q\bar{q} \rightarrow W/Z H$ (W/Z associated production (c))

クォークの対消滅で生成されたゲージボゾンから、Higgs 粒子が生成される過程。終状態にゲージボゾンが観測されるという特徴があるので、Higgs 粒子の生成数は少ないが事象選別は行き易い。

- $g\bar{g} \rightarrow t\bar{t} H$ (top associated production (d))

対生成されたトップクォークから Higgs 粒子が生成される過程。断面積は小さいが、終状態にトップクォーク対を含んでいるため事象選別が行い易い。また、トップクォークと Higgs 粒子の結合定数を測定出来るという利点もある。

Higgs 粒子の崩壊モード

以下に予想される Higgs 粒子の主な崩壊モードを示す。図 2.11 は Higgs 粒子の質量に対する崩壊分岐比を表す。

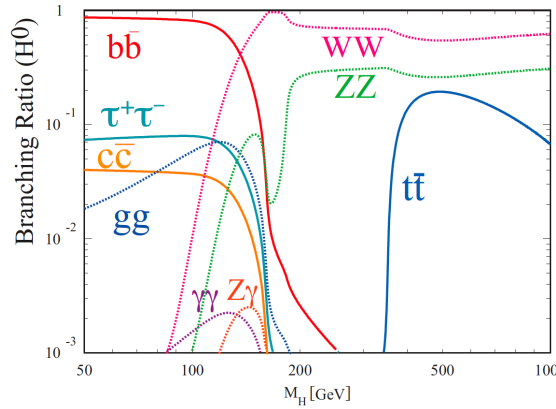


Fig. 2.11 Higgs 粒子の崩壊分岐比

- $H \rightarrow \tau\tau$ ($M_H < 150\text{GeV}$)

Higgs 粒子が軽い場合に有効とされているモードである。 $\gamma\gamma$ よりも崩壊分岐比が高く、vector boson fusion との組み合わせで背景事象と区別することができる。 τ の崩壊にニュートリノを伴うため、横消失エネルギー E_T^{miss} の精密な測定が重要である。

- $H \rightarrow \gamma\gamma$ ($M_H < 150\text{GeV}$)

150 GeV 以下の質量領域では $b\bar{b}, c\bar{c}$ への崩壊が支配的であるが、これらは陽子衝突による QCD 背景事象と区別することが難しい。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ を観測することで不変質量 $M_{\gamma\gamma}$ から探索を行う。従って、電磁カロリメーターの測定精度が重要となる。

- $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ ($150\text{GeV} < M_H < 180\text{GeV}$)

170 GeV 付近の質量領域では WW への崩壊が支配的となる。終状態にニュートリノを含むために Higgs 粒子の質量を再構成することはできない。2つのレプトンの横運動量 P_T と2つのニュートリノに由来する E_T^{miss} から横方向質量を測定し Higgs 粒子の探索を行う。

- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($180\text{GeV} < M_H < 800\text{GeV}$)

Higgs 粒子の質量が比較的重い場合に有効なモードである。4つのレプトンから Higgs 粒子の質量を再構成でき、背景事象も少ないことから gold-plated channel と呼ばれる。

- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($400\text{GeV} < M_H$)

400 GeV 以上の質量領域では、このモードの崩壊分岐比は $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ の 6 倍である。 $\nu\nu$ の不変質量は再構成出来ないため、横消失エネルギー E_T^{miss} の精密な測定が重要である。

- $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow lljj$ ($600\text{GeV} < M_H$)

この質量領域では、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ に比べ $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ は 150 倍、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow lljj$ は 20 倍もの崩壊分岐を持つ。Vector boson fusion を組み合わせて解析することで背景事象を取り除くことができる。

Higgs 粒子探索の現状

以下に 2011 年の Higgs 粒子探索の現状を示す。図 2.12、2.13 は横軸が Higgs 粒子の質量、縦軸が実際の観測から求めた Higgs 粒子の生成断面積の 95%信頼度における上限値を標準模型の予想による生成断面積で割った値を表す。従ってこの値が 1 以下の領域は標準模型 Higgs が排除されたことを意味する。図 2.12 は各崩壊モードで場合分けをした場合、図 2.13 は全ての崩壊モードを組み合わせた結果を示している。図 2.13 の黒線 (Observed) は実際の観測による値を示しているのに対し、黒の点線 (Expected) は Higgs 粒子が存在しない場合の理論的予想を示している。現在 ATLAS では、112.7~115.5 GeV, 131~237 GeV, 251~468 GeV の領域を 95%の信頼度で排除している。

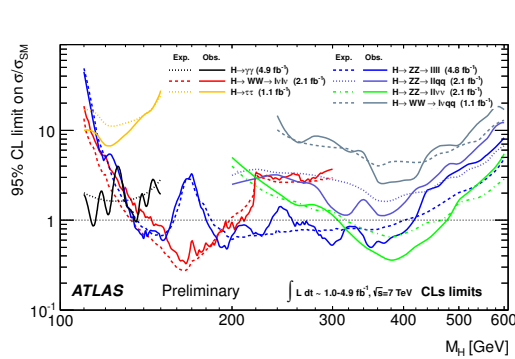


Fig. 2.12 各崩壊モードに対する Higgs 質量の排除領域

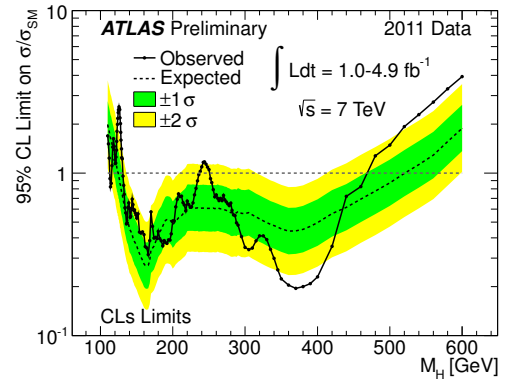


Fig. 2.13 Higgs 質量の排除領域

2.2.2 標準模型の検証

2.2.1 で述べた Higgs 粒子など、新粒子の探索において標準模型の検証は欠かすことができない。背景事象を理解することは標準模型を理解することであり、生成断面積の精密測定などが行われている。図 2.14 は各標準模型粒子に対する生成断面積の実測値と理論による予想値を示している。現在、実測値と理論値の矛盾は観測されていない。この内、Z ボゾンの生成断面積の測定については付録.B で述べる。

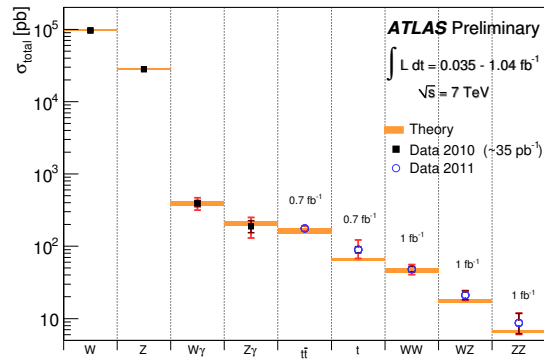


Fig. 2.14 標準模型粒子の生成断面積測定まとめ

2.3 ATLAS 検出器

以下に ATLAS 検出器の全体図を示す。ATLAS 検出器は、直径 22m、高さ 44m の円筒形で、総重量は 7000t である。各粒子の透過性の差異を利用して粒子を識別する。内側から内部飛跡検出器、カロリメータ、ミュオンスペクトロメータの順で設置されており、検出器の間には超伝導磁石が設置されている。

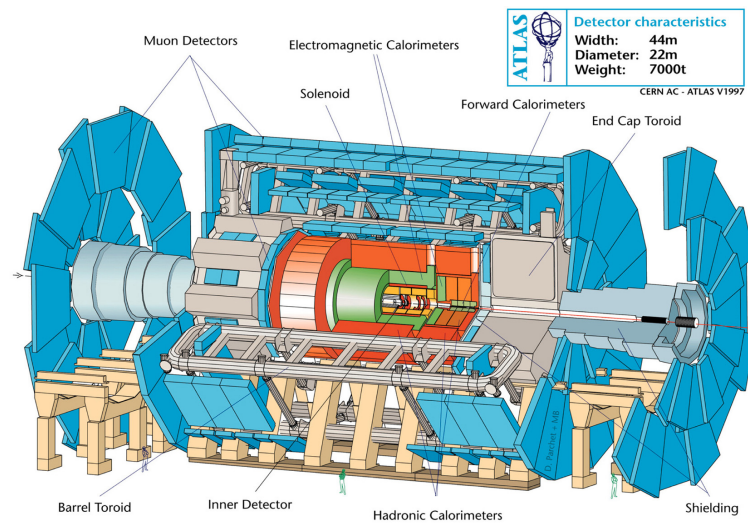


Fig. 2.15 ATLAS 検出器

2.3.1 ATLAS 座標系

ATLAS 実験で用いられる座標系を図 2.16 に示す。

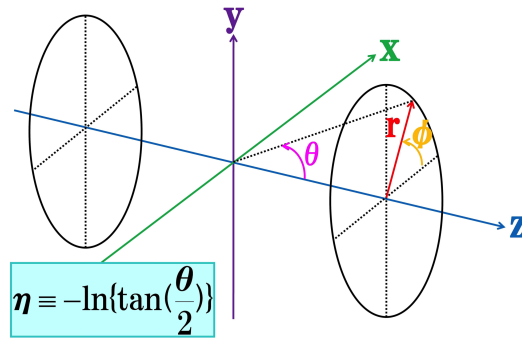


Fig. 2.16 ATLAS の座標系

ビームの衝突点を原点に取り、LHC のビーム軸方向を z 軸とする。 z 軸と直交する面内で、LHC のビームリングの中心方向を x 軸、天頂方向を y 軸とする。このとき衝突点に対して $+z$ 方向を A-side、 $-z$ 方向を C-side と呼ぶ。また円筒形の ATLAS 検出器に対し、図 2.16 に示す通り (r, θ, ϕ) を定義し、 θ と ϕ はそれぞれ、 $0 \leq \theta \leq \pi$ 、 $0 \leq \phi \leq 2\pi$ の範囲の値を用いる。さらに、擬ラピディティ $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$ を定義する。ハドロンコライダーでは散乱断面積が η に対してほぼ一定なのでこの量を多く用いる。また、 $|\eta| \leq 1.05$ の円筒の筒にあたる領域をバレル部、 $|\eta| > 1.05$ の領域をエンドキャップ部と呼ぶことにする。

2.3.2 マグネットシステム

ATLAS のマグネットシステムは 4 つの超伝導磁石からなる。外観を図 2.17 に示す。内側に位置するのが超伝導ソレノイド磁石、それを覆うようにして 3 つ設置されているのが超伝導トロイド磁石である。

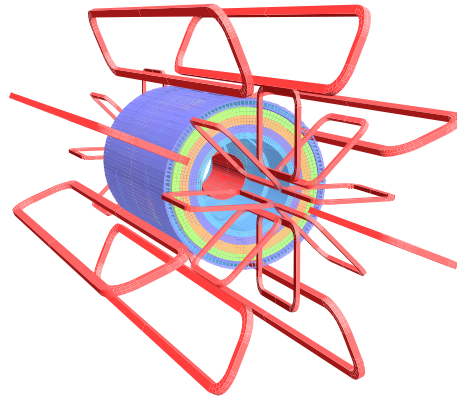


Fig. 2.17 ATLAS マグネットシステムの外観図

超伝導ソレノイド磁石

超伝導ソレノイド磁石は次項で述べる内部飛跡検出器において荷電粒子の横運動量 P_T を測定する目的で、内部飛跡検出器とカロリメータの間に設置されている。 z 方向の長さは 5.3m、直径 2.4m、径方向の厚さ 45mm の円筒形をしており、 z 方向に約 2T の磁束密度を提供する。超伝導ソレノイド磁場の写真を図 2.18 に示す。

超伝導トロイド磁石

超伝導トロイド磁石はバレル部に一つ、エンドキャップ部に 2 つで計 3 つが設置されており、ミューオンの

横運動量 P_T を測定することを目的としている。バレル部超伝導トロイド磁石はカロリメータ覆うように設置されており、長さ 25.3m、内径 9.4m、外径 20.1m で ϕ 方向に約 0.5T の磁束密度を提供する。バレル部超伝導トロイド磁石の写真を図 2.20 に示す。エンドキャップ部超伝導トロイド磁石は最も内側のミュオンスペクトロメータの外側に設置されており、長さが 5.0m、内径 1.65m、外径 10.7m でバレル部と同様に ϕ 方向に約 1.0T の磁束密度を提供する。エンドキャップ部超伝導トロイド磁石の写真を図 2.19 に示す。



Fig. 2.18 超伝導ソレノイド磁石

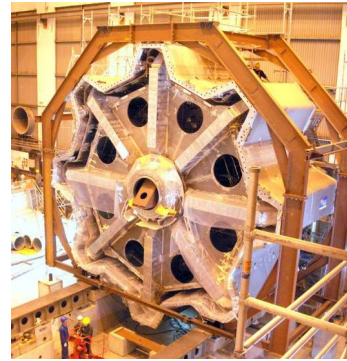


Fig. 2.19 エンドキャップ部超伝導トロイド磁石

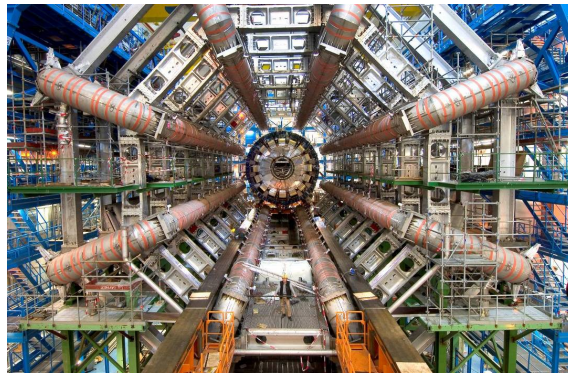


Fig. 2.20 バレル部超伝導トロイド磁石

2.3.3 内部飛跡検出器

ATLAS で用いられている内部飛跡検出器の外観を図 2.21 に、 r - z 平面における各検出器設置位置を図 2.22 に示す。内部飛跡検出器はピクセル検出器 (Pixel)、シリコン・トラッカー (Semi-Conductor Tracker(SCT))、遷移輻射トラッカー (Transition Radiation Tracker(TRT)) の 3 つで構成されている。内部飛跡検出器は荷電粒子の飛跡と発生点 (vertex) の再構成、横運動量 P_T を測定することを目的とし、 P_T は式 2.1 の精度で求まる。

$$\frac{\sigma_{P_T}}{P_T} = 0.05 \times P_T(\text{GeV}) \oplus 1\% \quad (|\eta| < 2.5) \quad (2.1)$$

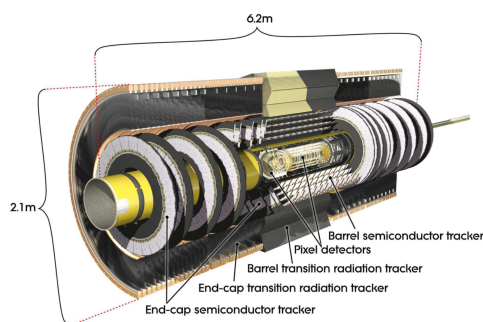


Fig. 2.21 内部飛跡検出器の外観図

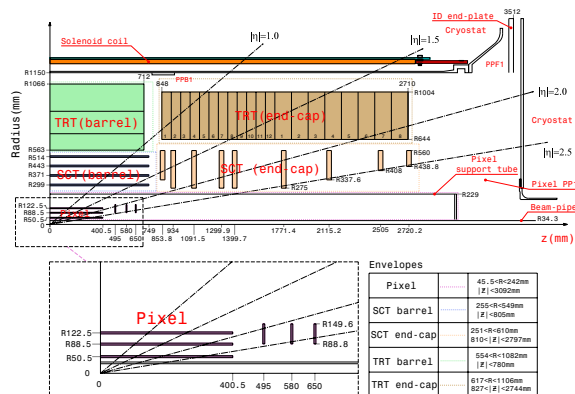


Fig. 2.22 内部飛跡検出器の r-z 断面図

ピクセル検出器 (Pixel)

Pixel は $r < 15\text{cm}$ の衝突点から最も近い領域に設置されている検出器である。 $50\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ または、 $50\mu\text{m} \times 600\mu\text{m}$ を 1つのピクセルとし、1つのモジュールは 47,268 個のピクセルからなる。バレル部、エンドキャップ部共に 3 層の構造となっており、総チャンネル数は 8040 万チャンネルとなる。位置分解能は r - ϕ 方向で $10\mu\text{m}$ 、 z 方向で $115\mu\text{m}$ と高い精度を有する。図 2.23 にピクセルモジュールの構造、図 2.24 にバレル部におけるピクセル検出器の写真を示す。

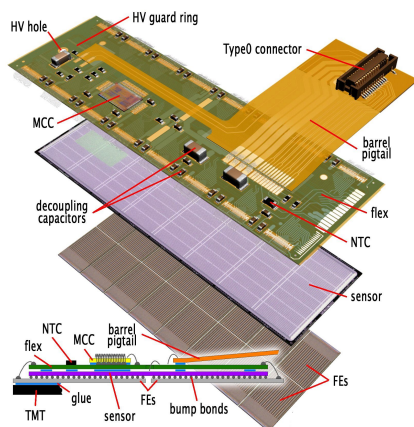


Fig. 2.23 ピクセルモジュールの構造

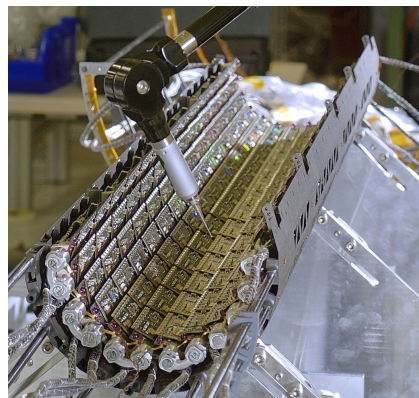


Fig. 2.24 バレル部におけるピクセル検出器

シリコン・トラッカー (SCT)

ピクセル検出器の外側に設置されている。一枚のシリコンセンサーは $80\mu\text{m}$ 間隔で読み出しストリップが備わっている。一つの SCT モジュールは 2 層のシリコンセンサーからなり、2 層を 40mrad ずらして上下に設置することで 2 次元読み出しが可能となる。SCT は全 4088 モジュールからなりこの内 2112 モジュールがバレル部に 4 層で設置され、残りがエンドキャップ部に 9 層で設置されている。位置分解能は r - ϕ 方向で $17\mu\text{m}$ 、 z 方向で $580\mu\text{m}$ である。図 2.25 にバレル部の SCT モジュールの写真、図 2.26 にバレル部の SCT の全体の写真を示す。

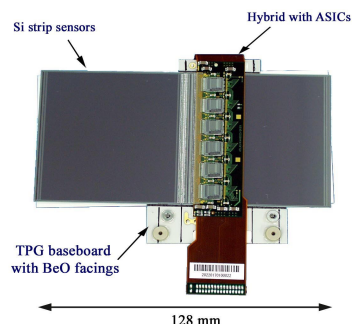


Fig. 2.25 バレル部用シリコンモジュール

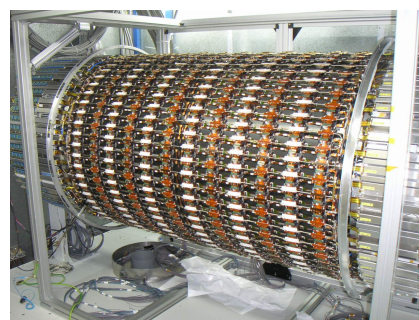


Fig. 2.26 バレル部におけるシリコン・トラッカー

遷移輻射トラッカー (TRT)

TRT はより精密な飛跡測定を行う目的でシリコン・トラッカーの外側に設置されている。TRT は遷移輻射の原理を用いたストロー型のガス増幅検出器である。遷移輻射とは荷電粒子が誘電率の異なる 2 つの物質を通るときに境界面において電磁的な放射をする現象で、放射されるエネルギーは荷電粒子の $\gamma=E/m$ に比例する。これにより電子と他の荷電粒子を識別することも可能である。ストローの直径は 4mm で中心に $30\mu\text{m}$ の金メッキされたタングステン製のワイヤーが張ってある。バレル部はビーム軸と平行に 52,444 本のストローチューブが 73 層、エンドキャップ部は経方向に 122,880 本が 160 層並べられており位置分解能は $170\mu\text{m}$ である。図 2.27 にバレル部の遷移輻射トラッカーの写真を示す。

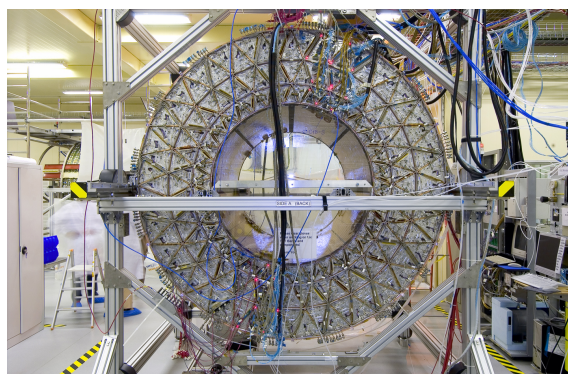


Fig. 2.27 バレル部遷移輻射トラッカー

2.3.4 カロリメータ

ATLAS におけるカロリメータの全体像を図 2.28 に示す。カロリメータは $|\eta| < 4.9$ の領域をカバーしており、電子や γ 、ジェットなどのエネルギー、位置の測定を目的としている。カロリメータは電磁カロリメータ (EM) と、バレル部タイルハドロンカロリメータ (Tile)、エンドキャップ部 LAr ハドロンカロリメータ (HEC)、LAr フォワードカロリメータ (FCal) からなる。図 2.29 は η に対する各カロリメータの吸収長を表している。

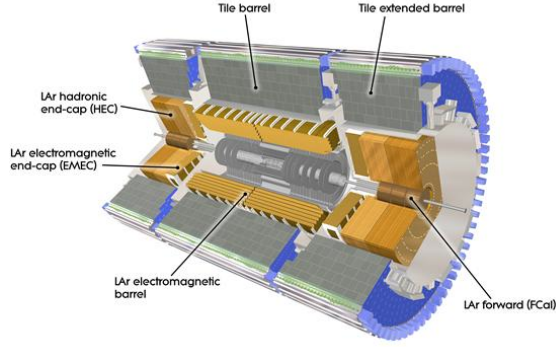


Fig. 2.28 カロリメータの全体像

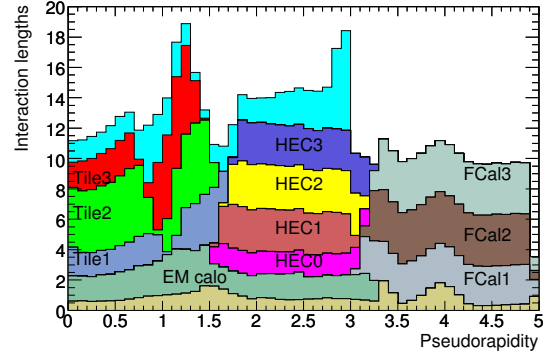


Fig. 2.29 各カロリメータの吸収長

電磁カロリメータ (EM)

電磁カロリメータは、 $|\eta| < 1.475$ のバレル部と $1.375 < |\eta| < 3.2$ のエンドキャップ部からなり、電子や γ の測定を目的としている。バレル部、エンドキャップ部共に鉛の吸収体と放射線耐性に優れる液体アルゴンからなるサンプリングカロリメータである。特徴は ϕ 方向の不感領域を無くすために、図 2.30 に示すように吸収体がアコーディオン状をしていることである。また、電磁カロリメータの写真を 2.31 に示す。エネルギーの分解能は以下の式 2.2 で表され、 $E=100\text{GeV}$ の電子に対しては 1% の分解能で測定可能である。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10.1 \pm 0.4\%}{\sqrt{E[\text{GeV}]}} \oplus (0.2 \pm 0.1)\% \quad (2.2)$$

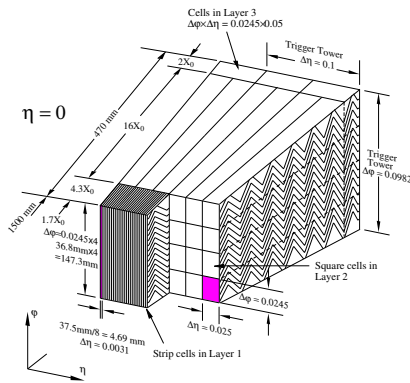


Fig. 2.30 電磁カロリメータの構造スケッチ



Fig. 2.31 電磁カロリメータの写真

バレル部タイルハドロンカロリメータ (Tile)

ハドロンカロリメータはジェットの測定を目的とし、 $\eta < 1.7$ のバレル部に設置されているのが Tile である。Tile は吸収体の鉄とタイル型のシンチレータからなる。構造のスケッチを図 2.32 に示す。エネルギー分解能は以下の式 2.3 で表される。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{56.4 \pm 0.4\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus (5.5 \pm 0.1)\% \quad (2.3)$$

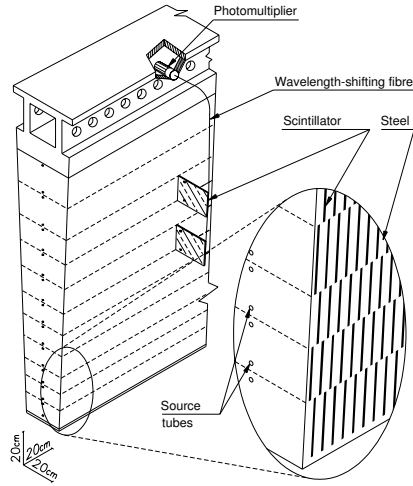


Fig. 2.32 タイルハドロンカロリメータの構造スケッチ

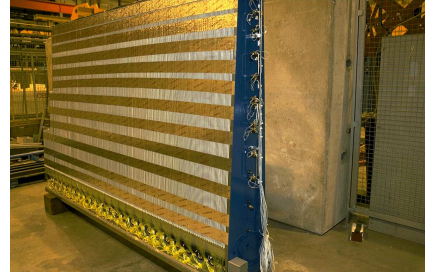


Fig. 2.33 タイルハドロンカロリメータの写真

エンドキャップ部 LAr ハドロンカロリメータ (HEC)

HEC はハドロンカロリメータの中でも $1.5 < |\eta| < 3.2$ の領域に設置されている。この領域は放射線強度が高いことから液体アルゴンが用いられ、吸収体には銅が使われている。エンドキャップ部 LAr ハドロンカロリメータの断面図を図 2.34 に示す。エネルギー分解能は以下の式 2.4 で表される。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{70.6 \pm 1.5\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus (5.8 \pm 0.2)\% \quad (2.4)$$

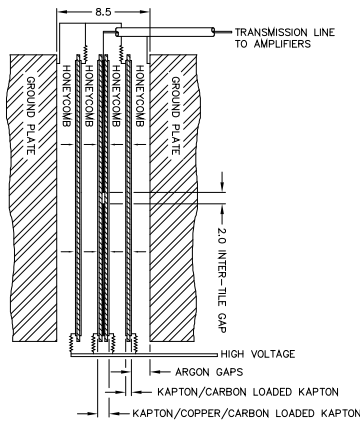


Fig. 2.34 LAr ハドロンカロリメータの構造スケッチ

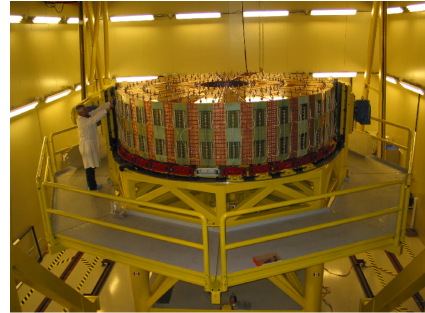


Fig. 2.35 LAr ハドロンカロリメータの写真

LAr フォワードカロリメータ (FCal)

FCal は $3.1 < \eta < 4.9$ の範囲に設置されており、図 2.36 に示すとおり電磁カロリメータの FCal1、ハドロンカロリメータの FCal2,3 からなる。FCal は高い放射線強度に対応するため特殊なカロリメータの構造をしている。図 2.37 に示すように、銅板に開けた穴にロッドを通しこの隙間に液体アルゴンを満たしている。FCal1 ではロッドに銅、FCal2,3 ではタングステンが用いられている。エネルギー分解能は以下の式 2.5 で表される。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{94.2 \pm 1.6\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus (7.5 \pm 0.4)\% \quad (2.5)$$

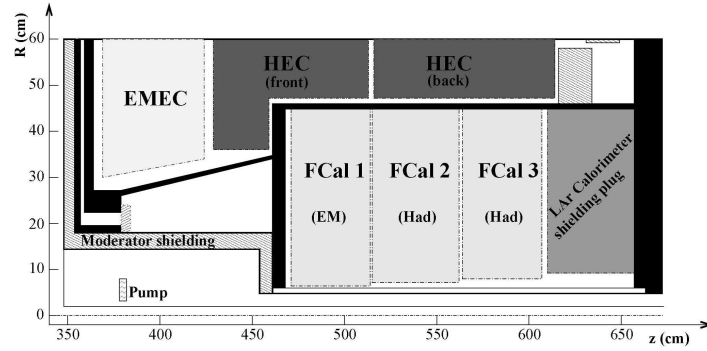


Fig. 2.36 LAr フォワードカロリメータの配置図

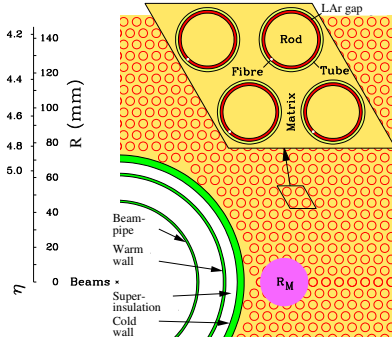


Fig. 2.37 LAr フォワードカロリメータの構造スケッチ



Fig. 2.38 LAr フォワードカロリメータの写真

2.3.5 ミューオンスペクトロメータ

ミューオンスペクトロメータはATLAS 検出器の最も外側に位置し、ミューオンの測定を目的とする。ミューオンは $2.2\mu\text{s}$ と比較的長寿命で物質の透過力も強いことから、ミューオンスペクトロメータまで到達することが出来る。ミューオンスペクトロメータは位置の精密測定を行う Monitor Drift Tube(MDT) と Cathod Strip Chamber(CSC)、トリガーの発行を担う Rasistive Plate Chamber(RPC) と Thin Gap Chamber(TGC) からなる。ミューオンスペクトロメータで測定される P_T の分解能は、1TeV のミューオンに対して約 $\sigma_{P_T}/P_T \simeq 7\%$ である。ミューオンスペクトロメータの全体図を図 2.39、検出器の z - y 断面図を図 2.40 に示す。また TGC については 3.4 で詳細に述べるためここでは割愛する。

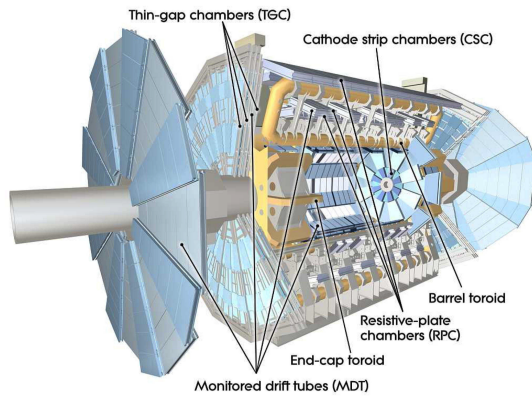


Fig. 2.39 ミューオンスペクトロメータの全体図

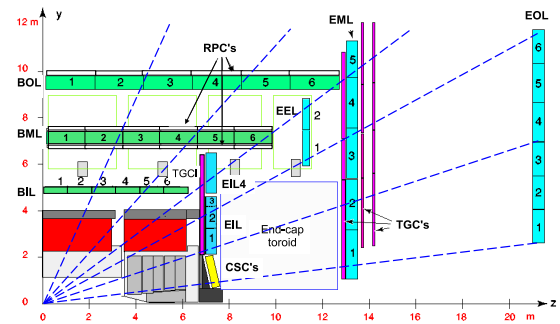


Fig. 2.40 ミューオンスペクトロメータの z-y 断面図

Monitor Drift Tube(MDT)

MDT はバレル部とエンドキャップ部の広い領域に多数設置され、それぞれミューオンの z 方向、 r 方向の位置測定を目的としている。図 2.40 の緑と青で塗られた領域が MDT を指し、各層をステーションという呼び方をする。MDT は直径約 30mm のカソードチューブに直径約 50 μ m のアノードワイヤーを張った構造をしている。荷電粒子が通過することで電子の雪崩増幅がおこり信号が読み出される仕組みとなっている。位置分解能は 60 μ m、総チャンネル数は約 30 万チャンネルである。MDT の構造のスケッチを図 2.41 に示す。

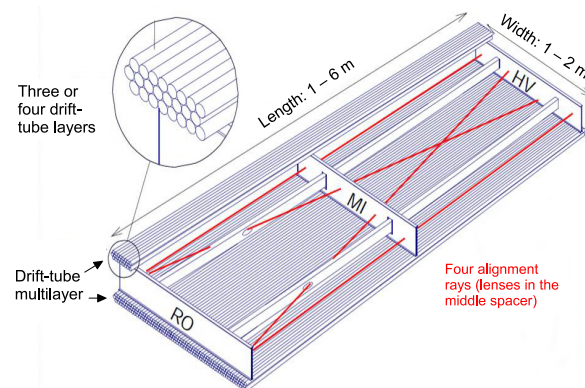


Fig. 2.41 MDT の構造

Cathode Strip Chamber(CSC)

CSC は放射線の多い $2.1 < |\eta| < 2.7$ の領域に設置されている。CSC は Muti Wire Proportional Chamber(MWPC) の一種である。その構造を図 2.42 に示す。CSC は平行に並ぶ陰極ストリップで挟まれたガスギャップに、ストリップと垂直になるように陽極ワイヤーを張った構造となっている。ドリフト時間は 30nsec 以下で、位置分解能は 45 μ m である。

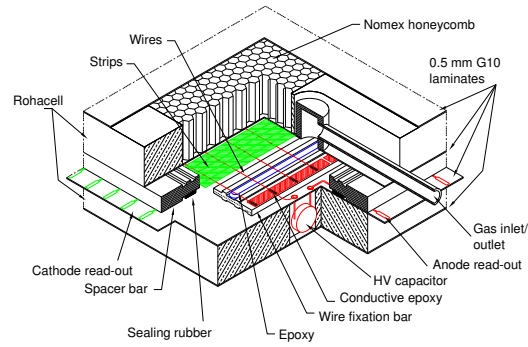


Fig. 2.42 CSC の構造

Resistive Plate Chamber(RPC)

RPC は $|\eta| < 1.05$ のバレル部のミュオントリガーの発行を主な目的としている。位置情報は直交したストリップによる ϕ - z 方向の 2 次元読み出しで行われ、MDT では測定されない ϕ 方向の位置を測定することが出来る。総読み出しチャンネル数は約 37 万チャンネルである。RPC は 2 層のガスギャップを 1 ステーションとして計 3 ステーションが設置されている。RPC は平行電極板を使用したワイヤーの存在しないガスチェンバーで、 ϕ 方向の位置分解能は 5-10mm である。RPC の構造を図 2.43 に示す。

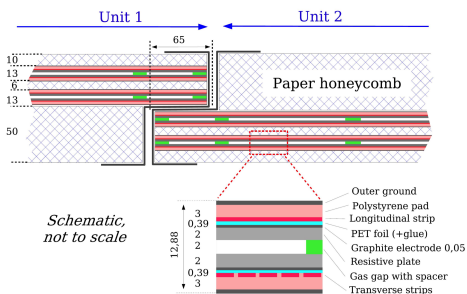


Fig. 2.43 RPC の構造図

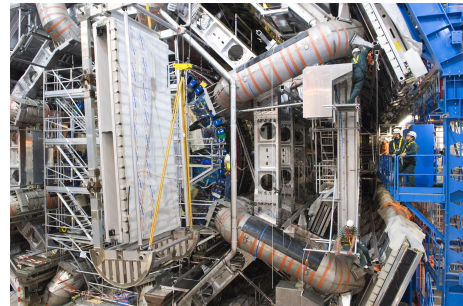


Fig. 2.44 RPC のインストールの様子

3 ATLAS におけるトリガーシステム

ATLAS では膨大な背景事象から興味あるイベントを効率よく取得するために 3 段階のトリガーを設置している。ハードウェアでトリガーの判定を行う Level1(L1)、ソフトウェアでトリガーの判定を行う Level2(L2), Event Filter(EF) からなり、L2 と EF はまとめて High Level Trigger(HLT) と呼ばれる。ATLAS のトリガーは、 μ , e/γ , τ , jets, E_T^{miss} , E_T sum に感度があるように設計されている。そして、最高ルミノシティ時には 1GHz になるイベントレートを最終的に 200Hz まで落とすことを目的としている。以下、各トリガーレベルにおけるトリガーについて簡単に述べ、7 章で評価対象とする TGC システムに関しては 3.4 で詳細に述べる。図 3.1 に ATLAS トリガーシステムの概要を示す。

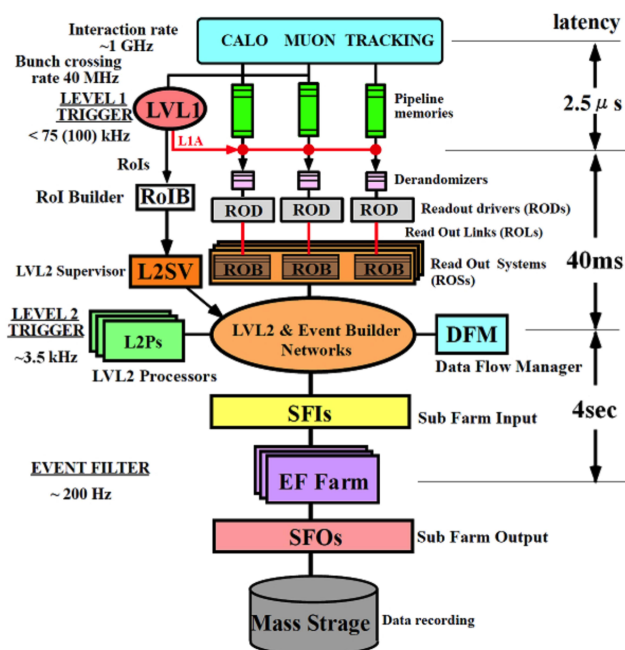


Fig. 3.1 ATLAS 実験におけるトリガーシステム及び DAQ システム図

3.1 レベル 1 トリガー (LVL1)

レベル 1 トリガーは全てハードウェアで処理が行われ、1GHz のイベントレートを 75kHz に落とすことを目的としている。図 3.2 に示される通りレベル 1 トリガーの判定にはカロリタもしくはミューオンスペクトロメータ (RPC, TGC) の情報を用いる。各トリガーに設けられた閾値を超えたものが Central Trigger Processor(CTP) に送られ最終的なレベル 1 トリガーの判定を行う。レベル 1 トリガーをパスした場合には、Region Of Interest(RoI) と呼ばれる粒子の大まかな位置情報と P_T がレベル 2 トリガーへ送られる。閾値が $E_T=10$ GeV のジェットトリガーであれば L1_J10、 $P_T=10$ GeV ミューオントリガーであれば L1_MU10 という呼び方をする。

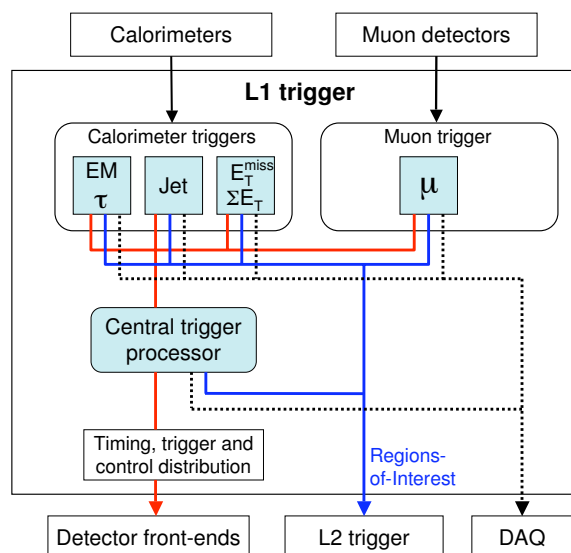


Fig. 3.2 L1 トリガーのブロックダイアグラム

3.2 レベル 2 トリガー (LVL2)

レベル 2 トリガーはソフトウェアで処理が行われ、イベントレートを 75kHz から 3kHz に落とすことを目的としている。レベル 2 トリガーはレベル 1 では用いることの出来ない内部飛跡検出器で再構成された粒子の飛跡 (トラック) の情報などを用いることで背景事象を取り除く。ミューオントリガーに注目した場合、内部飛跡検出器で再構成されたトラックとミューオンスペクトロメータで再構成されたトラックを結合することでトリガーの判定を行う。この結合されたトラックのことを combined track と呼ぶ。またこの時、レベル 1 から送られてくる RoI の位置付近のみを判断の対象とすることで計算の効率化を図っている。

3.3 イベントフィルター (EF)

EF はソフトウェアによって最終的なトリガーの発行を決定し、イベントレートを 200Hz まで落とすことを目的としている。EF では全ての検出器の完全な情報を用いて粒子を再構成・識別することでトリガーの発行を判断する。1 イベントで発生するデータ量は 1.5Mbyte と見積もられており、最終的に 300Mbytes/sec のデータが記録されていく。

3.4 TGC システム

この節では 7 章で評価対象とする TGC システムについて説明する。TGC はエンドキャップ部でのミューオントリガーの発行と MDT では測定されない粒子の ϕ 方向の位置情報を取得することを主な目的としている。

3.4.1 TGC の動作原理と構造

まず TGC の動作原理について簡単に説明する。TGC に入射した荷電粒子は、その飛跡に沿ってガス中の分子と多数衝突しイオン化される (図 3.3(a))。電離された電子 (1 次電子) は、陽極ヘドリフトしながら印加電場によって加速され、運動エネルギーを持つようになる。電子のエネルギーがガス分子の電離エネルギーを超えると、ガス分子をイオン化し 2 次電子を生成する (図 3.3(b))。2 次電子も電場によって加速され、それが次々と

衝突、電離を繰り返し、タウンゼント型と呼ばれる電子なだれを形成する。この過程をガス増幅という。電子とイオン雲はそれぞれにドリフトを始めて互いに分離し (図 3.3(c))、電子雲はアノードワイヤーを取り囲み (図 3.3(d))、イオン雲はさらにその周りを取り囲むようにアノードワイヤー半径方向に拡散していく (図 3.3(e))。TGC はこの電子と陽イオンによる誘起電荷をシグナルとしてワイヤーとストリップから読み出す。

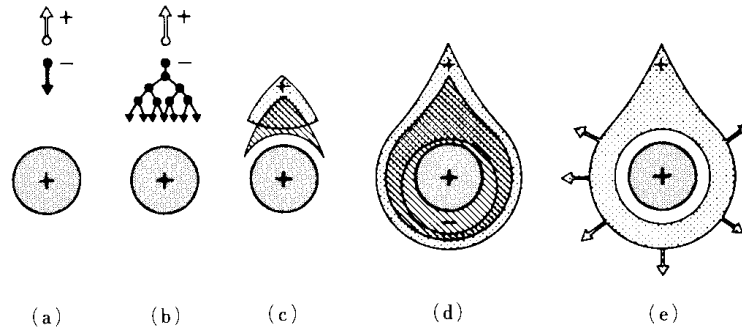


Fig. 3.3 アノードワイヤー付近でのタウンゼント型電子なだれの推移

次に、TGC の配置場所と構造を図 3.4 に示す。図 3.4 の両サイドにある赤い部分が TGC を指し、 r 方向と ϕ 方向に区切られた一つ一つがチェンバーである。

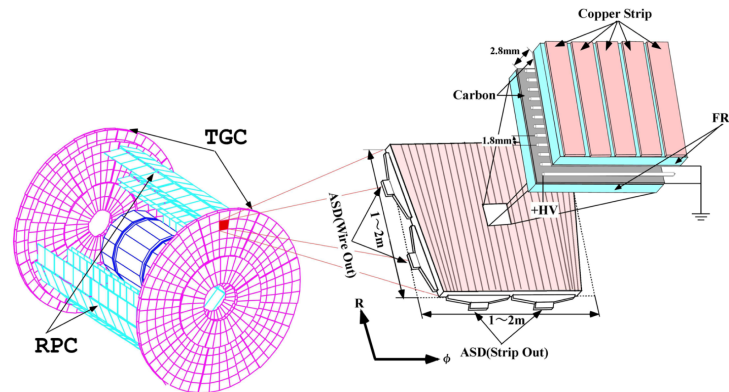


Fig. 3.4 TGC の配置と構造図

TGC は Muti Wire Proportional Chamber(MWPC) 型的一种である。チェンバーの断面図を図 3.6 に示す。TGC は、1.6mm 及び 1.8mm のガラスエポキシ樹脂を基板として、その表面にカーボン塗布することでカソード面を形成している。アノードワイヤーは直径 $50\mu\text{m}$ の金メッキタングステンワイヤーが用いられている。ワイヤー間隔は 1.8mm であり、これによって 25nsec の時間分解能が実現される。また、アノードとカソードの間隔は 1.4mm と通常の MWPC に比べて狭くなっており、陽イオンが早くカソードに到達する。これにより、粒子の高レート入射に対して耐性を持つ。図 3.5 に TGC の r - ϕ 平面図を示す。TGC には 2 種類のスペーサーが入っており、一つはワイヤーのたるみを防ぐためのワイヤーサポートで、もう一つはギャップ間隔を一定に保つためのボタン型サポートである。これらのスペーサーは不感領域となるが、Doublet/Triplet という多重構造にする際に、これらの不感領域が重ならないように制作されている。ワイヤーは r 方向の位置情報を、

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

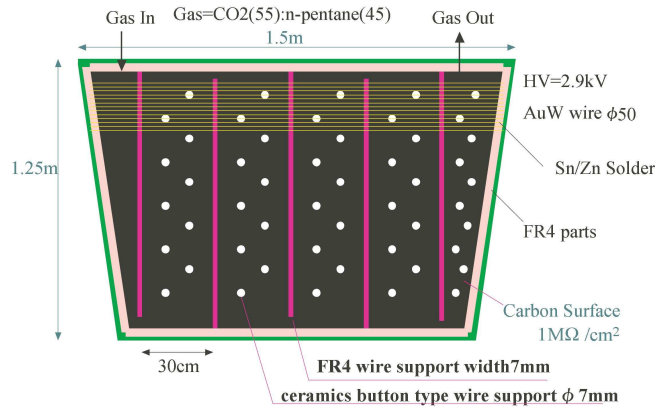


Fig. 3.5 ワイヤーとワイヤーサポート

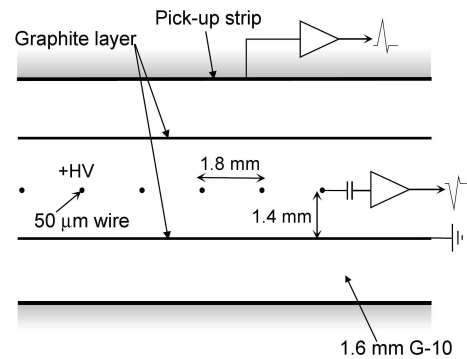


Fig. 3.6 TGC の断面図

3.4.2 TGC の配置

r - z 平面における配置

実際の実験では図 3.7 に示される通り、TGC は 2 層もしくは 3 層に重ねた構造をしている。2 層構造の TGC を Doublet、3 層構造を Triplet と呼ぶ。Triplet は 2 層目にはストリップがなく、3 層のワイヤー、2 層のストリップで読み出しを行う。Doublet はワイヤー 2 層、ストリップ 2 層で読み出しを行う。Triplet における 3 層を衝突点側から layer1,2,3、Doublet の場合 layer1,2 という呼び方をする。これらの計 7 層のチェンバーが A-side に配置されている様子を図 3.8 に示す。図 3.8 は r - z 平面に対して TGC の断面図を表していて、衝突点側から Triplet(M1)、Doublet(M2)、Doublet(M3) の計 3 ステーションとなっている。さらに $z=7000\text{mm}$ 付近に Endcap Inner(EI)、Forward Inner(FI) というチェンバーが存在するが 2011 年はトリガーの判定には用いられなかった。

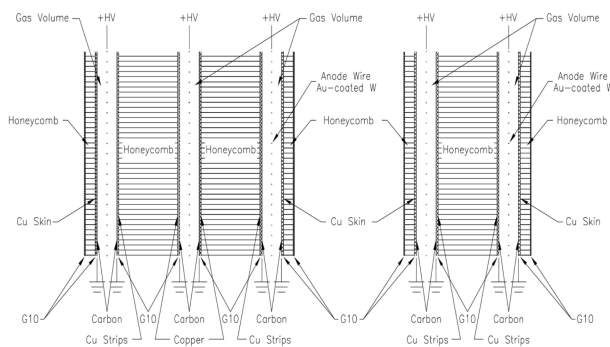


Fig. 3.7 Doublet と Triplet の構造

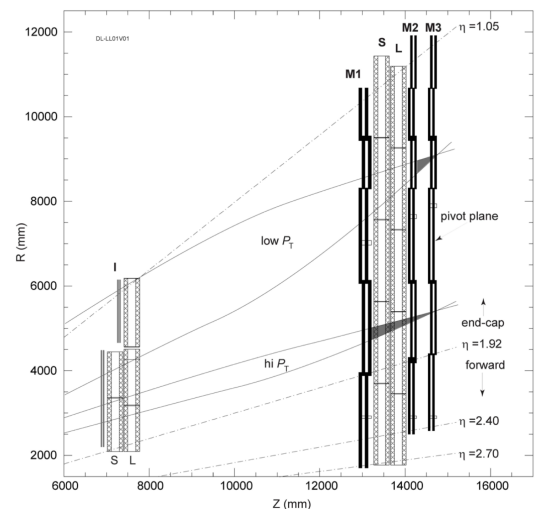


Fig. 3.8 TGC の r - z 断面における全体像

r - ϕ 平面における配置

図 3.9 に 1/12 セクターと呼ばれる TGC の配置を示す。この図は r - ϕ 平面での TGC をスケッチしたもので、線で区切られた一つ一つがチェンバーを表す。図 3.9 中の右下に記されている M3 を例に取った場合、 r 方向に T5, T6, T7, T8, T9 と呼ばれるチェンバーが ϕ 方向に 4 列、T2 と呼ばれるチェンバーが ϕ 方向に 2 列並べられている。ここで、 ϕ 方向に 4 列チェンバーが存在する領域を狭義の意味でのエンドキャップ部、2 列存在する領域をフォワード領域と呼ぶことにする。ATLAS 検出器ではこの 1/12 セクターが円を描くように配置されており、その全体像を図 3.10 に示す。また図 3.10 で青く示されてる領域をトリガーセクターと呼び、 $\phi=0$ のチェンバーから順にエンドキャップ部では 1-48、フォワード部では 1-24 の番号が割り振られている。さらに図 3.10 の黄色で表される領域が RoI に対応するサブセクターという単位である。図 3.11 はサブセクターのナンバリングを示している。各サブセクターに対して、エンドキャップ部では 0-147、フォワード部では 0-63 の番号が割り当てられる。

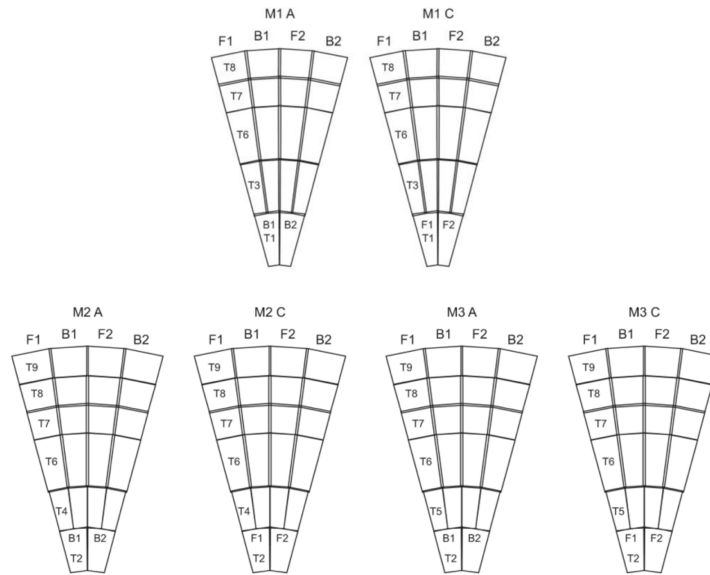


Fig. 3.9 TGC の 1/12 セクター

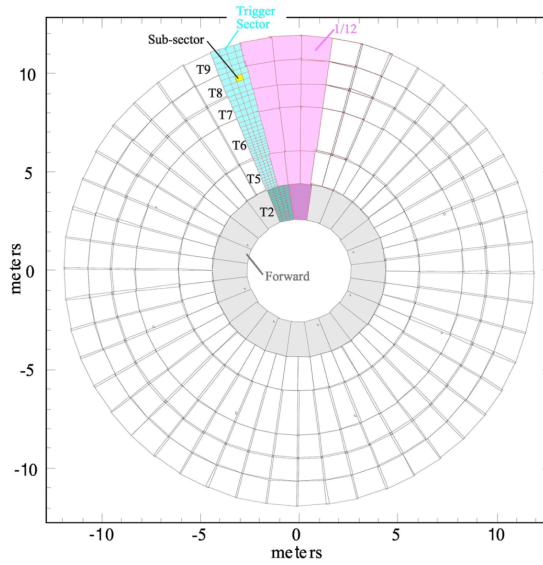


Fig. 3.10 TGC の r - z 断面における全体図 (M3)

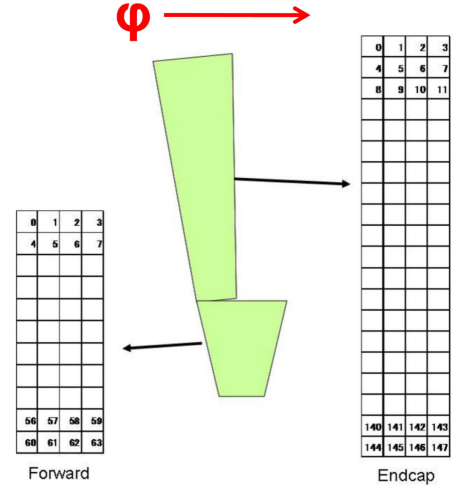


Fig. 3.11 TGC のサブセクターナンバリング

3.4.3 TGC トリガーシステム

TGC の主要な役割としてレベル 1 ミューオントリガーの発行がある。この章ではこの TGC におけるレベル 1 トリガー発行の仕組みについて述べる。

ミューオントリガーは測定されたミューオンの P_T が閾値以上であればトリガーの発行をするように設計されている。そこでまず、TGC における P_T 測定について述べる。図 3.12 は衝突点に対し、TGC が M1, M2, M3 という順番で設置されている様子を表している。衝突点から延びる青い線が無限運動量を仮定したミューオンの飛跡を表し、赤い線がトロイド磁場で曲げられたミューオンの飛跡を表す。ミューオンの P_T に従って赤の飛跡が変化することから図中の各ステーションにおける $\delta R, \delta\phi$ も P_T に従い変化する。この P_T に対する $\delta R, \delta\phi$ を予めシミュレーションを用いて計算し、 $\delta R, \delta\phi$ から P_T を得ることが出来る参照表を作成する。以後この参照表をコインシデンスウィンドウ (CW) と呼ぶ。実験中はこの CW を参照することで、ミューオンの大まかな P_T を計算しトリガー発行の判断に用いている。

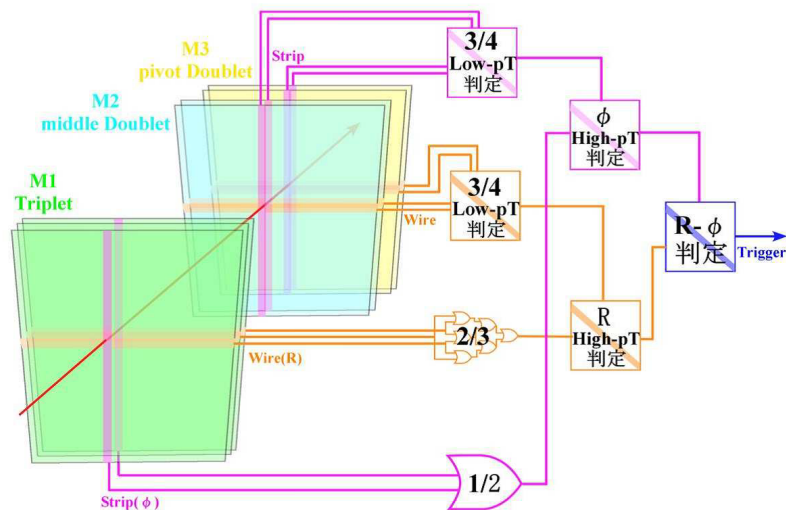


Fig. 3.13 TGC トリガーの判定方法

図 3.14 に CW の一例を示す。TGC では 6 種類の P_T スレッシュホールドが設定出来るようになっており、図 3.14 では 6, 8, 10, 11, 20, 40GeV という閾値の CW となっている。この閾値は実験中に変更可能なように設計されており、目的とする物理事象に適応したトリガーが随時実装出来る。例として $\delta\phi=0$, $\delta R=0$ が測定された場合には図 3.14 中のピンクの領域に対応する。この時、 P_T が 40GeV 以上であるという判断がなされて L1_MU40 というトリガーが発行される。図 3.14 で表される一つの領域をセルと呼び、セルに P_T スレッシュホールドが設定されている状態を CW がオープンになっている、もしくはアクティブになっていると呼ぶ。

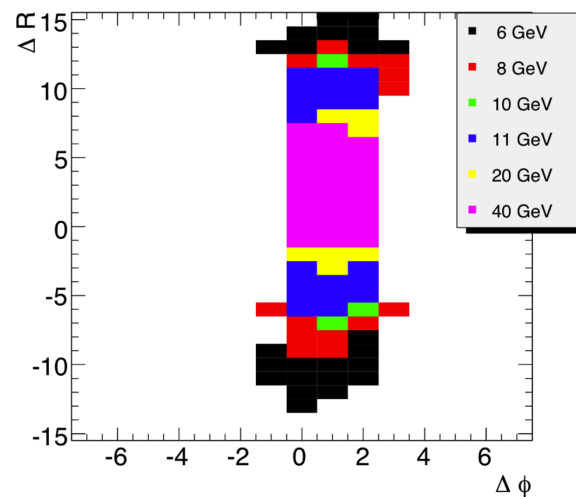


Fig. 3.14 High- P_T CW の例

3.4.4 クロストークとデクラスタリングルール

クロストークにより、本来信号を出すべきでないストリップが信号を出すことがある。クロストークは次のようにして起こる。入射粒子により電離された電子がガス増幅を起こすと入射粒子付近のワイヤーとストリップに誘電電荷が生じる。しかし実際はワイヤーとストリップ間には容量カップリングが存在するため、複数のストリップに信号が生じる。もしこの信号が本来期待されるストリップ以外で Amplifier Shaper Discrimination(ASD)

の閾値を超えてしまった場合には偽のヒットが記録されてしまう。

さらに TGC にはデクラスタリングルールというものが存在する。デクラスタリングルールとは 3.4.3 で述べたようなヒット情報からコインシデンスを取り $\delta R, \delta\phi$ を計算する際に、複数のチャンネルにヒットがあった場合に対象とするチャンネルを一つに絞り込むルールである。デクラスタリングルールの概念図を図 3.15 に示す。現時点では複数のヒットがあった場合には、チャンネル番号の若い順から 2 つ目のものを選ぶ様になっている。これにより複数のトリガーが発行されることは防げるが、前述のクロストークによるヒットを選び出した場合には間違ったトリガーを発行する事になる。この効果を CW に正しく反映させることが課題であり、7.4 で詳しく述べる。

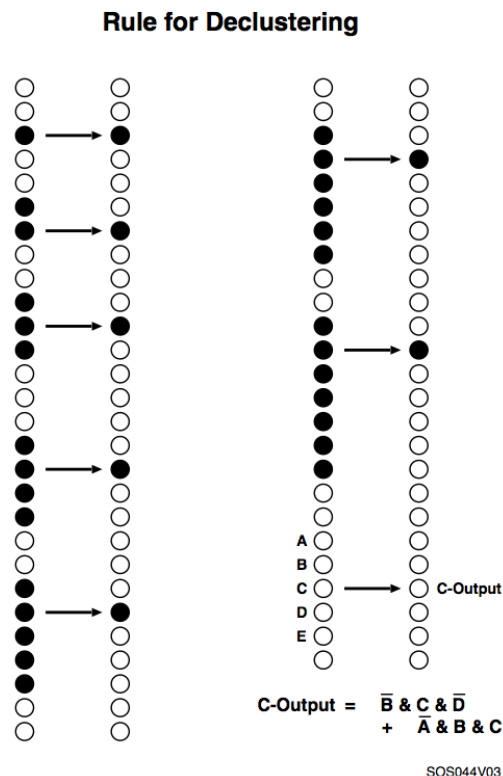


Fig. 3.15 デクラスタリングルール

3.5 2011 の主要なミュオントリガー

ここで 2011 年における主要なミュオントリガーについて簡単に述べる。2011 のデータ取得開始時は L1_MU10 と呼ばれるトリガーが主要なレベル 1 トリガーであった。L1_MU10 は TGC においては 3 ステーション、RPC においては 2 ステーションのコインシデンス情報を用いるものである。しかし、ルミノシティの増加に伴い L1_MU10 はプリスケールされ L1_MU11 と呼ばれる RPC において 3 ステーションのコインシデンス情報を用いるトリガーが 2011 年の後半では主要なレベル 1 トリガーとなった。閾値が $P_T=18\text{GeV}$ で、L1_MU10 をインプットにして発行されるレベル 2 ミュオントリガーを L2_mu18、L1_MU11 をインプットにして発行されるレベル 2 ミュオントリガーを L2_mu18_medium と呼ぶ。同様に、閾値が $P_T=18\text{GeV}$ で、L2_mu18 をインプットにして発行される EF トリガーを EF_mu18、L2_mu18_medium をインプットにする EF トリガーを EF_mu18_medium を呼ぶ。

4 ATLASにおけるミュオンの再構成

3章で述べたトリガーにより保存されたイベントは、その後粒子の再構成が行われる。この章ではミュオンの再構成について述べる。ATLAS 実験ではミュオンの識別と再構成にいくつかの種類が存在する。本論文では以下の2つの種類のミュオンを解析に用いる。

- Combined(CB) muon
 - CB muon はミュオンスペクトロメータと内部飛跡検出器で独立に再構成されたトラックを結合することで得られる。そのため CB muon は高い純度のミュオンであることが期待される。
- Segment Tagged(ST) muon
 - ST muon は内部飛跡検出器で再構成されたトラックからミュオンスペクトロメータでの飛跡の位置を予想し、トラックセグメントと関連付けられた場合に得られる。トラックセグメントとはMDTの各ステーションレベルで再構成されたミュオンの飛跡を指す。これにより低い P_T のミュオンでMDTの最も内側の層にのみヒットする場合や、MDTが一部インストールされておらずミュオンスペクトロメータではトラックが再構成できない領域などにこのアルゴリズムは有効である。

また、上記の再構成されたミュオンの事を offline muon と呼ぶ。以下に解析において主要な offline muon である CB muon の再構成の手順について簡単に述べる。

- 1. まず Region of Activity(ROA) と呼ばれる、 $\eta \times \phi = 0.4 \times 0.4$ の領域を定義する。ROA は TGC もしくは RPC で検出されたヒット位置 (η, ϕ) を中心に取る。
- 2. ROA 中の各ミュオンステーション (MDT, CSC) において直線のトラックセグメントが再構成される。MDT の場合、チューブのドリフトタイムの情報からフィットを行いトラックセグメントを再構成する。
- 3. 各ミュオンステーションで再構成されたトラックセグメントを磁場の影響を考慮して一つのミュオントラックに結合する。これを Stand Alone(SA) muon と呼ぶ。
- 4. SA muon は内部飛跡検出器で再構成されたトラック [1] と結合し、最終的に CB muon が得られる。

本文中で用いられる CB muon もしくは ST muon はすべて STACO と呼ばれるアルゴリズムが用いられている。STACO は上で述べた各ステップにおける再構成の方法や基準を決定するアルゴリズムである [2]。

5 解析におけるデータサンプル

この章では本文中で用いられるデータサンプルについて述べる。

5.1 実データについて

ATLAS 検出器によるデータ取得は run と呼ばれる単位で行われ、run 一回分はおよそ 5 時間程度であることが多い。run の識別には 6 桁の番号が割り振られており、2011 年最後の陽子・陽子衝突の run は run191933 であった。さらに LHC の運転状況に合わせて run は period と呼ばれる区間にまとめられ 2011 年には priodA-M が存在した。

取得された全てのデータが解析に使用されるわけではなく、Data Quality という枠組みの中で検出器の運転状況が良好であると判断されたイベントのみが解析に用いられる。最終的に解析に使用されるデータの集まりを Good Run List(GRL) と呼ぶ。GRL は各グループが目的とする物理に応じたものが作成され、本論文では標準模型検証用に作成された GRL を使用する。表 5.1 に各 period における run 番号と GRL に応じたデータの積分ルミノシティを表す。GRL に含まれない period, run は表から省略した。

Table 5.1 2011 年に取得されたデータ

	Run number	Integrated luminosity
periodB	run177986-178109	11.7pb ⁻¹
periodD	run179725-180481	161.9pb ⁻¹
periodE	run180614-180776	48.8pb ⁻¹
periodF	run182013-182519	312.5pb ⁻¹
periodG	run182726-183462	507.9pb ⁻¹
periodH	run183462-184169	301.9pb ⁻¹
periodI	run185353-186493	337.5pb ⁻¹
periodJ	run186516-186755	226.4pb ⁻¹
periodK	run186873-187815	590.4pb ⁻¹
periodL	run187815-190343	1326.3pb ⁻¹
periodM	run190608-191920	919.1pb ⁻¹

5.2 シミュレーションサンプルについて

ATLAS におけるデータの処理及び解析は Athena と呼ばれるフレームワークに従って行われる。図 5.1 は Athena の処理の流れを表していて、四角いオレンジのブロックが Athena で行われる処理、青い楕円が生成されるデータフォーマットを示す。Event Sumary Data(ESD), Analysis Object Data(AOD) と呼ばれるユーザーが最終的に解析を行うレベルではデータとシミュレーションの結果が同じ形式で生成されるようになっている。以下に、Athena によるイベントシミュレーションの流れを順番に説明していく。また、シミュレーションサンプルはモンテカルロ (MC) 法に従って生成されることから MC サンプルと呼ぶことがある。

イベント生成 (Generation)

検出器に入力するための物理事象そのものをモンテカルロシミュレーションを用いて再現する。PYTHIA[3] や POWHEG[4] といったイベントジェネレーターが用いられる。生成されるフォーマットを HepMC と呼ぶ。

検出器シミュレーション (Simulation)

ジェネレーターで生成された粒子の検出器中での物質との相互作用を Geant4[5] と呼ばれるシミュレータを用いて計算する。Geant4 では検出器の詳細な形状や磁場が再現されており、検出器の有感領域に作ったヒットは時間、位置、エネルギー損失が記録される。ここで生成されるフォーマットを Hits と呼ぶ。

デジタイゼーション (Digitization)

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

再構成 (Reconstruction)

シミュレーションによる Digits もしくは実データに従って、トラックやクラスターを再構成し粒子識別を行う。その結果を ESD として保存する。実際は解析のための物理情報を集約した AOD も同時に生成される。ユーザーはこの ESD もしくは AOD を用いて解析を行う。

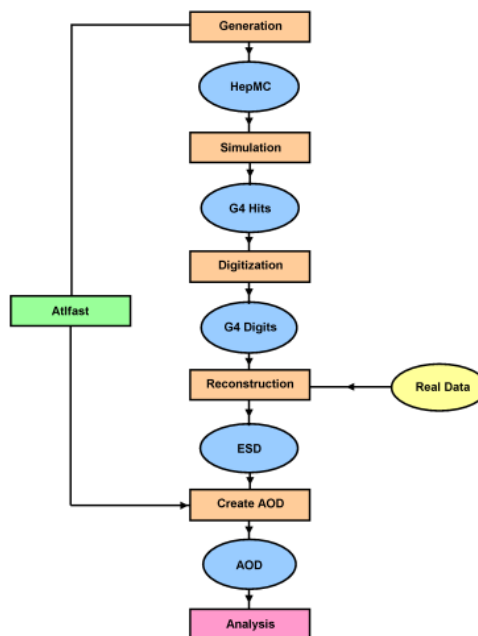


Fig. 5.1 Athenaにおけるシミュレーションの流れ

実際は ESD もしくは AOD をさらに Ntuple というフォーマットに変換する。Ntuple は ROOT と呼ばれる解析ソフトウェアで読み込めるフォーマットである。本論文では $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象をシミュレートした表 5.2 に表される MC サンプルを用いている。NTUP_SMWZ は offline muon や各トリガーレベルにおけるトラックなどの基本的な情報が保存されている Ntuple で、NTUP_L1TGC は TGC のヒット情報など TGC に関する情

報が多く保存されている Ntuple である。主に 6 章では NTUP_SMWZ、7 章では NTUP_L1TGC を解析に用いた。

Table 5.2 解析に用いられる MC サンプル

Process	Generator	Production cross section[nb]	Number of events
$Z \rightarrow \mu\mu$	PYTHIA	0.99 ± 0.05	NTUP_SMWZ: 5×10^6 NTUP_L1TGC: 5×10^5

6 2011 年 ミューオントリガー効率の評価

この章では、2011 年に取得されたデータを用いてミューオントリガーのパフォーマンスについて述べる。特に検出器に飛来したミューオンに対し、どの程度の割合でトリガーを発行しているかを表す量であるトリガー効率に注目する。閾値以上の P_T を持つミューオンに対しては高い効率が維持されることが理想で、実データからこのトリガー効率を計算して検出器やアルゴリズムの性能を評価・理解した。また付録.B で述べるような粒子の生成断面積の測定においては信号の選別効率がモンテカルロシミュレーションをベースに行われる。そのためデータとシミュレーションとの差異を Scale Factor(SF) として計算する必要がある。ここでは、データを用いて精度良くトリガー効率を計算するため、 $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象を用い “Tag and Probe” 法というテクニックを用いる。

6.1 $Z \rightarrow \mu\mu$ “Tag and Probe” 法

2011 年は $P_T > 18$ GeV 以上のミューオンが存在すればトリガーを発行する “EF_mu18” が主要なミューオントリガーの一つであった。Tag and Probe 法とは粒子のダイミューオン崩壊を利用し、このようなイベントのトリガーとは独立なサンプルを選ぶことで、データからトリガー効率の計算を可能にする方法である。特に $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象 (図 6.2) を用いることでバックグラウンドが 1% 以下に抑えられ、解析に対してバイアスが少ないという特色がある。ここで言うバックグラウンドとは π や K の崩壊に伴うミューオン等で、ミューオンの再構成の際に間違った P_T が見積もられる事象を指す。

まず、ミューオンに対しトリガーが発行されているかどうかの判断基準について述べる。トリガー発行の判断は 4 章で述べた CB muon に対し、ある距離 ΔR (式 6.1) を定義しその範囲内にトリガーオブジェクトが存在するかどうかで行う。

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2} \quad (6.1)$$

ここでトリガーオブジェクトとは LVL1 においては RoI、LVL2、EF においては各レベルで再構成された combined track のことを指す。図 6.1 に $Z \rightarrow \mu\mu$ MC サンプルを用いて計算した各トリガーレベルの ΔR 分布を示す。図 6.1 は横軸が ΔR を表し、縦軸がその割合を表す。また、左が Level1 トリガーにおける RoI との ΔR 分布で、右が Level2, Event Filter におけるトラックとの ΔR 分布である。Level1 における RoI は大まかな位置情報が記録されているため、Level2 や Event Filer と比べた場合に ΔR が大きくなる。図 6.1 から 99.9% 以上のイベントが含まれる、 $\Delta R=0.15$ (L1)、0.001(L2, EF) を基準値に定めた。

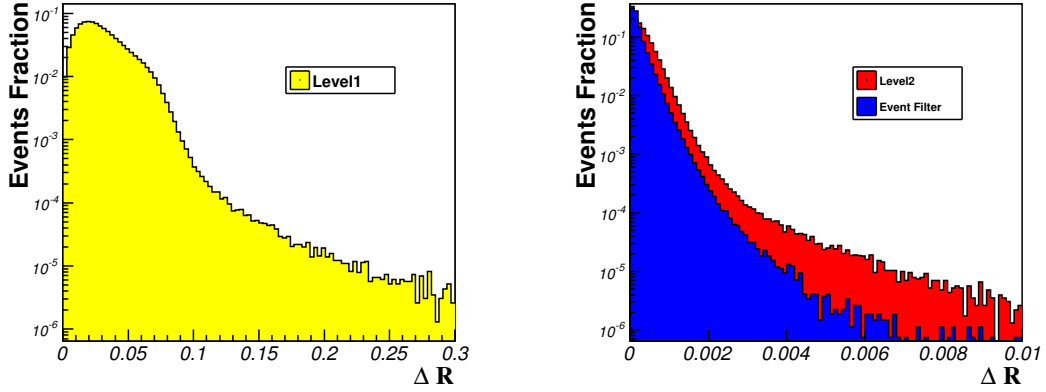


Fig. 6.1 各トリガーレベルにおける ΔR 分布

Table 6.1 各トリガーレベルにおける ΔR の平均値とマッチングの基準

	mean	matching criteria
Level1	0.031	0.15
Level2	0.00040	0.01
Event Filter	0.00023	0.01

次に Tag and Probe 法の解析手順について述べる。Tag and Probe は以下の 3 ステップで行われる。

- 1 : 各 CB muon に対し前述の基準を用いて、EF においてトリガーが発行されているかどうかの判断を行う。もしトリガーが発行されていれば、そのミュオンを tag muon とする。
- 2 : 同イベント中に他の CB muon を探す。Z ボゾンの崩壊に伴うミュオンであることを要求するために、tag muon とで不変質量を計算する。不変質量が Z ボゾンの質量付近であれば、この 2 つ目のミュオンを probe muon をする。これらから probe muon はイベントのトリガーとは独立なサンプルであり、かつ低バックグラウンドで衝突由来のミュオンを選び出すことができる。
- 3 : Probe muon に対しトリガー効率の計算を行う。トリガー効率 ε とスケールファクター SF の定義は以下の通りである。

$$\varepsilon = \frac{\text{トリガーとマッチングの取れた probe muon の数}}{\text{Probe muon の数}} \quad (6.2)$$

$$SF = \frac{\text{データから計算したトリガー効率}}{\text{MC シミュレーションから計算したトリガー効率}} \quad (6.3)$$

6.2 ミューオンの選別

ミュオンの選別に用いるカットパラメーターを以下に示す。

Vertex cut

- Primary vertex に 3 本以上の Track、 $|z_{PV}| < 150\text{mm}$

内部飛跡検出器によって再構成された Primary Vertex(PV)[6] に 3 本以上のトラック、かつ PV の z が 150mm 以下であること要求し、衝突由来でないイベントを取り除く。

ID track cut

- Pixel のバレル層に 1 ヒット以上
- $N_{\text{PIX}} + N_{\text{DEAD-PIX}} > 1$, (N_{PIX} : Pixel のヒット数、 $N_{\text{DEAD-PIX}}$: dead pixel sensor を通過した数)
- $N_{\text{SCT}} + N_{\text{DEAD-SCT}} > 5$, (N_{SCT} : SCT のヒット数、 $N_{\text{DEAD-SCT}}$: dead SCT sensor を通過した数)
- $N_{\text{HOLE-PIX}} + N_{\text{HOLE-SCT}} < 2$, ($N_{\text{HOLE-PIX}}$: Pixel hole の数、 $N_{\text{HOLE-SCT}}$: SCT hole の数)
- $N_{\text{TRT}} = N_{\text{TRT-HITS}} + N_{\text{TRT-OUTLIERS}}$ に対し、($N_{\text{TRT-HITS}}$: TRT のヒット数、 $N_{\text{TRT-OUTLIERS}}$: TRT outlier の数)
 - $|\eta| < 1.9$ なら、 $N_{\text{TRT}} > 5$ かつ $N_{\text{TRT-OUTLIERS}}/N_{\text{TRT}} < 0.9$ を要求
 - $|\eta| > 1.9$ なら、 $N_{\text{TRT}} > 5$ の場合 $N_{\text{TRT-OUTLIERS}}/N_{\text{TRT}} < 0.9$ を要求

内部飛跡検出器によって再構成されたトラックに対し、各検出器にある数以上のヒット数を要求することでクオリティの高いトラックを選ぶ。ここで、Pixel hole, SCT hole とは再構成されたトラックに対し関連付けられるヒットがない layer を表し、TRT outlier とはトラックに対しある距離以上離れた TRT ヒットであり、ノイズと思われるヒットの数を表す。

Tag muon selection

- CB muon
- $|\eta| < 2.4$, $P_T > 20\text{GeV}$, $|z_{0\text{toPV}}| < 10\text{mm}$, $\sum P_T(\Delta R < 0.2)/P_T(\text{muon}) < 0.1$
- トリガー (EF_mu18 or EF_mu18_medium) とマッチングが取れることを要求

CB muon を用い、 $P_T > 20\text{GeV}$ を要求することで、ミューオンの純度を高くする。 $|z_{0\text{toPV}}|$ はミューオンと PV との最も近い z 方向の距離を表し、10mm 以内であることを要求し PV 由来のミューオンであることを保証する。 $\sum P_T(\Delta R < 0.2)$ はミューオンの $\Delta R < 0.2$ の範囲におけるトラックの P_T の和を取ったものであり、 $\sum P_T(\Delta R < 0.2)/P_T(\text{muon}) < 0.1$ を要求することで周囲に荷電粒子があまり存在しない孤立したミューオンを選ぶ。Z ボゾンの崩壊に伴うミューオンは孤立していることから背景事象を効果的に取り除くことが出来る。 $|\eta| < 2.4$ は RPC, TGC のアクセプタンスである。

Probe muon selection

- CB muon
- $|\eta| < 2.4$, $|z_{0\text{toPV}}| < 10\text{mm}$, $\sum P_T(\Delta R < 0.2)/P_T(\text{muon}) < 0.1$
- $q_{\text{tag}} \cdot q_{\text{probe}} < -1$

- $|\phi_{\text{tag}} - \phi_{\text{probe}}| > 0.2$, $|z_{0\text{toPV,tag}} - z_{0\text{toPV,probe}}| < 3\text{mm}$, $|d_{0\text{toPV,tag}} - d_{0\text{toPV,probe}}| < 2\text{mm}$
- $|M_{\mu\mu} - M_Z| < 10\text{GeV}$

q_{tag} は tag muon の電荷、 q_{probe} は probe muon の電荷を表しそれらが異符号であることを要求する。 $d_{0\text{toPV}}$ はミューオンの PV に対する xy 平面上の最近接距離を表し、 $|z_{0\text{toPV,tag}} - z_{0\text{toPV,probe}}| < 3\text{mm}$ 、 $|d_{0\text{toPV,tag}} - d_{0\text{toPV,probe}}| < 2\text{mm}$ を要求することで、同じ PV 由来であることを保証する。 $|M_{\mu\mu} - M_Z| < 10\text{GeV}$ は Z ボゾンの崩壊に伴う粒子であることを要求する。

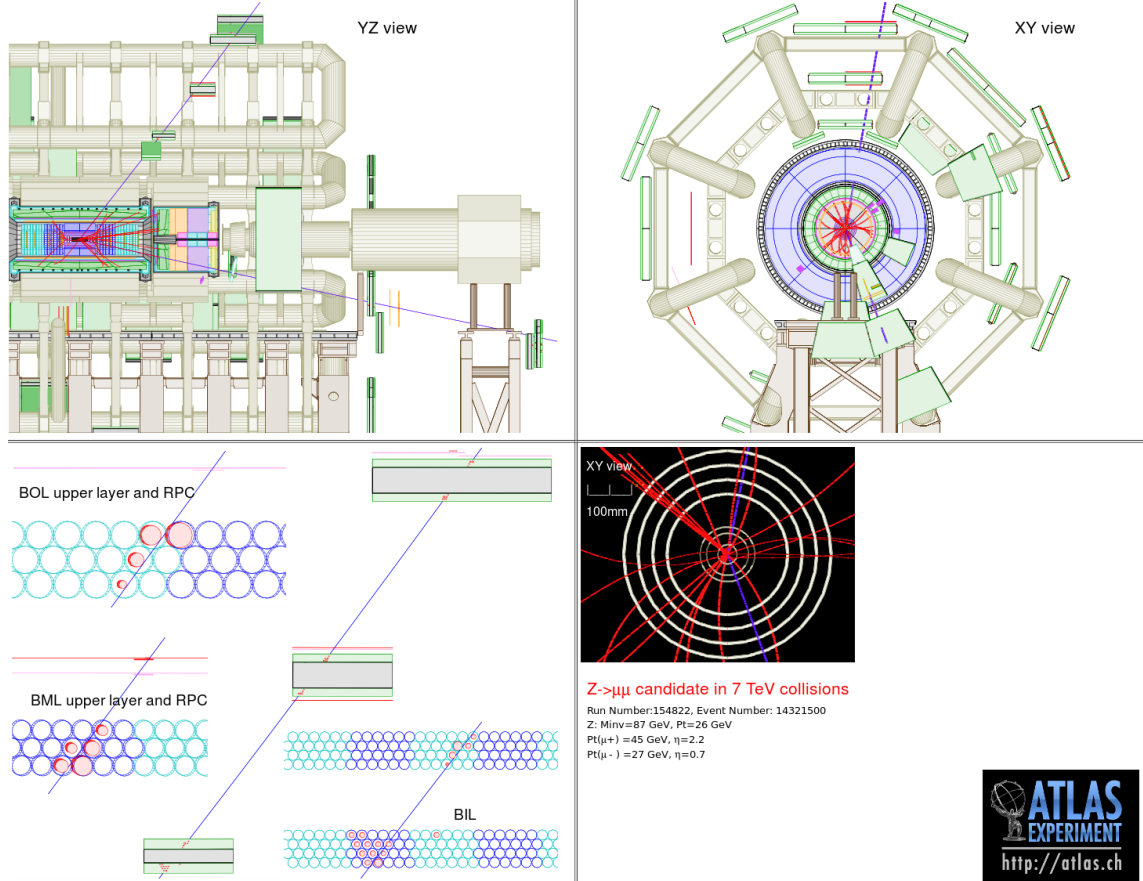


Fig. 6.2 $Z \rightarrow \mu\mu$ 候補のイベントディスプレイ

図 6.2 は $Z \rightarrow \mu\mu$ 候補の事象を表している。上の 2 つの図は yz 平面と xy 平面に対して再構成されたトラックが描かれており、RPC と TGC にそれぞれミューオンのヒットが示されている。左下は MDT におけるヒット情報、右下は内部飛跡検出におけるトラックの様子を示している。

6.3 ミューオントリガー効率

2011 年は、L1_MU10 をシードとした EF_mu18 と L1_MU11 をシードとした EF_mu18_medium が主要なミューオントリガーであった。EF_mu18_medium は periodF 以降でシステムに組み込まれ、EF_mu18 は periodJ 以降でルミノシティの増加に伴いプレスケールされた。従って tag muon を表 6.2 に記されたトリガーとマッチングを取ることで、EF_mu18 chain と EF_mu18_medium チェインのトリガー効率の計算を行った。また、

EF_mu18 と EF_mu18_medium に対する各トリガーレベルにおけるメニューを表 6.3 に示す。

Table 6.2 Tag muon に対する EF トリガーの要求

	PeriodB-E	PeriodF-M	$Z \rightarrow \mu\mu$ MC
Trigger	EF_mu18	EF_mu18_medium	EF_mu18_medium

Table 6.3 主要なトリガーのトリガーチェーン

	Level 1	Level 2	Event Filter
EF_mu18	L1_MU10	L2_mu18	EF_mu18
EF_mu18_medium	L1_MU11	L2_mu18_medium	EF_mu18_medium

まず、probe muon に対して基本的な変数である、不変質量、 P_T 、 η 、 ϕ の分布を $Z \rightarrow \mu\mu$ MC サンプルと比較した。Tag muon が EF_mu18_medium とマッチングが取れた場合について結果を図 6.3-6 に示す。不変質量分布は Z ボゾンの不変質量である 90GeV 付近にピークがあり、 P_T 分布のピークも 45GeV 付近であることが確認できる。検出器が存在しない領域では CB muon が再構成されないで、 η 、 ϕ 分布にはエントリーが少ないビンも存在する。これらの変数において MC シミュレーションがデータを概ね再現していること確認できた。

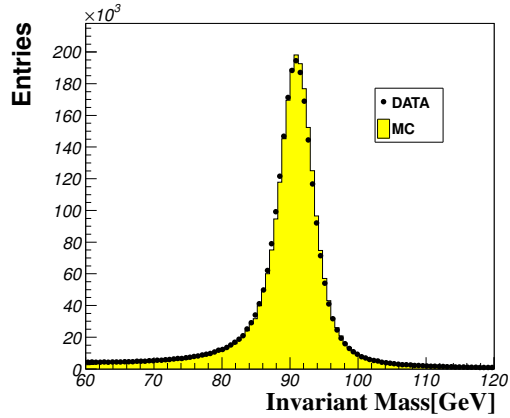


Fig. 6.3 Tag muon と probe muon による不変質量分布

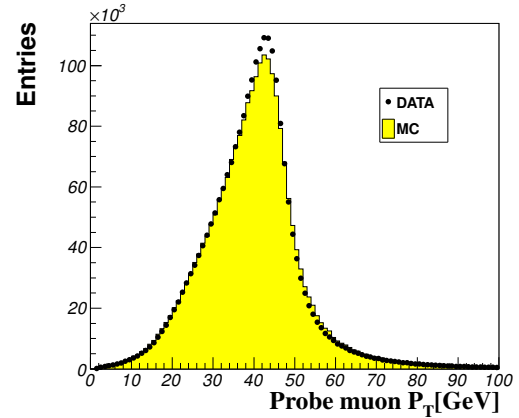


Fig. 6.4 Probe muon の P_T 分布

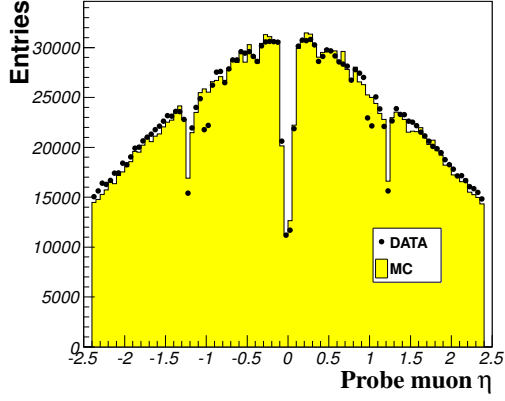


Fig. 6.5 Probe muon の η 分布

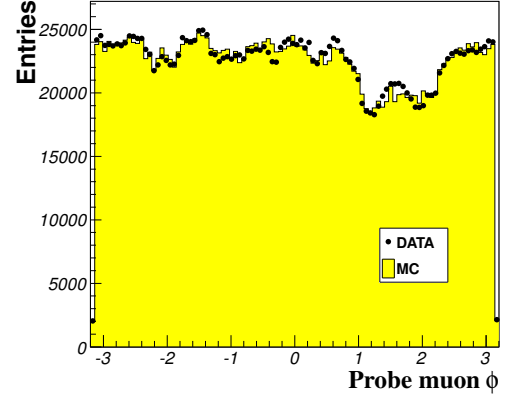


Fig. 6.6 Probe muon の ϕ 分布

次に Tag and Probe 法によりデータから計算したトリガー効率を $Z \rightarrow \mu\mu$ MC サンプルから計算した場合と比較することで、ミューオントリガーの性能を評価した。トリガー効率は P_T 、 η 、 ϕ に対して計算を行った。また、 P_T に関してはバレル部 ($|\eta| < 1.05$) とエンドキャップ部 ($|\eta| > 1.05$) の領域に分け、 η 、 ϕ に関してはブラトー領域 ($P_T > 20\text{GeV}$) の効率を示す。使用したデータ量は表の通りである。

Table 6.4 Probe muon の数

	Period	Integrated Luminosity	Number of Probe muons
EF_mu18 chain	Period B-I	1464.4 pb^{-1}	814502
EF_mu18_medium chain	Period F-M	4269.0 pb^{-1}	2330790

レベル 1 トリガー効率

レベル 1 トリガー効率は式 6.4 のように定義される。計算された結果を図 6.7-14 に示す。黒丸が実データから計算した値を示し、青丸が MC サンプルから計算した値を示す。ヒストグラムの下段にはこれらの SF を示すようにした。SF が 1 からズレている領域ではデータと MC サンプルに相違があることを意味する。

$$\varepsilon_{L1} = \frac{\text{RoI とマッチングの取れた probe muon の数}}{\text{probe muon の数}} \quad (6.4)$$

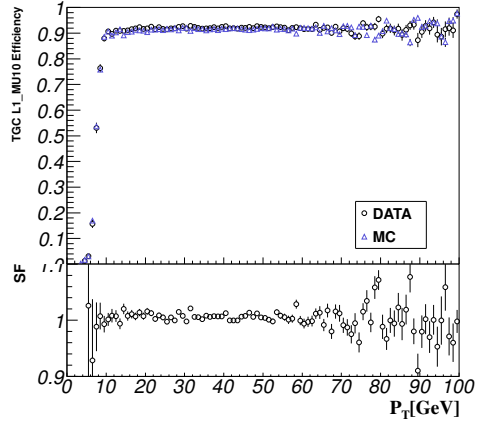


Fig. 6.7 TGC L1_MU10 Efficiency vs P_T

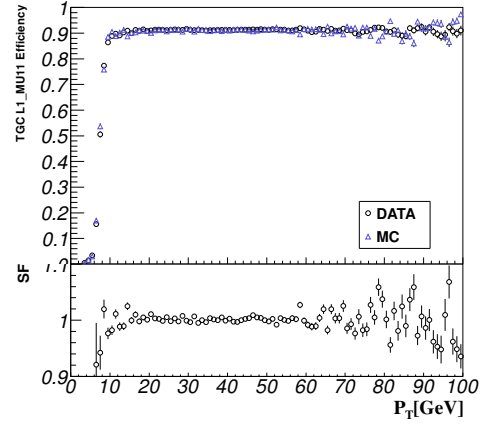


Fig. 6.8 TGC L1_MU11 Efficiency vs P_T

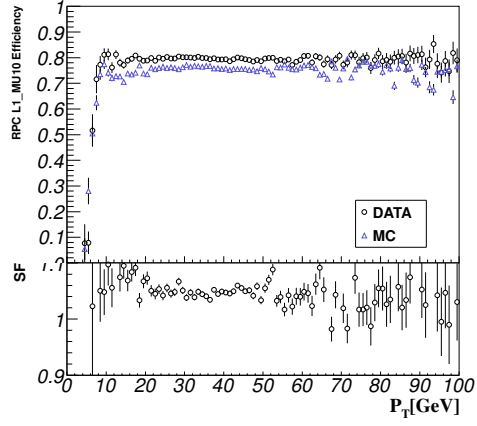


Fig. 6.9 RPC L1_MU10 Efficiency vs P_T

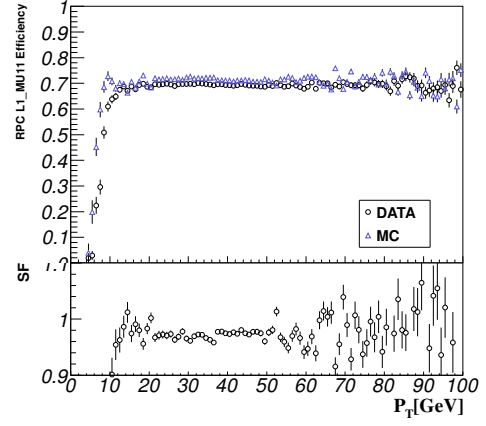


Fig. 6.10 RPC L1_MU11 Efficiency vs P_T

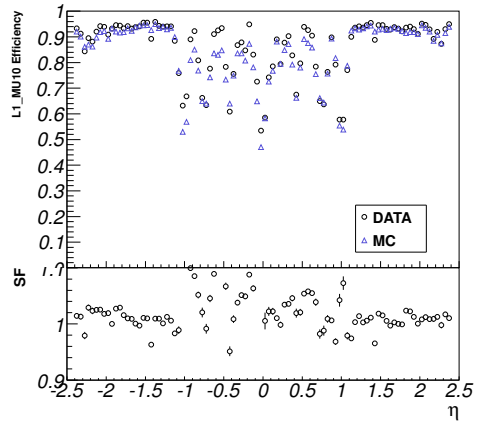


Fig. 6.11 L1_MU10 Efficiency vs η

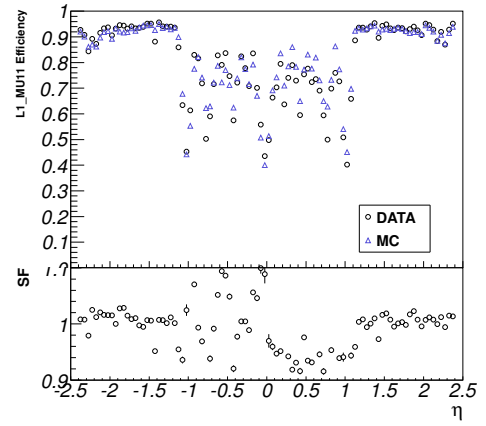


Fig. 6.12 L1_MU11 Efficiency vs η

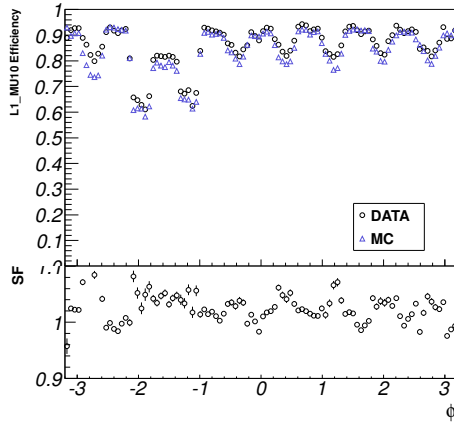


Fig. 6.13 L1_MU10 Efficiency vs ϕ

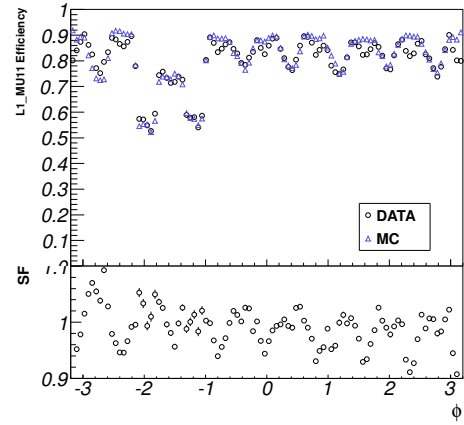


Fig. 6.14 L1_MU11 Efficiency vs ϕ

Table 6.5 $P_T > 20\text{GeV}$ における ε_{L1}

	L1 TrigEff. DATA	L1 TrigEff. MC	Scale Factor
L1_MU10	0.8564 ± 0.0004	0.8340 ± 0.0002	1.0269 ± 0.0006
L1_MU11	0.8007 ± 0.0003	0.8087 ± 0.0002	0.9901 ± 0.0005

データのレベル1トリガー効率はRPCとTGC合計でL1_MU10の場合85.6%、L1_MU11場合80.1%であった。RPC、TGCが設置されていない領域が存在すること、検出器自体の検出効率が100%でないことがレベル1トリガーに非効率が生じる主な原因である。TGCのトリガー効率に関してはこの他の要因も含め7.1.3で詳細に述べる。TGCのトリガー効率はシミュレーションと一致していることから概ね期待される性能を発揮していると言える。図6.9,10から、RPCに関しては解析対象の期間中で2%以上のシミュレーションとの差異がプラトー領域でのトリガー効率に現れている。この理由についてはこの節の最後で述べる。

レベル2トリガー効率

レベル2トリガーの性能を評価するために以下の $\varepsilon_{L2\text{wrt}L1}$ を定義する。これはレベル1トリガーをパスしたイベントに対してどの程度の割合でレベル2トリガーを発行しているかを表す。結果を図6.15-22に示す。

$$\varepsilon_{L2\text{wrt}L1} = \frac{\text{Level2 トリガーとマッチングの取れた probe muon の数}}{\text{RoI とマッチングの取れた probe muon の数}} \quad (6.5)$$

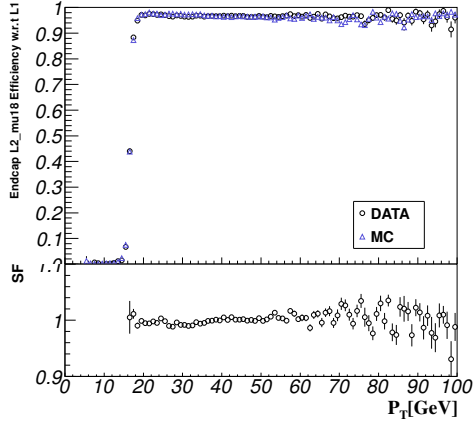


Fig. 6.15 Endcap L2_mu18 Efficiency w.r.t L1 vs P_T

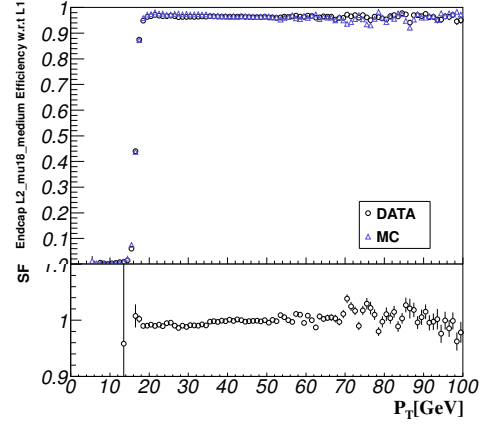


Fig. 6.16 Endcap L2_mu18_medium Efficiency w.r.t L1 vs P_T

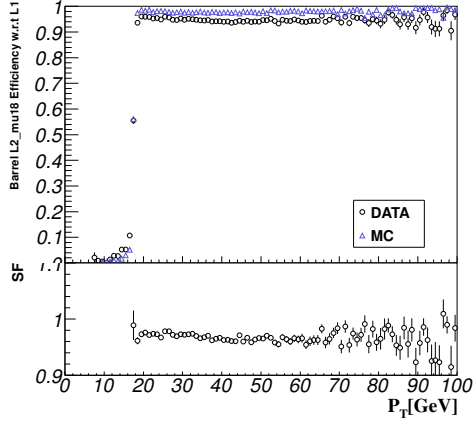


Fig. 6.17 Barrel L2_mu18 Efficiency w.r.t L1 vs P_T

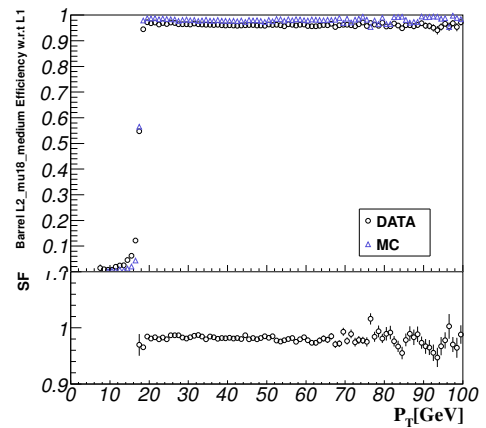


Fig. 6.18 Barrel L2_mu18_medium Efficiency w.r.t L1 vs P_T

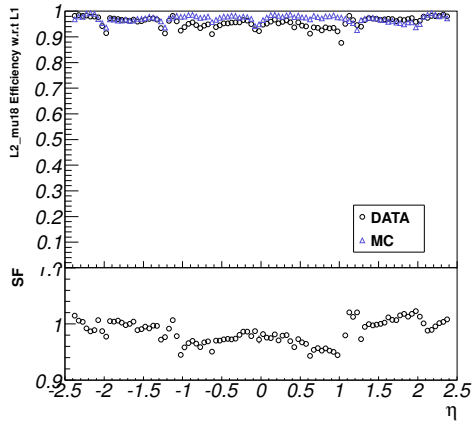


Fig. 6.19 L2_mu18 Efficiency w.r.t L1 vs η

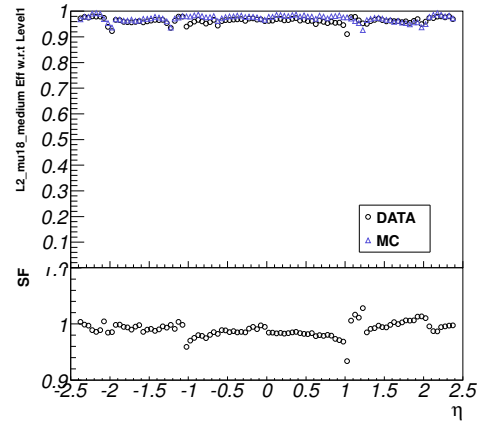


Fig. 6.20 L2_mu18_medium Efficiency w.r.t L1 vs η

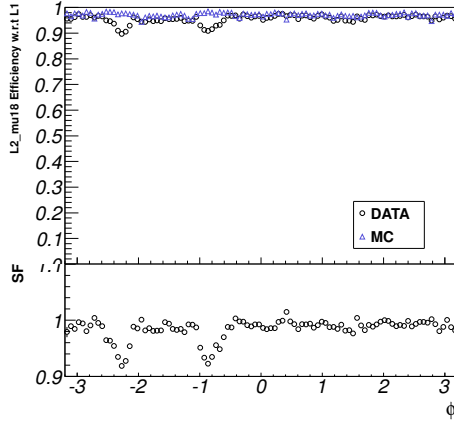


Fig. 6.21 L2.mu18 Efficiency vs ϕ

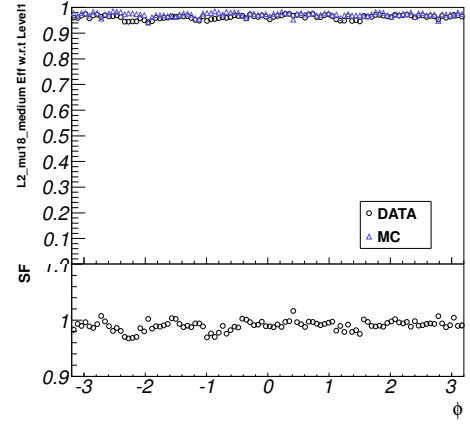


Fig. 6.22 L2.mu18.medium Efficiency w.r.t L1 vs ϕ

Table 6.6 $P_T > 20\text{GeV}$ における $\varepsilon_{L2\text{wrt}L1}$

	L2 TrigEff w.r.t L1. DATA	L2 TrigEff w.r.t L1. MC	Scale Factor
L2_mu18	0.9562 ± 0.0003	0.9719 ± 0.0001	0.9838 ± 0.0003
L2_mu18_medium	0.9633 ± 0.0001	0.9727 ± 0.0001	0.9903 ± 0.0002

データから計算された LVL1 トリガーをパスしたイベントに対する LVL2 トリガーの効率 $\varepsilon_{L2\text{wrt}L1}$ は L2.mu18 で 95.6%、L2.mu18_medium で 96.3% であった。図 6.17-18 からバレル部における LVL2 トリガー効率がシミュレーションの値より約 2% 低いことが分かる。これはソフトウェアの combined algorithm に問題があったため、PeriodH 以降で問題が解決された。図 6.23 に periodF-G と periodH-M に分けた場合のバレル部における $\varepsilon_{L2\text{wrt}L1}$ を示す。ヒストグラム下段の Difference は periodF-G と periodH-M の $\varepsilon_{L2\text{wrt}L1}$ の差を表していて、periodH 以降では約 5% 程 $\varepsilon_{L2\text{wrt}L1}$ が上昇しているのが確認出来る。

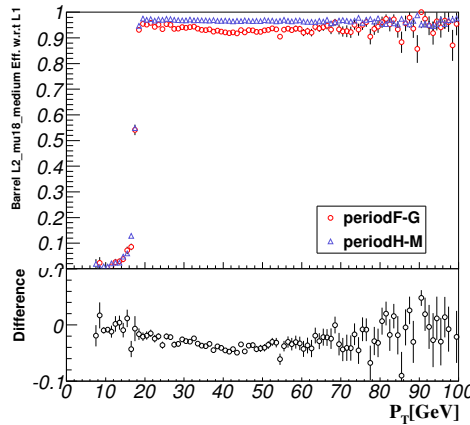


Fig. 6.23 period の違いによる $\varepsilon_{L2\text{wrt}L1}$ の変化

イベントフィルタトリガー効率

レベル2トリガーの場合と同様に、イベントフィルターのレベル2トリガーに対する効率を式6.6のように定義する。イベントフィルターはEF_mu18、EF_mu18_medium 共に99%以上の効率で期待通りの性能を発揮している。

$$\varepsilon_{\text{EFwrtL2}} = \frac{\text{EF トリガーとマッチングの取れた probe muon の数}}{\text{Level2 とマッチングの取れた Probe muon の数}} \quad (6.6)$$

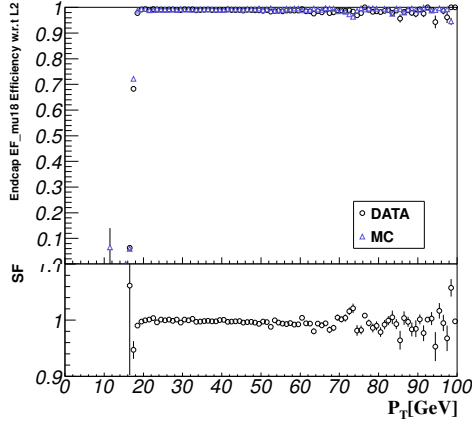


Fig. 6.24 Endcap EF_mu18 Efficiency w.r.t L2 vs P_T

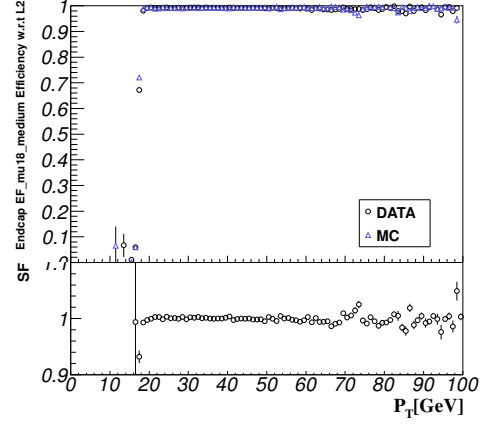


Fig. 6.25 Endcap EF_mu18_medium Efficiency w.r.t L2 vs P_T

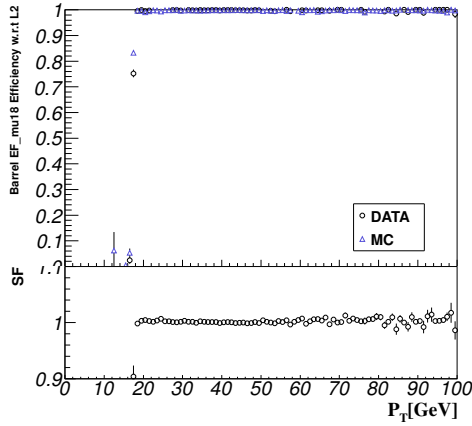


Fig. 6.26 Barrel EF_mu18 Efficiency w.r.t L2 vs P_T

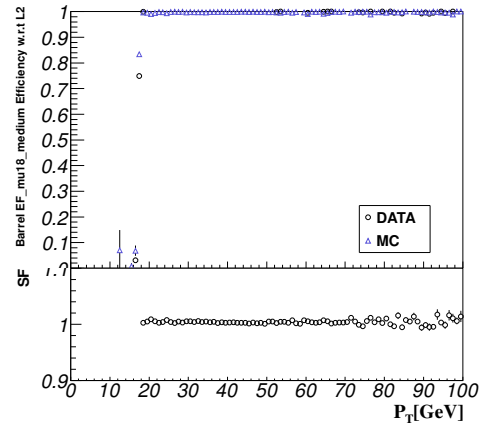


Fig. 6.27 Barrel EF_mu18_medium Efficiency w.r.t L2 vs P_T

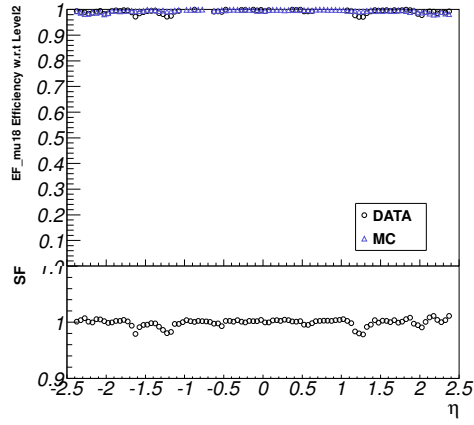


Fig. 6.28 EF_mu18 Trigger Efficiency w.r.t L2 vs η

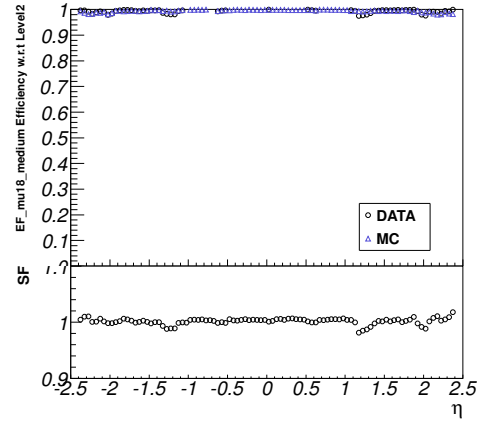


Fig. 6.29 EF_mu18_medium Efficiency w.r.t L2 vs η

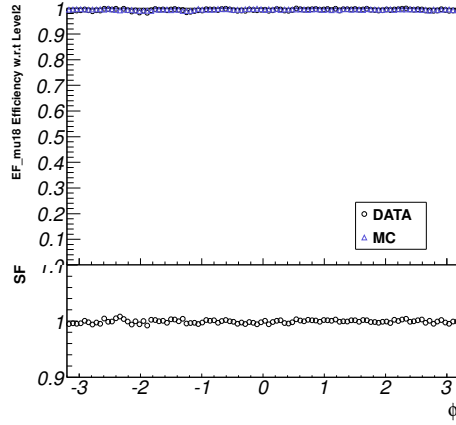


Fig. 6.30 EF_mu18 Efficiency w.r.t L2 vs ϕ

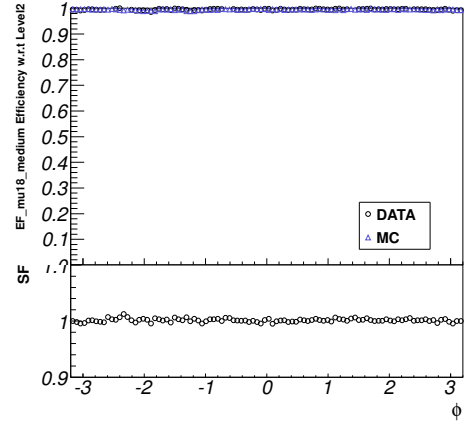


Fig. 6.31 EF_mu18_medium Efficiency w.r.t L2 vs ϕ

Table 6.7 $P_T > 20\text{GeV}$ における $\varepsilon_{\text{EFwrtL2}}$

	EF TrigEff w.r.t L2. DATA	EF TrigEff w.r.t L2. MC	Scale Factor
EF_mu18	0.9942 ± 0.0001	0.9949 ± 0.0001	1.0006 ± 0.0001
EF_mu18_medium	0.9964 ± 0.0000	0.9949 ± 0.0001	1.0015 ± 0.0001

ミューオントリガー効率

最終的なミューオンのトリガー効率はこれまでに述べた各トリガーレベルにおける効率の掛け算に相当する。また、ミューオントリガー効率の安定性を確認するために period 毎においても計算を行い、結果を以下に示す。

$$\varepsilon_{\text{mutrig}} = \frac{\text{Event Fileter トリガーとマッチングの取れた Probe muon の数}}{\text{Probe muon の数}} \quad (6.7)$$

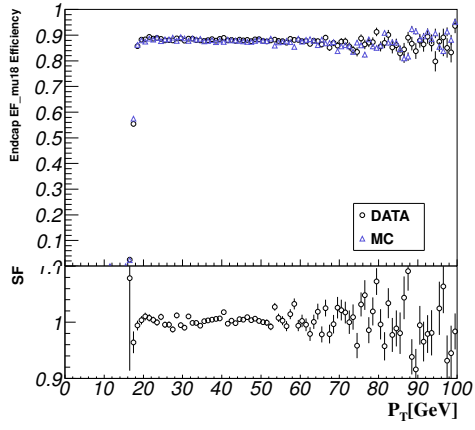


Fig. 6.32 Endcap EF_mu18 Efficiency vs P_T

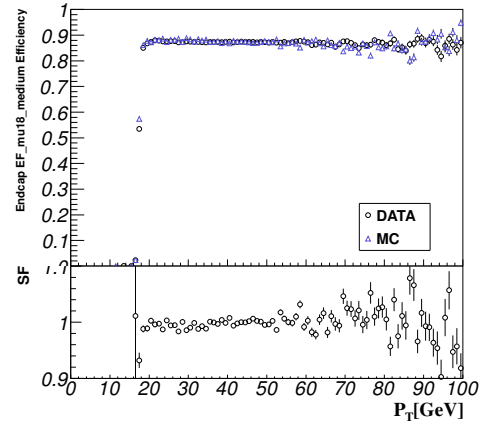


Fig. 6.33 Endcap EF_mu18_medium Efficiency vs P_T

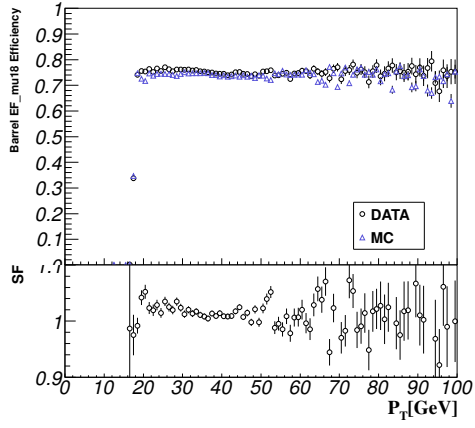


Fig. 6.34 Barrel EF_mu18 Efficiency vs P_T

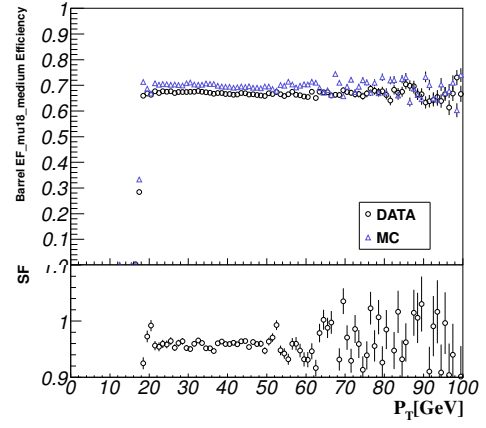


Fig. 6.35 Barrel EF_mu18_medium Efficiency vs P_T

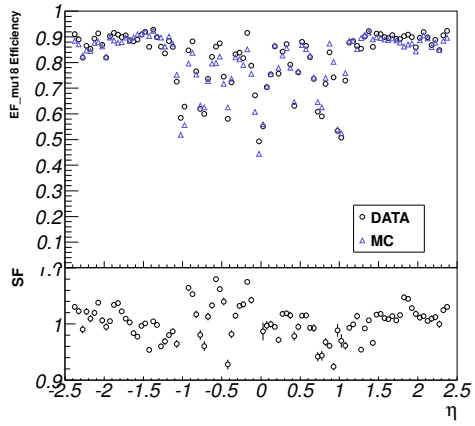


Fig. 6.36 EF_mu18Trigger Efficiency vs η

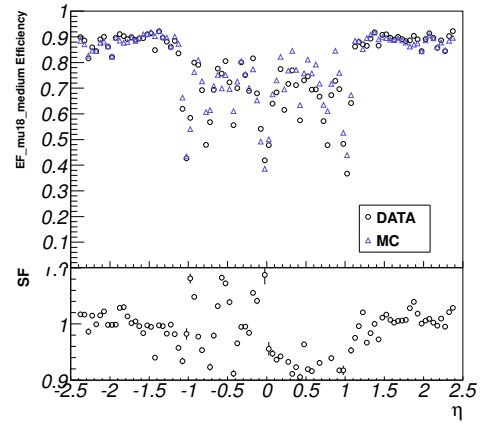


Fig. 6.37 EF_mu18_medium Efficiency vs η

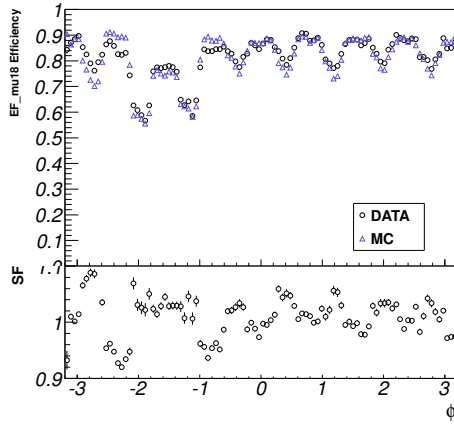


Fig. 6.38 EF_mu18 Efficiency vs ϕ

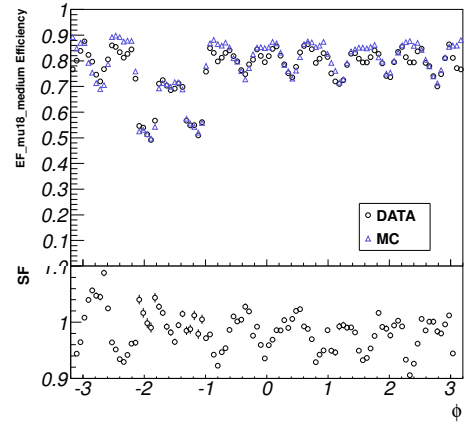


Fig. 6.39 EF_mu18_medium Efficiency vs ϕ

Table 6.8 $P_T > 20\text{GeV}$ におけるミュオントリガー効率

	Muon TrigEff. DATA	Muon TrigEff. MC	Scale Factor
EF_mu18	0.8141 ± 0.0004	0.8064 ± 0.0003	1.0095 ± 0.0006
EF_mu18_medium	0.7685 ± 0.0003	0.7826 ± 0.0003	0.9820 ± 0.0005

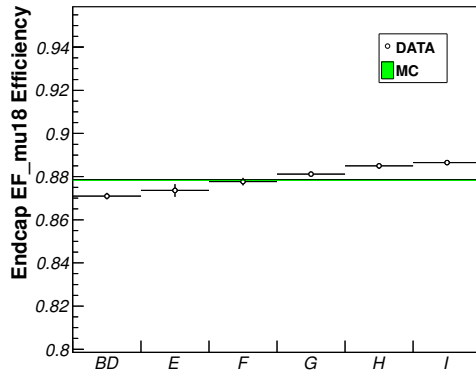


Fig. 6.40 Endcap EF_mu18 Efficiency vs Period

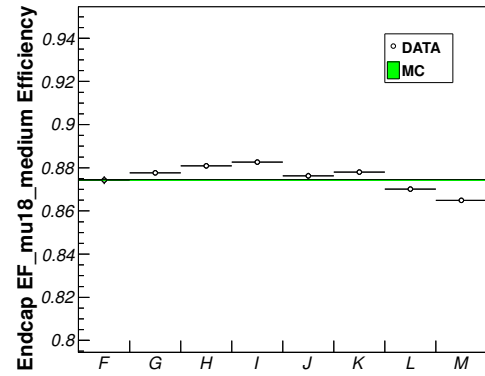


Fig. 6.41 Endcap EF_mu18_medium Efficiency vs Period

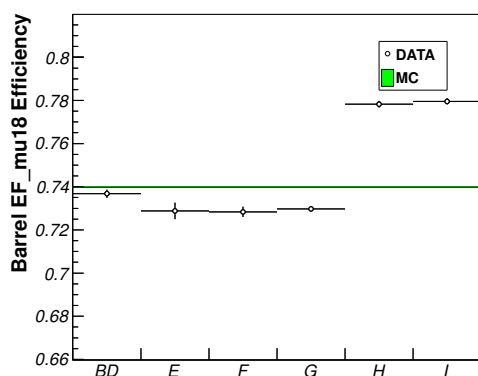


Fig. 6.42 Barrel EF_mu18 Efficiency vs Period

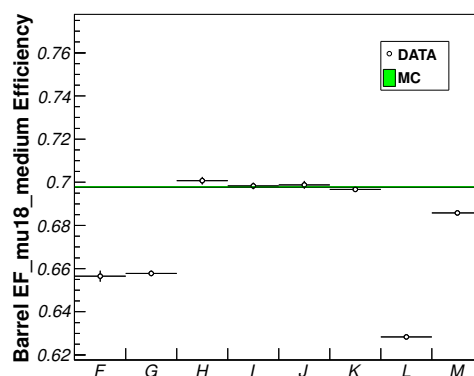


Fig. 6.43 Barrel EF_mu18_medium Efficiency vs Period

2011年に取得されたデータのミュオントリガー効率はEF_mu18で81.4%、EF_mu18.mediumで76.9%であった。シミュレーションとは精度約1.5%で一致しており、概ね期待通りのパフォーマンスを示していると言える。しかし、period毎のトリガー効率の図6.42,43からバレル部においてデータのトリガー効率が大きく変動し、シミュレーションでも再現されていないことが分かる。まず、periodH以降でトリガー効率が約4%程上昇した理由はレベル2におけるcombined algorithmの問題が解決されたことによる。次に、periodLで大きく効率を落としている理由はrun189205～run189638の期間でRPCハードウェアのタイミング設定に間違いがあったためである。この期間RPCでは約15%のトリガー効率の低下が見られた。

このように、トリガー効率は特にレベル1に用いられる検出器のタイミングや検出効率などに大きく左右されるため、トリガーの初段に位置するレベル1トリガーの発行が安定したミュオントリガーの発行の鍵となる。7章ではLevel1トリガーの発行を担うTGCのパフォーマンスに注目し、より詳細な評価を行う。また、図6.43のEF_mu18_mediumにおいては後半のデータのトリガー効率がシミュレーションで再現されているのに対し、図6.42のEF_mu18はそうでない。このEF_mu18のデータとシミュレーション差異はレベル1トリガーのRPCにおけるシミュレーションのチューニングがまだ完全でないためである。次節ではZ Tag and Probe法を用いたトリガー効率測定の系統誤差について述べる。

6.4 ミュオントリガー効率の系統誤差

ここでZ Tag and Probe法によるミュオントリガー効率測定の精度を評価するために、トリガー効率の系統誤差について述べる。トリガー効率の系統誤差のは以下に示すパラメーターを変化させ、得られた効率を元の値と比較することで見積もった。

- Invariant mass cut : ± 2 GeV
- Tag muon における P_T cut : $\pm 10\%$
- Tag muon における isolation cut : $\pm 10\%$
- Tag and Probe pair における $\Delta\phi$ cut : $\pm 10\%$
- Tag and Probe pair における Δz_0 cut : $\pm 10\%$

- Tag and Probe pair における Δd_0 cut : $\pm 10\%$
- Probe muon とトリガーオブジェクトとのマッチングの基準 : $\Delta R_{-0.005}^{+0.005}$
- $|\Delta\phi_{tag,probe}| < \pi - 0.1$

ここで、 $|\Delta\phi_{tag,probe}| < \pi - 0.1$ は Z ボゾンを用いた Tag and Probe 法のバイアスを見積もるために行われる。図 6.44 に示される通り RPC は x - y 平面において 8 回対称の構造をしている。従って、Z ボゾンの崩壊に伴うミューオンが back-to-back に生成された場合に tag muon がトリガーされている事を要求すると probe muon も検出器が存在する領域に飛来すると予想され、トリガー効率が高く見積もられるためである。

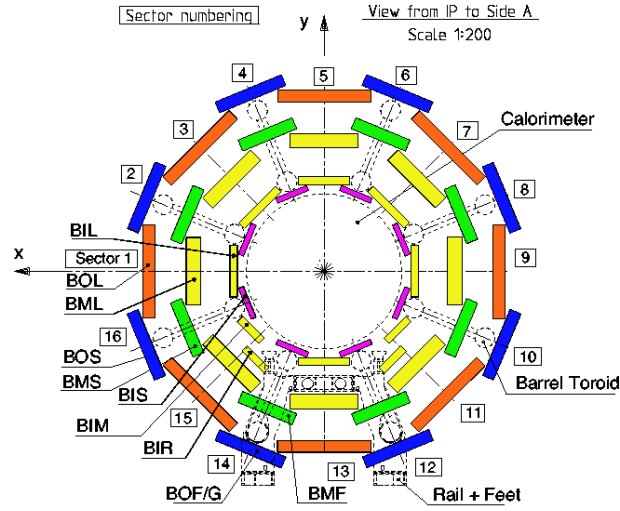


Fig. 6.44 RPC の x - y 平面断面図

今回の系統誤差の評価には EF_mu18_medium を用いた。使用したデータ量は periodF-M である。各カットパラメータによるトリガー効率の変化を図 6.45-46 と表 6.9 にまとめた。各カットパラメータの ($\pm$) 方向の変化に対しトリガー効率の変動が大きい方を系統誤差として採用した。得られた結果はデータに対しては $0.7685 \pm 0.0003(\text{stat.}) \pm 0.0023(\text{syst.})$ 、MC に対しては $0.7826 \pm 0.0003(\text{stat.}) \pm 0.0013(\text{syst.})$ であった。これにより Z Tag and Probe 法は精度 0.3% という高精度でミューオントリガー効率を決定出来ることが示された。

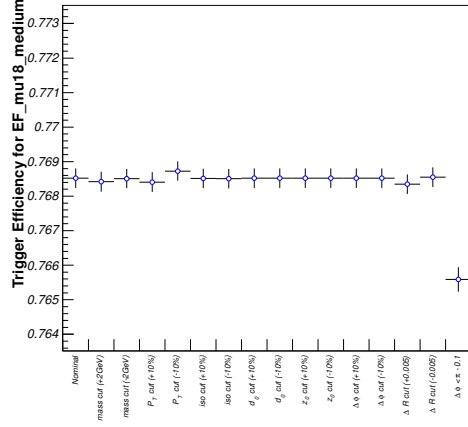


Fig. 6.45 DATA の各 Cut parameter に対するトリガー効率の変化

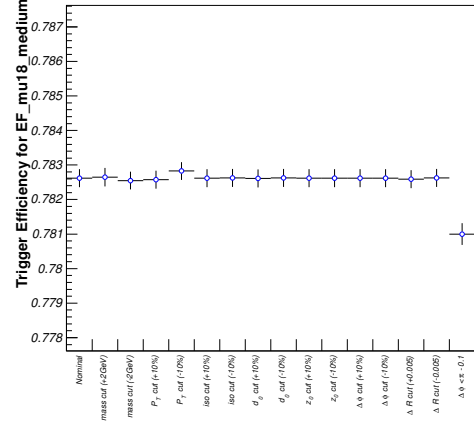


Fig. 6.46 MC の各 Cut parameter に対するトリガー効率の変化

Table 6.9 トリガー効率に対する系統誤差のまとめ

Syst. test	$\Delta \text{Trig. eff}_{\text{DATA}}(\%)$	$\Delta \text{Trig. eff}_{\text{MC}}(\%)$
$M_{\mu\mu}$ cut +2 GeV	-0.0102	+0.0029
$M_{\mu\mu}$ cut -2 GeV	-0.0014	-0.0072
P_T cut +10 %	-0.0113	-0.0042
P_T cut -10 %	+0.0205	+0.0207
Isolation cut +10 %	-0.0007	+0.0002
Isolation cut -10 %	-0.0011	+0.0008
Δd_0 cut +10 %	+0.0001	-0.0009
Δd_0 cut -10 %	-0.0002	+0.0007
Δz_0 cut +10 %	-0.0001	0.0000
Δz_0 cut -10 %	0.0001	0.0000
$\Delta\phi$ cut +10 %	0.0000	0.0000
$\Delta\phi$ cut -10 %	0.0000	0.0000
ΔR cut +0.005	-0.0175	-0.0027
ΔR cut -0.005	+0.0031	-0.0006
$\Delta\phi < \pi - 0.1$	-0.2935	-0.1619
Total	0.2949	0.1634

7 TGC トリガーシステムの評価

この章ではレベル 1 トリガーの発行を担う検出器である Thin Gap Chamber(TGC) の評価を行う。特にトリガー効率とトリガータイミングの評価を行い、TGC のトリガー発行の安定性について述べる。また、トリガーパフォーマンスの向上に向けた、実データを用いたコインシデンスウィンドウ (CW) の作成とその評価を述べる。解析に使用するデータは PeriodB-M である。

7.1 2011 年の TGC トリガー

TGC は表 7.1 に示す通り 6 種類のトリガーが実装可能である。L1_MUxx の xx はトリガーの閾値 P_T を表す。例えば、L1_MU10 では $P_T=10\text{GeV}$ 以上のミューオンをトリガーする。ただし、L1_MU0 は特別で M2 と M3 の 2 ステーションコインシデンスで CW が全てオープン状態でトリガーを発行する。L1_MU0 は 2011 年においてルミノシティの増加に伴い、run187810 以降で一部の領域が 3 ステーションコインシデンスに変更された (L1_MU4')。L1_MU6 以上のトリガーは 3 ステーションコインシデンスでかつ CW を参照することでトリガーの発行を判断する。

Table 7.1 TGC のトリガースレッシュホールド

Threshold Name	P_{T1}	P_{T2}	P_{T3}	P_{T4}	P_{T5}	P_{T6}
Trigger Name	L1_MU0(L1_MU4')	L1_MU6	L1_MU10	L1_MU11	L1_MU15	L1_MU20

7.1.1 TGC トリガー効率

以下に 6 章で述べた Tag and Probe 法を用いて計算した TGC トリガー効率を図 7.1-6 に示す。また、データとシミュレーションとの効率の差 (Difference) を定義する。ミューオンの選別は 6.2 の通りであるが、マッチングの取れた RoI が TGC 由来であるという条件を課す。また $P_T > 20\text{GeV}$ におけるトリガー効率とフェルミ関数 (式 7.1) によるフィットから求めたパラメーターを表 7.2-3 にまとめる。

$$\text{Difference} = \text{Trigger efficiency}(\text{DATA}) - \text{Trigger efficiency}(\text{Z} \rightarrow \mu\mu \text{ MC}) \quad (7.1)$$

$$F(P_T) = \frac{A_P}{1 + \exp(\frac{1}{C_W}(P_T - B_T))}, \quad (A_P : \text{Plateau efficiency}, B_T : \text{Threshold}, C_W : \text{Width}) \quad (7.2)$$

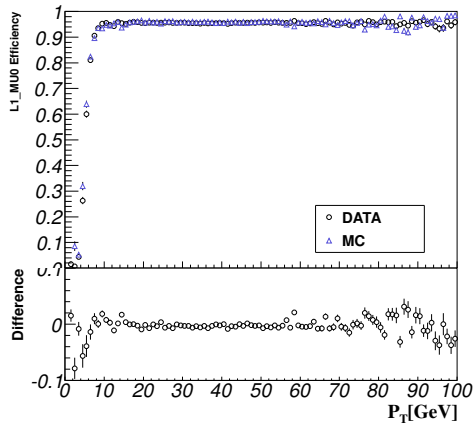


Fig. 7.1 L1_MU0 Efficiency

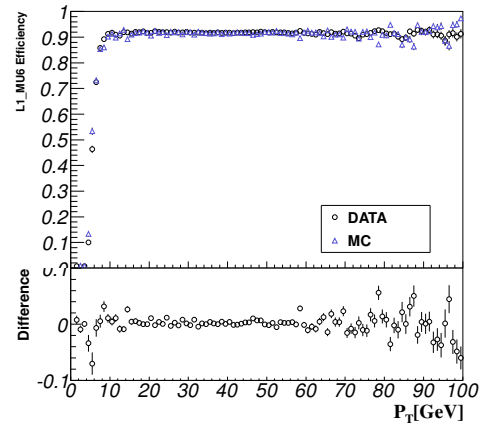


Fig. 7.2 L1_MU6 Efficiency

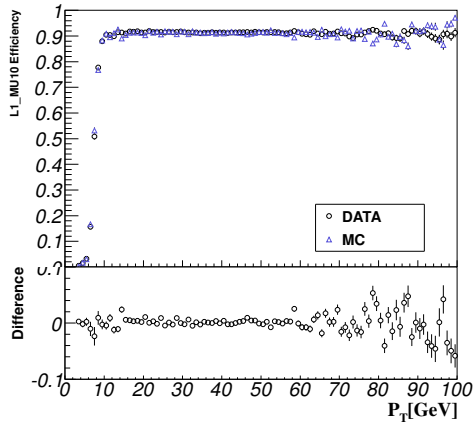


Fig. 7.3 L1_MU10 Efficiency

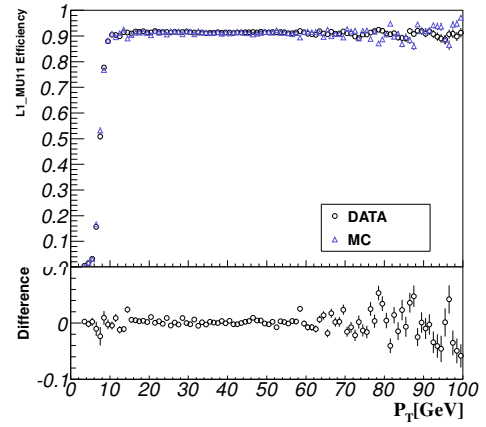


Fig. 7.4 L1_MU11 Efficiency

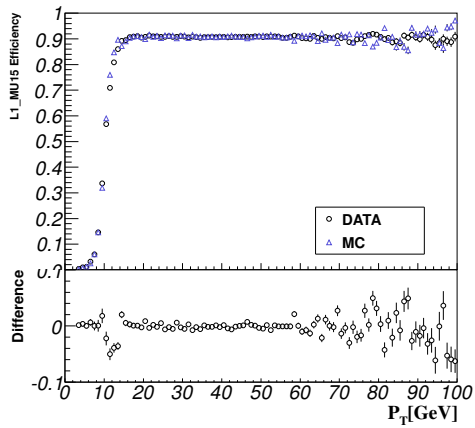


Fig. 7.5 L1_MU15 Efficiency

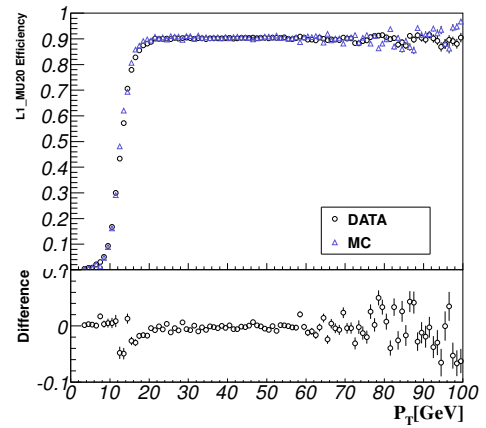


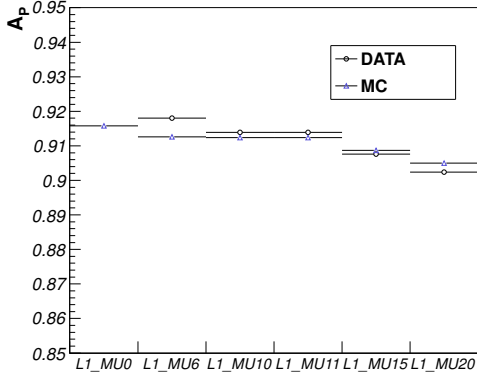
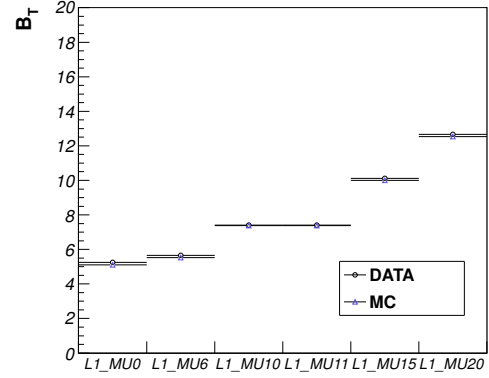
Fig. 7.6 L1_MU20 Efficiency

Table 7.2 TGC Trigger Efficiency Summary. DATA

	eff. $P_T > 20\text{GeV}$	A_P (Plateau) by Fit	B_T (Threshold) by Fit	C_W (Width) by Fit
L1_MU0	0.9554 ± 0.0002	0.9555 ± 0.0002	5.2546 ± 0.0262	0.6662 ± 0.0158
L1_MU6	0.9180 ± 0.0003	0.9180 ± 0.0003	5.6543 ± 0.0258	0.5678 ± 0.0146
L1_MU10	0.9139 ± 0.0003	0.9139 ± 0.0003	7.4145 ± 0.0213	0.6100 ± 0.0147
L1_MU11	0.9139 ± 0.0003	0.9139 ± 0.0003	7.4145 ± 0.0213	0.6100 ± 0.0147
L1_MU15	0.9076 ± 0.0003	0.9076 ± 0.0003	10.113 ± 0.0231	1.0665 ± 0.0160
L1_MU20	0.9023 ± 0.0003	0.9024 ± 0.0003	12.667 ± 0.0236	1.5536 ± 0.0164

Table 7.3 TGC Trigger Efficiency Summary. MC

	eff. $P_T > 20\text{GeV}$	A_P (Plateau) by Fit	B_T (Threshold) by Fit	C_W (Width) by Fit
L1_MU0	0.9582 ± 0.0002	0.9158 ± 0.0002	5.1106 ± 0.0283	0.7707 ± 0.0220
L1_MU6	0.9157 ± 0.0002	0.9126 ± 0.0003	5.5305 ± 0.0269	0.5999 ± 0.0165
L1_MU10	0.9124 ± 0.0002	0.9124 ± 0.0002	7.3825 ± 0.0207	0.6105 ± 0.0137
L1_MU11	0.9124 ± 0.0002	0.9124 ± 0.0002	7.3825 ± 0.0207	0.6105 ± 0.0137
L1_MU15	0.9086 ± 0.0002	0.9087 ± 0.0003	9.9971 ± 0.0197	0.9379 ± 0.0145
L1_MU20	0.9050 ± 0.0002	0.9050 ± 0.0003	12.537 ± 0.0206	1.4007 ± 0.0138

Fig. 7.7 A_P summaryFig. 7.8 B_T summary

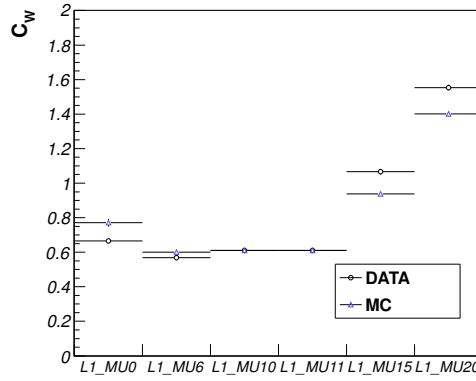


Fig. 7.9 C_W summary

図 7.7-9 に表 7.2,3 に示されているフィットの値をまとめた。図 7.7 から TGC はプラトーで約 90% 以上という高いトリガー効率を維持し、シミュレーションとも精度 0.5% で一致しており、期待通りのパフォーマンスを発揮しているといえる。データとシミュレーションのプラトー領域におけるトリガー効率の一致は TGC の検出効率がシミュレーションで正しく再現されているためで、7.1.3 で詳細に述べる。しかし、L1_MU20 を表す図 7.6 において閾値付近でデータのトリガー効率がシミュレーションに比べ約 5% 程低いのが見て取れる。この効果は図 7.9 のデータの C_W (Width) 増加にも現れている。この閾値付近でのトリガー効率の低下については 7.3 で述べる。

7.1.2 TGC トリガー効率の遷移

TGC のトリガー発行の安定性を確認するために period 毎のトリガー効率 ($P_T > 20\text{GeV}$) を計算した。結果を各 P_T スレッショルド毎に以下の図 7.10-15 に示す。

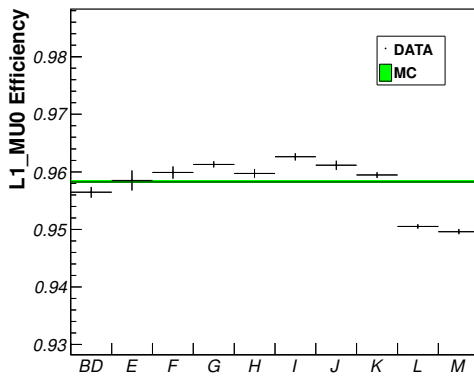


Fig. 7.10 L1_MU0 Efficiency vs Data taking Period

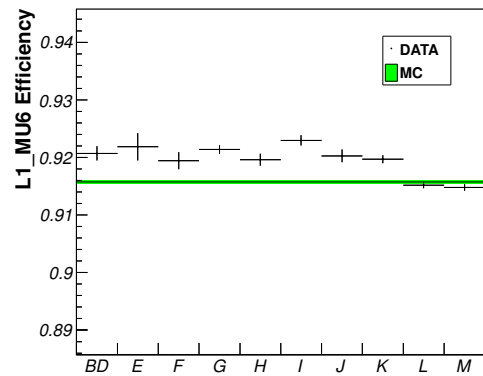


Fig. 7.11 L1_MU6 Efficiency vs Data taking Period

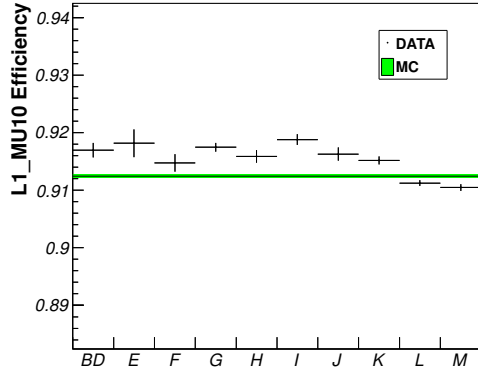


Fig. 7.12 L1_MU10 Efficiency vs Data taking Period

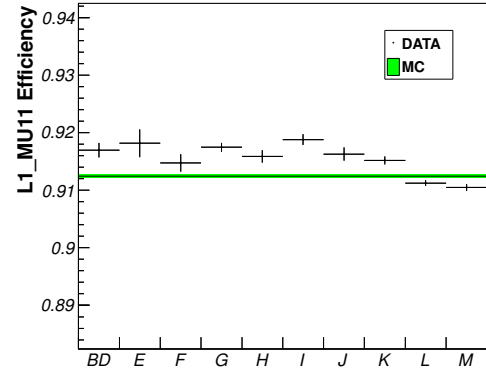


Fig. 7.13 L1_MU11 Efficiency vs Data taking Period

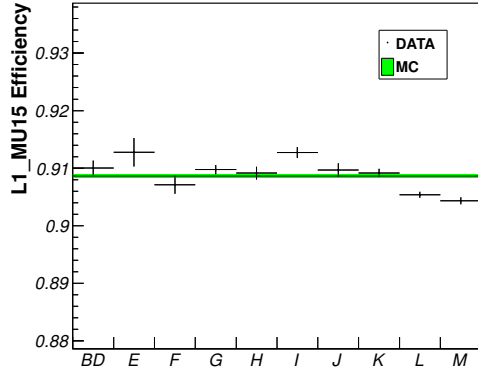


Fig. 7.14 L1_MU15 Efficiency vs Data taking Period

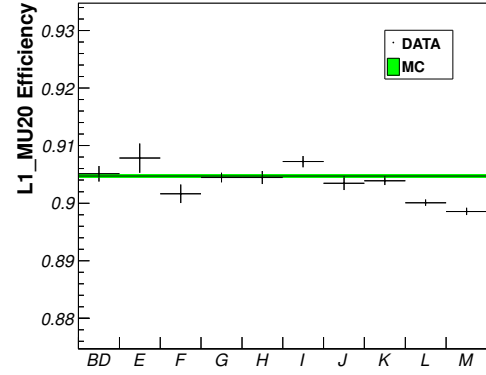


Fig. 7.15 L1_MU20 Efficiency vs Data taking Period

Table 7.4 History of TGC Trigger Efficiencies

	L1_MU0	L1_MU6	L1_MU10	L1_MU11	L1_MU15	L1_MU20
PeriodBD	0.9565 ± 0.0009	0.9207 ± 0.0012	0.9170 ± 0.0013	0.9170 ± 0.0013	0.9100 ± 0.0013	0.9051 ± 0.0013
PeriodE	0.9585 ± 0.0018	0.9219 ± 0.0024	0.9182 ± 0.0024	0.9182 ± 0.0024	0.9128 ± 0.0025	0.9078 ± 0.0025
PeriodF	0.9599 ± 0.0011	0.9194 ± 0.0015	0.9147 ± 0.0015	0.9147 ± 0.0015	0.9071 ± 0.0016	0.9016 ± 0.0016
PeriodG	0.9613 ± 0.0005	0.9214 ± 0.0007	0.9175 ± 0.0008	0.9175 ± 0.0008	0.9098 ± 0.0008	0.9044 ± 0.0008
PeriodH	0.9597 ± 0.0008	0.9196 ± 0.0010	0.9159 ± 0.0011	0.9159 ± 0.0011	0.9091 ± 0.0011	0.9045 ± 0.0011
PeriodI	0.9626 ± 0.0006	0.9230 ± 0.0009	0.9188 ± 0.0009	0.9188 ± 0.0009	0.9128 ± 0.0009	0.9072 ± 0.0010
PeriodJ	0.9611 ± 0.0008	0.9203 ± 0.0011	0.9163 ± 0.0011	0.9163 ± 0.0011	0.9097 ± 0.0012	0.9035 ± 0.0012
PeriodK	0.9594 ± 0.0005	0.9197 ± 0.0007	0.9152 ± 0.0007	0.9152 ± 0.0007	0.9092 ± 0.0007	0.9039 ± 0.0007
PeriodL	0.9505 ± 0.0004	0.9152 ± 0.0005	0.9112 ± 0.0005	0.9112 ± 0.0005	0.9054 ± 0.0005	0.9000 ± 0.0005
PeriodM	0.9496 ± 0.0005	0.9148 ± 0.0006	0.9105 ± 0.0006	0.9105 ± 0.0006	0.9043 ± 0.0006	0.8986 ± 0.0006

図 7.10-15 から periodB-K においてはトリガー効率の変動は約 $\pm 0.3\%$ 以下である。これはチェンバーのトリップと統計による変動だと考えられ、この期間 TGC は非常に安定したトリガー効率で運転したと言える。しかし、2011 年後半の period である L,M でトリガー効率が若干の低下を示している。これは HV に問題を抱える dead chamber が増加傾向にあるためで、次節で詳細に述べる。

次節以降ではトリガー効率に影響を与える TGC の検出効率、タイミングの評価を行っていく。

7.1.3 チェンバーの検出効率

TGC は A-side,C-side でそれぞれ 7 layer 存在し、各 layer でストリップとワイヤーのヒット情報を統合することでトリガーの発行を判断している。このワイヤーとストリップに対する検出効率の計算を行った。イベントのトリガーによるバイアスを無くするために、トリガー効率の計算と同様に Tag and Probe 法を用いる。イベントの選別は 6.2 に従う。Probe muon には track extrapolator というツールを用いる。Track extrapolator は内部飛跡検出器で再構成された track からミューオンの飛跡を予測するツールで、TGC 表面でのミューオンの通過位置 (η, ϕ) を知ることができる。今回の解析においては、TGC の 3 ステーション (M1, M2, M3) に対し、表 7.5 に示すとおり 3 つの xy 平面に対し飛跡の予測を行い、それらとストリップもしくはワイヤーのヒット位置とのマッチングを取ることで検出効率 ε_{hit} を求めた。

$$\varepsilon_{\text{hit}} = \frac{(\text{ストリップ or ワイヤー}) \text{ とマッチングの取れた probe muon の数}}{\text{Probe muon の数}} \quad (7.3)$$

Table 7.5 Extrapolator によって外挿する z の位置

	M1	M2	M3
The position to extrapolate	$z = \pm 13605\text{mm}$	$z = \pm 14860\text{mm}$	$z = \pm 15280\text{ mm}$

以下に $Z \rightarrow \mu\mu$ MC サンプルで計算した、ストリップもしくはワイヤーのヒット位置と extrapolator が予測した位置との差 $(\Delta\eta, \Delta\phi)$ を示す。ここでワイヤー、ストリップのヒット情報はそれぞれの中心の座標 (x, y, z) が記録されているので、それを (η, ϕ) に変換することで $(\Delta\eta, \Delta\phi)$ を計算する。ストリップは ϕ 方向の読み出しに使われることから、 $\Delta\phi$ の分布は広がり狭く、ワイヤーは η 方向の読み出しを行うので、 $\delta\eta$ の分布が鋭いことが図 7.16-19 から見てとれる。これらの分布から offline muon とのマッチングの基準を表 7.6 のように定めた。また $(\Delta\eta, \Delta\phi)$ の中心値が 0 に分布していることから extrapolator が正しく機能していることが分かる。

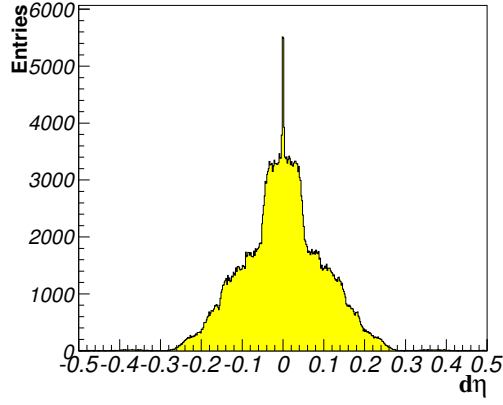


Fig. 7.16 ストリップに対する $\Delta\eta$

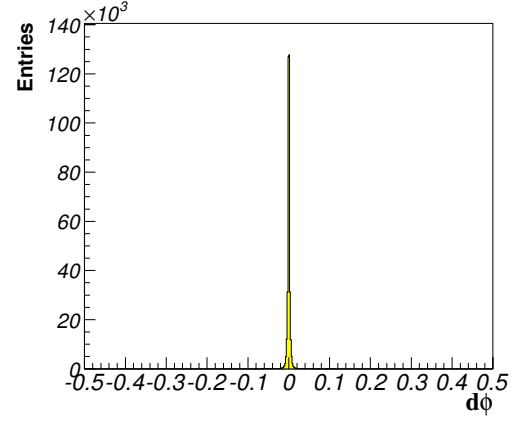


Fig. 7.17 ストリップに対する $\Delta\phi$

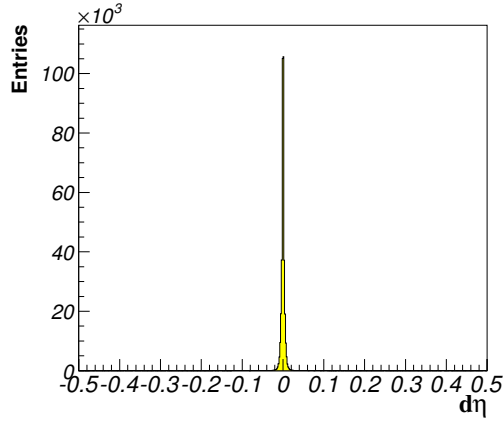


Fig. 7.18 ワイヤーに対する $\Delta\eta$

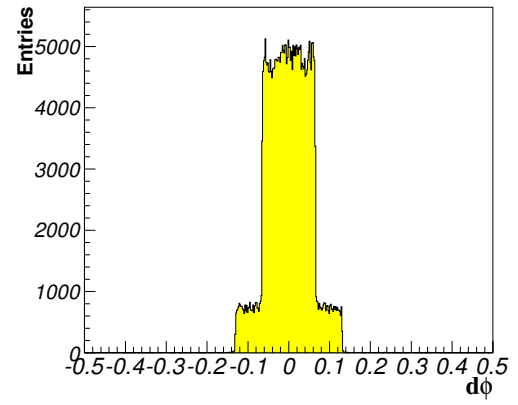


Fig. 7.19 ワイヤーに対する $\Delta\phi$

Table 7.6 TGC のヒットに対するマッチングの基準と平均値

	mean	matching criteria
Strip, η direction	3.87×10^{-4}	0.35
Strip, ϕ direction	2.09×10^{-6}	0.05
Wire, η direction	-1.70×10^{-5}	0.05
Wire, ϕ direction	2.12×10^{-4}	0.20

表 7.6 の基準を用いてチェンバー単位での検出効率を計算した。例として A-side の (M1, layer1) と (M2, layer1) のストリップに対する検出効率を図 7.20-23 に示し、残りのチェンバーについては付録.A.1 に載せた。図 7.20,22 は実データ、図 7.21,23 は $Z \rightarrow \mu\mu$ MC を用いた。

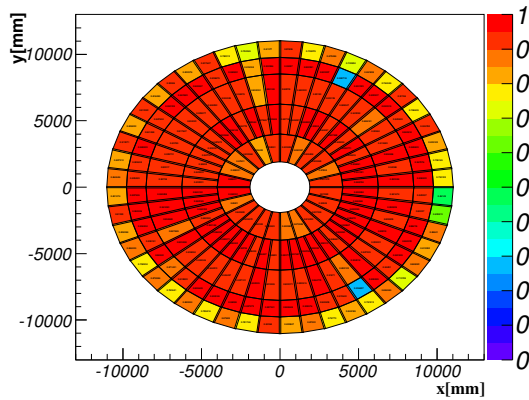


Fig. 7.20 Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer1, DATA

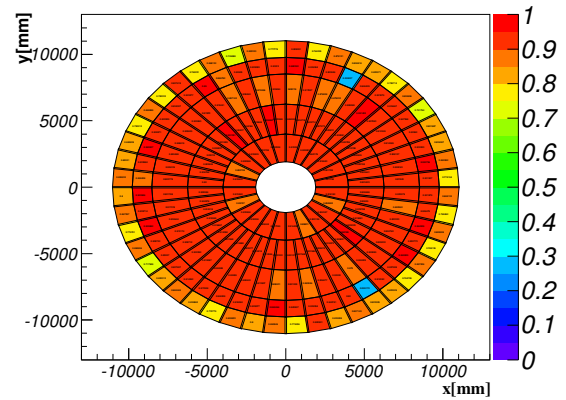


Fig. 7.21 Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer1, MC

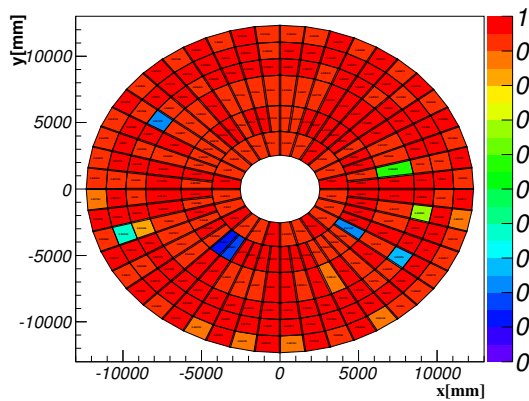


Fig. 7.22 Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer1, DATA

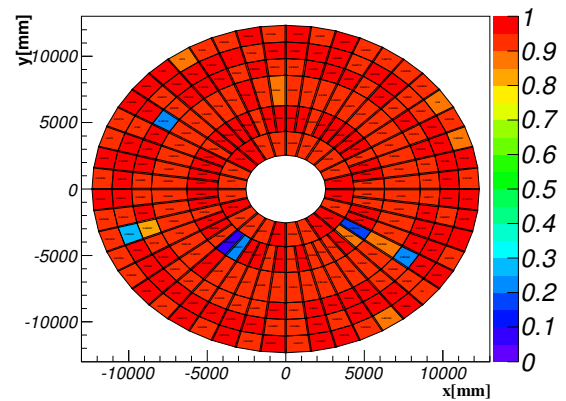


Fig. 7.23 Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer1, MC

上記の図 20,22 から、青く塗られた検出効率が著しく低いチェンバーが存在することが分かる。これらは dead chamber に対応し、検出効率の低下を招いている。チェンバーの取り替えが行えるような長期のメンテナンス期間は年間を通したデータ取得期間では存在せず、解析対象とする期間では dead chamber は日々増加傾向にあった。従って、dead chamber による検出効率の低下はシミュレーションで再現されていない箇所も存在する。また M1 の T8 と呼ばれるビーム軸に対して最も外側に位置するチェンバーが他のチェンバーと比べて検出効率が低いことが見て取れる。これは T8 が初期に製造されたチェンバーでノイズレートが高く閾値や HV を変更しているものが多いことと、検出効率が検出器静電容量 [8] に依存しているためである。

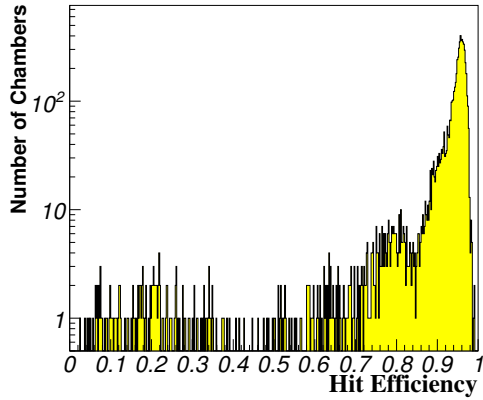


Fig. 7.24 Hit Efficiency Summary, DATA

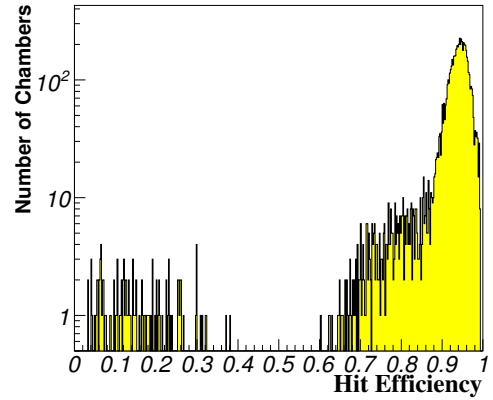


Fig. 7.25 Hit Efficiency Summary, MC

検出効率を横軸、チェンバーの数を縦軸に取ったものが図 7.24,25 である。データから計算した検出効率の平均は 92.9%であり、シミュレーションによる値は 92.1%でデータを概ね再現している。しかし、次項でも示される通りシミュレーションがデータよりも検出効率を若干低く見積もる傾向にある。これはシミュレーションの検出効率がデータのトリガー効率を再現するようにチューニングされており、検出効率は直接比較されていないためだと考えられる。

7.1.4 チェンバーの検出効率の遷移

検出効率の変化を追うために period 毎に各 layer における検出効率を計算した。結果を表 7.7-8 にまとめ、図を付録.A.2 に載せた。以下の図 7.26-29 ではすべての layer で足しあわせたワイヤー、ストリップそれぞれの検出効率の遷移を示す。

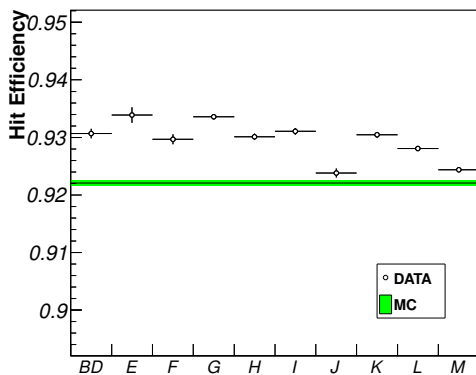


Fig. 7.26 Hit Efficiency History Aside Strip

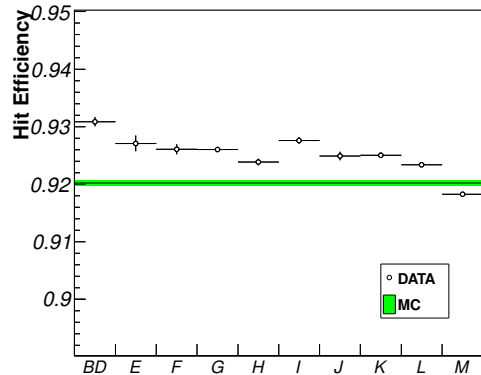


Fig. 7.27 Hit Efficiency History Cside Strip

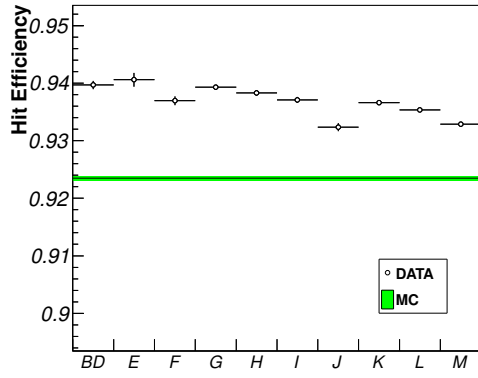


Fig. 7.28 Hit Efficiency History Aside Wire

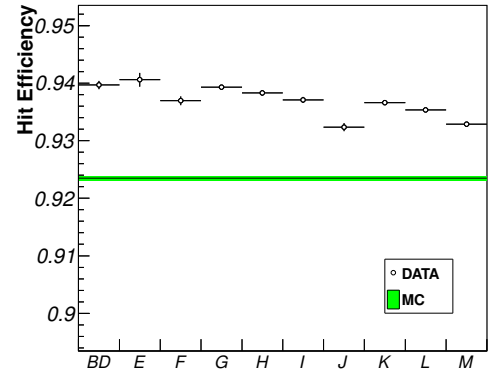


Fig. 7.29 Hit Efficiency History Cside Wire

Table 7.7 ストリップにおける検出効率のまとめ

	M1 Layer1	M1 Layer3	M2 Layer1	M2 Layer2	M3 Layer1	M3 Layer2
PeriodBD	0.9306 ± 0.0014	0.9139 ± 0.0016	0.9340 ± 0.0014	0.9411 ± 0.0013	0.9224 ± 0.0016	0.9429 ± 0.0013
PeriodE	0.9330 ± 0.0023	0.9161 ± 0.0026	0.9338 ± 0.0023	0.9431 ± 0.0022	0.9176 ± 0.0026	0.9388 ± 0.0022
PeriodF	0.9256 ± 0.0015	0.9104 ± 0.0017	0.9313 ± 0.0015	0.9412 ± 0.0014	0.9179 ± 0.0016	0.9406 ± 0.0014
PeriodG	0.9289 ± 0.0008	0.9117 ± 0.0008	0.9328 ± 0.0007	0.9427 ± 0.0007	0.9193 ± 0.0008	0.9428 ± 0.0007
PeriodH	0.9249 ± 0.0010	0.9078 ± 0.0011	0.9306 ± 0.0010	0.9408 ± 0.0009	0.9169 ± 0.0011	0.9404 ± 0.0009
PeriodI	0.9230 ± 0.0010	0.9121 ± 0.0011	0.9330 ± 0.0010	0.9416 ± 0.0010	0.9183 ± 0.0011	0.9407 ± 0.0010
PeriodJ	0.9212 ± 0.0013	0.9058 ± 0.0015	0.9311 ± 0.0013	0.9390 ± 0.0012	0.9121 ± 0.0014	0.9373 ± 0.0012
PeriodK	0.9256 ± 0.0008	0.9073 ± 0.0009	0.9320 ± 0.0008	0.9414 ± 0.0007	0.9185 ± 0.0009	0.9412 ± 0.0007
PeriodL	0.9215 ± 0.0005	0.9073 ± 0.0005	0.9295 ± 0.0005	0.9403 ± 0.0004	0.9162 ± 0.0005	0.9391 ± 0.0004
PeriodM	0.9197 ± 0.0006	0.9073 ± 0.0006	0.9259 ± 0.0006	0.9353 ± 0.0005	0.9119 ± 0.0006	0.9320 ± 0.0005
MC	0.9103 ± 0.0008	0.8979 ± 0.0009	0.9294 ± 0.0007	0.9373 ± 0.0007	0.9366 ± 0.0008	0.9366 ± 0.0007

Table 7.8 ワイヤーにおける検出効率のまとめ

	M1 Layer1	M1 Layer2	M1 Layer3	M2 Layer1	M2 Layer2	M3 Layer1	M3 Layer2
PeriodBD	0.9399 ± 0.0013	0.9017 ± 0.0015	0.9298 ± 0.0014	0.9404 ± 0.0014	0.9467 ± 0.0013	0.9230 ± 0.0015	0.9501 ± 0.0013
PeriodE	0.9401 ± 0.0022	0.9213 ± 0.0025	0.9295 ± 0.0024	0.9374 ± 0.0023	0.9465 ± 0.0021	0.9231 ± 0.0025	0.9464 ± 0.0021
PeriodF	0.9363 ± 0.0014	0.9173 ± 0.0016	0.9311 ± 0.0015	0.9364 ± 0.0014	0.9447 ± 0.0013	0.9261 ± 0.0015	0.9488 ± 0.0013
PeriodG	0.9398 ± 0.0007	0.9186 ± 0.0008	0.9288 ± 0.0008	0.9367 ± 0.0007	0.9442 ± 0.0007	0.9257 ± 0.0008	0.9499 ± 0.0007
PeriodH	0.9382 ± 0.0009	0.9181 ± 0.0010	0.9266 ± 0.0010	0.9362 ± 0.0009	0.9442 ± 0.0009	0.9259 ± 0.0010	0.9492 ± 0.0008
PeriodI	0.9379 ± 0.0010	0.9200 ± 0.0011	0.9274 ± 0.0010	0.9372 ± 0.0010	0.9438 ± 0.0009	0.9242 ± 0.0011	0.9476 ± 0.0009
PeriodJ	0.9317 ± 0.0013	0.9188 ± 0.0014	0.9220 ± 0.0013	0.9362 ± 0.0012	0.9440 ± 0.0012	0.9210 ± 0.0013	0.9450 ± 0.0011
PeriodK	0.9345 ± 0.0008	0.9172 ± 0.0008	0.9230 ± 0.0008	0.9365 ± 0.0008	0.9440 ± 0.0007	0.9257 ± 0.0008	0.9482 ± 0.0007
PeriodL	0.9329 ± 0.0005	0.9169 ± 0.0005	0.9252 ± 0.0005	0.9356 ± 0.0005	0.9440 ± 0.0004	0.9240 ± 0.0005	0.9476 ± 0.0004
PeriodM	0.9307 ± 0.0005	0.9144 ± 0.0006	0.9215 ± 0.0006	0.9320 ± 0.0005	0.9392 ± 0.0005	0.9201 ± 0.0006	0.9403 ± 0.0005
MC	0.9181 ± 0.0008	0.9017 ± 0.0005	0.9294 ± 0.0008	0.9289 ± 0.0007	0.9364 ± 0.0007	0.9182 ± 0.0009	0.9397 ± 0.0007

ストリップ、ワイヤーともに安定した検出効率を示している。ただし、2011 年最初の段階では 44 枚だった dead chamber が 2011 年の終わりには 75 枚に増加したことに伴い、各 layer において 0.5～1%程の検出効率の低下を招いている。今、periodK と periodM に注目し計算で求めた検出効率からトリガーの発行に必要なコインシデンスが取れる確率を計算すると表 7.9 のようになる。これらは約 1.5%のトリガー効率の低下を引き起こすと見積もられ、図 7.10-15 で見られようなデータ取得期間の終盤でのトリガー効率の低下はこれら検出効率の低下が主な原因であると結論づけた。

Table 7.9 Hits のコインシデンスが取れる確率

	Strip ($M1 \text{ Hits} \geq 1/2$) && ($M2 \text{ and } M3 \text{ Hits} \geq 3/4$)	Wire ($M1 \text{ Hits} \geq 2/3$) && ($M2 \text{ and } M3 \text{ Hits} \geq 3/4$)
PeriodK	0.9690	0.9636
PeriodL	0.9634	0.9527

7.1.5 イベントのパイルアップが与える影響

図 7.36 は一度のバンチ衝突において 20 個の vertex が再構成され、その内の一つが $Z \rightarrow \mu\mu$ 候補として観測されたイベント表している。このように、解析対象とするイベント中に複数の衝突反応が現れることをパイルアップと呼ぶ。パイルアップにより検出器の運転状況やミュオンの選別などにバイアスが生じることも考えられる。そこで、バンチ衝突当たりの平均反応数 $\langle\mu\rangle$ に対し TGC のトリガー効率を見積もりこの効果を調べた。 $\langle\mu\rangle$ は period 毎に異なった分布をしていることから今回は 2011 最終のデータ取得期間である periodM のみを解析の対象をした。以下の図 7.30-35 に各 P_T スレッシュホールド毎の結果を示す。データから計算された L1.MU10 に対するトリガー効率を直線でフィットすると傾きが -0.00022 ± 0.00022 であった。この傾きが小さくほぼ統計誤差の範囲で 0 とみなせるため、現状の $\langle\mu\rangle$ ではパイルアップによるバイアスはないと判断した。

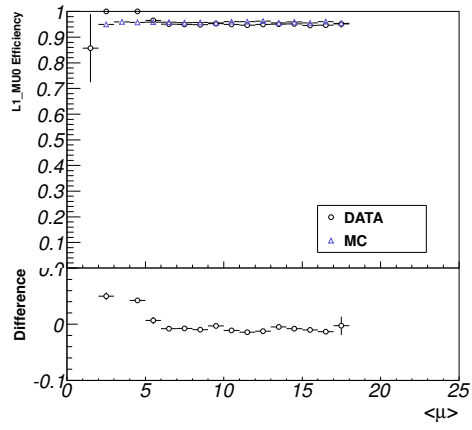


Fig. 7.30 L1.MU0 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$

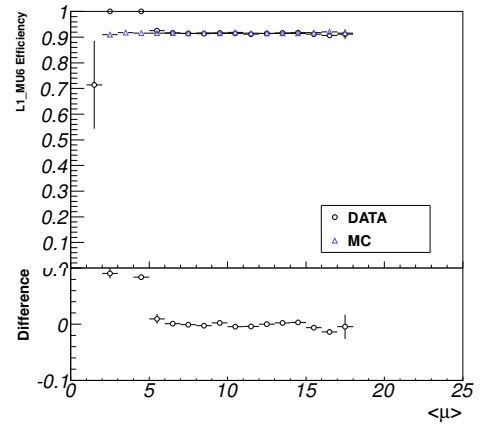


Fig. 7.31 L1.MU6 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$

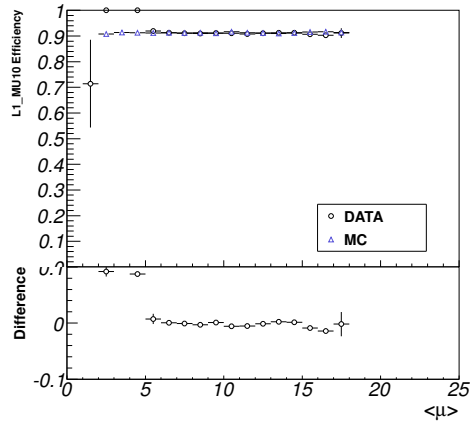


Fig. 7.32 L1.MU10 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$

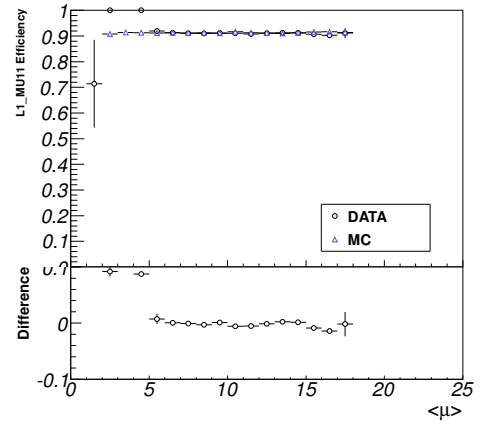


Fig. 7.33 L1.MU11 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$

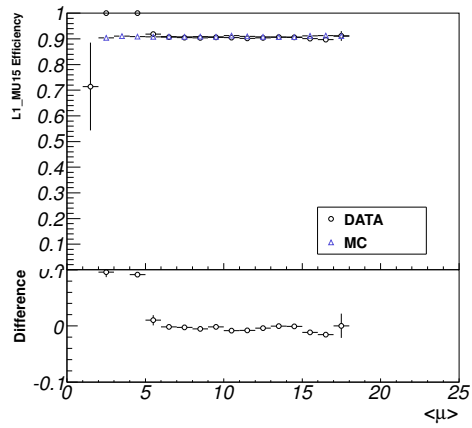


Fig. 7.34 L1.MU15 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$

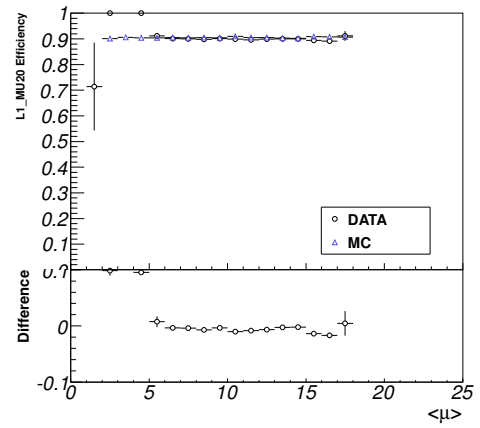


Fig. 7.35 L1.MU20 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$

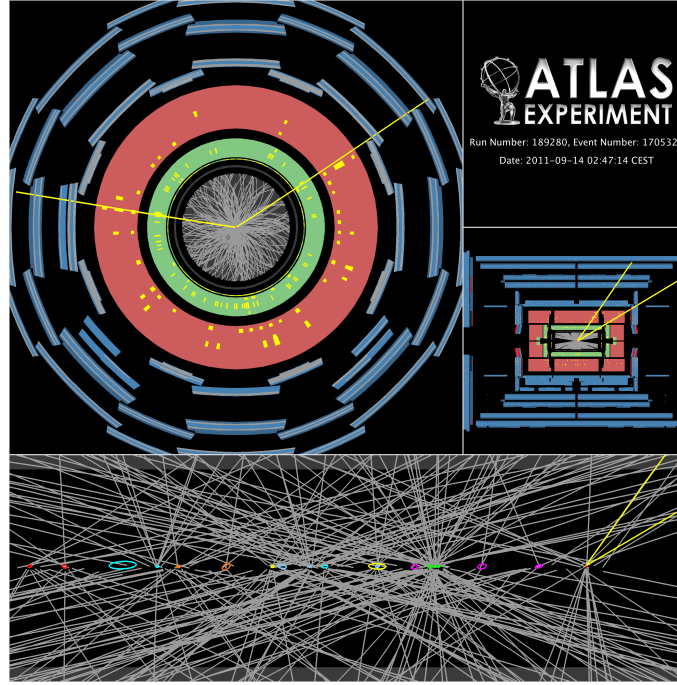


Fig. 7.36 20 個の再構成された Vertex を含むイベント

7.2 トリガータイミングの評価

この節では TGC がトリガーを発行するタイミングについて述べる。2011 年、LHC は 50ns 間隔のバンチ衝突で運転した。LHC 及び ATLAS で用いられるクロックは 1 周期 25ns なので、50ns 間隔でのバンチ衝突の場合はクロック 2 周期ごとにバンチ衝突が起こる。従ってバンチ衝突が起こらないクロック 1 周期が存在し、その間はトリガーが発行されないように設定されている。従って、TGC のトリガーのタイミングがバンチ衝突に対し正しく調整されている必要がある。実際の衝突データを用いてこれらトリガータイミングの評価を行った。トリガータイミングの解析にはカロリメーターでジェット等によってトリガーされたイベント (付録 A.5 の正規表現を満たすトリガーで取得されたイベント) を用いる。これにより、イベントがバンチ衝突と同期されていることが保証でき、それに対し TGC がトリガーを発行するタイミングを評価できるからである。バンチ衝突は 25ns のクロック周期に合わせて 1 から 3564 の Bunch Crossing Identification(BCID) が割り振られる。イベントの BCID と TGC がトリガーを発行したタイミングの BCID の差 (BCID Difference) を以下のように定義することで解析を行う。

$$\text{BCID Difference} = \text{Muonctpi BCID(TGC トリガーのタイミング)} - \text{Event BCID(バンチ衝突のタイミング)} \quad (7.4)$$

7.2.1 TGC トリガータイミング

以下の図 7.37-42 各トリガーにおけるタイミング分布を示す。黒線は全トリガーの分布を表し、青線は $dR < 0.5$ で CB muon とマッチングの取れたトリガー、赤線はマッチングの取れなかったトリガーの分布を表す。また CB muon とマッチングが取れた L1.MU0 に対し on-time(BCID difference = 0) の割合を (η, ϕ) の 2 次元で図 7.43 に示す。

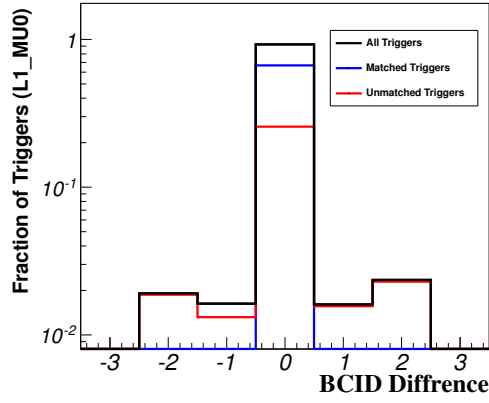


Fig. 7.37 L1_MU0 timing fraction

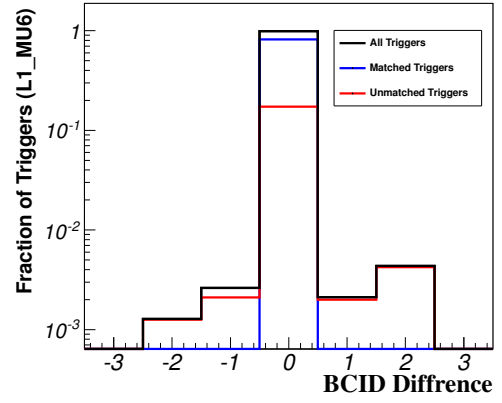


Fig. 7.38 L1_MU6 timing fraction

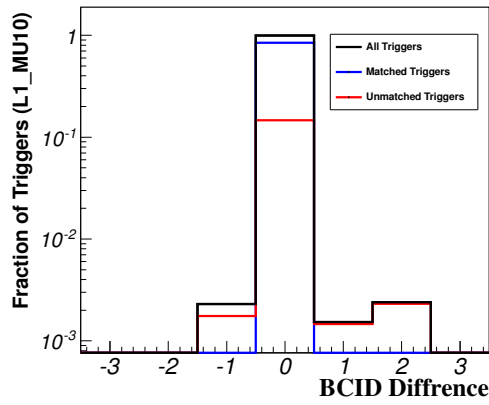


Fig. 7.39 L1_MU10 timing fraction

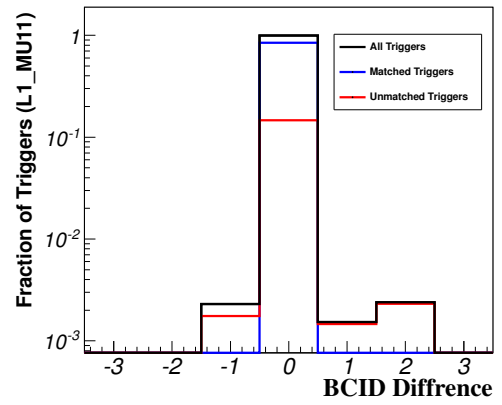


Fig. 7.40 L1_MU11 timing fraction

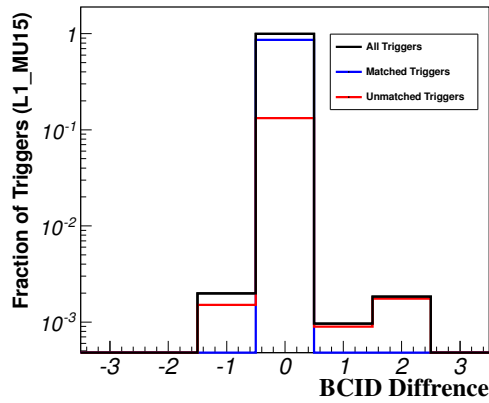


Fig. 7.41 L1_MU15 timing fraction

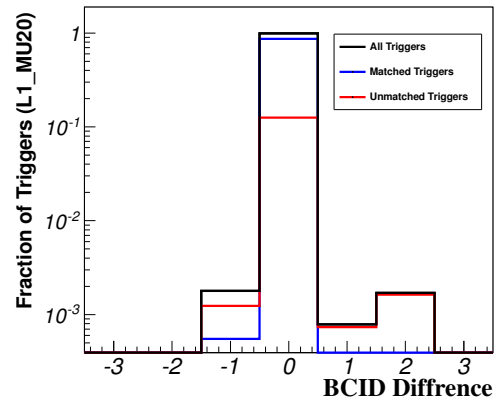


Fig. 7.42 L1_MU20 timing fraction

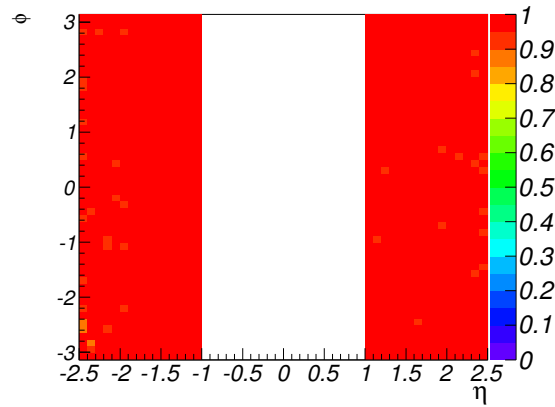


Fig. 7.43 L1_MU0 に対する on-time fraction の η - ϕ 分布

図 7.37-42 より CB muon に関連付けられた L1_MU0 は約 99%、それ以外のトリガーに関しては約 99.9%という高い割合で on-time に分布しており High P_T トリガーの効率に与える影響も 0.1%以下であると考えられる。図 7.43 からは (η, ϕ) に対しどの位置でも高い on-time の割合を示している事がわかる。また図 7.37 の赤線に対応する CB muon に関連付けられないトリガーは on-time(BCID Difference=0) 以外にも全体の約 4%程分布しているが、これらは粒子がビームパイプなどの物質と反応して生じる 2 次粒子によるフェイクトリガーだと考えられており [9]、TGC のタイミング調整の問題を示すものではない。

7.2.2 TGC トリガータイミングの遷移

図 7.44 に CB muon とマッチングの取れたトリガーに対する on-time の割合を period 毎に示す。この図からデータ取得期間中で高い on-time の割合を維持していることがわかる。また L1_MU0 は CW が全てオープン状態でトリガーを発行するために、フェイクトリガーの割合が高く on-time の割合が他のトリガーに比べて低い傾向にある。

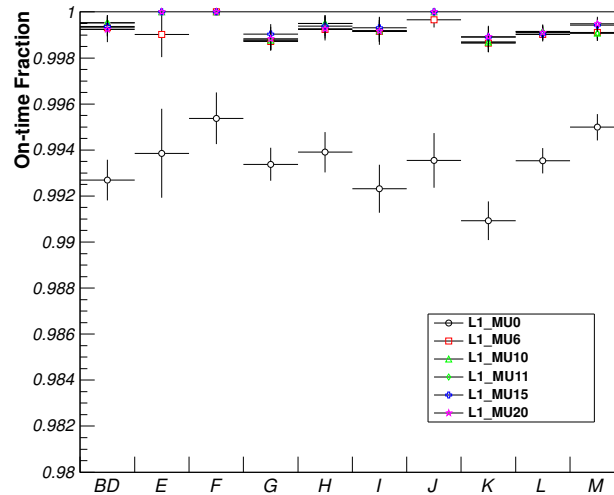


Fig. 7.44 On-time fraction vs period

7.3 コインシデンスウィンドウの評価

この章では TGC がトリガーの発行に用いる CW の評価を行う。2011 年に使用された CW はシミュレーションを元にして作成されている。この具体的な作成方法については 7.4 で述べる。TGC は無限運動量を仮定したミュオンのヒット位置と実際に磁場で曲げられたミュオンのヒット位置との差 ($\delta R, \delta\phi$) から CW を参照することでトリガーを発行している。シミュレーションベースで作成された CW を用いる場合、TGC のヒット情報などにデータとシミュレーションで相違があればトリガー効率の低下につながる。すなわち、データを用いた CW の評価は重要である。評価対象が 17280 と膨大なために高統計で初めて可能な作業である。

7.3.1 シミュレーションとの比較

Offline muon (CB muon, ST muon) と $dR < 0.2$ でマッチングの取れた RoI に対し、各チェンバーにおける ($\delta R, \delta\phi$) の分布をデータとシミュレーションで計算した。例としてデータから計算した、トリガーセクター が 15, RoI ナンバーが 48-99 の ($\delta R, \delta\phi$) 分布を図 45,46 に示す。また関連付けられた offline muon の P_T に従い表 7.10 のように色分けを行った。

Table 7.10 ($\delta R, \delta\phi$) の分布における色分けのパターン

Red	$20 \text{ GeV} < P_T$
Orange	$15 \text{ GeV} < P_T < 20 \text{ GeV}$
Green	$10 \text{ GeV} < P_T < 15 \text{ GeV}$
Blue	$6 \text{ GeV} < P_T < 10 \text{ GeV}$
Removed	$P_T < 6 \text{ GeV}$

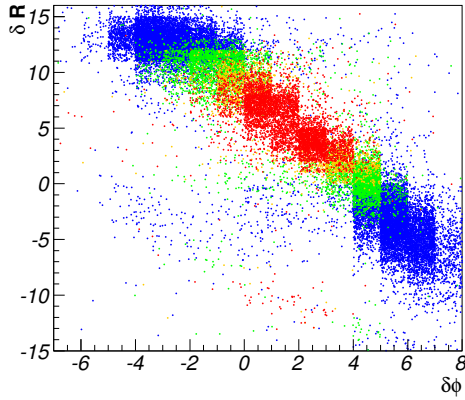


Fig. 7.45 TGC hit map, Aside

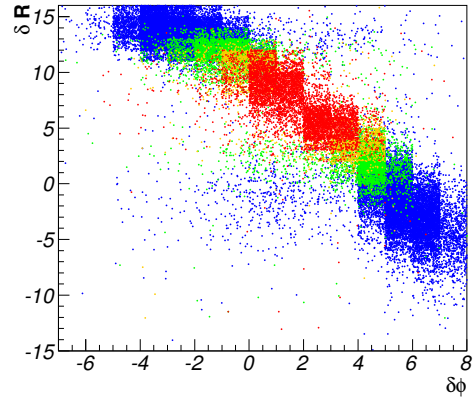


Fig. 7.46 TGC hit map, Cside

上記の図7.45,46 から、A-side と C-side において同じ位置に設置されているチェンバーにも関わらず、C-side における $(\delta R, \delta\phi)$ の分布が A-side と比べた場合に全体的に δR 方向に +1 程ズレていることが見て取れる。この違いは TGC の設置位置が本来期待されている位置よりもズレているためだと考えられる。そこで、設計通りのポジションが組み込まれているシミュレーションを用いて、 $P_T > 20\text{GeV}$ のミュオンに対し Difference(式 7.5,6) を定義することでこのズレの程度を計算した。このとき用いるシミュレーションサンプルは、データにおける offline muon の P_T とエンドキャップ部の η 分布を再現するように作成されたシングルミュオンである。図 7.47,48 にデータとシングルミュオンの P_T と η 分布を示す。またミュオンの電荷により場合分けをし、Aside で電荷が負の場合の Difference を図 49,50 に示す。Cside や正電荷の場合を付録.A.3 に載せる。

$$\eta\text{方向の Difference} = (\text{データの}\delta R\text{の平均値}) - (\text{MCの}\delta R\text{の平均値}) \quad (7.5)$$

$$\phi\text{方向の Difference} = (\text{データの}\delta\phi\text{の平均値}) - (\text{MCの}\delta\phi\text{の平均値}) \quad (7.6)$$

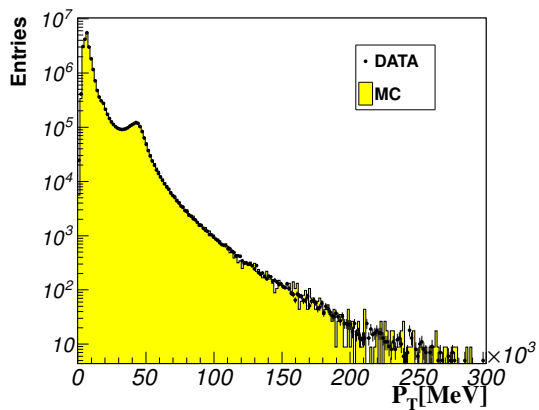


Fig. 7.47 データとシングルミュオンの P_T 分布

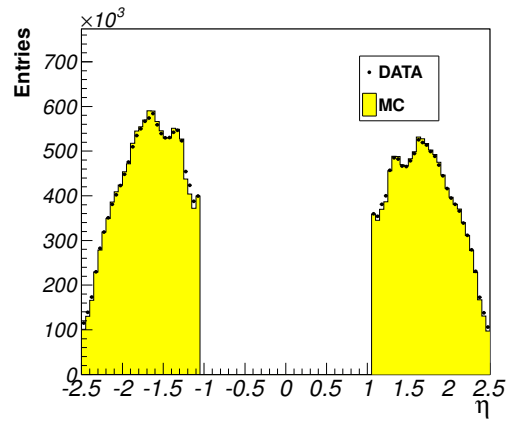


Fig. 7.48 データとシングルミュオンの η 分布

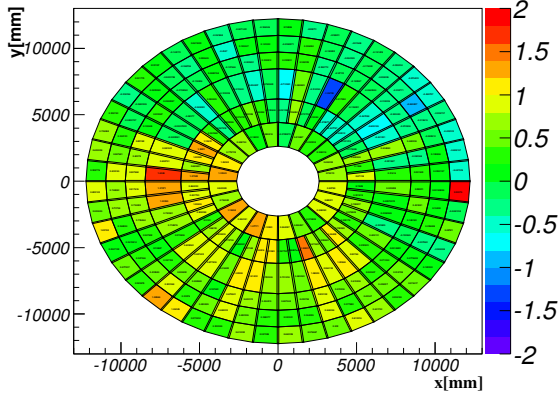


Fig. 7.49 R 方向の Difference, Aside Charge-

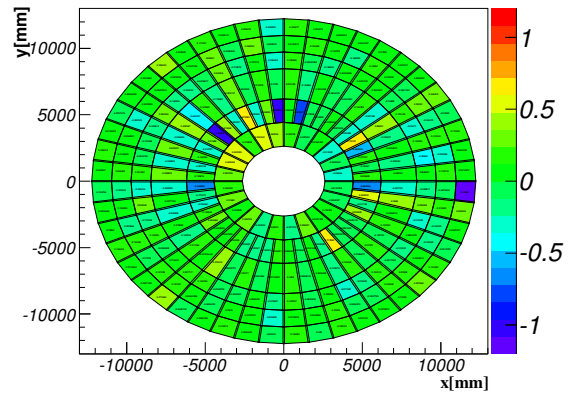


Fig. 7.50 ϕ 方向の Difference, Aside Charge-

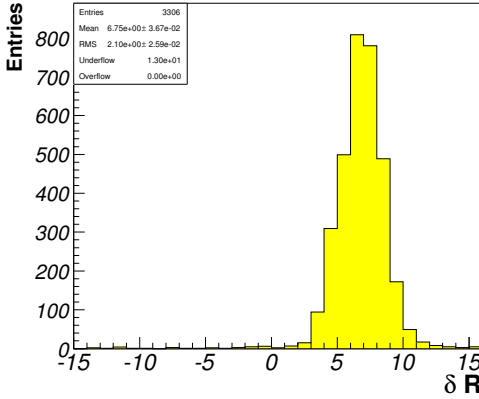


Fig. 7.51 データの δR 分布, Aside TrigSec26 RoI 48-99

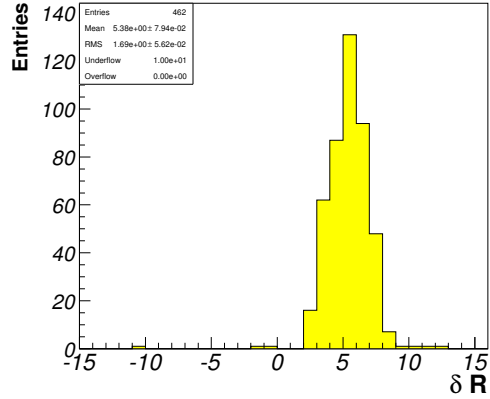


Fig. 7.52 MC の δR 分布, Aside TrigSec26 RoI 48-99

例として、図 7.51,52 に A-side エンドキャップ部のトリガーセクターが 26、RoI ナンバーが 48-99 のチェンバーにおける δR 分布を載せている。データでは平均値が 6.75 ± 0.04 なのに対し MC では 5.38 ± 0.08 で約 1.37 の違いが現れている。また、図 7.49-50 からは最大で δR 方向には +2、 $\delta \phi$ 方向には -0.7 程データとシミュレーションで差異が見て取れる。High- P_T コインシデンスにおいて、 δR 方向の差異はトリガーの閾値を間違える可能性があり、 $\delta \phi$ 方向の差異はトリガーの非効率を引き起こす。このアライメントがトリガー効率に与える影響を次項で述べ、実データを用いた CW の改良については 7.4 で述べる。

7.3.2 アライメントによる影響

7.1.1 で述べたようなデータとシミュレーションとのトリガー効率の閾値付近での差異を TGC アライメントの観点から考察を行った。まず、TGC の実際の設置位置を 7.1.3 で述べた track extrapolator を用いて見積もった。Extrapolator で予想されたヒットの位置を $(\eta_{\text{ext}}, \phi_{\text{ext}})$ 、実際の TGC のヒット位置を $(\eta_{\text{hit}}, \phi_{\text{hit}})$ として以下の residual を定義する。

$$\text{Residual}[\text{mm}] = (\eta_{\text{ext}}, \phi_{\text{ext}}) - (\eta_{\text{hit}}, \phi_{\text{hit}}) \quad (7.7)$$

ここで、 $(\eta_{\text{hit}}, \phi_{\text{hit}})$ は $(\eta_{\text{ext}}, \phi_{\text{ext}})$ に最も近いワイヤーとストリップの交点を用い、residual は単位を [mm] に変換する。またミューオンの選別を以下のように行なった。

- CB or ST muon
- ID track cut(6.2) を満たす
- $P_T > 20 \text{ GeV}$, $\sum P_T(\Delta R < 0.2)/P_T(\text{muon}) < 0.1$

まず、検出器が全て設計値通りにポジションされているシミュレーションサンプルを用いて extrapolator の解析に対するバイアスの有無を調べた。シミュレーションサンプルを用いた場合 residual の中心値は 0 に分布することが期待される。 η 方向の residual を図 7.53、 ϕ 方向の residual を図 7.54 に示す。また、例として M3 のチェンバー単位での residual を図 7.55-58 に示す。結果は $\pm 5\text{mm}$ 以内で中心値が 0 に分布しており、解析に対するバイアスはないと判断した。

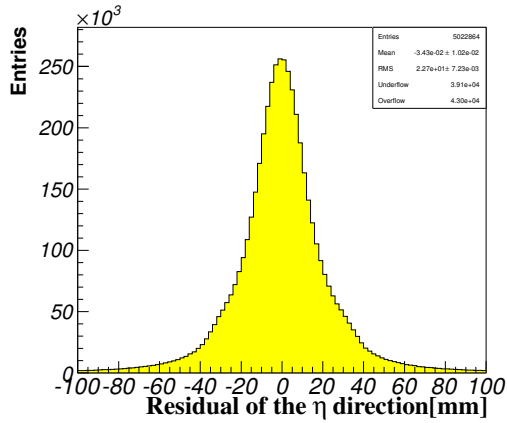


Fig. 7.53 η 方向の Residual 分布

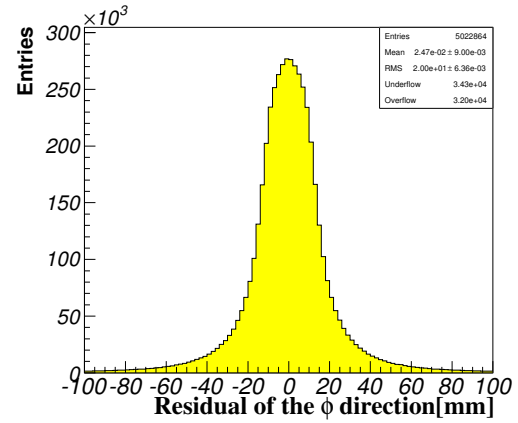


Fig. 7.54 ϕ 方向の Residual 分布

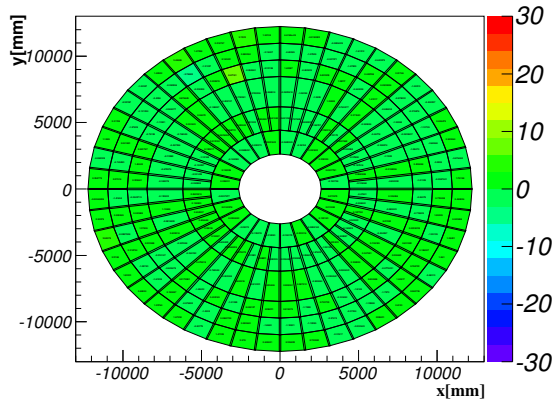


Fig. 7.55 η 方向の Residual 分布, Aside M3

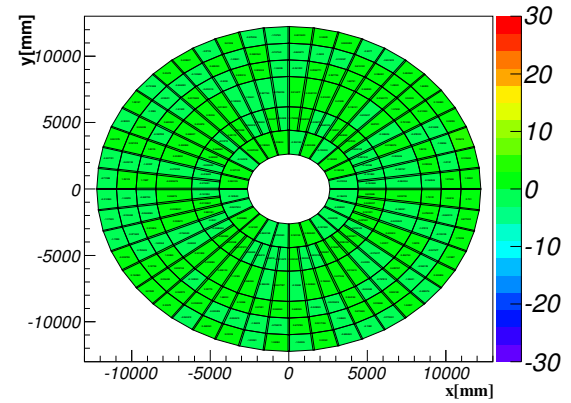


Fig. 7.56 ϕ 方向の Residual 分布, Aside M3

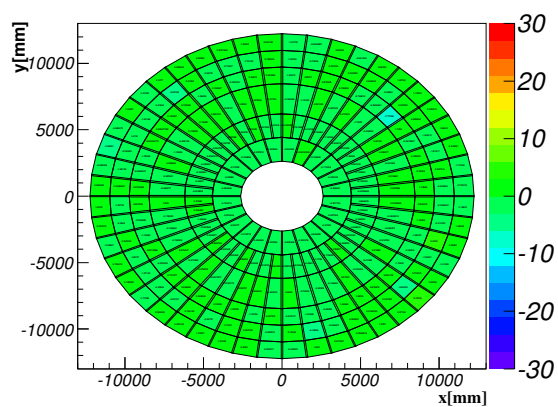


Fig. 7.57 η 方向の Residual 分布, Cside M3

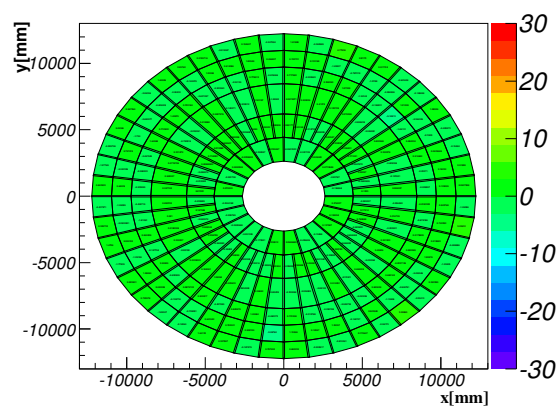


Fig. 7.58 ϕ 方向の Residual 分布, Cside M3

上記の結果を踏まえて、periodB の実データを用いて residual の計算を行った。PeriodB のみを解析の対象とする理由は後述する。以下の図 7.59,60 に Aside,M3 に対して residual を計算した結果を示す。他の Layer に関しては付録.A.4 に載せる。

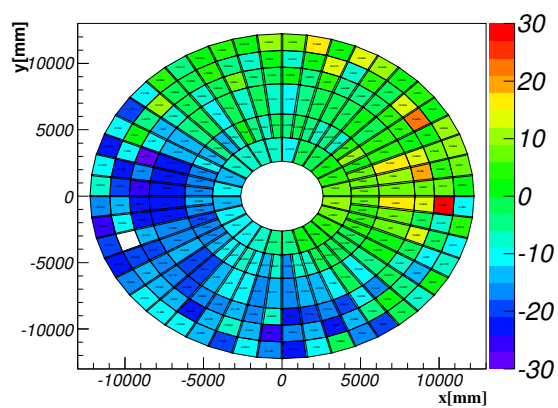


Fig. 7.59 η 方向の Residual, Aside M3

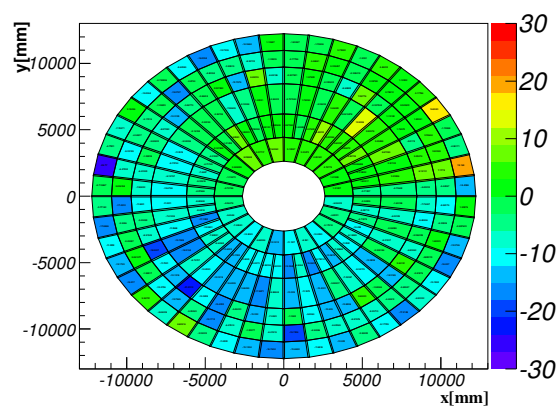


Fig. 7.60 ϕ 方向の Residual, Aside M3

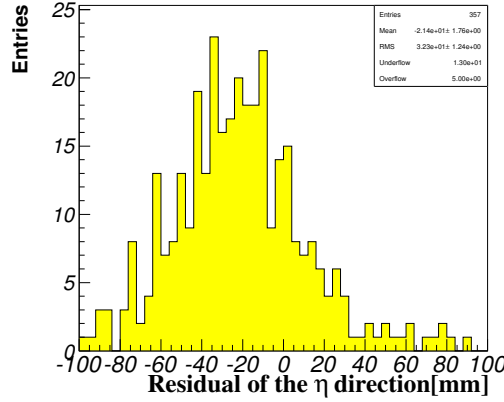


Fig. 7.61 η 方向の Residual, Aside M3 TrigSec 26 RoI 52-99

例として図 7.61 にトリガーセクターが 26、RoI ナンバーが 48-99 のチャンバーに対する η 方向の residual を示している。この中心値は -21.4 ± 1.8 で予定の位置と 20mm 程の差異が現れていることを意味する。 ϕ 方向も図 7.60 から 20~30mm 程の予定の位置との差異が現れており、これらがトリガー効率の低下を引き起こしていると考えられる。これらの差異を反映するために、periodE 以降ではトラックの再構成 (reconstruction) の段階で先行研究で [10] に基づいたアライメントパラメーターが導入されている。従って今回は periodB のみを解析の対象とした。ここで、アライメントがトリガー効率に与える影響を議論するためには、検出器シミュレーション (Geant4 simulation) の段階で検出器の geometry をアライメントパラメーターに従って作成する必要がある。しかし検出器シミュレーションのレベルでアライメント導入するには技術的困難が大きく、デジタイゼーション (digitization) と呼ばれる検出器のヒット情報から信号をシミュレートする段階でヒット位置をシフトさせ、アライメントの影響を見積もった。ここでアライメントパラメーターとして η, z 方向には実際に reconstruction で用いられている値 [10] を用いる。現在 ϕ 方向にはアライメントパラメーターが存在しないことから、図 7.60 及び付録.A.4 の値を用いた。

上記の方法で、シングルミュオンを 100 万イベント作成し、アライメントがトリガー効率に与える影響を見積もった。以下の図 62-67 に各トリガースレッシュホールドに対するトリガー効率を示す。黒の点が設計値通りのポジションが組み込まれている MC サンプル、青の点が digitization によってヒット位置をシフトさせた MC サンプルを表す。ここでトリガー効率は以下の式と定義する。

$$\varepsilon = \frac{\Delta R < 0.2 \text{ で RoI とマッチングの取れた truth muon の数}}{\text{Truth muon の数}} \quad (7.8)$$

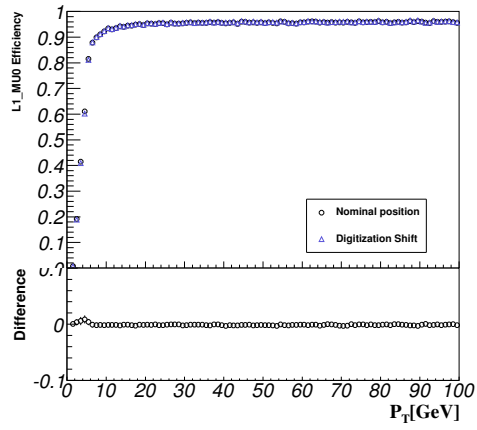


Fig. 7.62 L1_MU0 Trigger Efficiency

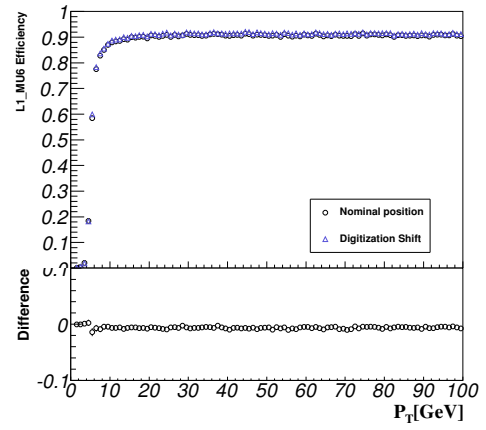


Fig. 7.63 L1_MU6 Trigger Efficiency

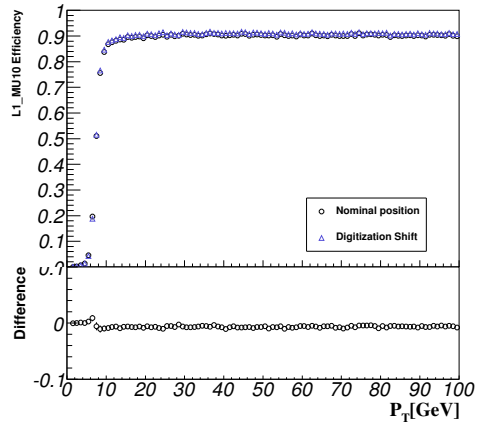


Fig. 7.64 L1_MU10 Trigger Efficiency

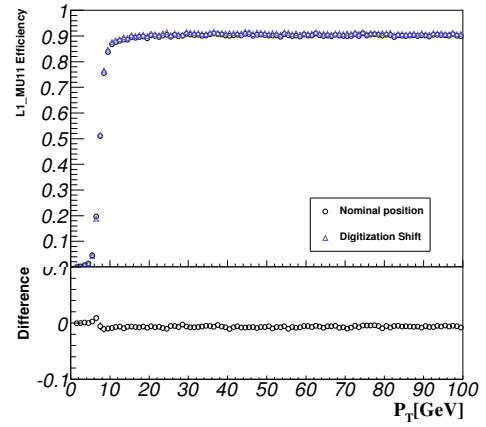


Fig. 7.65 L1_MU11 Trigger Efficiency

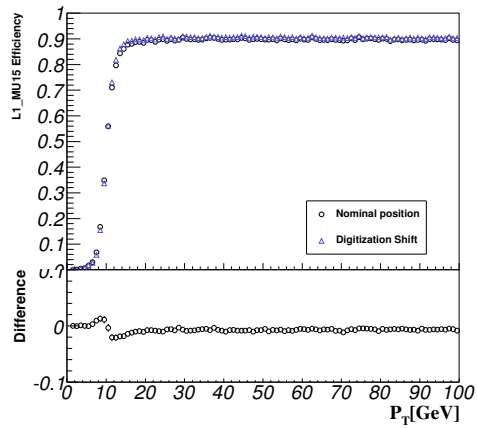


Fig. 7.66 L1_MU15 Trigger Efficiency

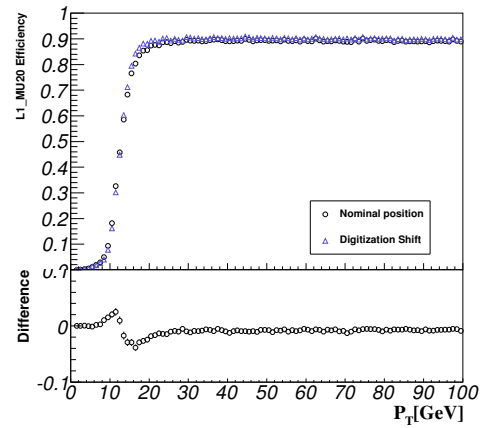


Fig. 7.67 L1_MU20 Trigger Efficiency

上記の L1_MU20 等のトリガー効率からアライメントの効果を組み込むことで、閾値付近で 3-4% のトリガー効率の低下が見て取れる。これは図 7.6 で見られるデータとシミュレーションの差異を再現しており、TGC の設置位置のズレがこのトリガー効率の低下を引き起こしていると結論づける。今後ルミノシティの増加に伴い L1_MU20, L1_MU40 等が主要な LVL1 トリガーとなった場合に、High P_T のミュオンを効率よくトリガーするためにはこのアライメントの効果を反映しなければならない。そこで実データを用いた CW の作成を試みた。その結果を次節 7.4 で述べる。

7.3.3 エレクトロニクスの問題

データとシミュレーションにおいてコインシデンス情報の対応が取れない問題として、エレクトロニクスの問題がある。例として、図 7.68 と 7.69 にエンドキャップ領域の (A-side, TriggerSector=8, RoINumber=59) と (A-side, TriggerSector=13, RoINumber=59) の $(\delta R, \delta\phi)$ 分布を載せている。本来、 $(\delta R, \delta\phi)$ 分布は P_T に従って δR 方向に広がりを見せるのに対し、これらの図は不自然な 2 重のスリットが見えている。TGC のヒット情報から計算された各 $(\delta R, \delta\phi)$ に対応する値が間違っただけを示しているためと考えられており、その非対応率は 0.25% 程 [11] である。現在、これら非対応の明確な原因は分かっておらず今後の課題である。

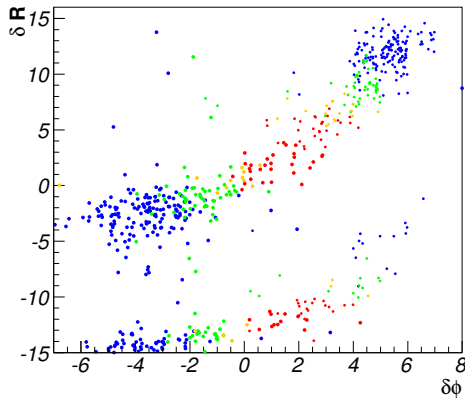


Fig. 7.68 TGC hit map, Aside Endcap TrigSec8 Roi59

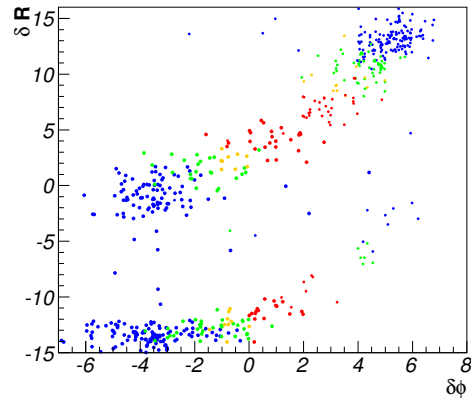


Fig. 7.69 TGC hit map, Aside Endcap TrigSec8 Roi59

7.4 実データを用いたコインシデンスウィンドウの作成

これまで 7 章で述べてきた LVL1 トリガーの評価を踏まえて、パフォーマンス向上に向けた実データを用いる CW 作成の研究を行った。現在はシミュレーションベースで CW を作成しているのに対し、実データを用いて作成することで実際の実験のコンディションを反映することが目的であり、特に以下のような点が挙げられる。

- TGC アライメント
- クロストーク

TGC アライメントに関しては 7.3.2 で述べた通りで、turn on curve における閾値付近でのトリガー効率の改善が期待出来る。また、クロストークの効果を正しく反映することはフェイクトリガーの削減につながる。2011 年は “setH” と呼ばれる CW を用いた。setH(図 7.73) はシミュレーションベースで作成した setD(図 7.72) に対

し、実機におけるクロストークの効果を吸収するために $\delta\phi$ 方向に ± 2 だけアクティブな領域を増やしてある。これによりトリガー効率の低下は防ぐことが出来たが、フェイクトリガーによるトリガーレート上昇が生じた。従って、実データを用いてクロストークの効果を正しく反映することでフェイクトリガーの削減が期待出来る。

7.4.1 コインシデンスウィンドウの作成方法

シミュレーションベースで CW を作成する場合には、truth muon に対する $(\delta R, \delta\phi)$ 情報を用いるが、実データを用いて作成する場合には offline muon の情報を用いる。offline muon は以下のように選択する。

- Vertex Cut (6.2 参照)
- ID track Cut (6.2 参照)
- CB muon or ST muon
- $|z_{0\text{toPV}}| < 10 \text{ mm}$

図 7.70 に示すように $(\delta R, \delta\phi)$ 分布を各 P_T に応じて場合分けを行い、エントリーの多いビンから順に対応するビンをアクティブにする。この作業をアクティブなビンのエントリーが各 P_T 毎に総エントリーの 98 % に達するまで行い、その結果を図 7.71 に示す。また、周囲にアクティブなビンが 1 以下の孤立点はこの段階で取り除いた。各 P_T に対し表 7.12 で表されるような P_T スレッシュホールドを振り分け、 P_T スレッシュホールドが高いものが優先されるように図 7.71 の 4 つのプロットを重ね合わせる。その結果を図 7.74 に示す、これを各 $\delta R, \delta\phi$ に応じ P_T スレッシュホールドを得ることが出来るような CW とする。ここで、実データを用いて CW を作成した場合に不自然なギャップが生じることがある。これはデータの統計量が足りないために本来イベントがあるセルにイベントが一つもなかったり、孤立点と判断されて取り除かれてしまうからである。今後より高統計で CW の作成・評価をする必要がある。

Table 7.11 P_T に対応する P_T スレッシュホールド

$20 \text{ GeV} < P_T$	$P_T \text{ Threshold} = 1 \text{ (L1_MU6)}$
$15 \text{ GeV} < P_T < 20 \text{ GeV}$	$P_T \text{ Threshold} = 3 \text{ (L1_MU10)}$
$10 \text{ GeV} < P_T < 15 \text{ GeV}$	$P_T \text{ Threshold} = 4 \text{ (L1_MU15)}$
$6 \text{ GeV} < P_T < 10 \text{ GeV}$	$P_T \text{ Threshold} = 5 \text{ (L1_MU20)}$

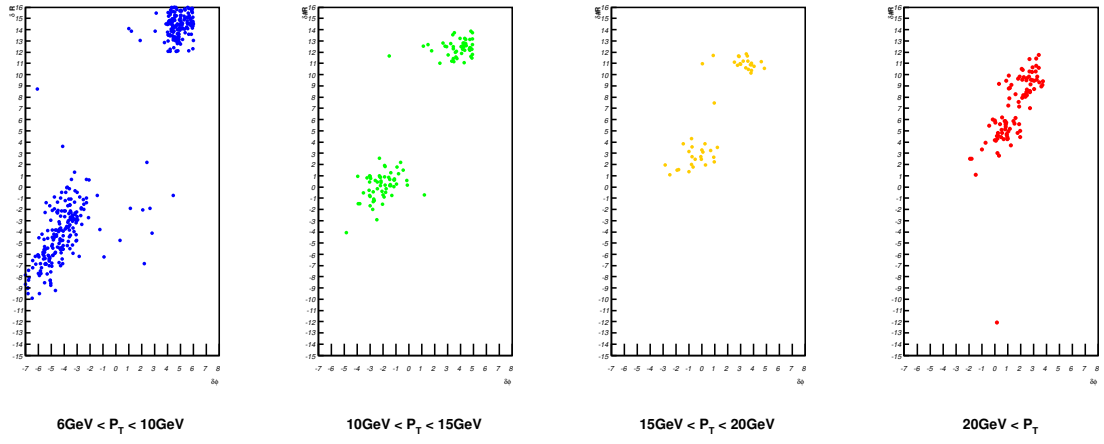


Fig. 7.70 各 P_T に対するヒット分布

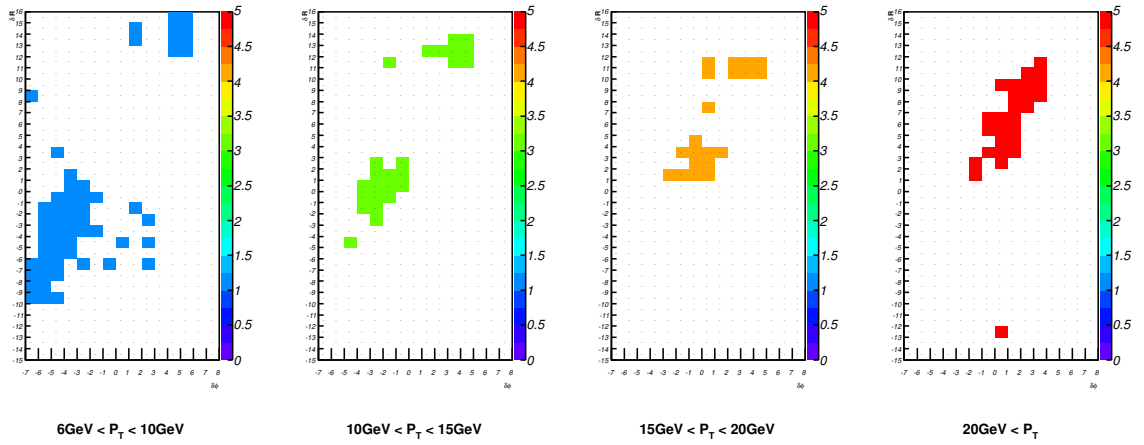


Fig. 7.71 各 P_T に対するオープンなセル

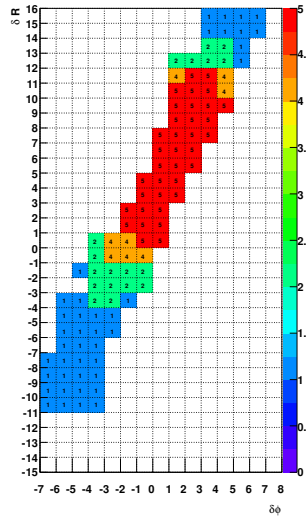


Fig. 7.72 setD, TrigSec13 RoI83

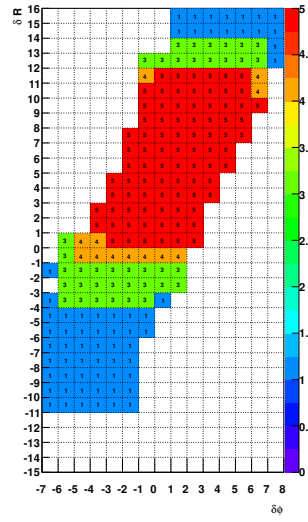


Fig. 7.73 setH, TrigSec13 RoI83

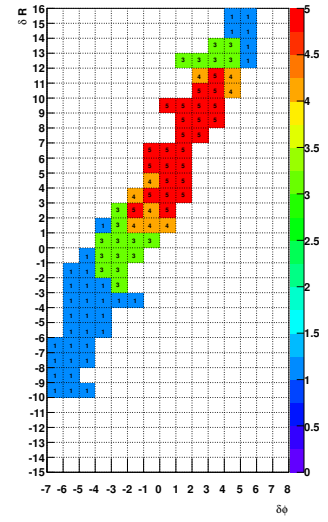


Fig. 7.74 data, TrigSec13 RoI83

7.4.2 実データを用いたコインシデンスウィンドウの評価

トリガー効率

7.4.1 で作成した実データを用いた CW を使用してトリガー効率の計算を行った。結果を以下の図 7.75-80 に示し、式 7.2 によってフィットした結果を図 7.81-83 と表 7.12-14 にまとめる。トリガー効率の計算には Tag and Probe 法を用い、実データのコインシデンス情報から新しく作成した CW に従い P_T スレッシュホールドの判定を行った。使用したデータ量は periodL-M である。赤点がシミュレーションベースで作成された setD、黒点が setD に対し ϕ 方向に ± 2 アクティブな領域を増やした setH、青点が実データを用いた CW を表す。

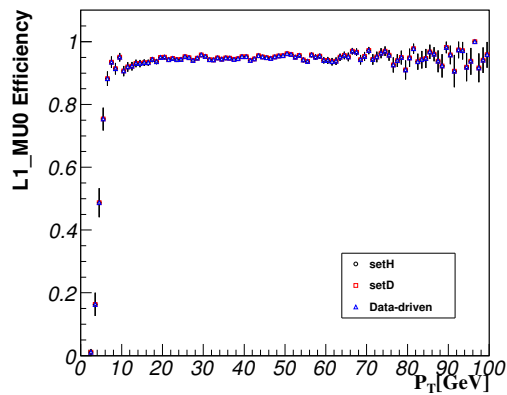


Fig. 7.75 L1_MU0

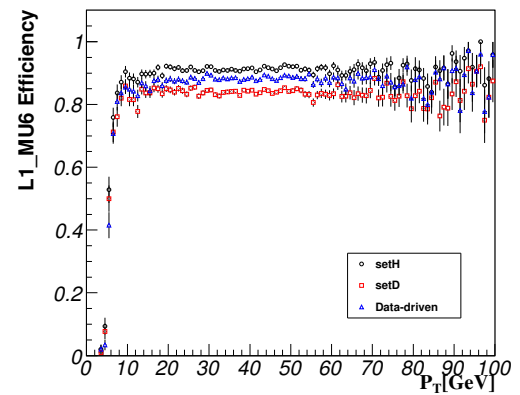


Fig. 7.76 L1_MU6

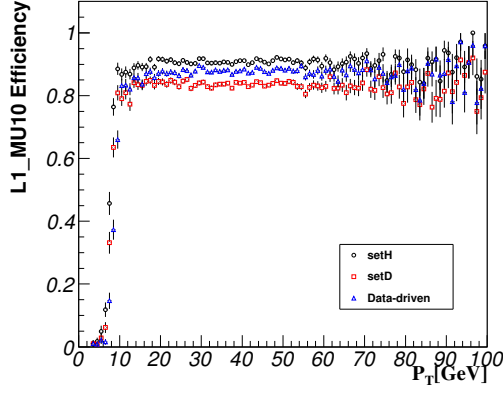


Fig. 7.77 L1_MU10

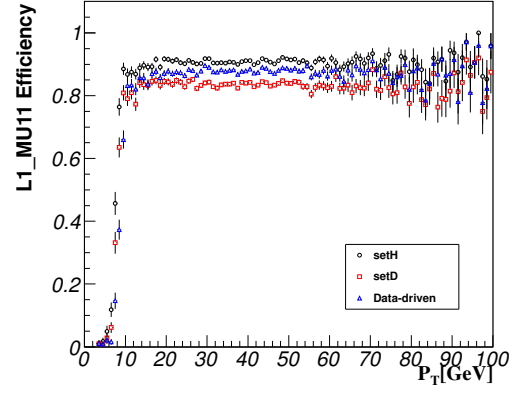


Fig. 7.78 L1_MU11

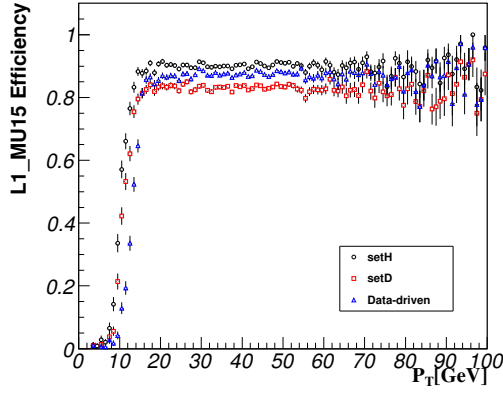


Fig. 7.79 L1_MU15

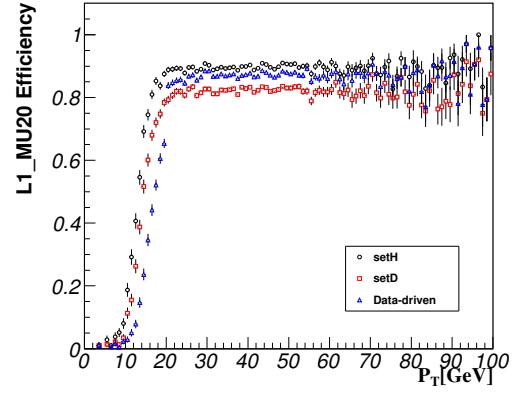


Fig. 7.80 L1_MU20

Table 7.12 TGC Trigger Efficiency Summary. SetH

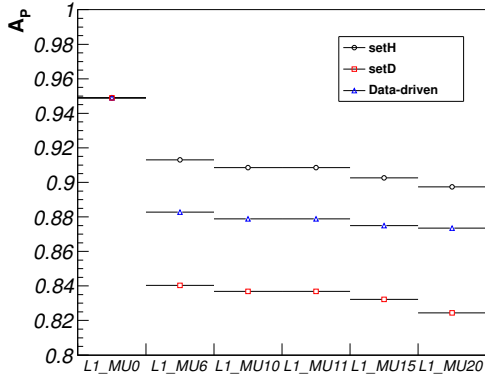
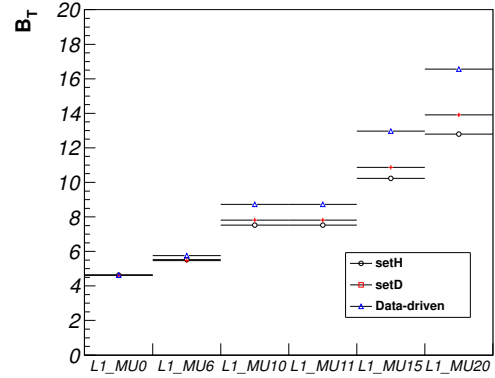
	eff. $P_T > 20\text{GeV}$	A_P (Plateau) by Fit	B_T (Threshold) by Fit	C_W (Width) by Fit
L1_MU0	0.9488 ± 0.0006	0.9490 ± 0.0006	4.6224 ± 0.0898	0.6089 ± 0.0458
L1_MU6	0.9129 ± 0.0008	0.9130 ± 0.0008	5.5295 ± 0.0755	0.5735 ± 0.0533
L1_MU10	0.9084 ± 0.0008	0.9086 ± 0.0008	7.5217 ± 0.0637	0.6105 ± 0.0489
L1_MU11	0.9084 ± 0.0008	0.9086 ± 0.0008	7.5217 ± 0.0637	0.6105 ± 0.0489
L1_MU15	0.9021 ± 0.0009	0.9026 ± 0.0009	10.234 ± 0.0752	1.1662 ± 0.0509
L1_MU20	0.8966 ± 0.0009	0.8974 ± 0.0009	12.800 ± 0.0746	1.6268 ± 0.0517

Table 7.13 TGC Trigger Efficiency Summary. SetD

	eff. $P_T > 20\text{GeV}$	A_P (Plateau) by Fit	B_T (Threshold) by Fit	C_W (Width) by Fit
L1_MU0	0.9488 ± 0.0006	0.9490 ± 0.0006	4.6224 ± 0.0898	0.6089 ± 0.0458
L1_MU6	0.8402 ± 0.0011	0.8403 ± 0.0010	5.4683 ± 0.0815	0.4864 ± 0.0536
L1_MU10	0.8365 ± 0.0011	0.8369 ± 0.0010	7.8089 ± 0.0687	0.5776 ± 0.0476
L1_MU11	0.8365 ± 0.0011	0.8369 ± 0.0010	7.8089 ± 0.0687	0.5776 ± 0.0476
L1_MU15	0.8318 ± 0.0011	0.8322 ± 0.0011	10.873 ± 0.0794	1.1477 ± 0.0544
L1_MU20	0.8238 ± 0.0011	0.8244 ± 0.0011	13.907 ± 0.0782	1.6785 ± 0.0529

Table 7.14 TGC Trigger Efficiency Summary. Data-driven CW

	eff. $P_T > 20\text{GeV}$	A_P (Plateau) by Fit	B_T (Threshold) by Fit	C_W (Width) by Fit
L1_MU0	0.9488 ± 0.0006	0.9490 ± 0.0006	4.6224 ± 0.0898	0.6089 ± 0.0458
L1_MU6	0.8830 ± 0.0009	0.8827 ± 0.0009	5.7635 ± 0.0753	0.4989 ± 0.0472
L1_MU10	0.8789 ± 0.0010	0.8788 ± 0.0009	8.7273 ± 0.0666	0.6719 ± 0.0417
L1_MU11	0.8789 ± 0.0010	0.8788 ± 0.0009	8.7273 ± 0.0666	0.6719 ± 0.0417
L1_MU15	0.8743 ± 0.0010	0.8750 ± 0.0010	12.970 ± 0.0666	1.1898 ± 0.0450
L1_MU20	0.8709 ± 0.0010	0.8735 ± 0.0010	16.554 ± 0.0653	1.8268 ± 0.0421

Fig. 7.81 A_P (plateau) SummaryFig. 7.82 B_T (threshold) Summary

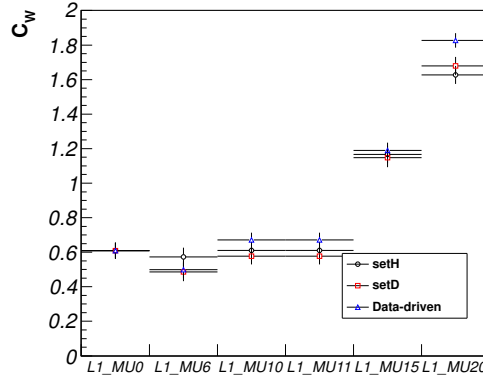


Fig. 7.83 $C_W(\text{width})$ Summary

まず上記の図 7.81 から、プラトー領域において実データを用いた C_W が setH と比べた場合に 2-3% のトリガー効率の低下が見て取れる。これは setH が $\delta\phi$ 方向に ± 2 アクティブな領域を増やしているのに対し、実データを用いた場合は 7.4.1 で述べたように総エントリーの 98% にあたる領域のセルをアクティブにしているためである。フェイクトリガーによるトリガーレートの増加を防ぐために、エントリーの少ないセルは取り除く必要があり、このトリガー効率の低下は後述する 50-60% のトリガーレートの削減に比べてリーズナブルな値と言える。また setD と実データを用いた場合とを比較した場合、4-5% の効率のゲインがあり実機のクロストークの効果を反映していることが確かめられた。しかし、Loou up Table の作成に用いたデータを評価対象としているために実データを用いた C_W の評価にはバイアスがある。今後バイアスのないサンプルに対して評価を行うのが課題である。

また L1_MU20 に注目し setD と実データを用いた場合の結果を比べた場合に、効率を維持しつつ $B_T(\text{threshold})$ が改善していることから 7.3.2 で述べたような TGC アライメントによる効果を反映することが出来たとも考えられる。しかし、実際はシミュレーションベースで C_W を作成した場合と実データを用いて作成した場合とでは、トリガーの閾値付近の取り扱いが違うために単純には比較できない。具体的に L1_MU20 のトリガーを想定した場合、シミュレーションベースでは $P_T=20, 40, 100 \text{ GeV}$ という単一の P_T を持つミューオンからヒットをシミュレーションしているのに対し、実データを用いる場合は $P_T > 20 \text{ GeV}$ という選び方で C_W を作成している。従ってシミュレーションベースの方が実データを用いる場合に比べて δR 方向多くのセルがアクティブになり、閾値以下で高いトリガー効率を示す C_W が作成されるためである。アライメントの効果より、この C_W の作成方法の違いが大きく現れていると考える。しかし結果として効率を維持しつつ閾値の改善が示されたことでトリガーレートの低下が期待出来る。

トリガーレート

次に、EF_MU11,15,20_NoAlg と呼ばれる LVL1 トリガーのみを要求し HLT は pass through のトリガーを用いて RoI の発行数を現行の setH と比較することで TGC のトリガーレートの減少率を確認した。以下の表が結果を表し、最大で 68.4% のトリガーレートの削減が期待できる。

Table 7.15 Trigger Rate Reduction

Trigger	setH	Data-driven	Reduction(%)
L1_MU0	154396	154396	0
L1_MU6	143640	87268	-39.2
L1_MU10	141294	61563	-56.4
L1_MU11	141294	61563	-56.4
L1_MU15	95519	33680	-64.7
L1_MU20	74064	23424	-68.4

最後に CB muon と $\Delta R < 0.2$ でマッチングの取れない LVL1 トリガーをフェイクトリガーと定義して、その割合を計算した。結果を以下に示す。

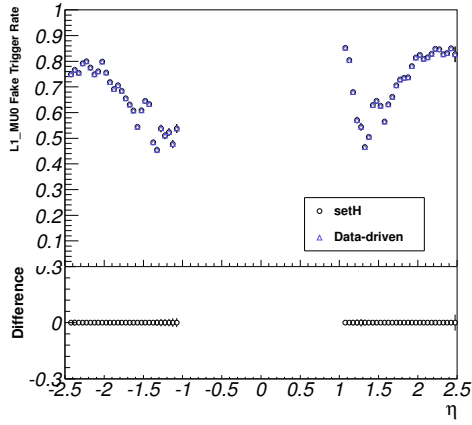


Fig. 7.84 L1_MU0 Fake Trigger Rate

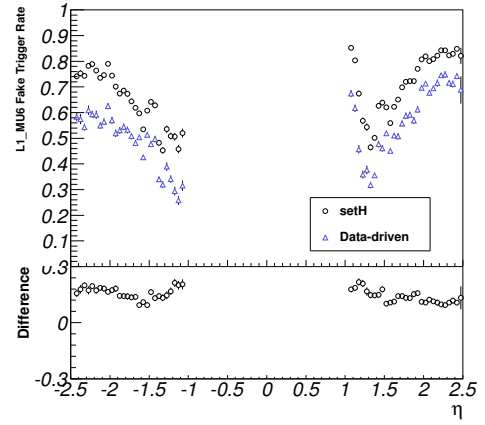


Fig. 7.85 L1_MU6 Fake Trigger Rate

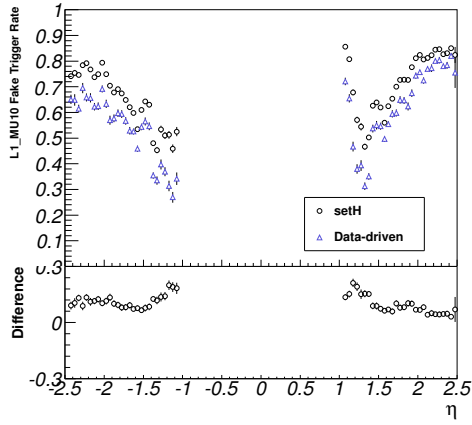


Fig. 7.86 L1_MU10 Fake Trigger Rate

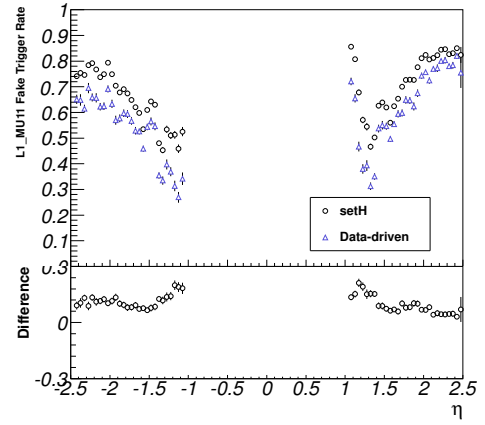


Fig. 7.87 L1_MU11 Fake Trigger Rate

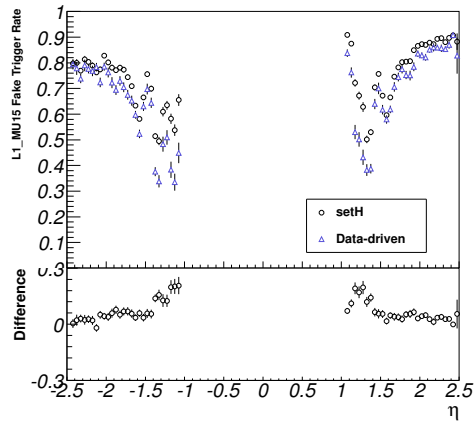


Fig. 7.88 L1_MU15 Fake Trigger Rate

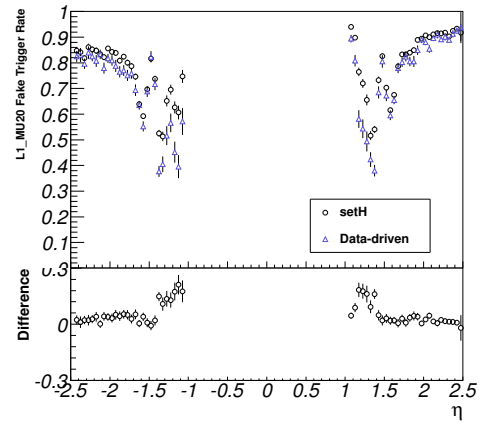


Fig. 7.89 L1_MU20 Fake Trigger Rate

Table 7.16 Fake Trigger Rate

Trigger	setH(%)	Data-driven(%)	Reduction(%)
L1_MU0	70.08 ± 0.12	70.08 ± 0.12	0
L1_MU6	69.11 ± 0.12	54.01 ± 0.17	-15.1
L1_MU10	69.36 ± 0.12	59.47 ± 0.20	-9.9
L1_MU11	69.36 ± 0.12	59.47 ± 0.20	-9.9
L1_MU15	75.75 ± 0.14	70.08 ± 0.25	-5.6
L1_MU20	79.16 ± 0.15	75.18 ± 0.28	-4.0

上記の表 7.16 と図 84-89 から、LVL1 トリガーにおいてエンドキャップ部ではフェイクトリガーが支配的である事が分かる。また L1_MU20 を例に取り、RoI に関連付けられた CB muon の P_T 分布は図 7.90 である。従って CB muon に関連付けられたトリガーに関しても、閾値以下のミュオンを多くトリガーしてしまっていることが分かる。このフェイクトリガーは粒子がビームパイプ等の物質と反応して生じる 2 次粒子由来だと考えられており、inner station(EI, FI) を LVL1 トリガーに取り組みフェイクトリガーを削減する研究が現在なされている [9]。

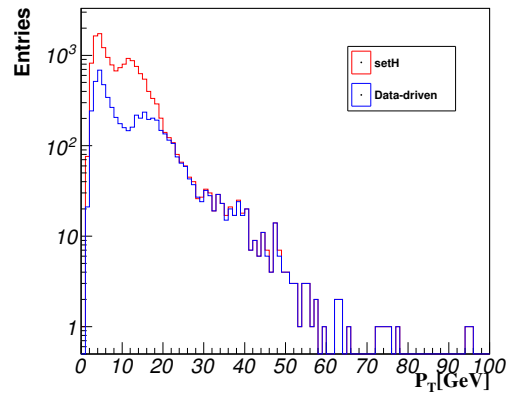


Fig. 7.90 L1_MU20に関連付けられた offline muon の P_T 分布

この7章ではTGCトリガーシステムの評価を行った。プラトー領域におけるトリガー効率が期待通りのパフォーマンスを示し、トリガータイミングも高い on-time の割合を保っていたことから、2011 年は安定したトリガーの発行を行ったと言える。しかし、TGC アライメントを LVL1 トリガーに反映させることとフェイクトリガーの除去が現在求められる改善点と言える。この2つの問題点を改善するために実データを用いた CW の作成を試みた。結果、クロストークによるトリガー効率の低下を抑えつつ、トリガーレートを最大で 68.4% の削減に成功した。しかし実データを用いて CW を作成するにはより高統計が必要で、今後アライメントの効果も含めより精密に実用性の検証を行う必要がある。

8 まとめ

本論文では、ATLAS 実験におけるミューオントリガーに注目し、その評価を行った。Tag and Probe 法と呼ばれる Z ボゾンのダイミュオン崩壊を用いることで、実際のデータから 0.3% という精度でミューオントリガー効率を計算することが出来た。

6 章では 2011 において主要なミューオントリガーであった EF_mu_18 と FE_mu_medium に対してトリガー効率を計算した。計算されたトリガー効率は、EF_mu_18 で 81.4%、EF_mu_18_medium で 76.9% であった。シミュレーションとは 1.5% の精度で一致しており概ね期待通りの性能を発揮していたと言える。データとシミュレーションとのトリガー効率の非対応の原因はレベル 2 トリガーにおける combined algorithm に問題があったこと、RPC においてハードウェアのタイミング設定に間違いがあった事による。当時このどちらの問題も Data quality monitoring と呼ばれる実験の状態をモニターする枠組みにおいて問題を発見できる仕組みができていなかった。現在は Tag and Probe 法によって計算されたトリガー効率をモニターするツールを開発するなどして対策を行った。

7 章では神戸大学が ATLAS 実験開始当初から携わっている TGC の性能評価を行った。TGC のレベル 1 トリガー効率は 90% 以上でトリガー発行のタイミングも 99% 以上が LHC のバンチ衝突と同期が取れていた。プラトー領域におけるトリガー効率はデータとシミュレーションで 0.5% の精度で一致しておりほぼ期待通りの性能を発揮していた。しかし、トリガーの閾値付近ではデータとシミュレーションで約 5% の効率の差異が現れていた。これは TGC の設置位置が本来期待されている位置よりずれているためだと結論づけた。

このアライメントの効果と実機で生じるクロストークの効果を正しく反映するために、実データの用いた CW の作成を試みた。その結果、現行の CW に対しプラトー領域では 3% のトリガー効率の低下に対し、約 50-60% のトリガーレートの削減が示された。これはクロストークによるトリガー効率の低下を抑えつつ、フェイクトリガーを大幅に削減出来るというものであった。しかし、実データを用いた CW の作成にはより多くの統計量が必要で 2012 に取得されるデータも加えて評価する必要がある。

付 図

2.1	LHC 全体図	2
2.2	最高ルミノシティの遷移	3
2.3	最高 “平均陽子反応数” の遷移	3
2.4	積分ルミノシティの遷移	4
2.5	CMS 検出器	4
2.6	ALICE 検出器	4
2.7	LHCb 検出器	4
2.8	標準模型粒子	5
2.9	Higgs 粒子生成のファイマンダイアグラム	5
2.10	Higgs 粒子の生成断面積	5
2.11	Higgs 粒子の崩壊分岐比	6
2.12	各崩壊モードに対する Higgs 質量の排除領域	7
2.13	Higgs 質量の排除領域	7
2.14	標準模型粒子の生成断面積測定のとめ	8
2.15	ATLAS 検出器	8
2.16	ATLAS の座標系	9
2.17	ATLAS マグネットシステムの外観図	9
2.18	超伝導ソレノイド磁石	10
2.19	エンドキャップ部超伝導トロイド磁石	10
2.20	バレル部超伝導トロイド磁石	10
2.21	内部飛跡検出器の外観図	11
2.22	内部飛跡検出器の r-z 断面図	11
2.23	ピクセルモジュールの構造	11
2.24	バレル部におけるピクセル検出器	11
2.25	バレル部用シリコンモジュール	12
2.26	バレル部におけるシリコン・トラッカー	12
2.27	バレル部遷移輻射トラッカー	12
2.28	カロリメータの全体像	13
2.29	各カロリメータの吸収長	13
2.30	電磁カロリメータの構造スケッチ	13
2.31	電磁カロリメータの写真	13
2.32	タイルハドロンカロリメータの構造スケッチ	14
2.33	タイルハドロンカロリメータの写真	14
2.34	LAr ハドロンカロリメータの構造スケッチ	14
2.35	LAr ハドロンカロリメータの写真	14
2.36	LAr フォワードカロリメータの配置図	15
2.37	LAr フォワードカロリメータの構造スケッチ	15

2.38	LAr フォワードカロリメータの写真	15
2.39	ミューオンスペクトロメータの全体図	16
2.40	ミューオンスペクトロメータの z-y 断面図	16
2.41	MDT の構造	16
2.42	CSC の構造	17
2.43	RPC の構造図	17
2.44	RPC のインストールの様子	17
3.1	ATLAS 実験におけるトリガーシステム及び DAQ システム図	18
3.2	L1 トリガーのブロックダイアグラム	19
3.3	アノードワイヤー付近でのタウンゼント型電子なだれの推移	20
3.4	TGC の配置と構造図	20
3.5	ワイヤーとワイヤーサポート	21
3.6	TGC の断面図	21
3.7	Doublet と Triplet の構造	21
3.8	TGC の r - z 断面における全体像	21
3.9	TGC の 1/12 セクター	22
3.10	TGC の r - z 断面における全体図 (M3)	23
3.11	TGC のサブセクターナンバリング	23
3.12	P_T 測定の原理	24
3.13	TGC トリガーの判定方法	25
3.14	High- P_T CW の例	25
3.15	デクラスタリングルール	26
5.1	Athena におけるシミュレーションの流れ	29
6.1	各トリガーレベルにおける ΔR 分布	32
6.2	$Z \rightarrow \mu\mu$ 候補のイベントディスプレイ	34
6.3	Tag muon と probe muon による不変質量分布	35
6.4	Probe muon の P_T 分布	35
6.5	Probe muon の η 分布	36
6.6	Probe muon の ϕ 分布	36
6.7	TGC L1_MU10 Efficiency vs P_T	37
6.8	TGC L1_MU11 Efficiency vs P_T	37
6.9	RPC L1_MU10 Efficiency vs P_T	37
6.10	RPC L1_MU11 Efficiency vs P_T	37
6.11	L1_MU10 Efficiency vs η	37
6.12	L1_MU11 Efficiency vs η	37
6.13	L1_MU10 Efficiency vs ϕ	38
6.14	L1_MU11 Efficiency vs ϕ	38
6.15	Endcap L2_mu18 Efficiency w.r.t L1 vs P_T	39
6.16	Endcap L2_mu18_medium Efficiency w.r.t L1 vs P_T	39

6.17	Barrel L2_mu18 Efficiency w.r.t L1 vs P_T	39
6.18	Barrel L2_mu18_medium Efficiency w.r.t L1 vs P_T	39
6.19	L2_mu18Efficiency w.r.t L1 vs η	39
6.20	L2_mu18_medium Efficiency w.r.t L1 vs η	39
6.21	L2_mu18 Efficiency vs ϕ	40
6.22	L2_mu18_medium Efficiency w.r.t L1 vs ϕ	40
6.23	period の違いによる $\varepsilon_{L2wrtL1}$ の変化	40
6.24	Endcap EF_mu18 Efficiency w.r.t L2 vs P_T	41
6.25	Endcap EF_mu18_medium Efficiency w.r.t L2 vs P_T	41
6.26	Barrel EF_mu18 Efficiency w.r.t L2 vs P_T	41
6.27	Barrel EF_mu18_medium Efficiency w.r.t L2 vs P_T	41
6.28	EF_mu18Trigger Efficiency w.r.t L2 vs η	42
6.29	EF_mu18_medium Efficiency w.r.t L2 vs η	42
6.30	EF_mu18 Efficiency w.r.t L2 vs ϕ	42
6.31	EF_mu18_medium Efficiency w.r.t L2 vs ϕ	42
6.32	Endcap EF_mu18 Efficiency vs P_T	43
6.33	Endcap EF_mu18_medium Efficiency vs P_T	43
6.34	Barrel EF_mu18 Efficiency vs P_T	43
6.35	Barrel EF_mu18_medium Efficiency vs P_T	43
6.36	EF_mu18Trigger Efficiency vs η	43
6.37	EF_mu18_medium Efficiency vs η	43
6.38	EF_mu18 Efficiency vs ϕ	44
6.39	EF_mu18_medium Efficiency vs ϕ	44
6.40	Endcap EF_mu18 Efficiency vs Period	44
6.41	Endcap EF_mu18_medium Efficiency vs Period	44
6.42	Barrel EF_mu18 Efficiency vs Period	45
6.43	Barrel EF_mu18_medium Efficiency vs Period	45
6.44	RPC の x-y 平面断面図	46
6.45	DATA の各 Cut parameter に対するトリガー効率の変化	47
6.46	MC の各 Cut parameter に対するトリガー効率の変化	47
7.1	L1_MU0 Efficiency	49
7.2	L1_MU6 Efficiency	49
7.3	L1_MU10 Efficiency	49
7.4	L1_MU11 Efficiency	49
7.5	L1_MU15 Efficiency	49
7.6	L1_MU20 Efficiency	49
7.7	A_P summary	50
7.8	B_T summary	50
7.9	C_W summary	51

7.10	L1.MU0 Efficiency vs Data taking Period	51
7.11	L1.MU6 Efficiency vs Data taking Period	51
7.12	L1.MU10 Efficiency vs Data taking Period	52
7.13	L1.MU11 Efficiency vs Data taking Period	52
7.14	L1.MU15 Efficiency vs Data taking Period	52
7.15	L1.MU20 Efficiency vs Data taking Period	52
7.16	ストリップに対する $\Delta\eta$	54
7.17	ストリップに対する $\Delta\phi$	54
7.18	ワイヤーに対する $\Delta\eta$	54
7.19	ワイヤーに対する $\Delta\phi$	54
7.20	Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer1, DATA	55
7.21	Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer1, MC	55
7.22	Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer1, DATA	55
7.23	Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer1, MC	55
7.24	Hit Efficiency Summary, DATA	56
7.25	Hit Efficiency Summary, MC	56
7.26	Hit Efficiency History Aside Strip	56
7.27	Hit Efficiency History Cside Strip	56
7.28	Hit Efficiency History Aside Wire	57
7.29	Hit Efficiency History Cside Wire	57
7.30	L1.MU0 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$	59
7.31	L1.MU6 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$	59
7.32	L1.MU10 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$	59
7.33	L1.MU11 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$	59
7.34	L1.MU15 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$	59
7.35	L1.MU20 Trigger Efficiency vs $\langle \mu \rangle$	59
7.36	20 個の再構成された Vertex を含むイベント	60
7.37	L1.MU0 timing fraction	61
7.38	L1.MU6 timing fraction	61
7.39	L1.MU10 timing fraction	61
7.40	L1.MU11 timing fraction	61
7.41	L1.MU15 timing fraction	61
7.42	L1.MU20 timing fraction	61
7.43	L1.MU0 に対する on-time fraction の η - ϕ 分布	62
7.44	On-time fraction vs period	63
7.45	TGC hit map, Aside	64
7.46	TGC hit map, Cside	64
7.47	データとシングルミュオンの P_T 分布	64
7.48	データとシングルミュオンの η 分布	64

7.49	R 方向の Difference, Aside Charge-	65
7.50	ϕ 方向の Difference, Aside Charge-	65
7.51	データの δR 分布, Aside TrigSec26 RoI 48-99	65
7.52	MC の δR 分布, Aside TrigSec26 RoI 48-99	65
7.53	η 方向の Residual 分布	66
7.54	ϕ 方向の Residual 分布	66
7.55	η 方向の Residual 分布, Aside M3	66
7.56	ϕ 方向の Residual 分布, Aside M3	66
7.57	η 方向の Residual 分布, Cside M3	67
7.58	ϕ 方向の Residual 分布, Cside M3	67
7.59	η 方向の Residual, Aside M3	67
7.60	ϕ 方向の Residual, Aside M3	67
7.61	η 方向の Residual, Aside M3 TrigSec 26 RoI 52-99	68
7.62	L1.MU0 Trigger Efficiency	69
7.63	L1.MU6 Trigger Efficiency	69
7.64	L1.MU10 Trigger Efficiency	69
7.65	L1.MU11 Trigger Efficiency	69
7.66	L1.MU15 Trigger Efficiency	69
7.67	L1.MU20 Trigger Efficiency	69
7.68	TGC hit map, Aside Endcap TrigSec8 Roi59	70
7.69	TGC hit map, Aside Endcap TrigSec8 Roi59	70
7.70	各 P_T に対するヒット分布	72
7.71	各 P_T に対するオープンなセル	72
7.72	setD, TrigSec13 RoI83	73
7.73	setH, TrigSec13 RoI83	73
7.74	data, TrigSec13 RoI83	73
7.75	L1.MU0	73
7.76	L.MU6	73
7.77	L1.MU10	74
7.78	L1.MU11	74
7.79	L1.MU15	74
7.80	L1.MU20	74
7.81	A_P (plateau) Summary	75
7.82	B_T (threshold) Summary	75
7.83	C_W (width) Summary	76
7.84	L1.MU0 Fake Trigger Rate	77
7.85	l1.MU6 Fake Trigger Rate	77
7.86	L1.MU10 Fake Trigger Rate	77
7.87	l1.MU11 Fake Trigger Rate	77

7.88	L1_MU15 Fake Trigger Rate	78
7.89	l1_MU20 Fake Trigger Rate	78
7.90	L1_MU20 に関連付けられた offline muon の P_T 分布	79
A.1	Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer1, DATA	1
A.2	Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer1, MC	1
A.3	Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer3, DATA	1
A.4	Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer3, MC	1
A.5	Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer1, DATA	2
A.6	Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer1, MC	2
A.7	Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer2, DATA	2
A.8	Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer2, MC	2
A.9	Hit Efficiency Aside M3 Strip Layer1, DATA	2
A.10	Hit Efficiency Aside M3 Strip Layer1, MC	2
A.11	Hit Efficiency Aside M3 Strip Layer2, DATA	3
A.12	Hit Efficiency Aside M3 Strip Layer2, MC	3
A.13	Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer1, DATA	3
A.14	Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer1, MC	3
A.15	Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer2, DATA	3
A.16	Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer2, MC	3
A.17	Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer3, DATA	4
A.18	Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer3, MC	4
A.19	Hit Efficiency Aside M2 Wire Layer1, DATA	4
A.20	Hit Efficiency Aside M2 Wire Layer1, MC	4
A.21	Hit Efficiency Aside M2 Wire Layer2, DATA	4
A.22	Hit Efficiency Aside M2 Wire Layer2, MC	4
A.23	Hit Efficiency Aside M3 Wire Layer1, DATA	5
A.24	Hit Efficiency Aside M3 Wire Layer1, MC	5
A.25	Hit Efficiency Aside M3 Wire Layer2, DATA	5
A.26	Hit Efficiency Aside M3 Wire Layer2, MC	5
A.27	Hit Efficiency Cside M1 Strip Layer1, DATA	5
A.28	Hit Efficiency Cside M1 Strip Layer1, MC	5
A.29	Hit Efficiency Cside M1 Strip Layer3, DATA	6
A.30	Hit Efficiency Cside M1 Strip Layer3, MC	6
A.31	Hit Efficiency Cside M2 Strip Layer1, DATA	6
A.32	Hit Efficiency Cside M2 Strip Layer1, MC	6
A.33	Hit Efficiency Cside M2 Strip Layer2, DATA	6
A.34	Hit Efficiency Cside M2 Strip Layer2, MC	6
A.35	Hit Efficiency Cside M3 Strip Layer1, DATA	7
A.36	Hit Efficiency Cside M3 Strip Layer1, MC	7

A.37 Hit Efficiency Cside M3 Strip Layer2, DATA	7
A.38 Hit Efficiency Cside M3 Strip Layer2, MC	7
A.39 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer1, DATA	7
A.40 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer1, MC	7
A.41 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer2, DATA	8
A.42 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer2, MC	8
A.43 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer3, DATA	8
A.44 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer3, MC	8
A.45 Hit Efficiency Cside M2 Wire Layer1, DATA	8
A.46 Hit Efficiency Cside M2 Wire Layer1, MC	8
A.47 Hit Efficiency Cside M2 Wire Layer2, DATA	9
A.48 Hit Efficiency Cside M2 Wire Layer2, MC	9
A.49 Hit Efficiency Cside M3 Wire Layer1, DATA	9
A.50 Hit Efficiency Cside M3 Wire Layer1, MC	9
A.51 Hit Efficiency Cside M3 Wire Layer2, DATA	9
A.52 Hit Efficiency Cside M3 Wire Layer2, MC	9
A.53 Hit Efficiency History Aside M1 Strip Layer1	10
A.54 Hit Efficiency History Cside M1 Strip Layer1	10
A.55 Hit Efficiency History Aside M1 Strip Layer3	10
A.56 Hit Efficiency History Cside M1 Strip Layer3	10
A.57 Hit Efficiency History Aside M2 Strip Layer1	10
A.58 Hit Efficiency History Cside M2 Strip Layer1	10
A.59 Hit Efficiency History Aside M2 Strip Layer2	11
A.60 Hit Efficiency History Cside M2 Strip Layer2	11
A.61 Hit Efficiency History Aside M3 Strip Layer1	11
A.62 Hit Efficiency History Cside M3 Strip Layer1	11
A.63 Hit Efficiency History Aside M3 Strip Layer2	11
A.64 Hit Efficiency History Cside M3 Strip Layer2	11
A.65 Hit Efficiency History Aside M1 Wire Layer1	12
A.66 Hit Efficiency History Cside M1 Wire Layer1	12
A.67 Hit Efficiency History Aside M1 Wire Layer2	12
A.68 Hit Efficiency History Cside M1 Wire Layer2	12
A.69 Hit Efficiency History Aside M1 Wire Layer3	12
A.70 Hit Efficiency History Cside M1 Wire Layer3	12
A.71 Hit Efficiency History Aside M2 Wire Layer1	13
A.72 Hit Efficiency History Cside M2 Wire Layer1	13
A.73 Hit Efficiency History Aside M2 Wire Layer2	13
A.74 Hit Efficiency History Cside M2 Wire Layer2	13
A.75 Hit Efficiency History Aside M3 Wire Layer1	13

A.76 Hit Efficiency History Cside M3 Wire Layer1	13
A.77 Hit Efficiency History Aside M3 Wire Layer2	14
A.78 Hit Efficiency History Cside M3 Wire Layer2	14
A.79 η 方向の Difference, Aside Charge+	14
A.80 η 方向の Difference, Aside Charge-	14
A.81 ϕ 方向の Difference, Aside Charge+	14
A.82 ϕ 方向の Difference Aside Charge-	14
A.83 η 方向の Difference, Cside Charge+	15
A.84 η 方向の Difference, Cside Charge-	15
A.85 ϕ 方向の Difference, Cside Charge+	15
A.86 ϕ 方向の Difference, Cside Charge-	15
A.87 Residual of the ext_d η , Aside M1	15
A.88 Residual of the ext_d η , Cside M1	15
A.89 Residual of the ext_d η , Aside M2	16
A.90 Residual of the ext_d η , Cside M2	16
A.91 Residual of the ext_d η , Aside M3	16
A.92 Residual of the ext_d η , Cside M3	16
A.93 Residual of the ext_d ϕ , Aside M1	16
A.94 Residual of the ext_d ϕ , Cside M1	16
A.95 Residual of the ext_d ϕ , Aside M2	17
A.96 Residual of the ext_d ϕ , Cside M2	17
A.97 Residual of the ext_d ϕ , Aside M3	17
A.98 Residual of the ext_d ϕ , Cside M3	17
B.1 DATA の各 Cut parameter に対するトリガー効率の変化	19
B.2 MC の各 Cut parameter に対するトリガー効率の変化	19
B.3 各 Cut parameter に対する SF_{trig} の変化	20
B.4 各 Cut parameter に対する SF_{event} の変化	20
B.5 Track Reconstruction Efficiency vs P_T	22
B.6 Combined Efficiency vs P_T	22
B.7 Track Reconstruction Efficiency vs η	22
B.8 Combined Efficiency vs η	22
B.9 Track Reconstruction Efficiency vs ϕ	22
B.10 Combined Efficiency vs ϕ	22
B.11 DATA の各 Cut parameter に対する再構成効率の変化	23
B.12 MC の各 Cut parameter に対する再構成効率の変化	23
B.13 各 Cut parameter に対する SF_{trig} の変化	23
B.14 各 Cut parameter に対する SF_{event} の変化	23
B.15 Isolation Efficiency vs P_T	25
B.16 Isolation Efficiency vs η	25

B.17 Isolation Efficiency vs ϕ	25
B.18 DATA の各 Cut parameter に対する Isolation Efficiency の変化	26
B.19 MC の各 Cut parameter に対する Isolation Efficiency の変化	26
B.20 各 Cut parameter に対する SF_{trig} の変化	26
B.21 各 Cut parameter に対する SF_{event} の変化	26
B.22 Fiducial region における不変質量分布	28
B.23 Fiducial region における P_T 分布	28
B.24 Fiducial region における η 分布	28
B.25 Fiducial region における ϕ 分布	28
B.26 バンチ衝突における平均反応数の分布	31

付 表

2.1 LHC の設計パラメーター	3
5.1 2011 年に取得されたデータ	28
5.2 解析に用いられる MC サンプル	30
6.1 各トリガーレベルにおける ΔR の平均値とマッチングの基準	32
6.2 Tag muon に対する EF トリガーの要求	35
6.3 主要なトリガーのトリガーチェーン	35
6.4 Probe muon の数	36
6.5 $P_T > 20\text{GeV}$ における ε_{L1}	38
6.6 $P_T > 20\text{GeV}$ における $\varepsilon_{L2\text{wrt}L1}$	40
6.7 $P_T > 20\text{GeV}$ における $\varepsilon_{EF\text{wrt}L2}$	42
6.8 $P_T > 20\text{GeV}$ におけるミューオントリガー効率	44
6.9 トリガー効率に対する系統誤差のまとめ	47
7.1 TGC のトリガースレッシュールド	48
7.2 TGC Trigger Efficiency Summary. DATA	50
7.3 TGC Trigger Efficiency Summary. MC	50
7.4 History of TGC Trigger Efficiencies	52
7.5 Extrapolator によって外挿する z の位置	53
7.6 TGC のヒットに対するマッチングの基準と平均値	54
7.7 ストリップにおける検出効率のまとめ	57
7.8 ワイヤーにおける検出効率のまとめ	58
7.9 Hits のコインシデンスが取れる確率	58
7.10 $(\delta R, \delta\phi)$ の分布における色分けのパターン	63
7.11 P_T に対応する P_T スレッシュールド	71
7.12 TGC Trigger Efficiency Summary. SetH	74
7.13 TGC Trigger Efficiency Summary. SetD	75
7.14 TGC Trigger Efficiency Summary. Data-driven CW	75

7.15 Trigger Rate Reduction	77
7.16 Fake Trigger Rate	78
A.1 トリガーパターンの正規表現	17
B.1 トリガー効率に対する系統誤差のまとめ	20
B.2 $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントがトリガーされる効率の SF	20
B.3 再構成効率のまとめ	23
B.4 再構成効率に対する系統誤差のまとめ	24
B.5 $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントが再構成される効率の SF	24
B.6 Isolation 効率のまとめ	25
B.7 Isolation Efficiency に対する系統誤差のまとめ	27
B.8 $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントにおいて isolation cut の要求を満たす効率の SF	27
B.9 $Z \rightarrow \mu\mu$ における A_Z	28
B.10 Event Selection Summary	29
B.11 Signal Efficiencies Summary	29
B.12 $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントの Acceptance まとめ	30
B.13 $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントのアクセプタンスに対する系統誤差のまとめ	30
B.14 Event Re-weighting Factor	31
B.15 データに対する信号数の変化	32
B.16 観測数と背景事象数のまとめ	32
B.17 測定された Z ボゾンの生成断面積	32

A 参照図と参照表

A.1 チェンバーの検出効率

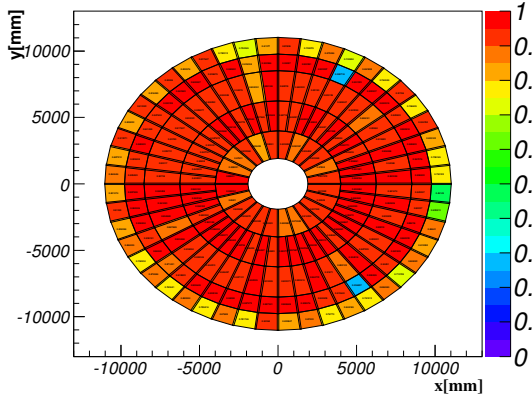


Fig. A.1 Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer1, DATA

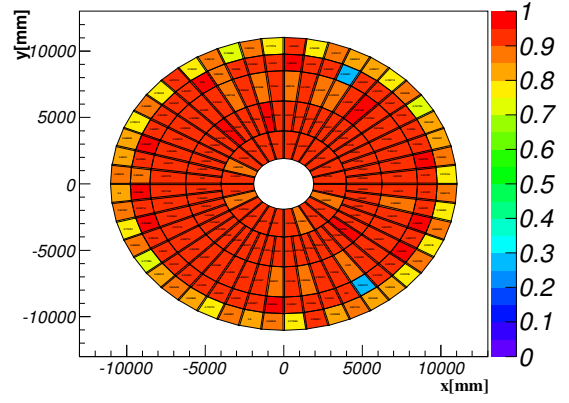


Fig. A.2 Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer1, MC

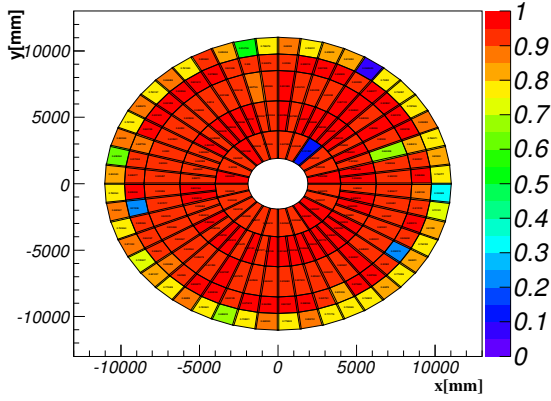


Fig. A.3 Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer3, DATA

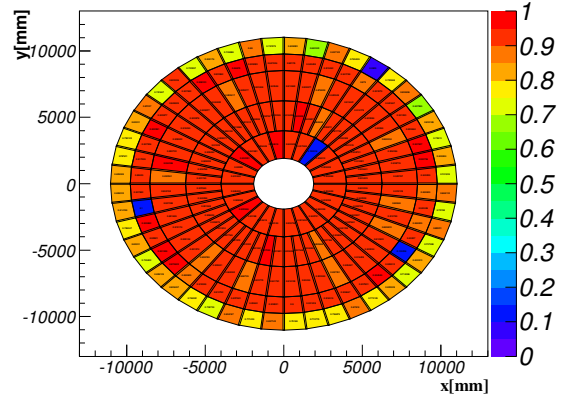


Fig. A.4 Hit Efficiency Aside M1 Strip Layer3, MC

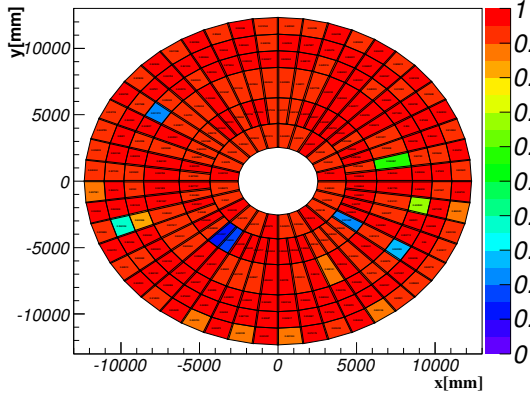


Fig. A.5 Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer1, DATA

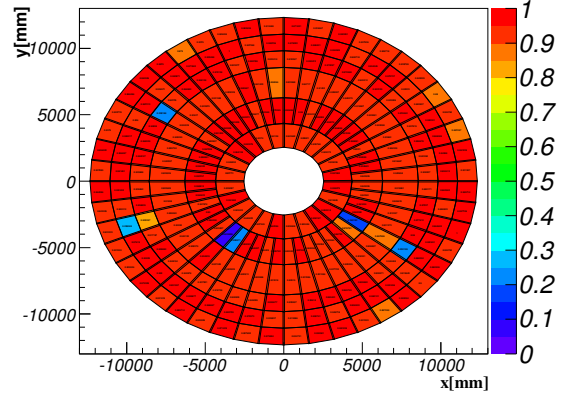


Fig. A.6 Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer1, MC

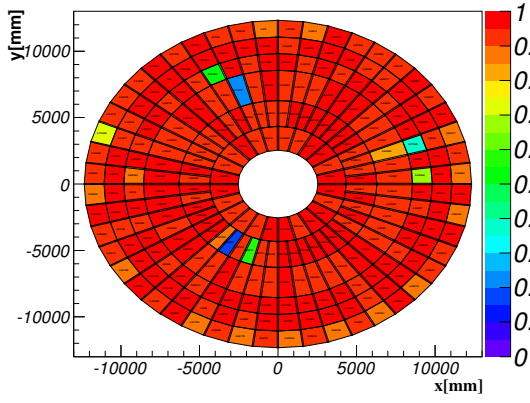


Fig. A.7 Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer2, DATA

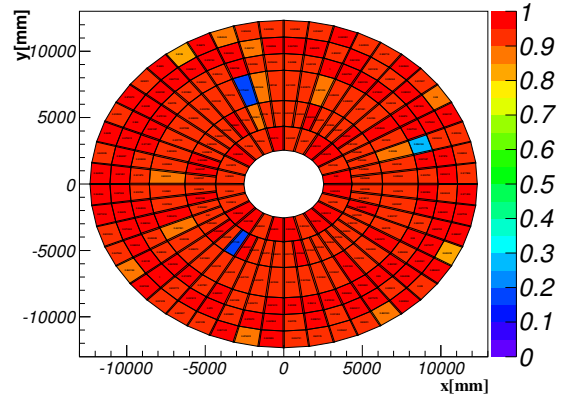


Fig. A.8 Hit Efficiency Aside M2 Strip Layer2, MC

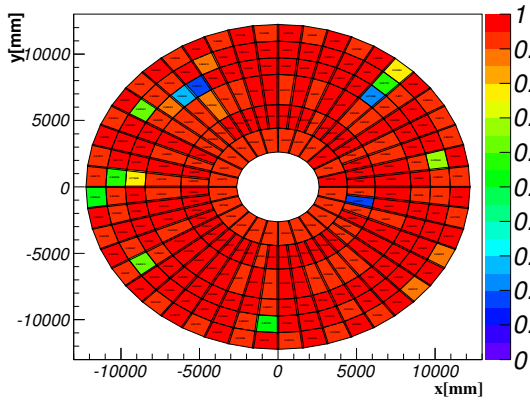


Fig. A.9 Hit Efficiency Aside M3 Strip Layer1, DATA

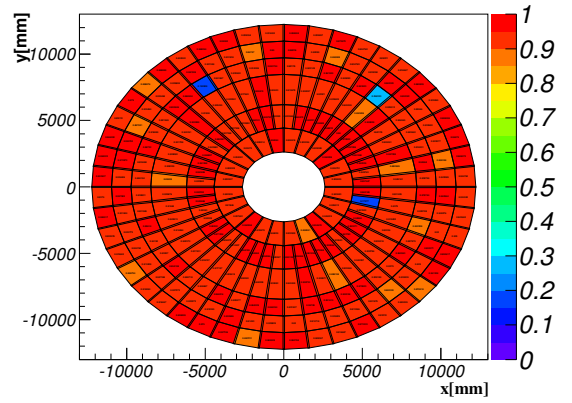


Fig. A.10 Hit Efficiency Aside M3 Strip Layer1, MC

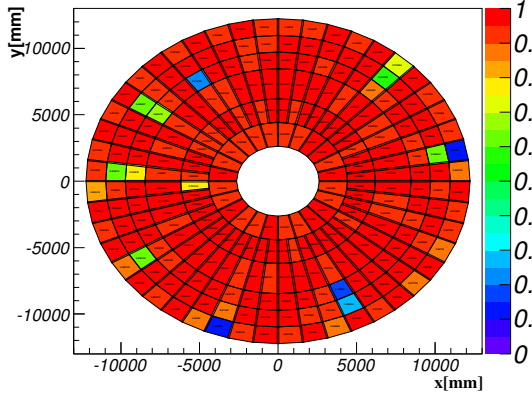


Fig. A.11 Hit Efficiency Aside M3 Strip Layer2, DATA

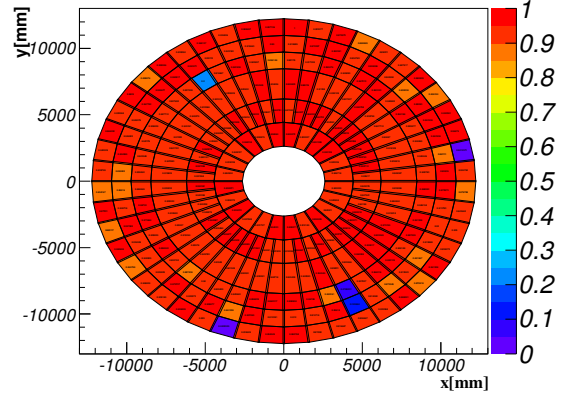


Fig. A.12 Hit Efficiency Aside M3 Strip Layer2, MC

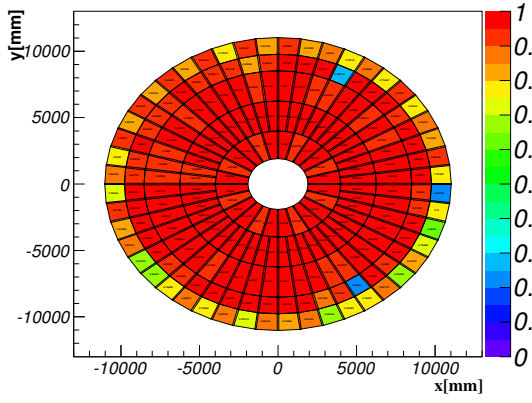


Fig. A.13 Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer1, DATA

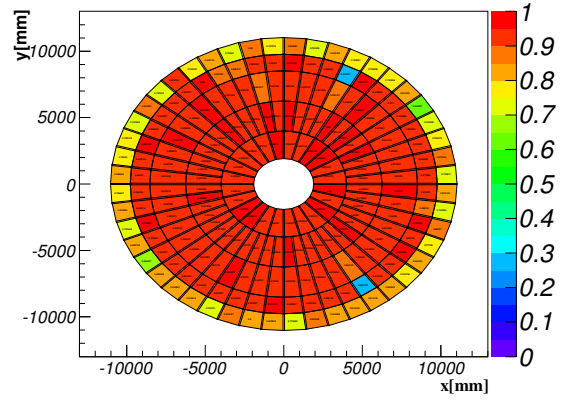


Fig. A.14 Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer1, MC

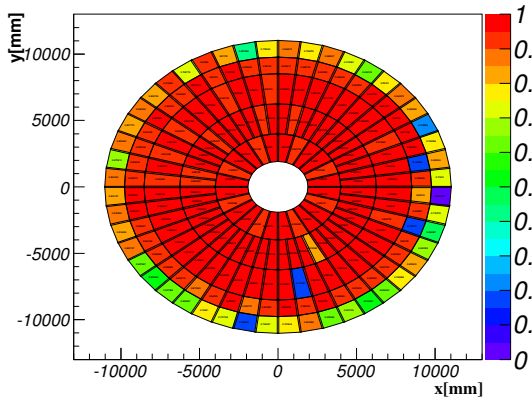


Fig. A.15 Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer2, DATA

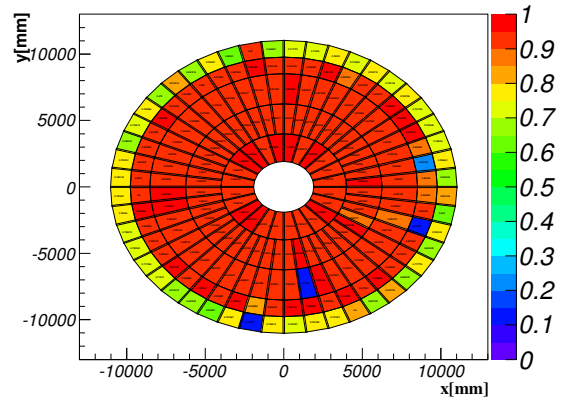


Fig. A.16 Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer2, MC

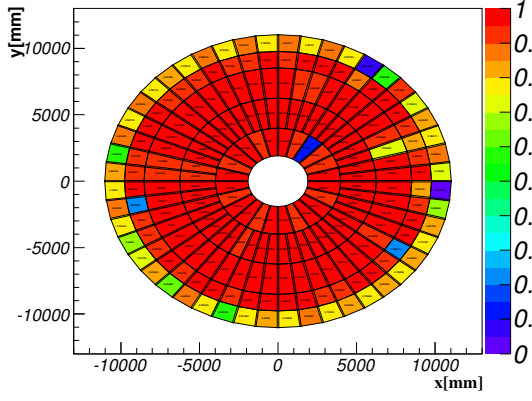


Fig. A.17 Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer3, DATA

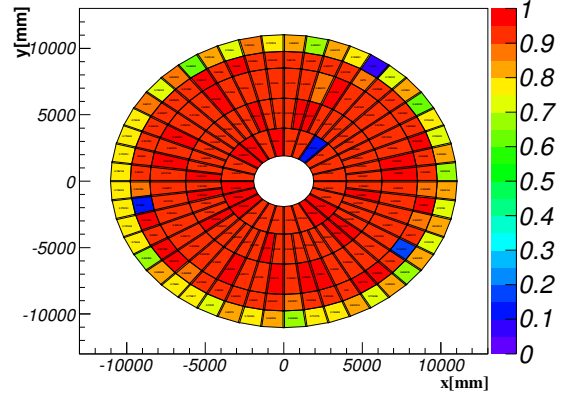


Fig. A.18 Hit Efficiency Aside M1 Wire Layer3, MC

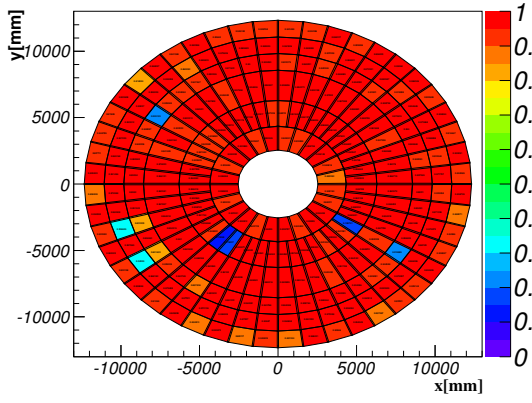


Fig. A.19 Hit Efficiency Aside M2 Wire Layer1, DATA

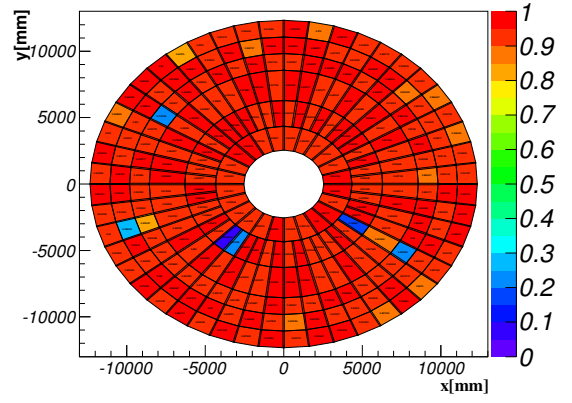


Fig. A.20 Hit Efficiency Aside M2 Wire Layer1, MC

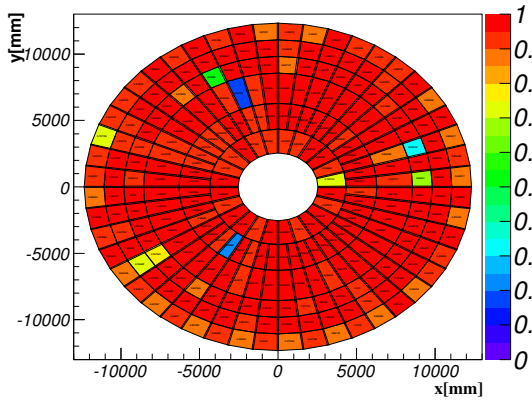


Fig. A.21 Hit Efficiency Aside M2 Wire Layer2, DATA

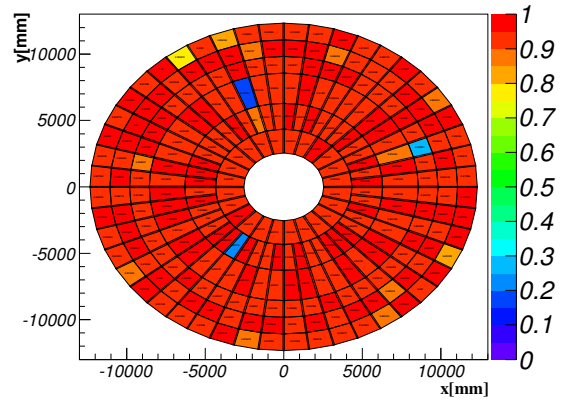


Fig. A.22 Hit Efficiency Aside M2 Wire Layer2, MC

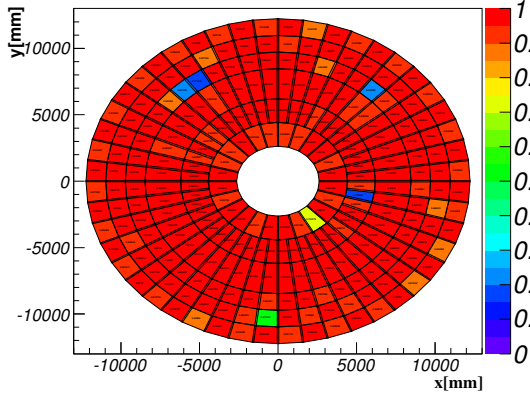


Fig. A.23 Hit Efficiency Aside M3 Wire Layer1, DATA

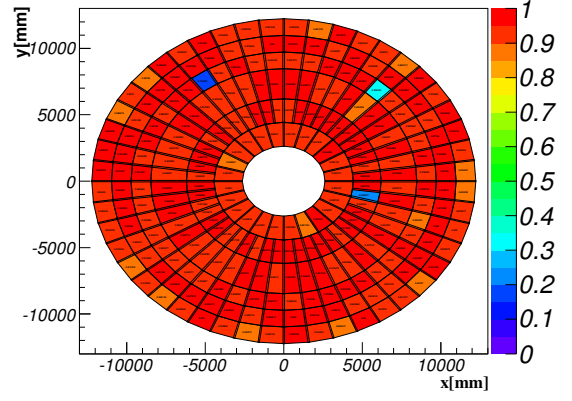


Fig. A.24 Hit Efficiency Aside M3 Wire Layer1, MC

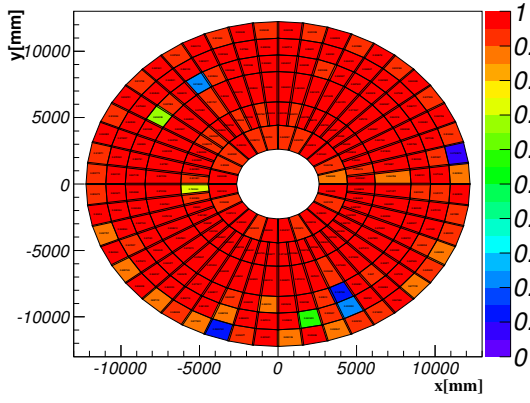


Fig. A.25 Hit Efficiency Aside M3 Wire Layer2, DATA

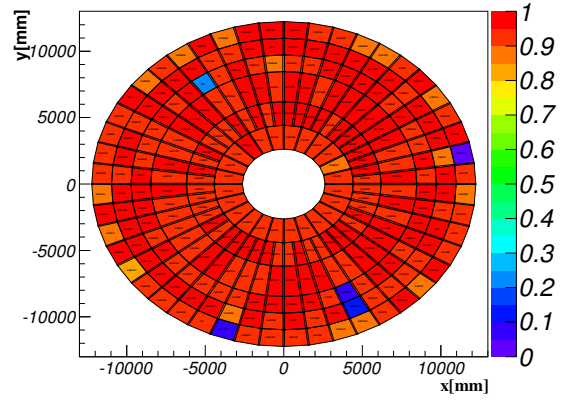


Fig. A.26 Hit Efficiency Aside M3 Wire Layer2, MC

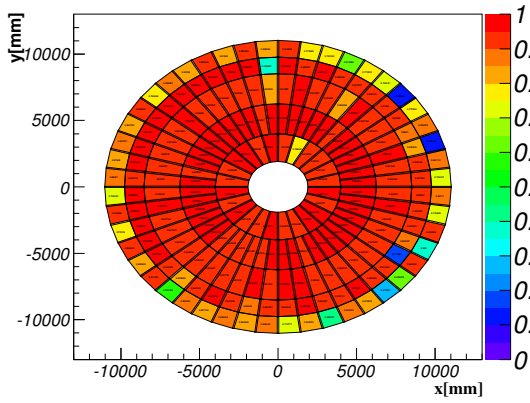


Fig. A.27 Hit Efficiency Cside M1 Strip Layer1, DATA

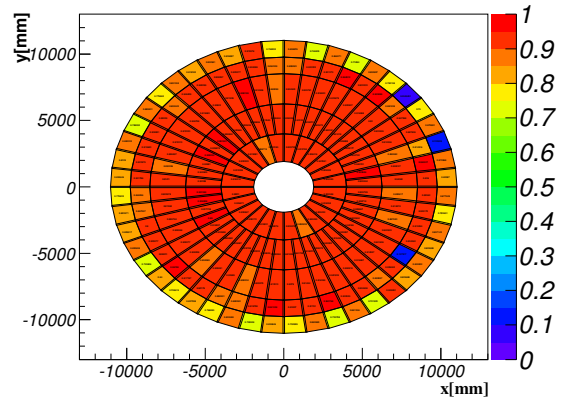


Fig. A.28 Hit Efficiency Cside M1 Strip Layer1, MC

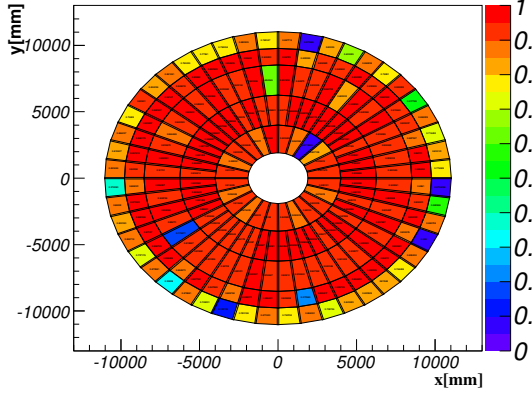


Fig. A.29 Hit Efficiency Cside M1 Strip Layer3, DATA

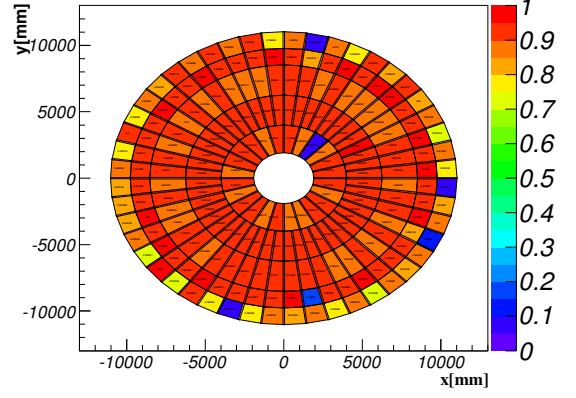


Fig. A.30 Hit Efficiency Cside M1 Strip Layer3, MC

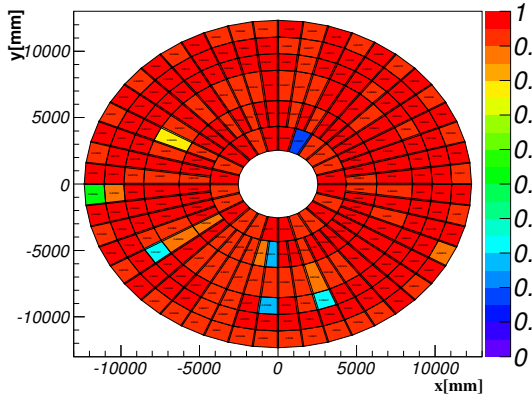


Fig. A.31 Hit Efficiency Cside M2 Strip Layer1, DATA

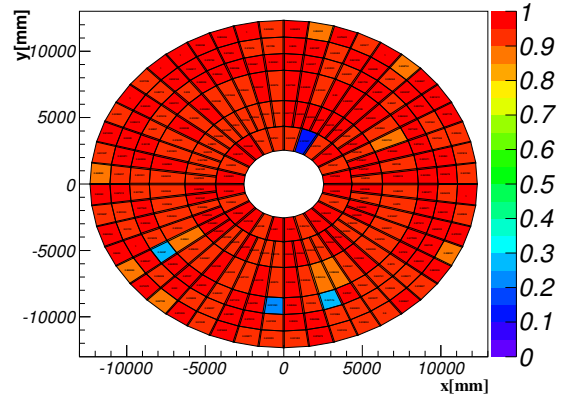


Fig. A.32 Hit Efficiency Cside M2 Strip Layer1, MC

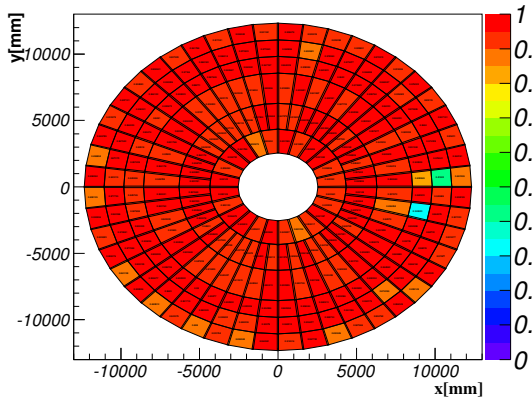


Fig. A.33 Hit Efficiency Cside M2 Strip Layer2, DATA

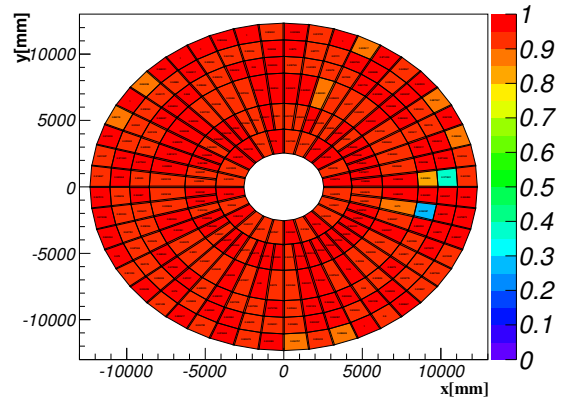


Fig. A.34 Hit Efficiency Cside M2 Strip Layer2, MC

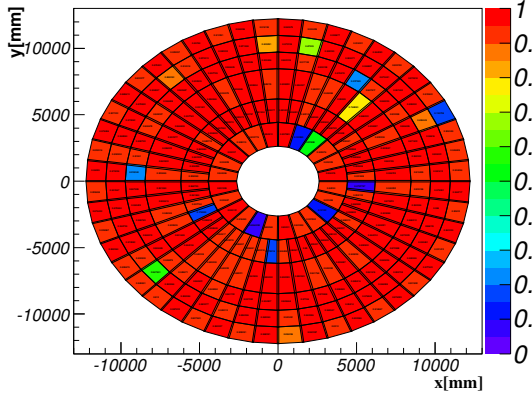


Fig. A.35 Hit Efficiency Cside M3 Strip Layer1, DATA

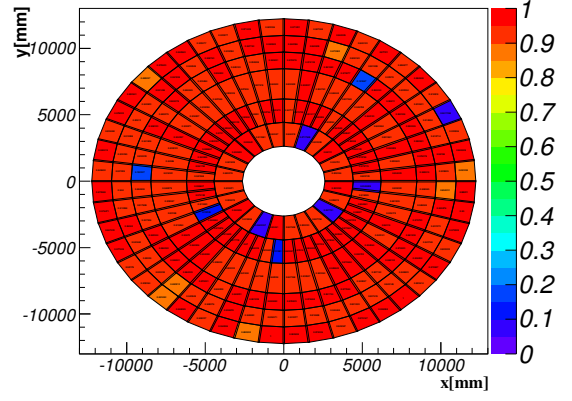


Fig. A.36 Hit Efficiency Cside M3 Strip Layer1, MC

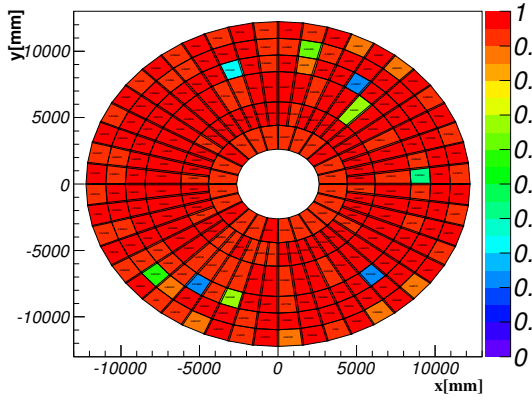


Fig. A.37 Hit Efficiency Cside M3 Strip Layer2, DATA

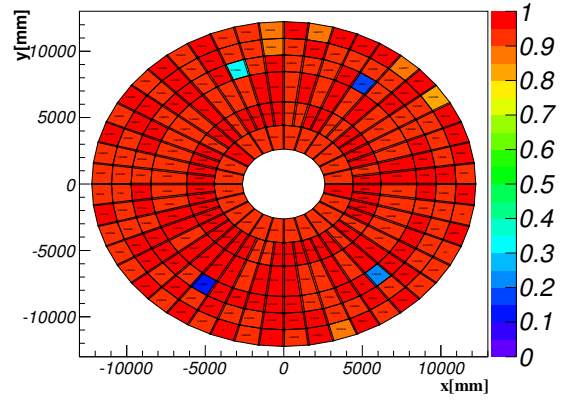


Fig. A.38 Hit Efficiency Cside M3 Strip Layer2, MC

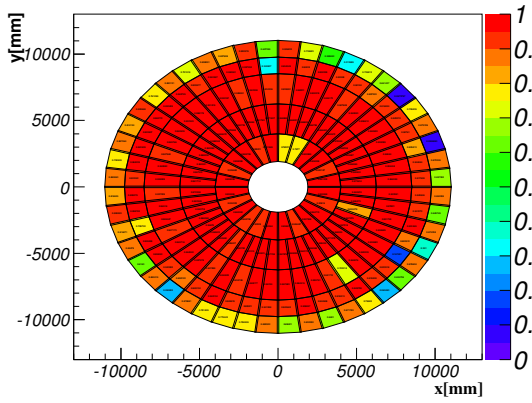


Fig. A.39 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer1, DATA

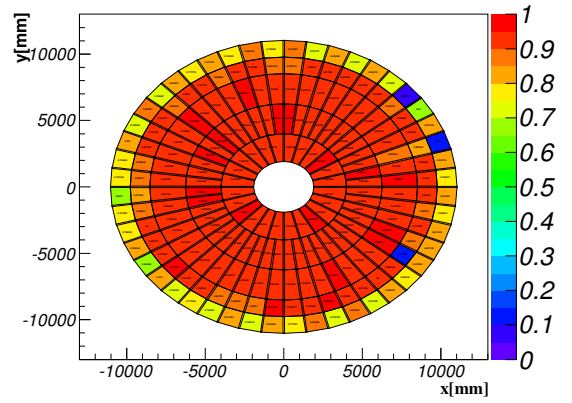


Fig. A.40 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer1, MC

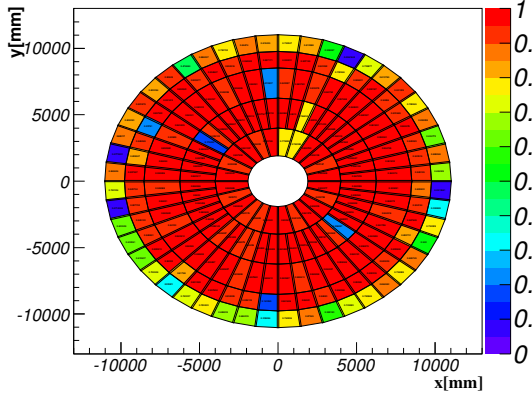


Fig. A.41 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer2, DATA

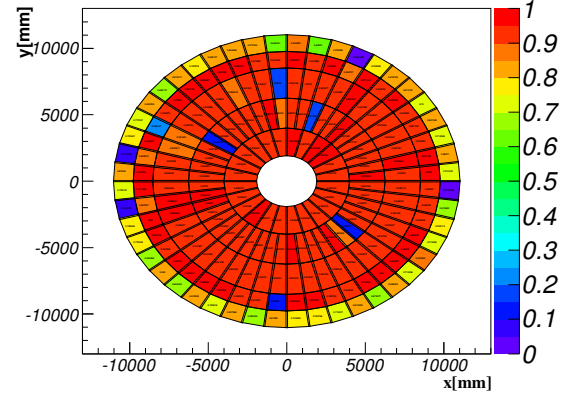


Fig. A.42 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer2, MC

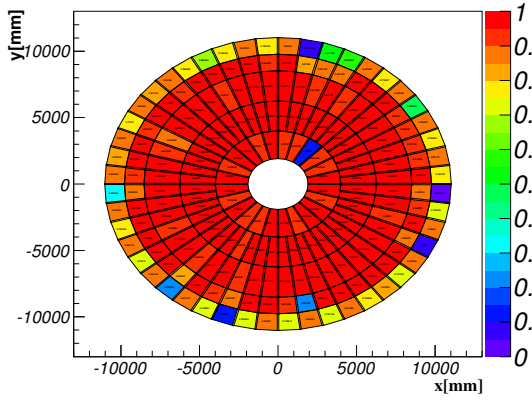


Fig. A.43 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer3, DATA

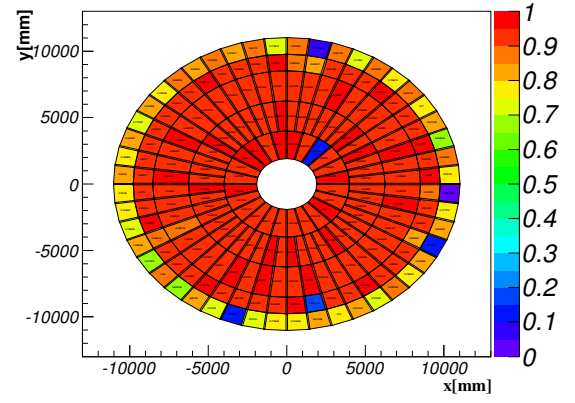


Fig. A.44 Hit Efficiency Cside M1 Wire Layer3, MC

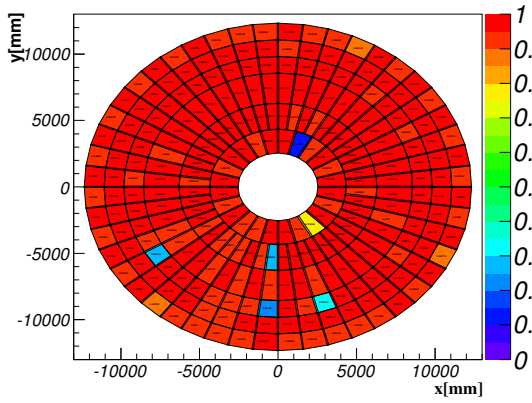


Fig. A.45 Hit Efficiency Cside M2 Wire Layer1, DATA

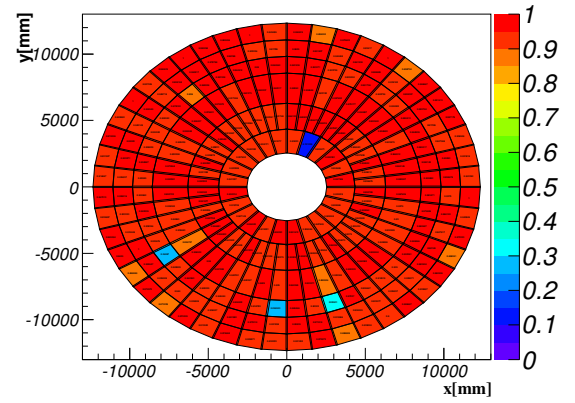


Fig. A.46 Hit Efficiency Cside M2 Wire Layer1, MC

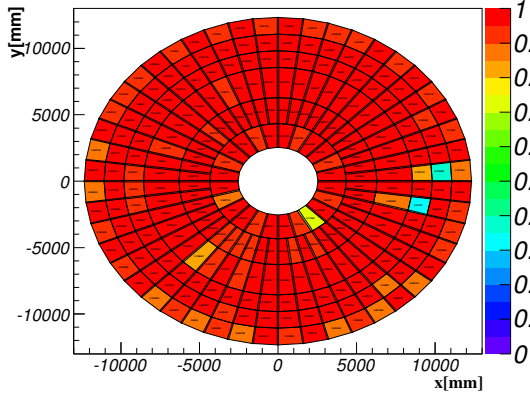


Fig. A.47 Hit Efficiency Cside M2 Wire Layer2, DATA

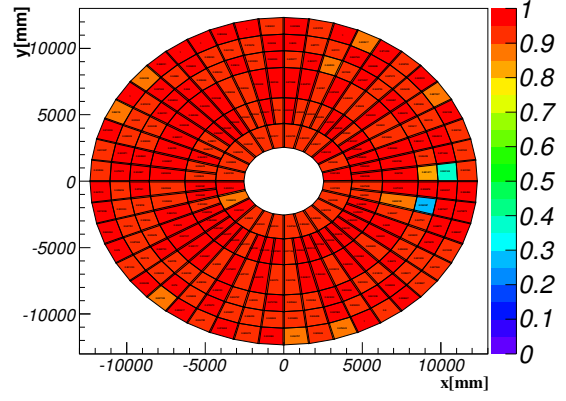


Fig. A.48 Hit Efficiency Cside M2 Wire Layer2, MC

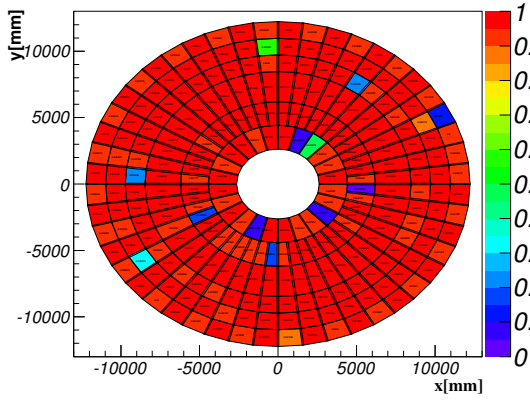


Fig. A.49 Hit Efficiency Cside M3 Wire Layer1, DATA

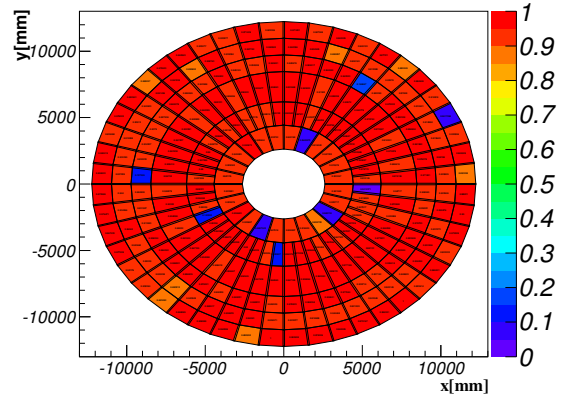


Fig. A.50 Hit Efficiency Cside M3 Wire Layer1, MC

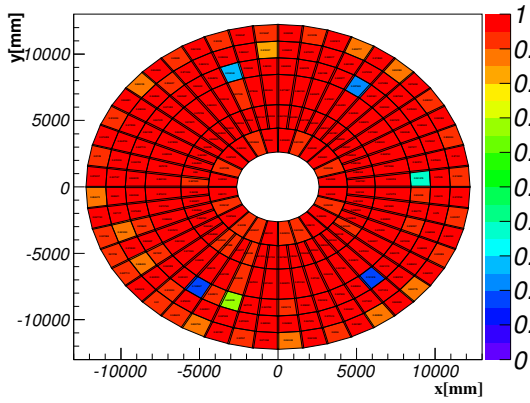


Fig. A.51 Hit Efficiency Cside M3 Wire Layer2, DATA

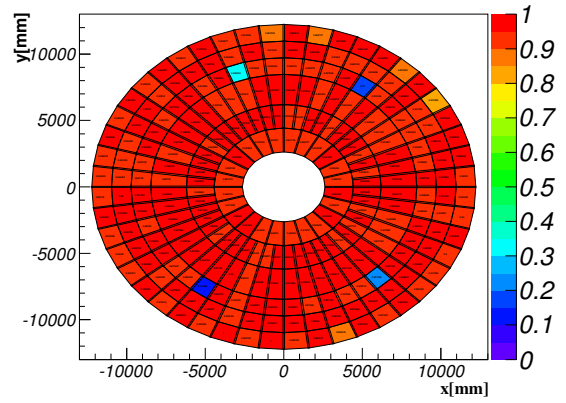


Fig. A.52 Hit Efficiency Cside M3 Wire Layer2, MC

A.2 チェンバーの検出効率の遷移

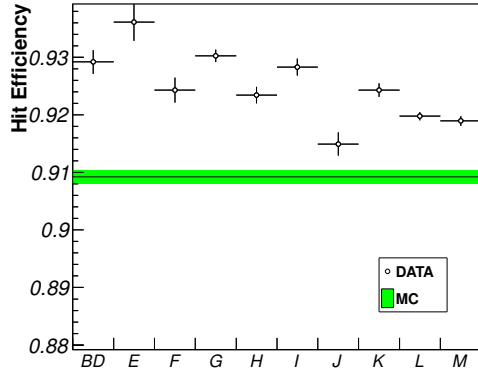


Fig. A.53 Hit Efficiency History Aside M1 Strip Layer1

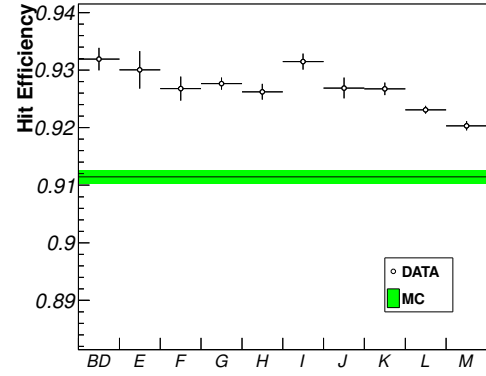


Fig. A.54 Hit Efficiency History Cside M1 Strip Layer1

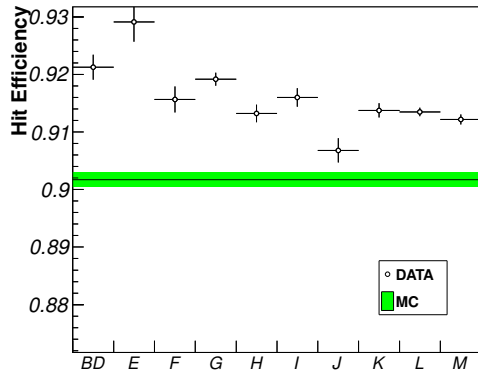


Fig. A.55 Hit Efficiency History Aside M1 Strip Layer3

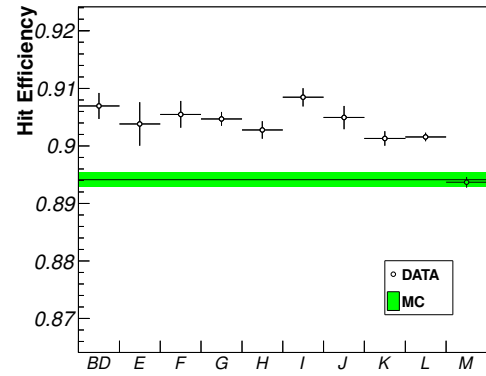


Fig. A.56 Hit Efficiency History Cside M1 Strip Layer3

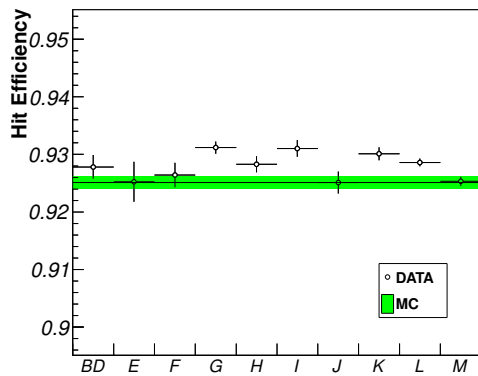


Fig. A.57 Hit Efficiency History Aside M2 Strip Layer1

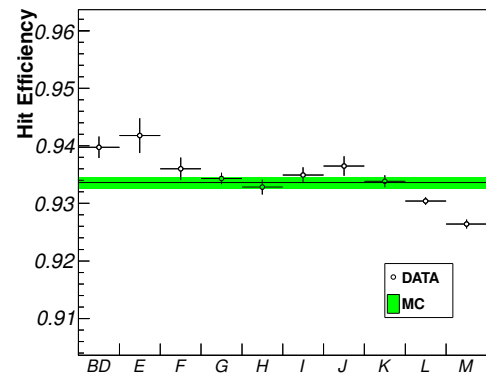


Fig. A.58 Hit Efficiency History Cside M2 Strip Layer1

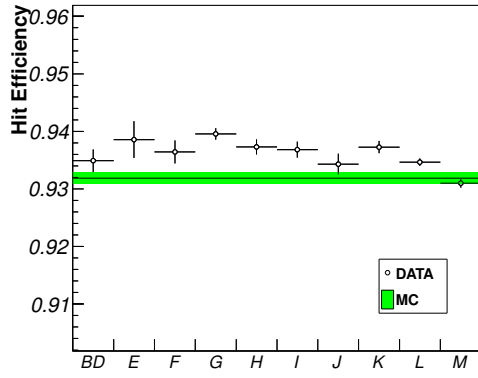


Fig. A.59 Hit Efficiency History Aside M2 Strip Layer2

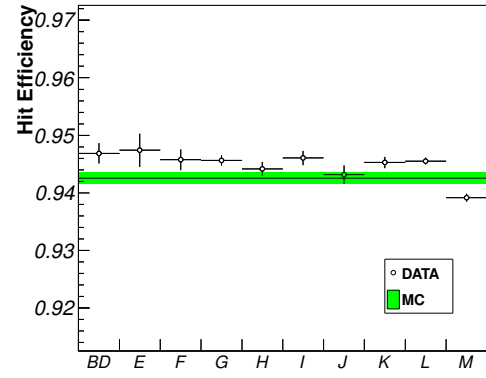


Fig. A.60 Hit Efficiency History Cside M2 Strip Layer2

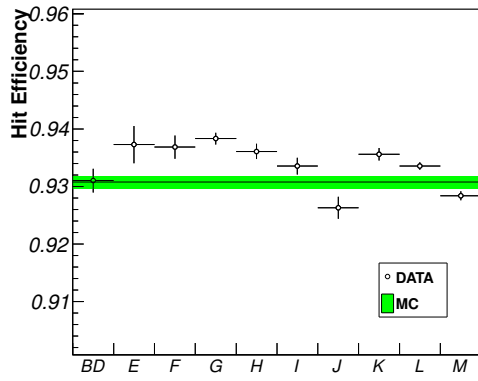


Fig. A.61 Hit Efficiency History Aside M3 Strip Layer1

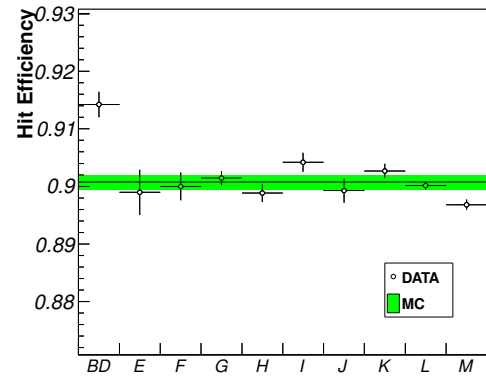


Fig. A.62 Hit Efficiency History Cside M3 Strip Layer1

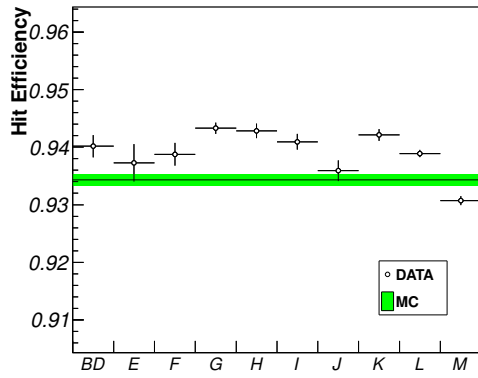


Fig. A.63 Hit Efficiency History Aside M3 Strip Layer2

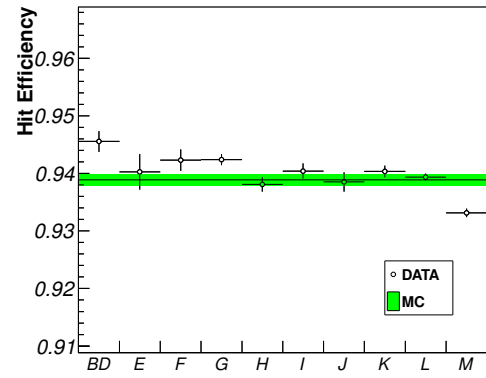


Fig. A.64 Hit Efficiency History Cside M3 Strip Layer2

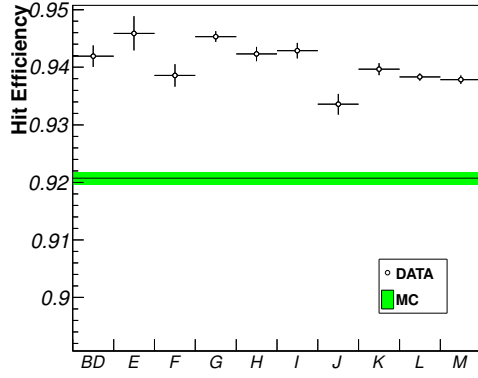


Fig. A.65 Hit Efficiency History Aside M1 Wire Layer1

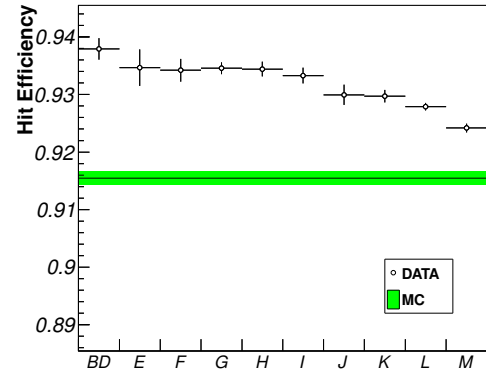


Fig. A.66 Hit Efficiency History Cside M1 Wire Layer1

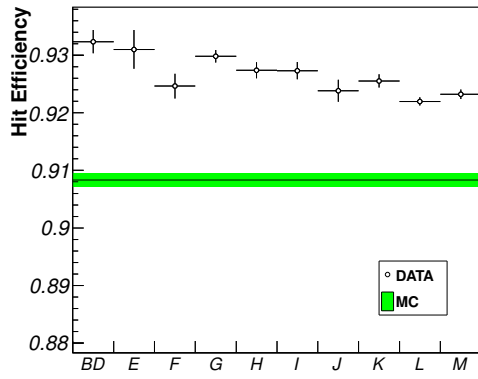


Fig. A.67 Hit Efficiency History Aside M1 Wire Layer2

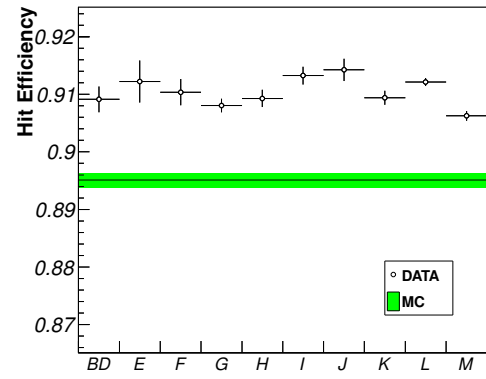


Fig. A.68 Hit Efficiency History Cside M1 Wire Layer2

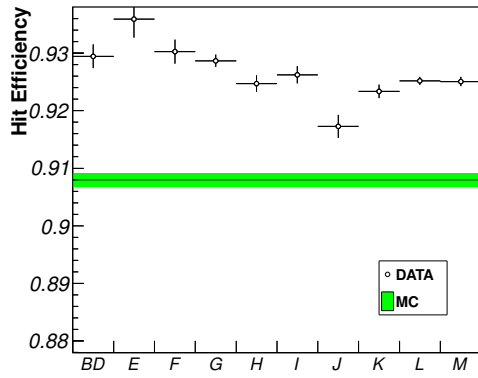


Fig. A.69 Hit Efficiency History Aside M1 Wire Layer3

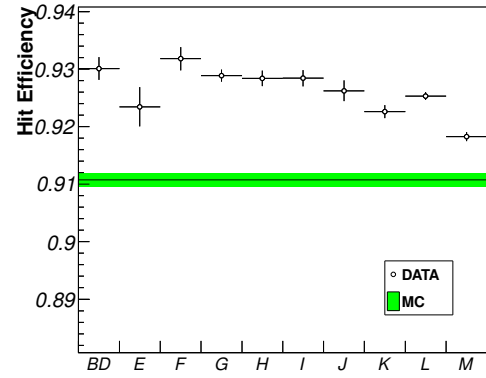


Fig. A.70 Hit Efficiency History Cside M1 Wire Layer3

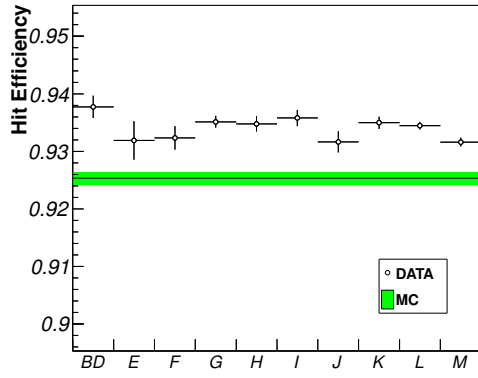


Fig. A.71 Hit Efficiency History Aside M2 Wire Layer1

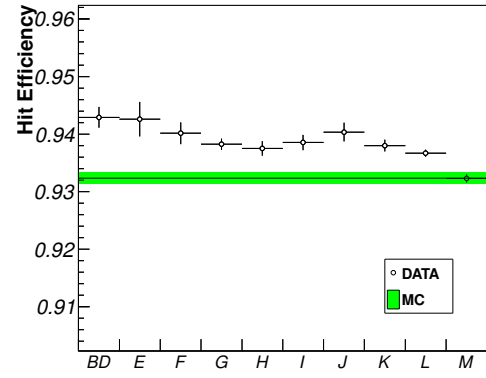


Fig. A.72 Hit Efficiency History Cside M2 Wire Layer1

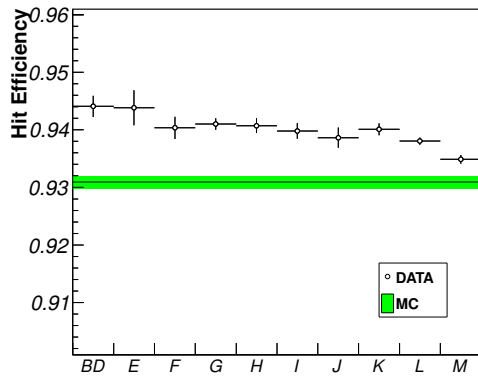


Fig. A.73 Hit Efficiency History Aside M2 Wire Layer2

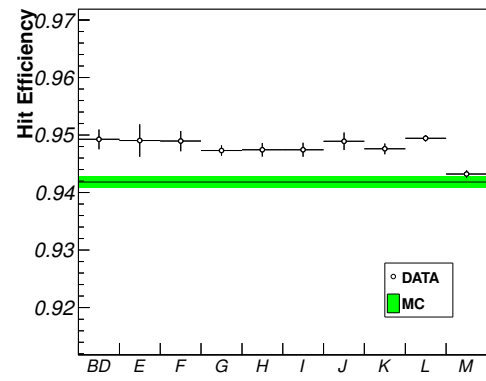


Fig. A.74 Hit Efficiency History Cside M2 Wire Layer2

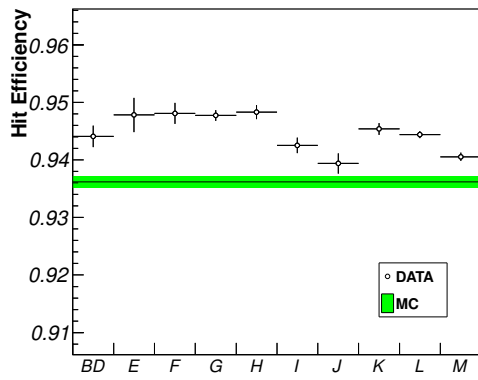


Fig. A.75 Hit Efficiency History Aside M3 Wire Layer1

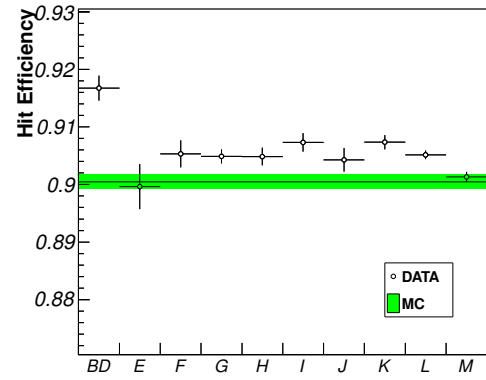


Fig. A.76 Hit Efficiency History Cside M3 Wire Layer1

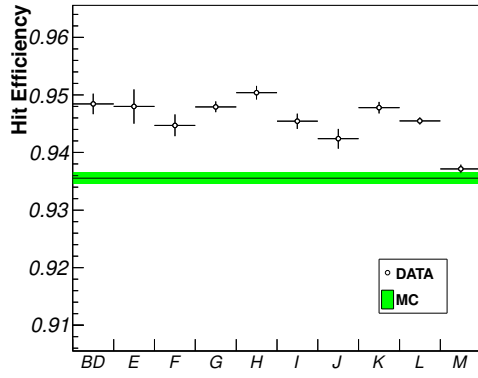


Fig. A.77 Hit Efficiency History Aside M3 Wire Layer2

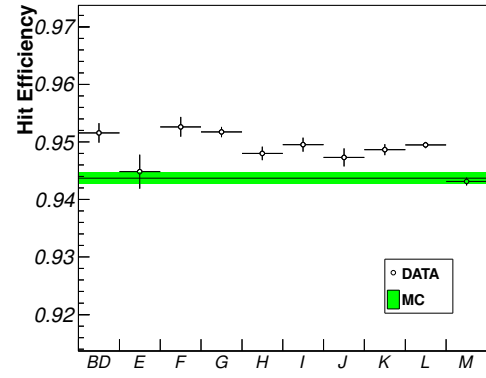


Fig. A.78 Hit Efficiency History Cside M3 Wire Layer2

A.3 コインシデンスウィンドウにおける η, ϕ 方向の差異

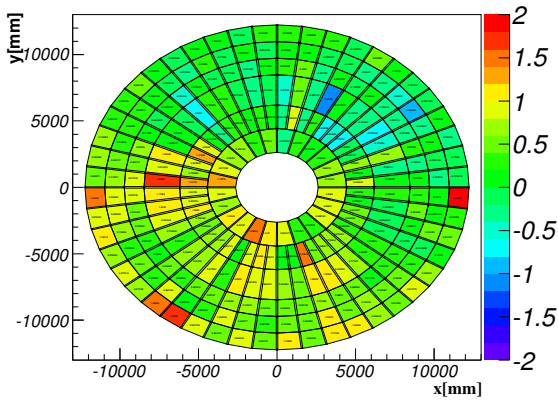


Fig. A.79 η 方向の Difference, Aside Charge+

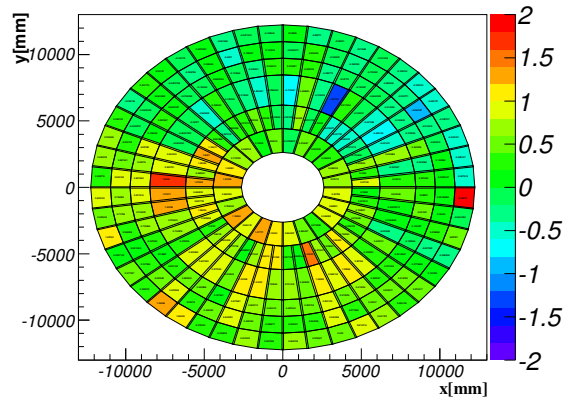


Fig. A.80 η 方向の Difference, Aside Charge-

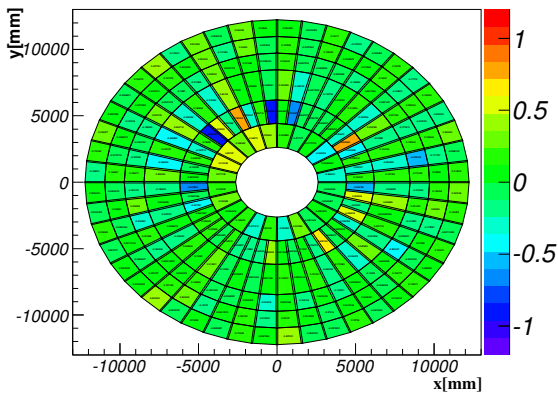


Fig. A.81 ϕ 方向の Difference, Aside Charge+

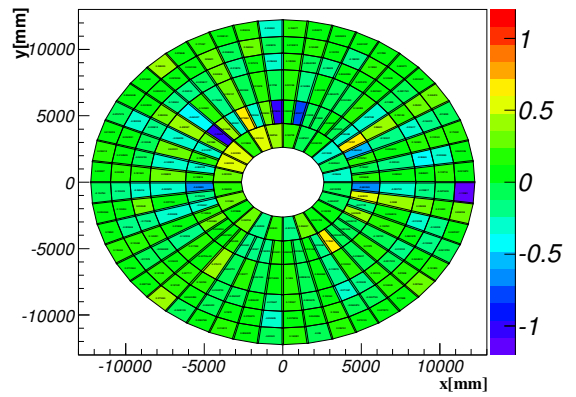


Fig. A.82 ϕ 方向の Difference Aside Charge-

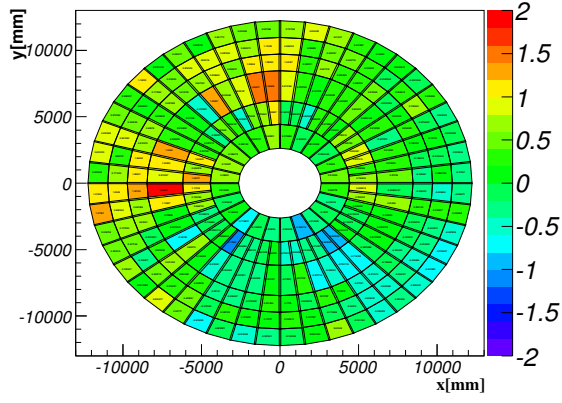


Fig. A.83 η 方向の Difference, Cside Charge+

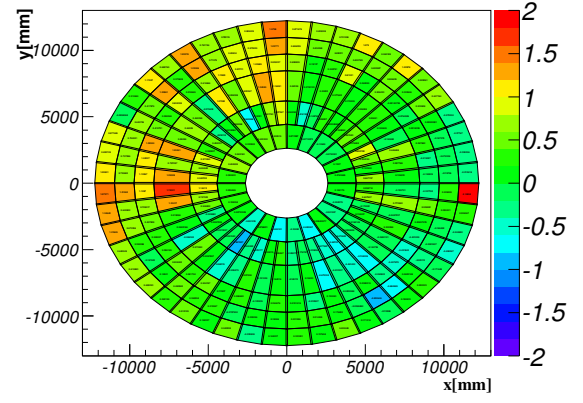


Fig. A.84 η 方向の Difference, Cside Charge-

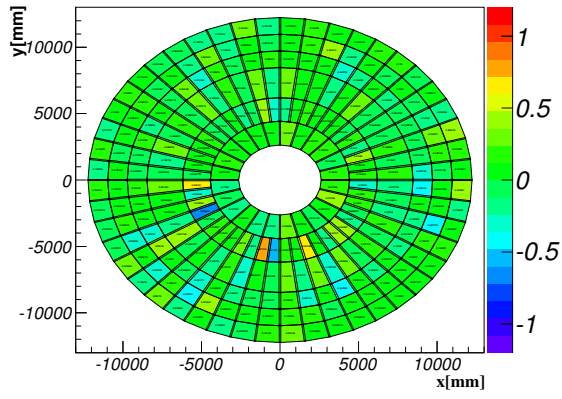


Fig. A.85 ϕ 方向の Difference, Cside Charge+

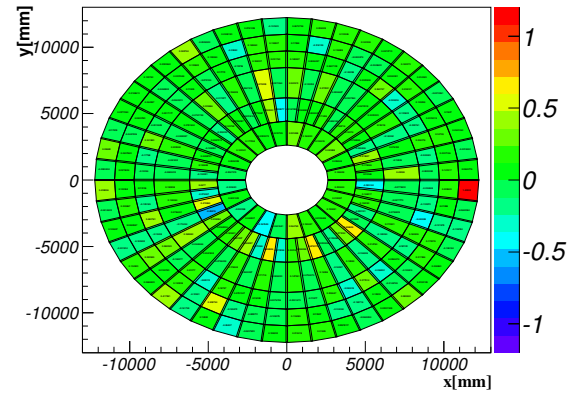


Fig. A.86 ϕ 方向の Difference, Cside Charge-

A.4 Extrapolator により見積もられた residual

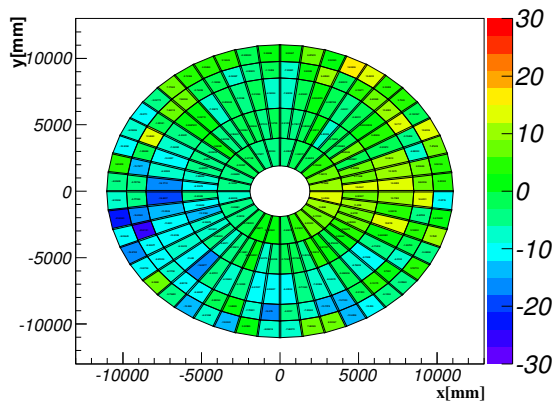


Fig. A.87 Residual of the ext.d η , Aside M1

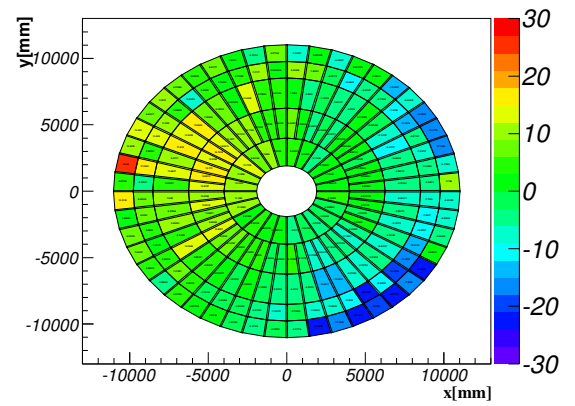


Fig. A.88 Residual of the ext.d η , Cside M1

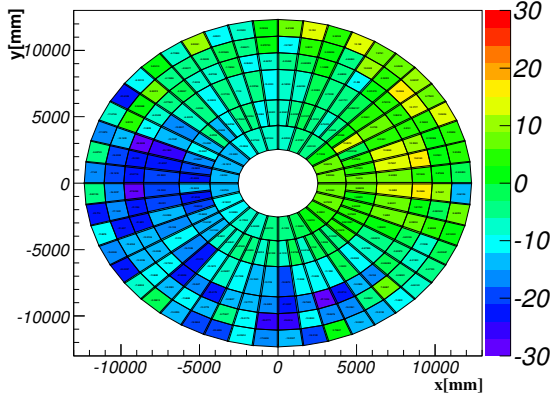


Fig. A.89 Residual of the $\text{ext_d}\eta$, Aside M2

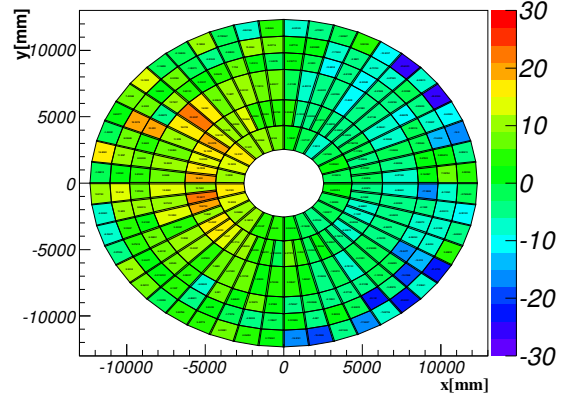


Fig. A.90 Residual of the $\text{ext_d}\eta$, Cside M2

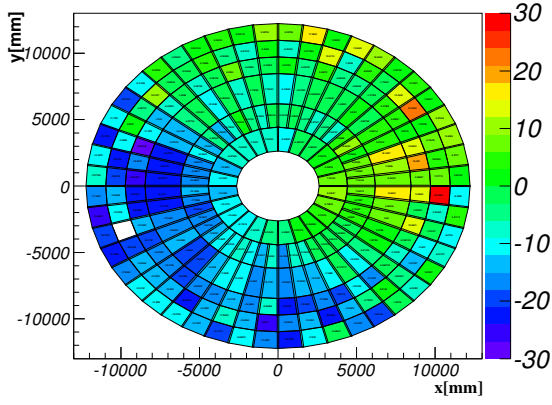


Fig. A.91 Residual of the $\text{ext_d}\eta$, Aside M3

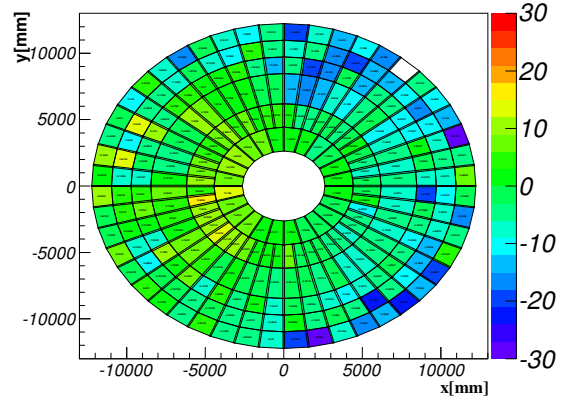


Fig. A.92 Residual of the $\text{ext_d}\eta$, Cside M3

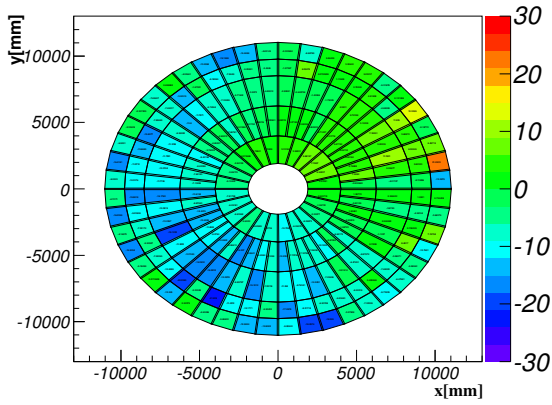


Fig. A.93 Residual of the $\text{ext_d}\phi$, Aside M1

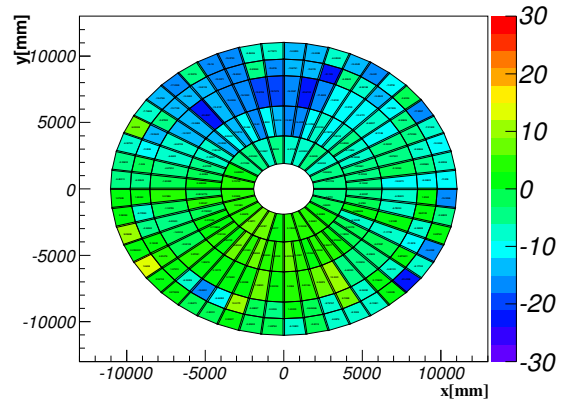


Fig. A.94 Residual of the $\text{ext_d}\phi$, Cside M1

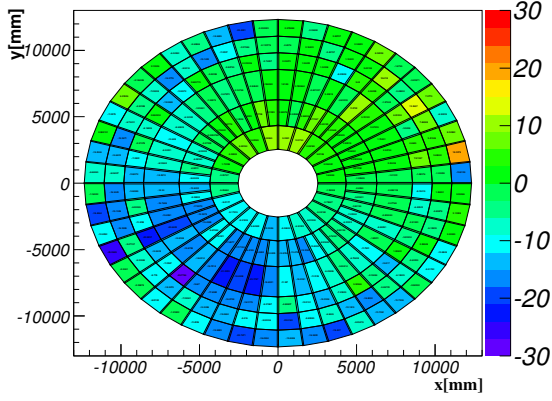


Fig. A.95 Residual of the $\text{ext_d}\phi$, Aside M2

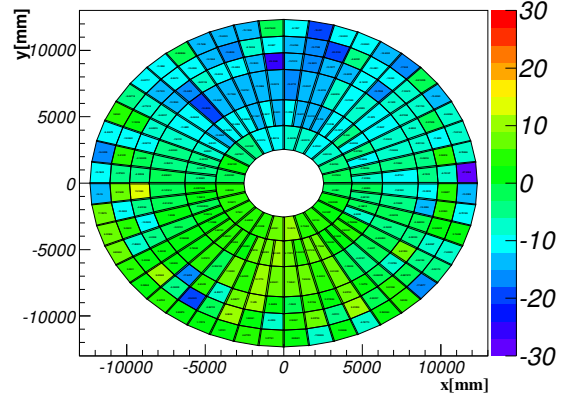


Fig. A.96 Residual of the $\text{ext_d}\phi$, Cside M2

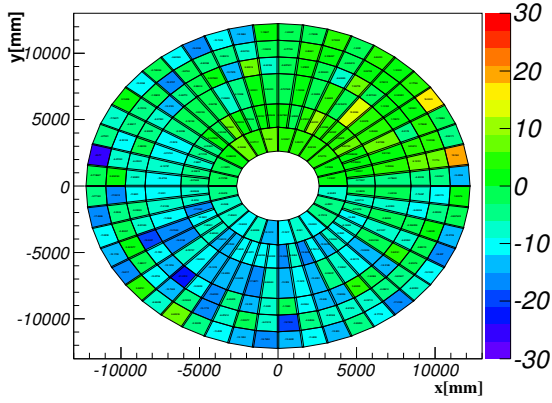


Fig. A.97 Residual of the $\text{ext_d}\phi$, Aside M3

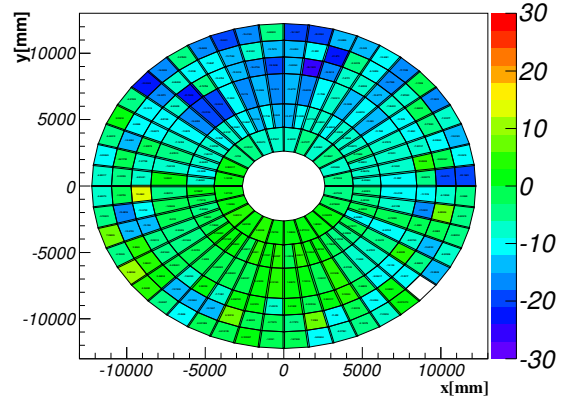


Fig. A.98 Residual of the $\text{ext_d}\phi$, Cside M3

A.5 カロリメータによるトリガーパターン

Table A.1 トリガーパターンの正規表現

$\text{EF_te}[0 - 9] + \$$
$\text{EF_xs}[0 - 9] + ((\text{loose}) (\text{medium}) (\text{tight}))?\text{noMu}\$$
$\text{EF_xe}[0 - 9] + ((\text{loose}) (\text{medium}) (\text{tight}))?\text{noMu}\$$
$\text{EF_je}[0 - 9] + (\text{NoEF})?\$$
$\text{EF_L1}[F]?J[0 - 9] + (\text{NoAlg})?\$$
$\text{EF_}[f]?j[0 - 9] + _ [f]?j[0 - 9] + _ a[0 - 9] + \text{tc_EFFS}(\text{anymct}[0 - 9] +)?\$$
$\text{EF_tau}[0 - 9] + ((\text{loose}) (\text{medium}) (\text{tight}))?\$$
$\text{EF_}[0 - 9]?[f]?j[0 - 9] + _ a[0 - 9]$ $+ \text{tc_EFFS}((\text{deta}[0 - 9] + _ F(B C)) (\text{xe}[0 - 9] + ((\text{loose}) (\text{medium}) (\text{tight}))?\text{noMu}))?\$$

B Z ボゾン生成断面積の測定

Z ボゾンの生成断面積は、重心系エネルギー 7TeV というテラスケールでの陽子衝突で現在の Z ボゾン生成機構の理解が正しいのかをテストする目的で精密に測定されている。また、これらの標準模型粒子は Higgs 粒子等の新粒子を探索する上では背景事象となり性質の理解は重要である。6 章で述べた Z Tag and Probe 法を用いたミューオントリガー効率の測定は Z ボゾンの崩壊に伴うミューオンを用いていることから、 $Z \rightarrow \mu\mu$ を用いた Z ボゾンの生成断面積測定においてミューオンの運動量に相関があり、Z ボゾンがトリガーされる効率を精度良く決定できる。従ってこの章では、本文中で得られたミューオントリガー効率を用いて Z の生成断面積を測定することを目的とする。使用するデータは PreperiodF-M で積分ルミノシティ 4269pb^{-1} である。MC サンプルは表 5.2 で表される NTUP_SMWZ を用いる。

B.1 生成断面積測定の概要

まず、Z ボゾンの生成断面積の概要について述べる。Z ボゾンの生成断面積は以下の式 B.1 から計算される。

$$\sigma_Z \times BR(Z \rightarrow \mu\mu) = \frac{N^{obs} - N^{bkg}}{A_Z \cdot C_Z \cdot L_{int}} \quad (\text{B.1})$$

- σ_Z は Z ボゾンの生成断面積を表し、 $BR(Z \rightarrow \mu\mu)$ は $Z \rightarrow \mu\mu$ の崩壊分岐比を表す。
- N^{obs} はデータから見積もられた信号の数を表す。
- N^{bkg} は背景事象の数を表す。
- L_{int} は解析に使用された run とトリガーで取得されたデータの積分ルミノシティを表す。
- A_Z, C_Z は以下に示すアクセプタンスを表す。また、 C_Z は trigger, reconstruction, isolation の効率に対しデータと MC の相違を SF として較正する。

$$C_Z = \frac{N_{MC,rec}}{N_{MC,gen,cut}} \text{ and } A_Z = \frac{N_{MC,gen,cut}}{N_{MC,gen,all}} \quad (\text{B.2})$$

- $N_{MC,rec}$ はシミュレーションから計算された reconstruction, イベント選別を行った後の信号の数を表す。
- $N_{MC,gen,cut}$ はシミュレーションで信号が作成される generated level において、8.2 で表す fiducial cut 後の信号の数を表す。
- $N_{MC,gen,all}$ はシミュレーションによって作成された信号の数を表す ($M_{\mu\mu} > 60 \text{ GeV}$)。

B.2 各効率のスケールファクター

Z ボゾンの生成断面積測定において信号の検出効率はデータ取得期間中の検出器の運転状況に影響を受ける。従って、以後順番に述べる trigger, reconstruction, isolation の効率に関してはデータと MC の相違をスケールファクター (SF) で較正する。SF は以下の式で定義される。

$$\text{SF} = \frac{\text{データから計算された効率}}{\text{MC から計算された効率}} \quad (\text{B.3})$$

また各効率の系統誤差の評価については以下に示すパラメーターを変化させ、得られた効率を元の値と比較することで行った。

- Invariant mass cut : $\pm 2 \text{ GeV}$
- Tag muon における P_T cut : $\pm 10\%$
- Tag muon における isolation cut : $\pm 10\%$
- Tag and Probe pair における $\Delta\phi$ cut : $\pm 10\%$
- Tag and Probe pair における Δz_0 cut : $\pm 10\%$
- Tag and Probe pair における Δd_0 cut : $\pm 10\%$
- Trigger efficiency の評価には以下も加える
 - Probe muon とトリガーオブジェクトとのマッチングの基準 : $\Delta R_{-0.005}^{+0.005}$
 - $|\Delta\phi_{tag,probe}| < \pi - 0.1$

Trigger efficiency

シングルミュオンに対するトリガー効率 $\varepsilon_{\text{mutrig}}$ の測定に関してはすでに本文中で述べた。しかし、 $Z \rightarrow \mu\mu$ の解析においては2つの CB muon を要求することから、実際に $Z \rightarrow \mu\mu$ 候補のイベントがトリガーされる効率 $\varepsilon_{\text{event}}$ は以下の式となる。

$$\varepsilon_{\text{event}} = 1 - (1 - \varepsilon_{\text{mutrig}})^2 \quad (\text{B.4})$$

以後シングルミュオンに対するトリガー効率の SF を SF_{trig} 、 $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントがトリガーされる効率に対する SF を SF_{event} とする。また一般にトリガー効率 (trigger efficiency) と述べるときはシングルミュオンに対するトリガー効率を指すこととする。結果を図 B.1-4 と表 B.1 にまとめ、最終的にイベントの較正に用いられる SF は $0.9934 \pm 0.0002(\text{stat.}) \pm 0.0007(\text{syst.})$ となった。

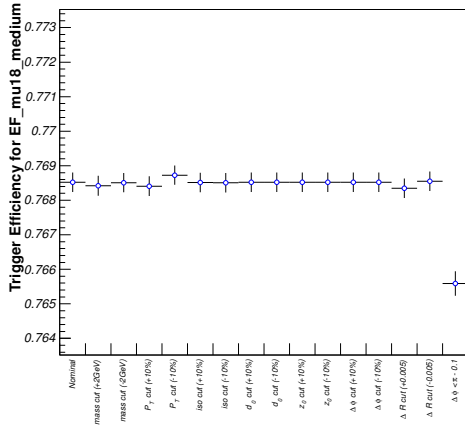


Fig. B.1 DATA の各 Cut parameter に対するトリガー効率の変化

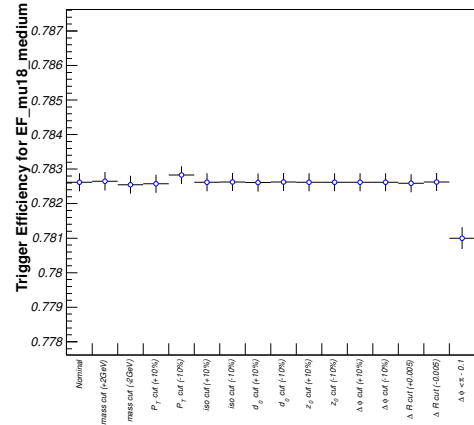


Fig. B.2 MC の各 Cut parameter に対するトリガー効率の変化

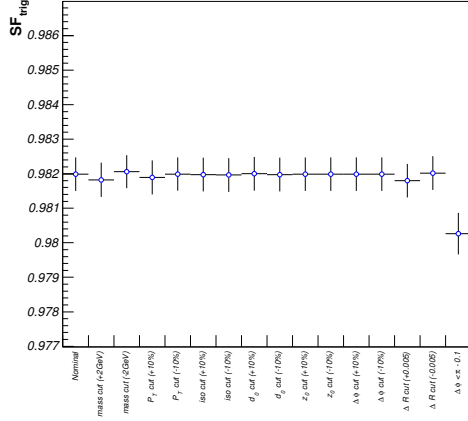


Fig. B.3 各 Cut parameter に対する SF_{trig} の変化

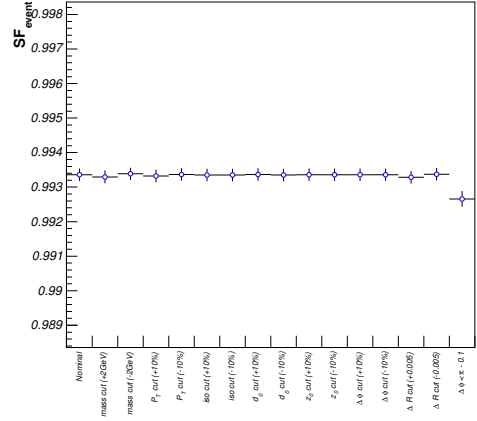


Fig. B.4 各 Cut parameter に対する SF_{event} の変化

Table B.1 トリガー効率に対する系統誤差のまとめ

Syst. test	$\Delta\epsilon_{mutrig,DATA}(\%)$	$\Delta\epsilon_{mutrig,MC}(\%)$	$\Delta SF_{trig}(\%)$	$\Delta SF_{event}(\%)$
$M_{\mu\mu}$ cut +2 GeV	-0.0102	+0.0029	+0.0166	-0.0062
$M_{\mu\mu}$ cut -2 GeV	-0.0014	-0.0072	+0.0072	-0.0026
P_T cut +10 %	-0.0113	-0.0042	-0.0092	-0.0036
P_T cut -10 %	+0.0205	+0.0207	+0.0002	+0.0006
Isolation cut +10 %	-0.0007	+0.0002	-0.0012	-0.0004
Isolation cut -10 %	-0.0011	+0.0008	-0.0025	-0.0009
Δd_0 cut +10) %	+0.0001	-0.0009	+0.0012	+0.0004
Δd_0 cut -10 %	-0.0002	+0.0007	-0.0012	+0.0004
Δz_0 cut +10 %	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
Δz_0 cut -10 %	0.0001	0.0000	-0.0001	0.0000
$\Delta\phi$ cut +10 %	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$\Delta\phi$ cut -10 %	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ΔR cut +0.005	-0.0175	-0.0027	-0.0189	-0.0073
ΔR cut -0.005	+0.0031	-0.0006	-0.0032	-0.0012
$\Delta\phi < \pi - 0.1$	-0.2935	-0.1619	-0.1722	-0.0699
Total	0.2949	0.1634	0.1743	0.0707

Table B.2 $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントがトリガーされる効率の SF

Parameter	Value
SF_{event}	$0.9934 \pm 0.0002(\text{stat.}) \pm 0.0007(\text{syst.})$

Reconstruction efficiency

再構成効率 (reconstruction efficiency) とは offline muon が再構成される効率を指す。Z ボゾンの選別において CB muon を用いることから再構成効率は以下の式 B.5 ように定義される。

$$\varepsilon_{\text{reco}} = (\text{Inner track reconstruction efficiency}) \times (\text{Combined efficiency}) \quad (\text{B.5})$$

Inner track reconstruction efficiency は内部飛跡検出器でトラックが再構成される効率を表し、Combined efficiency はそれら再構成されたトラックに対し、ミューオン検出器で再構成されたトラックと結合され CB muon が作成される効率を表す。各効率の測定にはトリガー効率と同様に Z Tag and Probe 法を用いる。Probe muon を以下のように選び、Inner track reconstruction efficiency, combined efficiency を式 B.6-7 のように定義する。結果を図 B.5-10 に示す。

- Inner track reconstruction efficiency の計算における probe muon の選別
 - SA muon
 - $q_{\text{tag}} \cdot q_{\text{probe}} < 0$
 - $|\eta| < 2.4$, $P_{\text{T}} > 20\text{GeV}$, $|z_{0\text{toPV}}| < 10\text{mm}$
 - $|\phi_{\text{tag}} - \phi_{\text{probe}}| > 0.2$, $|z_{0\text{toPV,tag}} - z_{0\text{toPV,probe}}| < 3\text{mm}$, $|d_{0\text{toPV,tag}} - d_{0\text{toPV,probe}}| < 2\text{mm}$
 - $|M_{\mu\mu} - M_{\text{Z}}| < 10\text{GeV}$
- Combined efficiency の計算における probe muon の選別
 - Inner track
 - $q_{\text{tag}} \cdot q_{\text{probe}} < 0$
 - $|\eta| < 2.4$, $P_{\text{T}} > 20\text{GeV}$, $|z_{0\text{toPV}}| < 10\text{mm}$
 - $|\phi_{\text{tag}} - \phi_{\text{probe}}| > 0.2$, $|z_{0\text{toPV,tag}} - z_{0\text{toPV,probe}}| < 3\text{mm}$, $|d_{0\text{toPV,tag}} - d_{0\text{toPV,probe}}| < 2\text{mm}$
 - $\sum P_{\text{T}}(\Delta R < 0.2)/P_{\text{T}}(\text{Innertrack}) < 0.1$
 - $|M_{\mu\mu} - M_{\text{Z}}| < 10\text{GeV}$

$$\text{Track reconstruction efficiency} = \frac{\text{Inner track と } \Delta R < 0.01 \text{ でマッチングが取れた probe muon の数}}{\text{Probe muon の数}} \quad (\text{B.6})$$

$$\text{Combined efficiency} = \frac{\text{CB muon と } \Delta R < 0.05 \text{ でマッチングが取れた probe muon の数}}{\text{Probe muon の数}} \quad (\text{B.7})$$

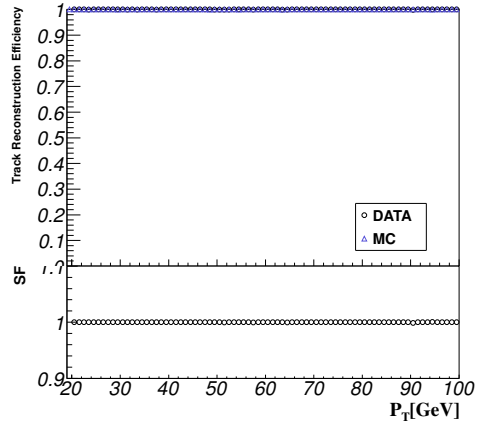


Fig. B.5 Track Reconstruction Efficiency vs P_T

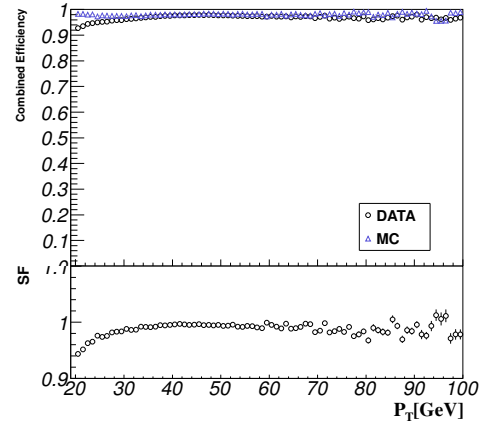


Fig. B.6 Combined Efficiency vs P_T

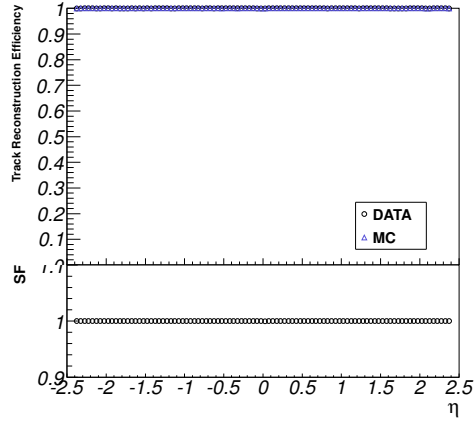


Fig. B.7 Track Reconstruction Efficiency vs η

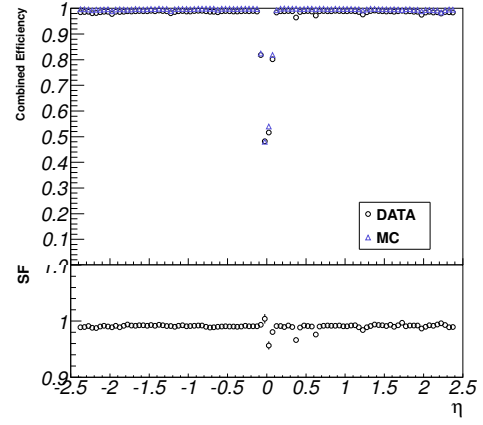


Fig. B.8 Combined Efficiency vs η

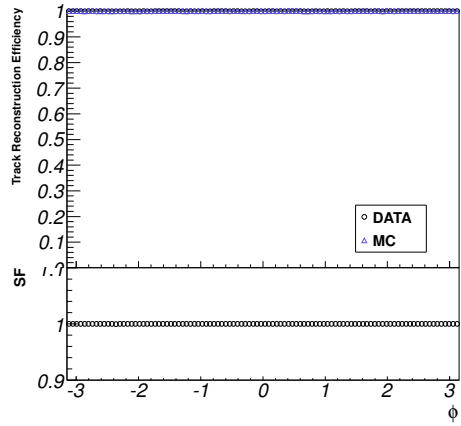


Fig. B.9 Track Reconstruction Efficiency vs ϕ

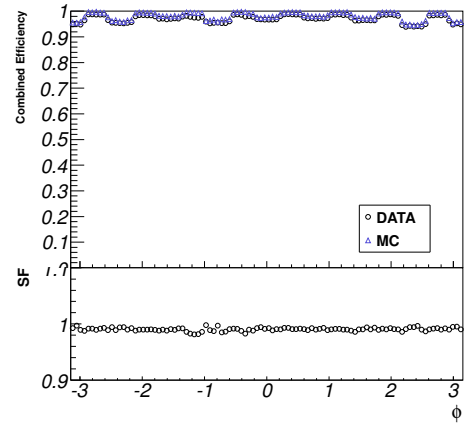


Fig. B.10 Combined Efficiency vs ϕ

Table B.3 再構成効率のまとめ

	DATA	MC	SF
TrkRec.eff	1.0000 ± 0.0000	1.0000 ± 0.0000	1.0000 ± 0.0000
Comb.eff	0.9707 ± 0.0001	0.9800 ± 0.0001	0.9904 ± 0.0001
$\varepsilon_{\text{reco}}$	0.9706 ± 0.0001	0.9799 ± 0.0001	0.9905 ± 0.0001

以下に $\varepsilon_{\text{reco}}$ に対する系統誤差の評価を示す。シングルミュオンに対する $\varepsilon_{\text{reco}}$ の SF を SF_{reco} 、以下に示すように $Z \rightarrow \mu\mu$ に対し 2つのミュオンが再構成される効率 $\varepsilon_{\text{event}}$ の SF を SF_{event} と定義する。最終的に信号の検出効率の較正に用いられる SF_{event} は $0.9811 \pm 0.0002(\text{stat.}) \pm 0.0033(\text{syst.})$ となった。

$$\varepsilon_{\text{event}} = \varepsilon_{\text{reco}}^2 \quad (\text{B.8})$$

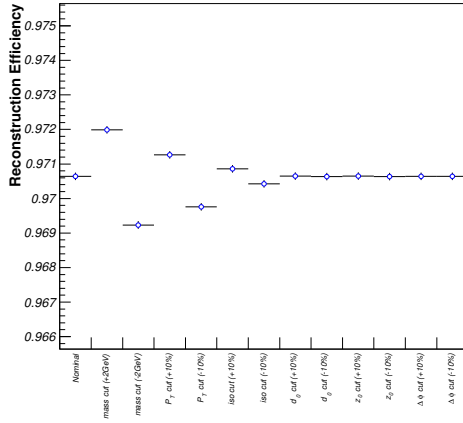


Fig. B.11 DATA の各 Cut parameter に対する再構成効率の変化

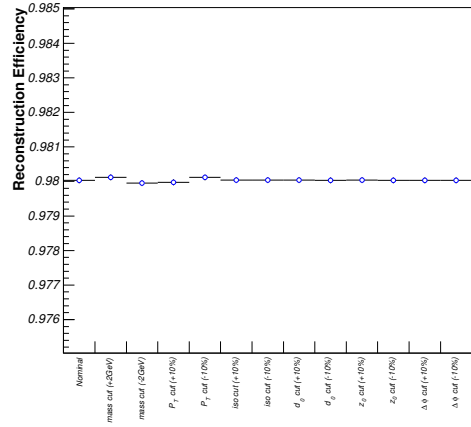


Fig. B.12 MC の各 Cut parameter に対する再構成効率の変化

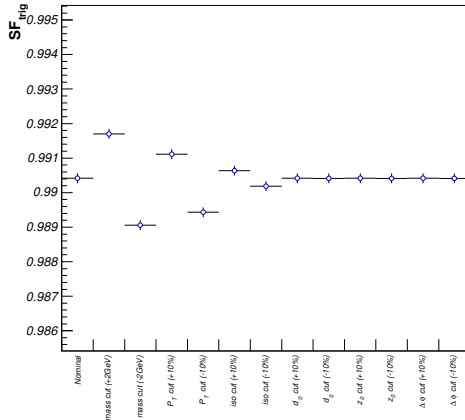
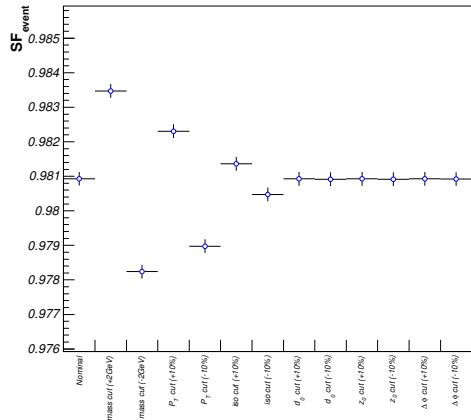
Fig. B.13 各 Cut parameter に対する SF_{trig} の変化Fig. B.14 各 Cut parameter に対する SF_{event} の変化

Table B.4 再構成効率に対する系統誤差のまとめ

Syst. test	$\Delta\varepsilon_{\text{reco}}(\%)$	$\Delta\varepsilon_{\text{reco}}(\%)$	$\Delta\text{SF}_{\text{trig}}(\%)$	$\Delta\text{SF}_{\text{event}}(\%)$
$M_{\mu\mu}$ cut +2 GeV	+0.1346.	+0.0089	+0.1283	+0.2544
$M_{\mu\mu}$ cut -2 GeV	-0.1410	-0.0079	-0.1359	-0.2689
P_{T} cut +10 %	+0.0622	-0.0060	+0.0695	+0.1377
P_{T} cut -10 %	-0.0884	+0.0083	-0.0986	-0.1953
Isolation cut +10 %	+0.0218	+0.0004	+0.0218	+0.0432
Isolation cut -10 %	-0.0216	+0.0009	-0.0230	-0.0454
Δd_0 cut +10 %	+0.0007	+0.0008	-0.0001	-0.0001
Δd_0 cut -10 %	-0.0005	+0.0001	-0.0007	-0.0013
Δz_0 cut +10 %	+0.0005	+0.0006	-0.0001	-0.0002
Δz_0 cut -10 %	-0.0005	+0.0001	-0.0006	-0.0012
$\Delta\phi$ cut +10 %	+0.0002	+0.0002	-0.0001	-0.0001
$\Delta\phi$ cut -10 %	-0.0002	+0.0002	-0.0004	-0.0008
Total	0.1678	0.0122	0.1694	0.3354

Table B.5 $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントが再構成される効率の SF

Parameter	Value
SF_{event}	$0.9811 \pm 0.0002(\text{stat.}) \pm 0.0033(\text{syst.})$

Isolation Efficiency

Isolation 効率とは CB muon の isolation cut による効率を表す。Isolation 効率は Z Tag and Probe 法によって計算され、probe muon を以下のように選ぶ。Isolation 効率の定義は式 B.9 である。

- Isolation 効率の計算における probe muon の選別
 - CB muon
 - $q_{\text{tag}} \cdot q_{\text{probe}} < 0$
 - $|\eta| < 2.4$, $P_{\text{T}} > 20\text{GeV}$, $|z_{0\text{toPV}}| < 10\text{mm}$
 - $|\phi_{\text{tag}} - \phi_{\text{probe}}| > 0.2$, $|z_{0\text{toPV,tag}} - z_{0\text{toPV,probe}}| < 3\text{mm}$, $|d_{0\text{toPV,tag}} - d_{0\text{toPV,probe}}| < 2\text{mm}$
 - $|M_{\mu\mu} - M_{\text{Z}}| < 10\text{GeV}$

$$\varepsilon_{\text{iso}} = \frac{\sum \text{P}_{\text{T}}(\Delta R < 0.2)/\text{P}_{\text{T}}(\text{muon}) < 0.1 \text{ を満たす probe muon の数}}{\text{Probe muon の数}} \quad (\text{B.9})$$

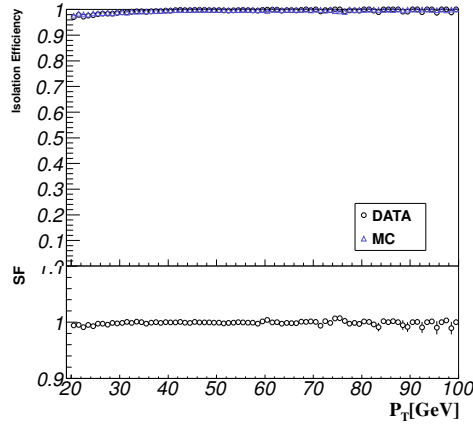


Fig. B.15 Isolation Efficiency vs P_T

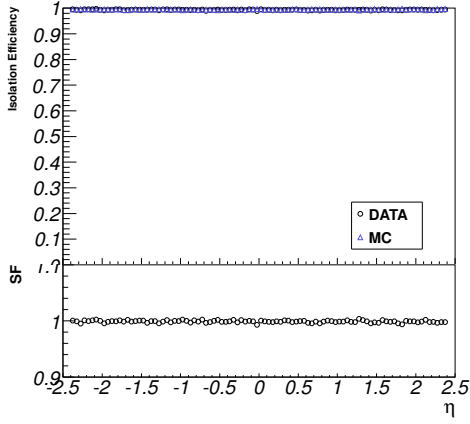


Fig. B.16 Isolation Efficiency vs η

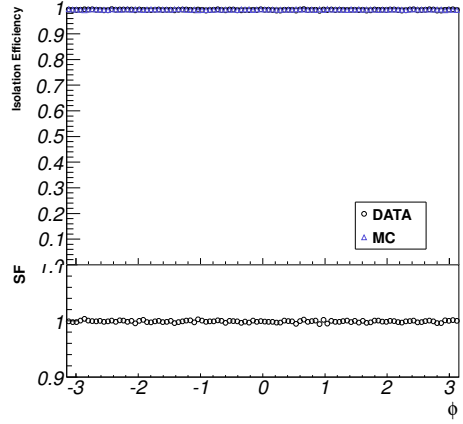


Fig. B.17 Isolation Efficiency vs ϕ

Table B.6 Isolation 効率のまとめ

	<i>DATA</i>	MC	SF
ε_{iso}	0.9933 ± 0.0001	0.9942 ± 0.0001	0.9990 ± 0.0001

以下に isolation 効率に対する系統誤差の評価を示す。シングルミュオンに対する isolation 効率の SF を SF_{iso} 、以下に示すように $Z \rightarrow \mu\mu$ に対し 2 つのミュオンが isolation cut の要求を満たす効率 $\varepsilon_{\text{event}}$ の SF を SF_{event} と定義する。最終的に信号の検出効率の較正に用いられる SF_{event} は $0.9981 \pm 0.0001(\text{stat.}) \pm 0.0005(\text{syst.})$ となった。

$$\varepsilon_{\text{event}} = (\text{Isolation.eff})^2 \quad (\text{B.10})$$

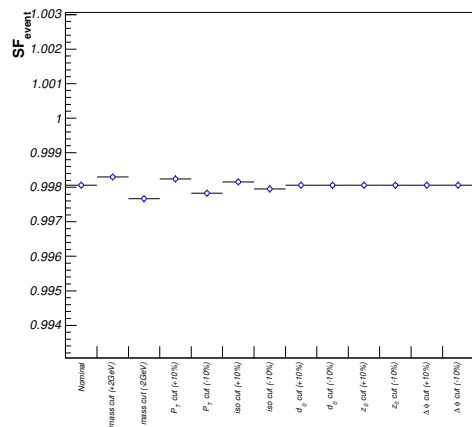
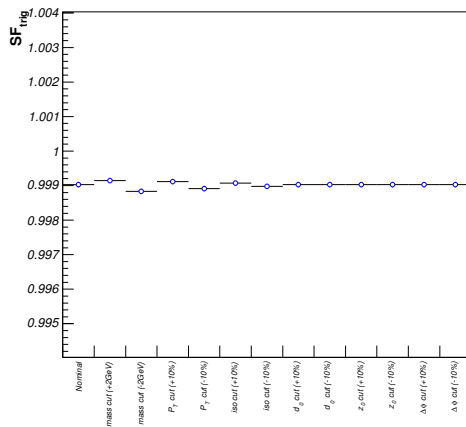
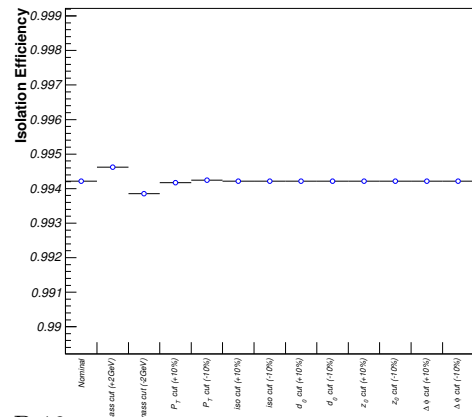
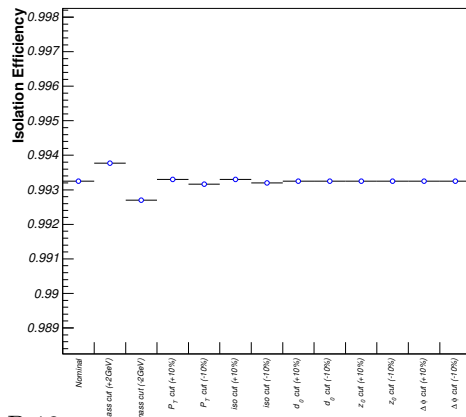


Table B.7 Isolation Efficiency に対する系統誤差のまとめ

Syst. test	$\Delta\varepsilon_{\text{iso,DATA}}(\%)$	$\Delta\varepsilon_{\text{iso,MC}}(\%)$	$\Delta\text{SF}_{\text{trig}}(\%)$	$\Delta\text{SF}_{\text{event}}(\%)$
$M_{\mu\mu}$ cut +2 GeV	+0.0522	+0.0405	+0.0118	+0.0236
$M_{\mu\mu}$ cut -2 GeV	-0.0551	-0.0359	-0.0194	-0.0387
P_{T} cut +10 %	+0.0050	-0.0040	+0.0090	+0.0181
P_{T} cut -10 %	-0.0086	+0.0029	-0.0115	-0.0230
Isolation cut +10 %	+0.0050	+0.0003	+0.0047	+0.0094
Isolation cut -10 %	-0.0050	+0.0003	-0.0053	-0.0106
Δd_0 cut +10 %	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Δd_0 cut -10 %	-0.0001	0.0000	-0.0001	-0.0002
Δz_0 cut +10 %	-0.0001	0.0000	-0.0001	-0.0002
Δz_0 cut -10 %	+0.0001	0.0000	+0.0001	+0.0002
$\Delta\phi$ cut +10 %	-0.0001	0.0000	-0.0001	-0.0002
$\Delta\phi$ cut -10 %	0.0001	0.0000	0.0001	0.0002
Total	0.0556	0.0407	0.0232	0.0463

Table B.8 $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントにおいて isolation cut の要求を満たす効率の SF

Parameter	Value
SF_{event}	$0.9981 \pm 0.0001(\text{stat.}) \pm 0.0005(\text{syst.})$

B.3 測定における fiducial regions

Z ボゾンの生成断面積測定の解析に用いる fiducial region を以下のように定義する。

- $Z \rightarrow \mu\mu$: $P_{\text{T}}^{\mu} > 20\text{GeV}$, $|\eta^{\mu}| < 2.4$, $66 < M_{\mu\mu} < 116\text{GeV}$

シミュレーションの generated level において、truth muon の情報を用いて上記のカットによるアクセプタンス A_Z を見積もった。結果を図 B.22-25 と表 B.9 に示す。

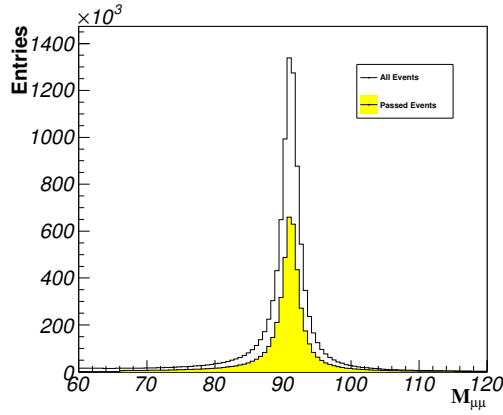


Fig. B.22 Fiducial region における不変質量分布

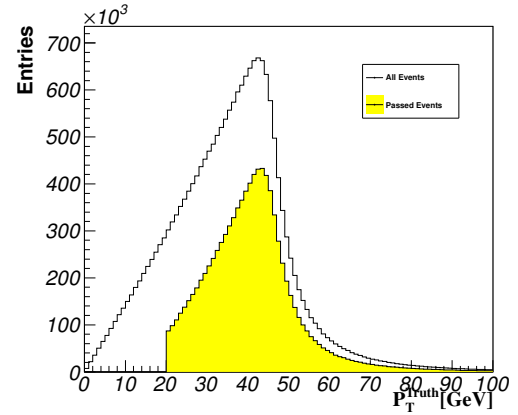


Fig. B.23 Fiducial region における P_T 分布

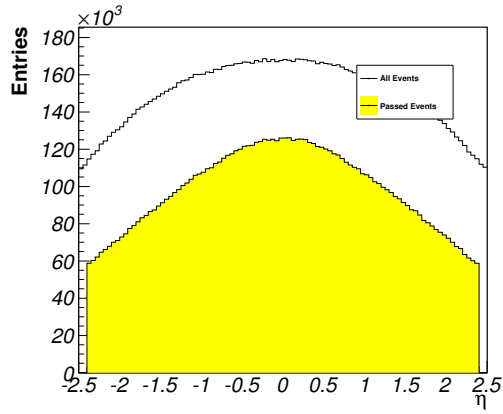


Fig. B.24 Fiducial region における η 分布

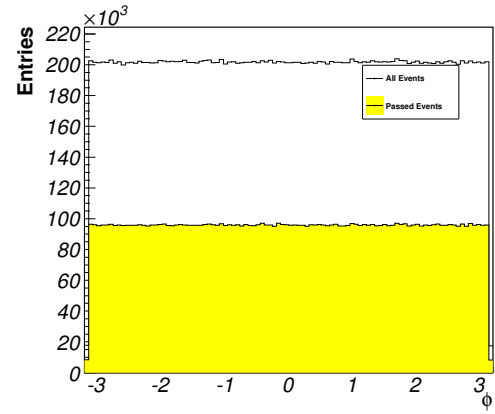


Fig. B.25 Fiducial region における ϕ 分布

また、 A_Z における PDF セットや generator の違いによる理論的誤差を [11] に従って 2.8% とした。

Table B.9 $Z \rightarrow \mu\mu$ における A_Z

Parameter	Value
A_Z	$0.4726 \pm 0.0002(\text{stat.}) \pm 0.0132(\text{syst.})$

B.4 信号の選別効率

$Z \rightarrow \mu\mu$ 候補のイベントを選別するために表 B.10 で表されるカットを行う。これらのカットによる信号の選別効率を $Z \rightarrow \mu\mu$ MC サンプルを用いて計算し、結果を表 B.11 にまとめた。また trigger, reconstruction, isolation 効率に関しては SF を用いて値を較正し、最終的の選別効率は 33.91% となった。

Table B.10 Event Selection Summary

Good Run List	
Trigger	EF_mu18_medium
Primary Vertex	$N_{tracks} \geq 3$ and $ z_{PV} < 150\text{mm}$
Muon Quality	ID track cut ≥ 2 combined muons $P_T > 20\text{GeV}$ $ \eta < 2.4$ $ z_0\text{toPV} < 10\text{mm}$
Isolation	$\sum P_T(\Delta R < 0.2)/P_T(muon) < 0.1$
Opposite Charge	$q_1 \cdot q_2 < 0$
Same Vertex	$ \Delta(z_0\text{toPV}) < 3\text{mm}$ $ \Delta(d_0\text{toPV}) < 2\text{mm}$
Mass Window	$66 < M_{\mu\mu} < 116\text{GeV}$

Table B.11 Signal Efficiencies Summary

Selection	Number of Events	Reduction Factor(%)	Rel.eff(%)
Total Events	4797304	-	-
Trigger	3535315	73.69	73.69
Primary Vertex	3223501	67.19	91.18
Muon Quality	1744927	36.37	54.13
Isolation	1718406	35.82	98.48
Opposite Charge	1718357	35.82	100.00
Same Vertex	1718346	35.82	100.00
Mass Window	1672373	34.86	97.32
Correction (Trigger efficiency)	1661335	34.63	99.34
Correction (Reconstruction efficiency)	1629936	33.98	98.11
Correction (Isolation efficiency)	1626839	33.91	99.81

B.5 アクセプタンスと信号の選別効率のまとめ

$Z \rightarrow \mu\mu$ イベントに対する信号の検出効率を A_Z, C_Z で表し、結果を表 B.12 にまとめる。全体の系統誤差は 0.65% で、その内訳を表 B.13 にまとめる。

Table B.12 $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントの Acceptance まとめ

Parameter	Value
A_Z	$0.4726 \pm 0.0002(\text{stat.}) \pm 0.0013(\text{syst.})$
C_Z	$0.7175 \pm 0.0003(\text{stat.}) \pm 0.0055(\text{syst.})$
Overall acceptance	$0.3391 \pm 0.0002(\text{stat.}) \pm 0.0026(\text{syst.})$

Table B.13 $Z \rightarrow \mu\mu$ イベントのアクセプタンスに対する系統誤差のまとめ

A_Z parameter	acceptance uncertainty(%)
theoretical uncertainty	0.28
C_Z parameter	acceptance uncertainty(%)
pileup re-weighting	0.37
trigger efficiency	0.07
reconstruction efficiency	0.34
isolation efficiency	0.46
muon momentum resolution	0.00
muon momentum scale	0.06
theoretical uncertainty	0.33
total C_Z uncertainty	0.76

Pile-up re-weighting

$Z \rightarrow \mu\mu$ 等の MC サンプルでは、pile-up の効果を反映するために minimum bias events が含まれている。しかし通常 MC サンプルはデータ取得期間中もしくはそれ以前に作成されるために、解析対象となるイベントの pile-up が完全に再現しているわけではない。従って今回の解析において event-by-event でデータの pile-up のコンデションを再現するように MC サンプルの re-weight を行っている。Re-weight は図 B.26 に示すバンチ衝突当たりの平均反応数 $\langle\mu\rangle$ に応じて行い、結果を表 8 にまとめる。また re-weight 行った場合と行わない場合との C_Z を比較することで、 C_Z の系統誤差として 0.37% を見積もった。

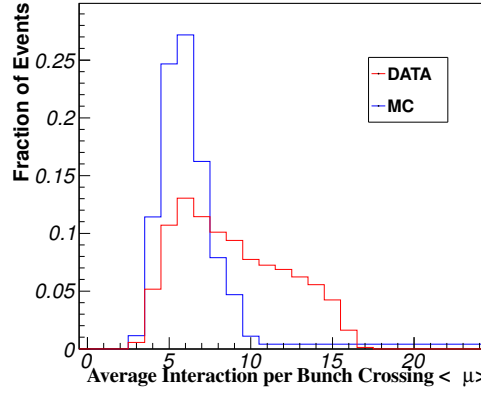


Fig. B.26 バンチ衝突における平均反応数の分布

Table B.14 Event Re-weighting Factor

$\langle \mu \rangle$	Event weight	$\langle \mu \rangle$	Event weight	$\langle \mu \rangle$	Event weight
1	1	7	0.703249	13	15.2261
2	1	8	1.27436	14	13.5924
3	0.483271	9	1.99305	15	10.3592
4	0.450134	10	6.97802	16	3.96187
5	0.432317	11	17.7028	17	0.300382
6	0.477607	12	16.7743	≥ 18	0

Muon momentum resolution

ミューオンの運動量測定における系統誤差を見積もる。解析に用いられる MC サンプルは、実際にデータから計算された運動量分解能に従って運動量が較正されている。従って較正に用いるパラメータの誤差を muon momentum resolution の系統誤差として用いる。パラメータの誤差は inner track, stand alone track に対してそれぞれ ($\pm$) 方向が存在し、 C_Z の変化を計算することで C_Z 系統誤差を見積もる。変化の最も大きかった stand alone track(+) の場合から、系統誤差を 0.003% とした。

Muon momentum scale

Muon momentum scale に関する誤差は、momentum scale を行った場合と行わない場合との C_Z の変化から見積もる。結果は 0.06% と見積もられた。

Theoretical uncertainty for C_Z

C_Z に対する理論的誤差を見積もる。[11] に従い 0.33% とした。

B.6 生成断面積測定のまとめ

データから計算された表 B.10 に従う信号数の変化を表 B.15 にまとめる。最終的に得られた信号数は 1510614 で、[11] に従い Electroweak による背景事象を 0.35 %、QCD による背景事象を 0.39% とした。

Table B.15 データに対する信号数の変化

Selection	Number of Events	Reduction Factor(%)	Rel.eff(%)
Total Events (Passed GRL)	347693920	-	-
Trigger	163861904	47.12	47.12
Primary Vertex	162522016	46.74	99.18
Muon Quality	1866961	5.37×10^{-3}	1.15×10^{-2}
Isolation	1621817	4.66×10^{-3}	86.87
Opposite Charge	1620698	4.66×10^{-3}	99.93
Same Vertex	1620641	4.66×10^{-3}	100.00
Mass Window	1510614	4.34×10^{-3}	93.21

Table B.16 観測数と背景事象数のまとめ

N^{obs}	1510614
$N^{bkg}(EWK)$	$5287 \pm 73(\text{stat.}) \pm 305(\text{syst.})$
$N^{bkg}(QCD)$	$5891 \pm 774(\text{stat.}) \pm 3310(\text{syst.})$

得られた各パラメーターを用いて式 B.1 に従って生成断面積を測定し、結果を表 B.17 に示す。これは理論的予想 $0.99 \pm 0.05 \text{nb}^{-1}$ と矛盾のない結果であった。

Table B.17 測定された Z ボゾンの生成断面積

$\sigma_Z \times \text{BR}(Z \rightarrow \mu\mu) = 1.036 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.007(\text{syst.}) \pm 0.035(\text{lumi.}) \text{nb}^{-1}$
--

参考文献

- [1] F Akesson, M J Costa, D Dobos, M Elsing, S Fleischmann, A Gaponenko, K Gnanvo, P T Keener, W Liebig, E Moyse, A Salzburger, M Siebel, and A Wildauer, ATLAS Inner Detector Event Data Model, Technical Report ATL-SOFT-PUB-2007-006. ATL-COM-SOFT-2007-015, CERN, Geneva, 2007.
- [2] S. Hassani et al., A muon identification and combined reconstruction procedure for the ATLAS detector at the LHC using the (MUONBOY, STACO, MuTag) reconstruction packages, Nucl. Instrum. Meth. A572 (2007)
- [3] Torbjorn Sjostrand, Stephen Mrenna, and Peter Z. Skands. PYTHIA 6.4 Physics and Manual. JHEP, 2006.
- [4] Simone Alioli, Paolo Nason, Carlo Oleari, and Emanuele Re. A general framework for implementing NLO calculations in shower Monte Carlo programs: the POWHEG BOX. JHEP, 2010.
- [5] S. Agostinelli et al. GEANT4: A simulation toolkit. Nucl. Instrum. Meth., A506:250?303, 2003.
- [6] Performance of the ATLAS Silicon Pattern Recognition Algorithm in Data and Simulation at $\sqrt{s} = 7$ TeV, Technical Report ATLAS-CONF-2010-072, CERN, Geneva, 2010.
- [7] 伊藤悠貴著, 検出効率解析に基づく μ 粒子検出器の高電圧・閾値電圧の最適化, 修士学位論文, 名古屋大学, 2010
- [8] ATLAS, Summary of comments on earlier drafts to the ATLAS Letter of Intent for the Phase-I Upgrade, CERN-LHCC-2012-001; LHCC-I-020-ADD-1, 2012.
- [9] 若林潤著, LHC-ATLAS 実験 μ 粒子トリガー検出器の 7TeV 陽子陽子衝突事象を用いたアライメントの研究, 修士学位論文, 名古屋大学, 2011.
- [10] 吹田航一著, ATLAS 実験前後方部レベル 1 ミューオントリガーシステムの動作検証, 修士学位論文, 神戸大学, 2011.
- [11] Aharrouche M et al, Total and differential $W \rightarrow l\nu$ and $Z \rightarrow ll$ cross-sections measurements in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector, ATL-COM-PHYS-2011-751, 2011

謝辞

本研究はたくさんの方々に支えられて進めることが出来ました。まず初めに、指導教官の藏重久弥教授にはこのような研究の機会を与えて頂き深く感謝します。山崎祐司准教授、松下崇氏、織田勸氏には多くのご指導を頂き、研究に対する理解が深まりました。また、石野雅也氏、長野邦浩氏を初めとする ATLAS JAPAN トリガーグループの方々にはミーティングを通して多くの助言を頂きました。ありがとうございました。

共に大学生活を過ごした、大塚康平氏、小西拓也氏、鈴木雄太氏に感謝します。彼らのおかげで切磋琢磨することが出来ました。そして、研究生活を共に楽しく送ることができた研究室の皆様にも感謝します。

早川俊氏、結束晃平氏、鈴木友氏には CERN での生活をサポートしていただきました。ありがとうございます。秘書の横山有美さんには出張の手続きを行って頂きました。ありがとうございます。

最後に家族に対して感謝の意を述べて謝辞と致します。