

修士学位論文  
ATLAS エンドキャップトリガーにおける  
宇宙線ミュオン事象の研究

神戸大学大学院  
自然科学研究科 物理学専攻  
高エネルギー研究室  
059S102N  
稲田 昌彦

2007 年 2 月 20 日

## 概要

スイスの CERN 研究所で LHC(Large Hadron Collider) が現在建造中で、2007 年末に完成する予定となっている。LHC とは全周 27km の陽子陽子衝突型加速器のことで、二つの陽子ビームをそれぞれ 7TeV という世界最高エネルギーまで加速させ、正面衝突させる実験を行う。この衝突地点に設置される測定器のひとつに ATLAS 測定器がある。ATLAS 実験ではこの ATLAS 測定器を用いて、標準理論が预言する未発見の Higgs 粒子や、標準理論の枠を超えた SUSY 粒子の探索を行うことが大きな目的となっている。ATLAS 測定器は、それぞれの目的をもった粒子検出器、マグネットシステムの集合体であり、現在建設が進行中である。

ATLAS 実験において各検出器のインストールから実験開始を経て定常的に陽子陽子衝突反応のデータ収集に移るまでの過程のことをコミッショニング (性能検証) といい、ATLAS 測定器を正常に動作させるためには必要不可欠な作業である。現在は宇宙線ミュオンを用いたコミッショニングの時期にあり、初の実データによる個々の検出器の性能評価及び検出器を統合した動作確認を行うことが主な目的となっている。

今回シミュレーションにより、ATLAS エンドキャップシステムにおいて宇宙線ミュオンを用いたコミッショニングに関する研究を行った。シミュレーションは宇宙線ミュオンの情報 (エネルギー、入射角度、ヒット位置、ヒットレートなど) を知り、理想的な状況で検出器の反応を見ることで、実観測での結果の予測ができる。これによりコミッショニングをスムーズに行うための重要な役割を果たす。

宇宙線ミュオンは、ビーム衝突によって発生する粒子と比較すると、それぞれの検出器を通過するタイミング、入射方向など様々な面で異なるため、ビーム衝突実験のために設定された環境では検出器を統合した動作確認を行うことができない。よって、宇宙線ミュオン用の環境設定を行うことでそれを可能にし、解析を行った。

この結果、TGC によるトリガーレートは 682Hz と大きな値になることがわかり、さらにトリガー条件をみたした事象の多くは MDT にもヒットがあるということを知ることができた。この情報から宇宙線ミュオン事象によってほぼ全ての ATLAS エンドキャップ領域で十分コミッショニングを行うことができるという予測が立ち、またこれらの情報により実観測時における効率化が期待される。

# 目次

|       |                                     |    |
|-------|-------------------------------------|----|
| 1     | 序論                                  | 5  |
| 2     | ATLAS 実験                            | 6  |
| 2.1   | LHC                                 | 6  |
| 2.2   | ATLAS 実験で期待される物理                    | 8  |
| 2.2.1 | 標準理論 Higgs 粒子                       | 8  |
| 2.3   | ATLAS 測定器                           | 12 |
| 2.3.1 | 内部飛跡検出器                             | 13 |
| 2.3.2 | カロリメータ                              | 14 |
| 2.3.3 | マグネット                               | 15 |
| 2.3.4 | ミュオンシステム                            | 16 |
| 2.4   | コミッショニング (性能検証)                     | 18 |
| 2.4.1 | ビーム衝突開始前                            | 19 |
| 2.4.2 | ビーム衝突開始後                            | 20 |
| 3     | エンドキャップミュオントリガーシステム                 | 21 |
| 3.1   | TGC                                 | 21 |
| 3.1.1 | 構造                                  | 21 |
| 3.1.2 | 配置                                  | 24 |
| 3.2   | MDT                                 | 26 |
| 3.2.1 | 構造                                  | 26 |
| 3.2.2 | 配置                                  | 28 |
| 3.3   | トリガーシステム                            | 32 |
| 3.3.1 | LVL1 Trigger                        | 33 |
| 3.3.2 | LVL2 Trigger                        | 33 |
| 3.3.3 | Event Filter                        | 33 |
| 3.4   | LVL1 End Cap Muon Trigger           | 33 |
| 3.4.1 | R- コインシデンス                          | 34 |
| 3.4.2 | トリガーのタイミング                          | 35 |
| 3.5   | TGC エレクトロニクス                        | 36 |
| 3.5.1 | トリガー系                               | 36 |
| 3.5.2 | リードアウト系                             | 37 |
| 3.5.3 | コントロール系                             | 38 |
| 4     | エンドキャップミュオンシステムのシミュレーションによるコミッショニング | 39 |

|       |                              |    |
|-------|------------------------------|----|
| 4.1   | 宇宙線ミュオンによるコミッショニング           | 39 |
| 4.1.1 | 宇宙線ミュオン                      | 39 |
| 4.2   | LVL1 Cosmic Muon Trigger の構築 | 42 |
| 4.2.1 | コインシデンス                      | 42 |
| 4.2.2 | トリガーのタイミング                   | 43 |
| 4.2.3 | トロイド磁場                       | 43 |
| 4.3   | シミュレーション                     | 44 |
| 4.3.1 | 目的                           | 44 |
| 4.3.2 | シミュレーションの流れ                  | 44 |
| 4.4   | 解析                           | 49 |
| 4.4.1 | 宇宙線ミュオン                      | 49 |
| 4.4.2 | トリガーレートとトリガー効率               | 53 |
| 4.4.3 | ヒットレート                       | 55 |
| 5     | まとめ                          | 62 |

## 図目次

|      |                                |    |
|------|--------------------------------|----|
| 2.1  | LHC                            | 6  |
| 2.2  | CMS                            | 7  |
| 2.3  | Alice                          | 7  |
| 2.4  | LHC-B                          | 7  |
| 2.5  | Higgs 生成のファインマン・ダイアグラム         | 8  |
| 2.6  | Higgs 生成断面積の質量依存               | 8  |
| 2.7  | Higgs 崩壊分岐比の質量依存               | 9  |
| 2.8  | ATLAS の Higgs 発見能力             | 11 |
| 2.9  | ATLAS 測定器                      | 12 |
| 2.10 | ATLAS 測定器の座標系                  | 12 |
| 2.11 | 内部飛跡検出器                        | 13 |
| 2.12 | カロリメータ                         | 14 |
| 2.13 | トロイド磁石の配置                      | 15 |
| 2.14 | トロイド磁石の磁場 (X-Y 平面)             | 15 |
| 2.15 | ミュオン検出器                        | 16 |
| 2.16 | Cathode Strip Chamber          | 17 |
| 2.17 | Resistive Plate Chamber        | 17 |
| 2.18 | ビームハロー・ビームガスのトラック              | 20 |
| 3.1  | TGC の配置と構造                     | 21 |
| 3.2  | TGC の構造 (断面図)                  | 22 |
| 3.3  | TGC の構造 (平面図)                  | 22 |
| 3.4  | 左 : Triplet 右 : Doublet        | 23 |
| 3.5  | TGC の配置 Z-R 平面                 | 25 |
| 3.6  | トリガーセクターの構成                    | 25 |
| 3.7  | MDT の構造                        | 26 |
| 3.8  | MDT small chamber layout       | 28 |
| 3.9  | MDT large chamber layout       | 28 |
| 3.10 | EM-station におけるチェンバーの配置 X-Y 平面 | 29 |
| 3.11 | EOL chamber の ID の割り振り         | 30 |
| 3.12 | EI-station                     | 31 |
| 3.13 | トリガーシステムの構成                    | 32 |
| 3.14 | コインシデンス ウィンドウによる Pt 判定         | 34 |
| 3.15 | TGC エレクトロニクス                   | 36 |
| 3.16 | TGC エレクトロニクスのデータの流れ            | 37 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.1  | 7GeV 以上の宇宙線の垂直方向のフラックスと高度の関係 . . . . .       | 40 |
| 4.2  | LVL1 Cosmic Muon Trigger . . . . .           | 42 |
| 4.3  | シミュレーションのデータの流れ . . . . .                    | 44 |
| 4.4  | ATLAS 検出器が設置されている実験ホールとその周辺の構造 . . . . .     | 45 |
| 4.5  | ATLAS 測定器周辺のパラメータ . . . . .                  | 46 |
| 4.6  | 事象選択フィルターの有感領域 . . . . .                     | 47 |
| 4.7  | 地上領域の定義 . . . . .                            | 49 |
| 4.8  | ジェネレーターによって生成された宇宙線ミュオン事象の分布 . . . . .       | 50 |
| 4.9  | 事象選択フィルターにかかった宇宙線ミュオン事象の分布 . . . . .         | 50 |
| 4.10 | 地表からみた事象選択フィルター有感領域の立体角 . . . . .            | 51 |
| 4.11 | トリガー条件をみたした宇宙線ミュオン事象の分布 . . . . .            | 52 |
| 4.12 | M3-station のヒット数分布 . . . . .                 | 54 |
| 4.13 | M1-station のヒット数分布 . . . . .                 | 56 |
| 4.14 | M2-station のヒット数分布 . . . . .                 | 56 |
| 4.15 | EM-station のチューブ単位のヒットレート分布 . . . . .        | 57 |
| 4.16 | EML chamber の ID 毎のチューブ単位のヒットレート分布 . . . . . | 58 |
| 4.17 | EO-station のチューブ単位のヒットレート分布 . . . . .        | 59 |
| 4.18 | EI-station のチューブ単位のヒットレート分布 . . . . .        | 60 |

## 表目次

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | LHC 加速器主要パラメータ . . . . .                               | 7  |
| 2 | TGC の各 station の領域、及び事象選別フィルターの有感領域 (Z-R 座標) . . . . . | 48 |
| 3 | 宇宙線ミュオン事象の統計量と頻度 . . . . .                             | 53 |
| 4 | MDT、TGC の各 station にヒットがある割合 . . . . .                 | 55 |
| 5 | MDT の各種チェンバーにおけるチューブヒットレート一覧 . . . . .                 | 61 |

# 1 序論

新たなエネルギー領域の物理を解明するため、スイスのジュネーブ郊外の CERN 研究所で LHC(Large Hadron Collider) が現在建造中で、2007 年末に完成する予定となっている。LHC とは地下 100m に設置された全周 27km の陽子陽子衝突型加速器のことで、二つの陽子ビームをそれぞれ 7TeV という世界最高エネルギーまで加速させ、正面衝突させる実験を行う。この衝突地点に 4 つの測定器 ATLAS, CMS, ALICE, LHC-B を設置し、陽子陽子衝突反応による素粒子の相互作用を探る。

標準理論は物質の構成要素であるクォーク・レプトンとその 3 つの基本的な力である強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用を記述する素粒子物理の基礎をなす理論である。この理論により予言されているにもかかわらず未だに発見されていない粒子が 1 つ存在している。この粒子は Higgs 粒子と呼ばれ、この粒子が作り出す Higgs 場によって素粒子は質量を獲得するとされている。この Higgs 粒子や、標準理論の枠を超えた SUSY 粒子の探索を行うことが ATLAS 測定器の大きな目的のひとつとなっている。

ATLAS 測定器は、それぞれの目的をもった様々な粒子検出器、マグネットシステムの集合体であり、現在建設が着々と進んでいる。ATLAS 実験において各検出器のインストールから実験開始を経て定常的に陽子陽子衝突反応のデータ収集に移るまでの過程のことをコミッショニング (性能検証) といい、ATLAS 測定器を正常に動作させるためには必要不可欠な作業である。コミッショニングは最初は個々の検出器において性能評価を行い、最終的には物理事象を用いて検出器全体を統合して性能評価していく。現在は宇宙線ミュオンを用いたコミッショニングの時期にあり、個々の検出器の性能評価及び検出器を統合した動作確認を行っていくことが目的となっている。

今回シミュレーションにより、ATLAS エンドキャップミュオンシステムにおいて宇宙線ミュオンを用いたコミッショニングに関する研究を行った。シミュレーションは宇宙線ミュオンの情報 (エネルギー、入射角度、ヒット位置、ヒットレートなど) を知り、理想的な状況で検出器の反応を見ることで、実観測での結果の予測ができる。これによりコミッショニングをスムーズに行うための重要な役割を果たす。

宇宙線ミュオンはビーム衝突によって発生する粒子とは、検出器を通過するタイミング、入射方向など様々な面で異なるため、ビーム衝突のために設定された環境では検出器を統合した動作確認を行うことができない。よって、宇宙線ミュオン用の環境設定を行うことでデータを出力し、解析を行った。

2 章では LHC 計画 及び ATLAS 実験について、Higgs の物理から ATLAS 測定器を構成する検出器、さらには ATLAS 実験におけるコミッショニングについて述べ、3 章で ATLAS 検出器の中で今回焦点を当てて考えていくエンドキャップミュオンシステムを構成する検出器の構造・配置からトリガーシステム、エレクトロニクスについてまとめる。そして 4 章で宇宙線ミュオンについての情報、宇宙線ミュオンに対応したトリガーの環境設定、そして実際にシミュレーションを行い解析した結果を述べ、6 章でまとめとする。

## 2 ATLAS 実験

### 2.1 LHC

大型陽子陽子衝突型加速器 LHC(Large Hadron Collider) が新しいエネルギー領域の物理の解明を目指すべく、電子陽電子衝突加速器 LEP(Large Electron Positron Collider) で使用されたトンネル内に建設中で、2007 年末の完成を目指している。陽子は電子に比べると質量が大きく、シンクロトロン放射によるエネルギー損失が少ないという利点をもつため、LEP よりも高エネルギーの衝突が実現可能で、重心系で 14TeV という世界最高エネルギーを作り出すことができる。

27km のリングには 7TeV にまで加速されていく陽子の軌道を曲げるために、1232 個の超伝導磁石が設置される。最高ルミノシティは  $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  にまで達し、40MHz という高頻度で衝突を繰り返す。なお 1 回のバンチ衝突当たり約 20 個の陽子衝突が起こると予想されている。LHC の各パラメータは表 1 参照。

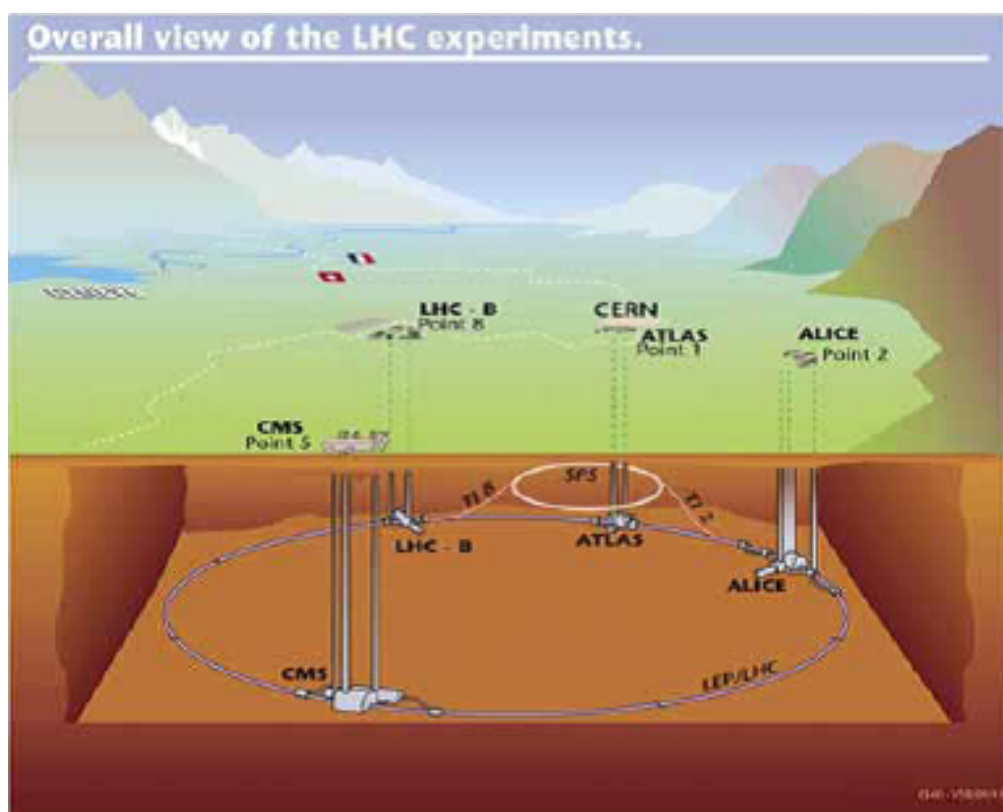


図 2.1 LHC



|                     |  |            |                        |
|---------------------|--|------------|------------------------|
| 主リング周長              | 26,658.87m                             | バンチ間隔      | 24.95nsec              |
| 入射エネルギー             | 450GeV                                 | バンチ内陽子数    | $1.1 \times 10^{11}$ 個 |
| 陽子エネルギー             | 7.0TeV                                 | バンチ長さ (陽子) | 77mm                   |
| High Luminosity(7年) | $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ | 衝突点でのビーム半径 | 15.9 $\mu\text{m}$     |
| Low Luminosity(3年)  | $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ | ビーム衝突角度    | 300 $\mu\text{rad}$    |
| Luminosity Lifetime | 10 時間                                  |            |                        |

表 1 LHC 加速器主要パラメータ

ビームの衝突地点は 4 カ所あり、それぞれの地点に測定器を設置する。

4 つの測定器は、後述する大型汎用測定器である ATLAS(A Troidal LHC ApparatuS) 測定器、ATLAS 測定器と同じく汎用測定器である CMS(Compact Muon Solenoid) 測定器、B 中間子の研究に特化した LHC-B 測定器、重イオン衝突実験用の ALICE(A Large Ion Collider Experiment) 測定器である。

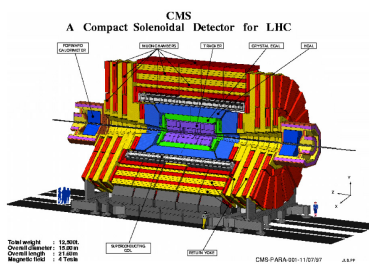


図 2.2 CMS

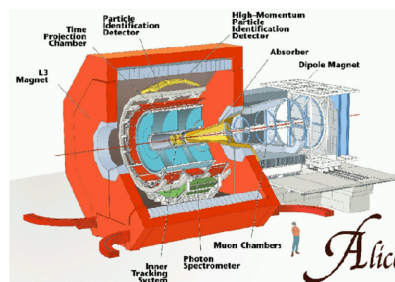


図 2.3 Alice

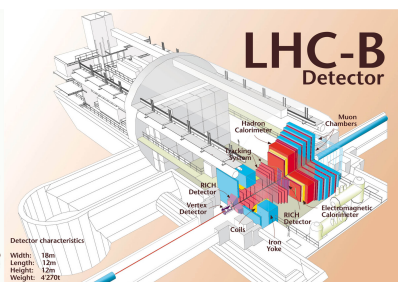


図 2.4 LHC-B

## 2.2 ATLAS 実験で期待される物理

ATLAS 測定器を用いて行われる ATLAS 実験では、Higgs 粒子、SUSY 粒子 (超対称性粒子) を発見することを主な目的としている。

### 2.2.1 標準理論 Higgs 粒子

ATLAS では Higgs 粒子を、その質量  $m_H$  が 100GeV ~ 1TeV の範囲で探索することができる。Higgs 粒子の理論的な質量の上限値は 1TeV なので、理論が正しければ Higgs 粒子は ATLAS 実験で発見されるはずである。仮に Higgs 粒子の質量が 300GeV であったとすると、高ルミノシティー運転時で 1 年間に  $10^6$  個の Higgs 粒子が生成される予定である。

Higgs 粒子の生成過程、崩壊過程を次に示していく。

#### < 生成過程 >

Higgs 粒子は標準理論で 4 つの生成過程が考えられている。この 4 つの過程のファインマン・ダイアグラム (図 2.5) と生成断面積の質量依存 (図 2.6) を示す。

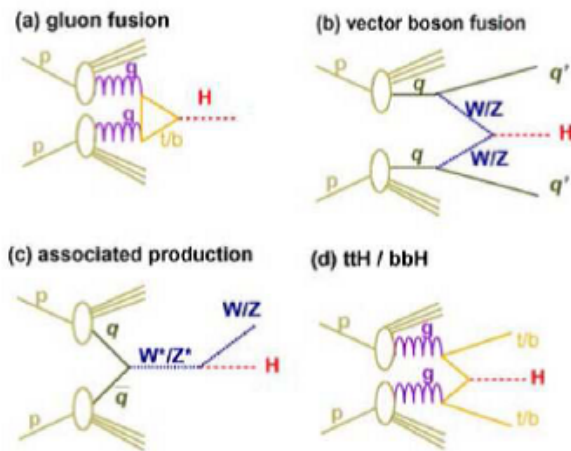


図 2.5 Higgs 生成のファインマン・ダイアグラム

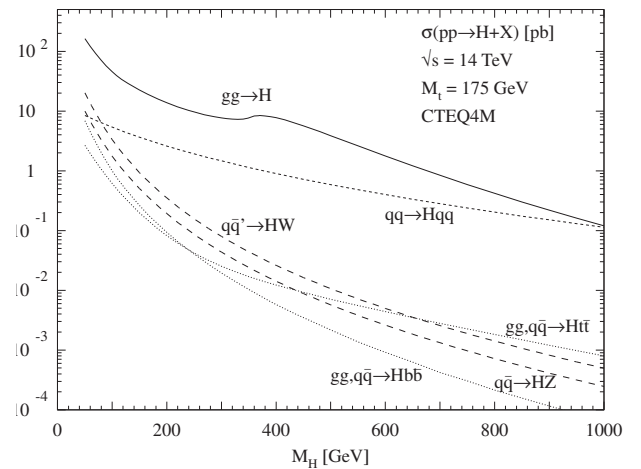


図 2.6 Higgs 生成断面積の質量依存

#### 1. $gg \rightarrow H$ (gluon fusion)

最も生成断面積が大きい過程。しかし、Higgs 粒子の崩壊による粒子以外は大きな横運動量を持つ粒子がなく、バックグラウンドが厳しい過程である。

#### 2. $qq \rightarrow qqH$ (W/Z fusion)

2 つの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。反応断面積も比較的に大きく、散乱角前方のクォークによる 2 つのジェットが観測される特徴を持つ。

3.  $qq \rightarrow (W/Z)H$  (W/Z associate production)

クォークの対消滅で生成されたゲージボゾンから、さらに Higgs 粒子が放射される過程。終状態にゲージボゾン (W/Z) が観測される。

4.  $qq/gg \rightarrow ttH$  (top associate production)

対生成されたトップクォークから、Higgs 粒子が放出される過程。断面積は小さいが、特徴のあるトップクォークペアを終状態に含んでいる。

< 崩壊過程 >

Higgs 粒子の崩壊過程は Higgs 粒子の質量  $m_H$  に依存している。図 2.7 はこの崩壊分岐比の質量依存を示している。以下に Higgs 粒子の質量別に崩壊過程の説明を行っていく。

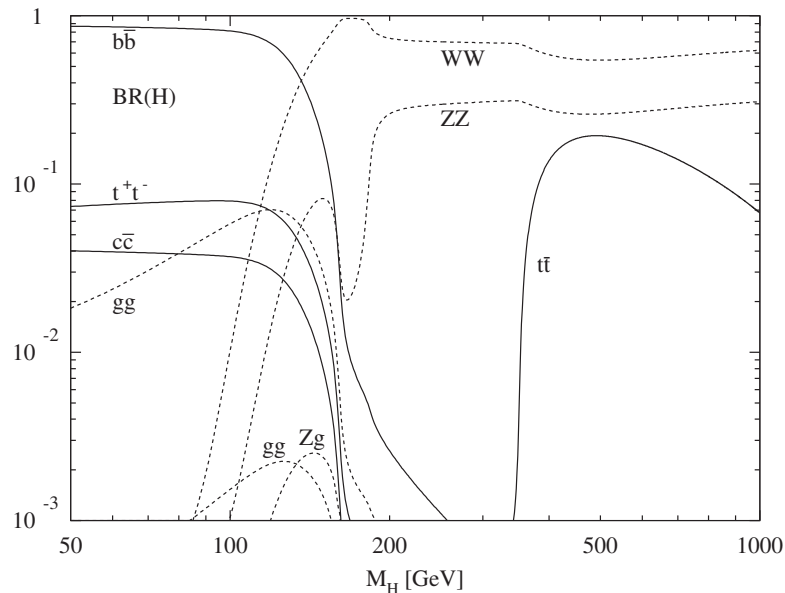


図 2.7 Higgs 崩壊分岐比の質量依存

- $100\text{GeV} < m_H < 120\text{GeV}$

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

この領域での Higgs 粒子の主な崩壊過程は、 $b\bar{b}$ 、 $c\bar{c}$ 、 $\tau^+\tau^-$  であるが、これらについては陽子・陽子衝突による QCD バックグラウンドが大きく測定が難しい。それゆえ、分岐比が  $10^{-3}$  と小さいが、 $\gamma\gamma$  への崩壊過程を観測することになる。この測定にはエネルギー、角度分解能の優れた電磁カロリメータが必要となる。

- $130\text{GeV} < m_H < 2m_Z$

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+l^-l^+l^- \quad (2.2)$$

この質量領域では、 $W^\pm$ 、 $Z$ の質量を超えるため、 $WW^*$ 、 $ZZ^*$ の崩壊モードが始まる。この時のバックグラウンドとして、 $pp \rightarrow ZZ^*/Z\gamma^*$ 、 $Zb\bar{b} \rightarrow 4\text{lepton}$ などがあるが、1組の $l^+l^-$ 対の横運動量 ( $p_T$ ) に対して制限をつけ、さらにもう1組の $l^+l^-$ 対の不変質量に対し制約を付ける事により、これらのバックグラウンドを除去することが出来る。

- $2m_Z < m_H < 700\text{GeV}$

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

この崩壊モードは“Gold Plated Channel”と呼ばれ、分岐比も大きく Z-mass constraint(2組の *lepton* 対の不変質量  $m_{l\bar{l}} \sim m_Z$ ) による事象の取捨選択が有効であるため、最も信頼性の高いモードであり、比較的きれいな信号が得られる。 $m_H = 200\text{GeV}$ としたとき、高ルミノシティで1年間運転して  $(100\text{fb}^{-1})100\text{events}$  程度が期待されている。

- $700\text{GeV} < m_H < 1\text{TeV}$

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

この領域では  $4\text{lepton}$  モードに比べ、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^- \nu\nu$  が約 20 倍、 $H \rightarrow WW \rightarrow lvjj$  が約 150 倍という高い分岐比を持つ。バックグラウンドと区別するために Higgs 粒子が W/Z associate production によって生成された場合を考え、散乱角前方のクォークによる2つのジェットを観測することでこのバックグラウンドを除去する。

< ATLAS の Higgs 粒子発見能力 >

LHC を高ルミノシティ - で約 1 年運転したとき、ATLAS 測定器において Higgs 粒子が発見される能力を図 2.8 に示す。このグラフの縦軸は Higgs 粒子を発見する能力を現し、予想される Higgs 粒子の事象の数をバックグラウンドの事象の数の平方根で割ったものである。縦軸の値が高い程、Higgs 粒子の事象があったときに、それがバックグラウンドでは説明できないことを示し、 $100\text{fb}^{-1}$  あれば ATLAS 実験において Higgs 粒子を  $10\sigma$  以上の確かさで発見できる事を示している。また、ATLAS 測定器は Higgs 粒子の質量の上限値である  $1\text{TeV}$  まで探索出来ることを示しており、非常に優れた測定器である事がわかる。

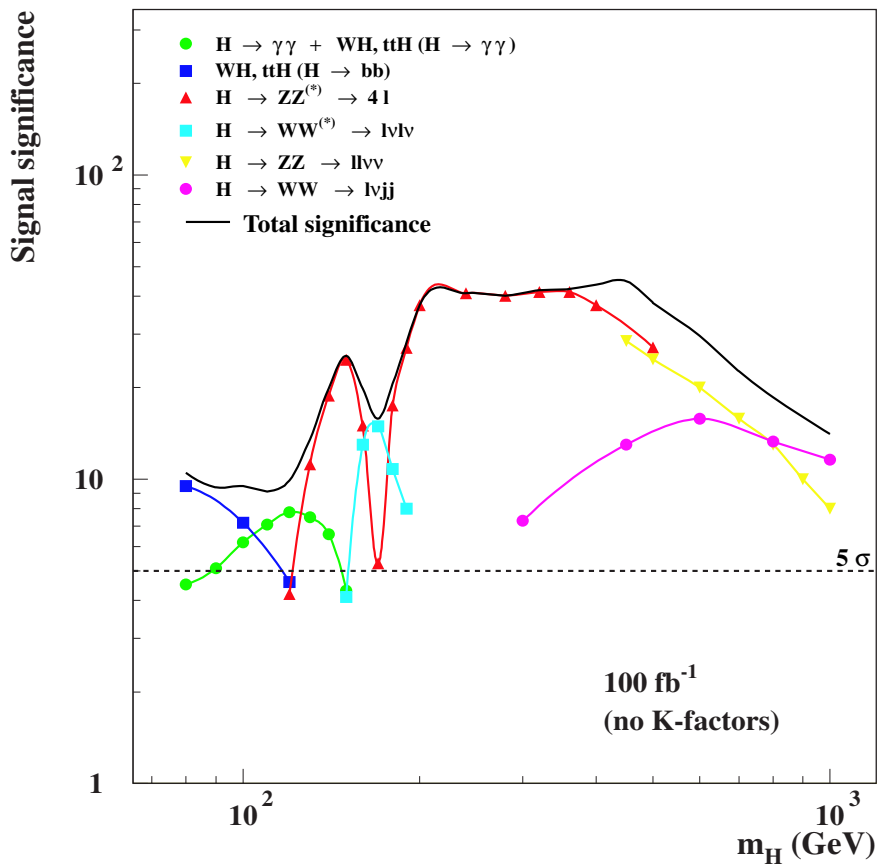


図 2.8 ATLAS の Higgs 発見能力

## 2.3 ATLAS 測定器

前節で述べた物理事象を解明していくために、ATLAS 測定器 (図 2.9) は個々の目的をもった検出器から構成される。ATLAS 測定器は全体で直径 22m、長さ 44m、総重量 7,000t という規模を持ち、今までにない巨大な汎用測定器となっている。

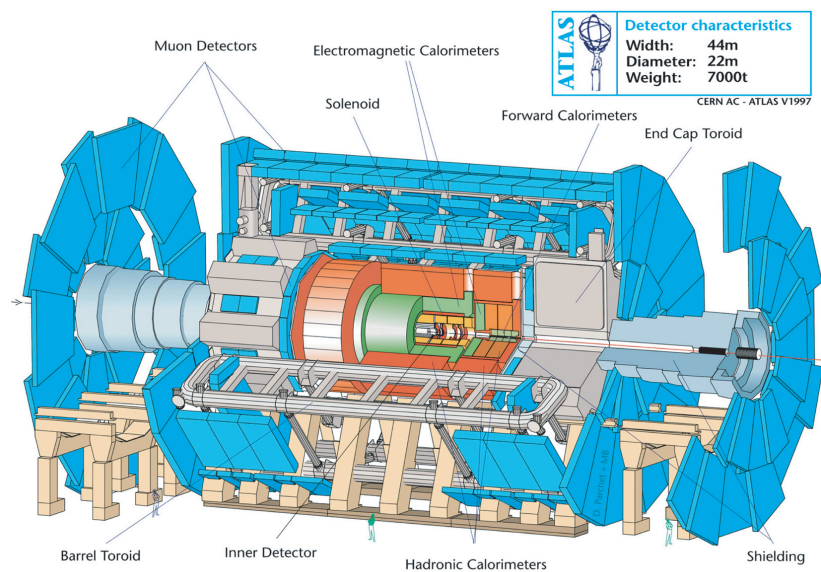


図 2.9 ATLAS 測定器

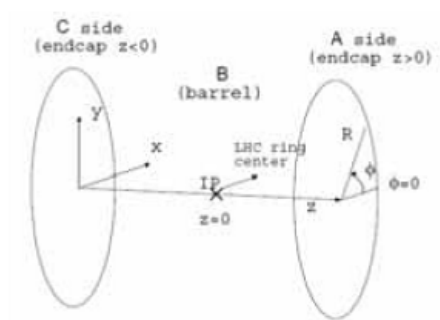


図 2.10 ATLAS 測定器の座標系

ATLAS 測定器で採用している座標系 (図 2.10) は、ビーム軸を Z 軸とし、これに垂直な方向を R 方向、ビーム軸周りを反時計周りに周回する方向に 方向をとる円筒座標系である。他にもビーム軸を同じく Z 軸とし、Z 軸に垂直かつ地表と水平な方向に X 軸、この Z-X 平面に垂直な向きに Y 軸を取ったデカルト座標系で考えられることもある。ここで、ビームの衝突点は  $(X, Y, Z) = (0, 0, 0)$  で表される。

また、衝突点から引いた線とビーム軸とのなす角  $\eta$  によって、擬ラピディティ (pseudorapidity) が  $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$  と定義されている。陽子陽子散乱においてある位置に飛んでくる粒子数を  $N$  とすると粒子密度  $dN/d\eta$  は一定となる。

- ・ ATLAS 測定器を構成する各検出器および、トロイド磁石について説明する。

### 2.3.1 内部飛跡検出器

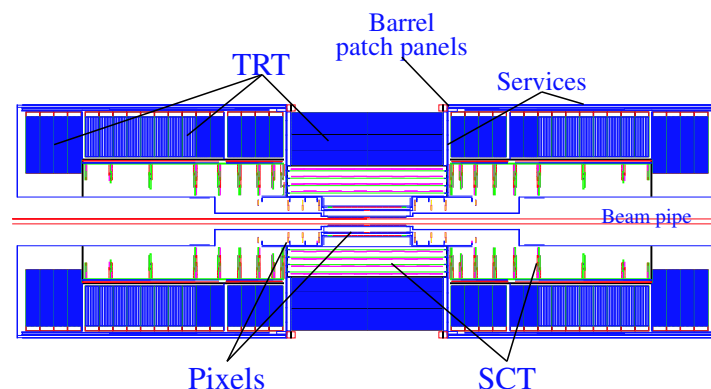


図 2.11 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器はビーム衝突点に最も近い検出器で、2T の磁場を作る超伝導ソレノイドの内部に位置している。内部飛跡検出器はさらに内側から順に、ピクセル検出器 (Pixel)、シリコン・トラッカー (SCT)、遷移輻射トラッカー (TRT) の 3 つで構成されている。これらの検出器により、ビーム衝突直後の粒子の飛跡の測定、寿命が短い粒子の崩壊点の検出などが行われる。

### 2.3.2 カロリメータ

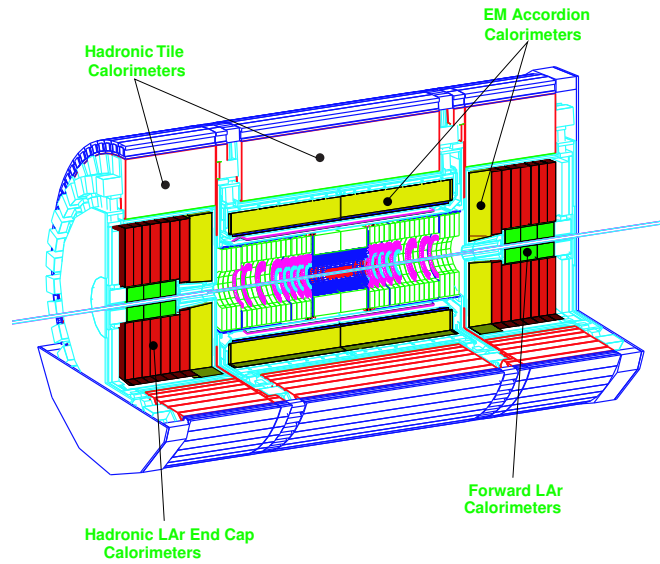


図 2.12 カロリメータ

電磁カロリメータとハドロンカロリメータが超伝導マグネットの外側に設置される。電磁カロリメータは鉛の吸収体と液体アルゴンからなり、ATLAS のバレル、エンドキャップ領域をカバーし、電子と光子の同定に用いられる。ハドロンカロリメータはバレル部が鉄の吸収体とシンチレータ、エンドキャップ部は銅の吸収体と液体アルゴン、フォワード部は銅とタングステンの吸収体と液体アルゴンからなり、ハドロンの同定、エネルギー測定、ジェットの再構成などを行う。



### 2.3.3 マグネット

ATLASでは中央のソレノイド磁石、バレル・エンドキャップ部のトロイド磁石という超伝導磁石によってマグネットシステムは構成されている(図 2.13)。トロイド磁石はビーム軸を対象に8つのコイルが設置されている。積分磁場強度はバレル部で2~6Tm、エンドキャップ部で4~8Tmであり、方向の磁場を作り出すように設計されているが、実際はR方向の漏れ磁場も存在する(図 2.14)。この磁場によってミュオンの飛跡を曲げ、その曲がり具合によってミュオンの運動量を測定する際に役立つ。

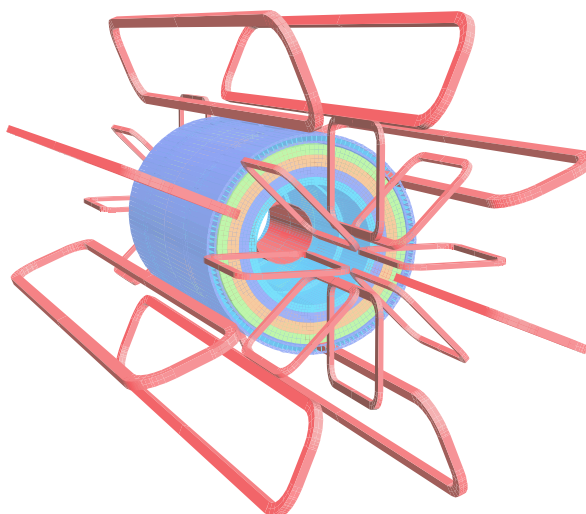


図 2.13 トロイド磁石の配置

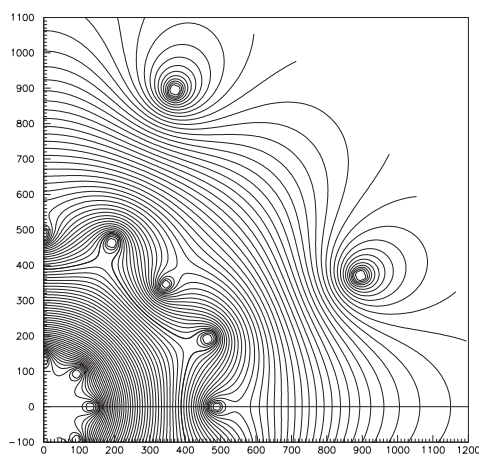


図 2.14 トロイド磁石の磁場 (X-Y 平面)

### 2.3.4 ミューオンシステム

ミューオンは質量が電子の約 200 倍と大きいため、制動輻射を起こしにくく、また強い相互作用を起こさないため物質の透過力が高い。このためミューオンシステムは ATLAS 測定器の最外部に設置される。その構成は運動量精密測定用の MDT(Monitored Drift Tube)、CSC(Cathode Strip Chamber) とトリガー用の RPC(Resistive Plate Chamber)、TGC(Thin Gap Chamber) の 4 種のチェンバーからなっている (図 2.15)。

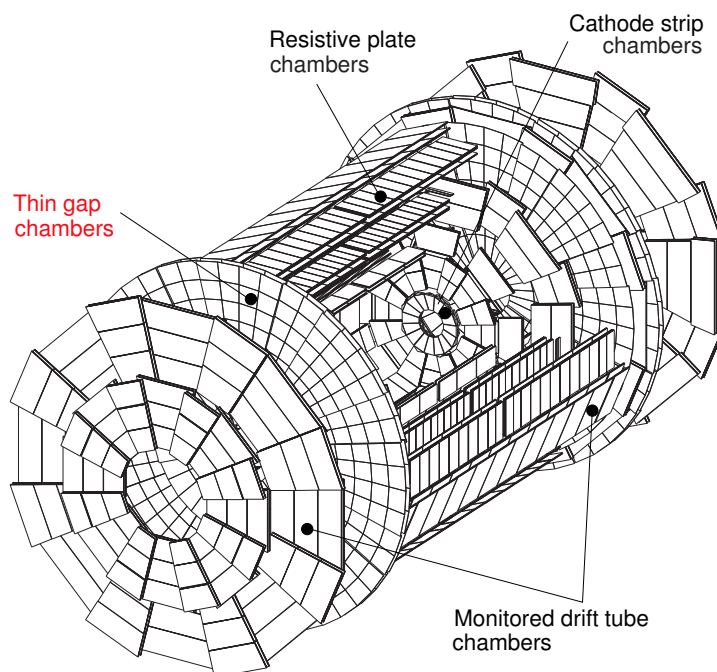


図 2.15 ミューオン検出器

ミューオンシステムを構成する検出器について簡単に説明を行う。

#### MDT (Monitored Drift Tube)

MDT はバレル部、エンドキャップ部をカバーし、Z-R 方向の位置の精密測定を行うことができる。ドリフトチューブの集合体であり、ドリフト時間とシグナルの大きさから位置を求める。詳しくは 3 章の MDT の構造・配置の欄で述べる。

### CSC (Cathode Strip Chamber)

カソード読み出しの MWPC(Multi-Wire Proportional Chamber) で、フォワード部の内側に設置される。

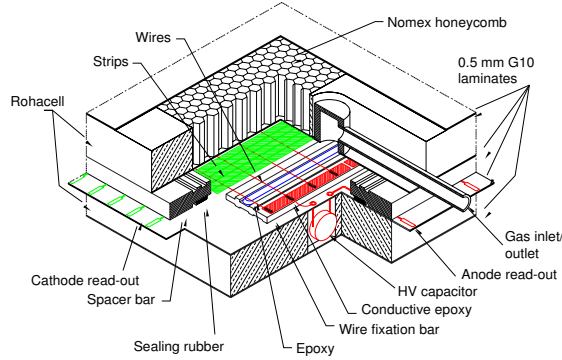


図 2.16 Cathode Strip Chamber

### RPC (Resistive Plate Chamber)

ストリップを用いた検出器を 2 層に重ねた構造で、バレル部に設置され、Z-R 方向、R- 方向の運動量を測定しトリガー判定を行う。

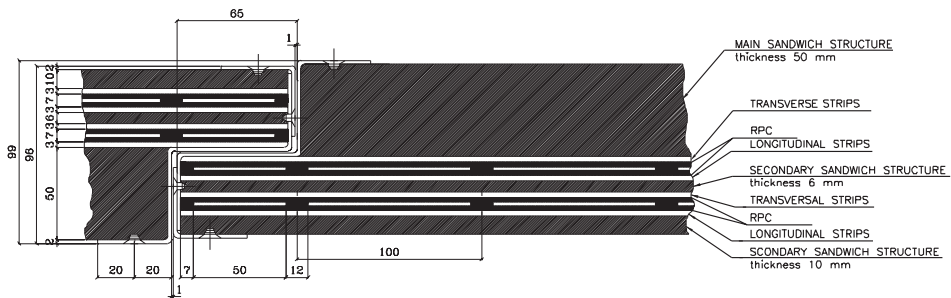


図 2.17 Resistive Plate Chamber

### TGC (Thin Gap Chamber)

エンドキャップ部に設置される MWPC で、アノードワイヤーとカソードストリップからの信号読み出しにより二次元の位置測定が可能である。詳細は 3 章の TGC の構造・配置の欄で述べる。

## 2.4 コミッショニング (性能検証)

2007年夏に ATLAS 測定器のインストールが完了し、同年末に陽子ビームの衝突が開始される予定であるが、この実験開始に向け ATLAS 測定器ではさまざまな性能の評価が行われていく。また、ビーム衝突実験開始後もすぐに 7TeV の陽子ビームを使用するわけではなく、450GeV のビームを使って検出器の較正を行い、2008 年末までに ATLAS 測定器が正常に動作できるようにする予定である。

このように ATLAS 実験において各検出器のインストールから実験開始を経て定期的に陽子陽子衝突反応のデータ収集に移るまでの過程のことをコミッショニング (性能検証) といい、ATLAS 測定器を正常に動作させるためには必要不可欠な作業である。

コミッショニングでは各検出器において、インストールと並行して動作評価やタイミング合わせ、較正が行われていく。これらの作業は最初は検出器ごとに行ない、その後 ATLAS 測定器へのインストールが進むにつれ、全体を統合して動かしていく。

コミッショニングの主な内容は、

1. 各検出器が正常に動くかどうか
2. データ収集ができていくかどうか
3. エレクトロニクス、ソフトウェアの両方でトリガーが正しく動作するかどうか
4. オフライン事象再構成 (キャリブレーション)

などといったことをシミュレーションや実観測を通して検証していくことである。

コミッショニングの過程は様々な段階に別れていて、最初の段階ではエレクトロニクスの性能の評価などを個々の検出器において行う。そして、最終段階では物理的な事象により全ての検出器を統合してコミッショニングを行っていくことになっている。

この物理事象を用いるコミッショニングはさらに次の 4 つの工程に分かれている。

ビーム衝突開始前

1. 宇宙線テスト
2. シングルビーム実験 (ビームハロー・ビームガス事象)

ビーム衝突開始後

3. 衝突実験・初期 (ミニマムバイアス事象)
4. 衝突実験・本番 (標準理論でよく理解されている事象、 $Z \rightarrow ll, W \rightarrow l$  など)

では、このビーム衝突開始前と開始後のコミッショニングについて説明をする。

#### 2.4.1 ビーム衝突開始前

最初の宇宙線テスト、シングルビーム実験の段階ではそれぞれ宇宙線ミュオン、ビームハロー・ビームガス事象を用いて、ビーム衝突を起こす前段階のコミッショニングを行っていく。この宇宙線ミュオンやビームハロー・ビームガス事象は大きなフラックスを持っていて統計量を集めやすく、個々の検出器のパラメータの最適化や、検出器間の大まかな配置の調整などを効果的に行うことができる。また、ビームハローのミュオンは水平方向に検出器全体を通過するので、検出器を統合したタイミングの調整も行うことができる。

##### < 宇宙線テスト >

宇宙線ミュオンを用いたコミッショニングは2005年6月にATLAS測定器が設置される実験ホール内に設置されたタイルカロリメータにより初めて開始された。このとき事象の再構築、並びにデータ解析は本実験で用いられる解析フレームワークの枠組内で行われた。2006年夏にタイルカロリメータと液体アルゴンカロリメータを統合した宇宙線テストが行われ、ミュオンシステムのインストールが進行中の現在、TGC、MDTの各検出器、及びそれらを統合したシステムにおいて宇宙線テストが行われようとしている。

この宇宙線ミュオンを用いたコミッショニングは今回の論文の本題であるので、4章で詳しく述べる。

##### < シングルビーム実験 (ビームハロー・ビームガス事象) >

シングルビーム実験とはビームハロー・ビームガス事象を用いたコミッショニングのことである。ビームハローとは陽子ビームがLHC加速器のビームパイプ内の残留ガスと弾性・非弾性散乱することで発生、またはビーム同士の弾性散乱によって生じる二次粒子のことである。同様にビームガス事象も陽子がビームパイプ内の残留ガスと反応して生じるものであるが、残留ガス密度の高い、ATLAS測定器で囲まれた真空チェンバー内部で生じる粒子のことを言う。

ビームハローはATLAS測定器の両サイドを横切るように通過し、ビームガスは内部飛跡検出器という、陽子ビームの衝突地点付近から発生する特徴をもつ(図2.18)。

ビームハロー・ビームガス事象によるコミッショニングはビームが走る環境が整わないと実行できないので、このコミッショニングは宇宙線ミュオンでのコミッショニングに次ぐ第二の方法と考えられている。

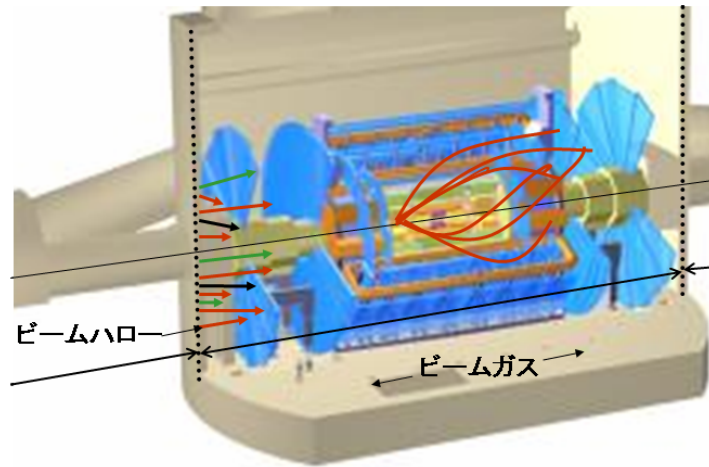


図 2.18 ビームハロー・ビームガスのトラック

#### 2.4.2 ビーム衝突開始後

重心系エネルギー 900GeV のビーム衝突で得られる最初のデータは主に陽子陽子のソフトな衝突から生じる事象であり、ミニマムバイアスの条件下で行われる。これらの事象を用いて検出器やトリガーシステムの性能検証を行う。

重心系エネルギーを 14TeV に上げた後は今までの加速器実験でよく知られている物理プロセス ( $Z \rightarrow ee, \mu\mu$  など) を用いてカロリメータのエネルギー補正やオフライン事象構成のアルゴリズムの検証を行う。

### 3 エンドキャップミュオントリガーシステム

この章ではエンドキャップミュオントリガーシステムの仕組みについて説明する。エンドキャップミュオントリガーシステムを構成する TGC、MDT のそれぞれの検出器についての構造、ATLAS 測定器内における配置、そしてこの検出器を統合して実現されるトリガーシステム、最後に TGC のエレクトロニクスについて触れる。

#### 3.1 TGC

TGC(Thin Gap Chamber) はガスチェンバーである MWPC (Multi Wire Proportional Chamber) の一種で、通常の MWPC に比べアノードワイヤーとカソード面との間の距離が短いための名が付いている。今回の ATLAS 実験ではエンドキャップ部に設置され、ミュオンをトリガーする役割を担っている。

##### 3.1.1 構造

どのような仕組みでミュオンをトリガーするのか、構造を探ることで説明していく。

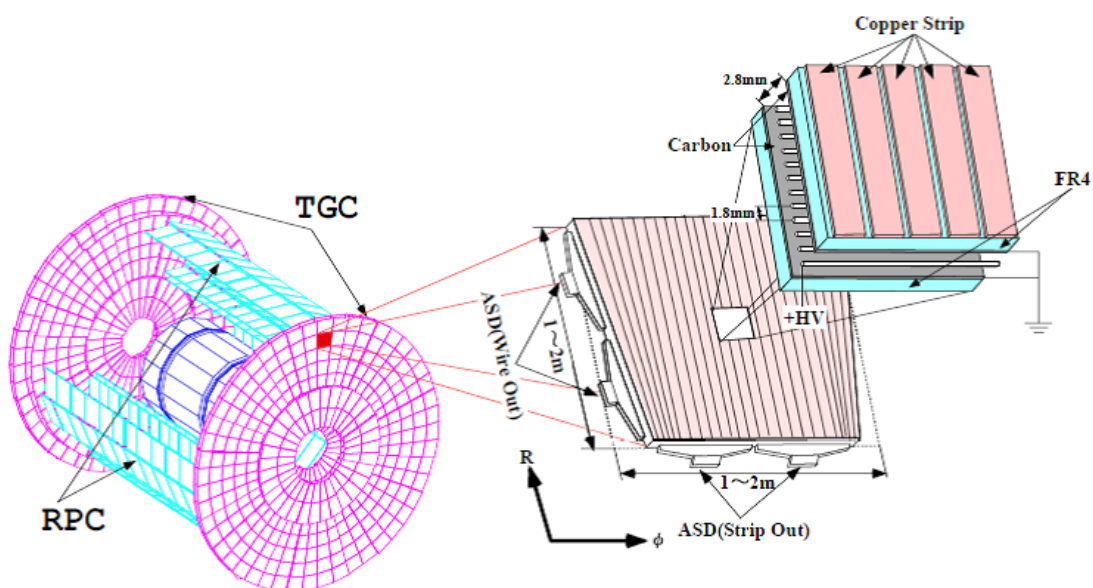


図 3.1 TGC の配置と構造

図 3.1 のように TGC はエンドキャップ部に設置され、ワイヤーが R 方向、ストリップが  $\phi$  方向の情報を出力することで二次元での信号読み出しが可能となっている。このときに、ワイヤーは 4~20 本毎 (幅 10~36mm) にまとめられたワイヤーグループを単位としてチャンネルの読み出しを

行い、ストリップ (幅 15~53mm) はチェンバーを 方向に 32 分割するように配置され、それぞれが一つのチャンネルとして読み出される。チェンバーの大きさは配置される場所によって異なるが、一辺が 1~2m 程度となっている。

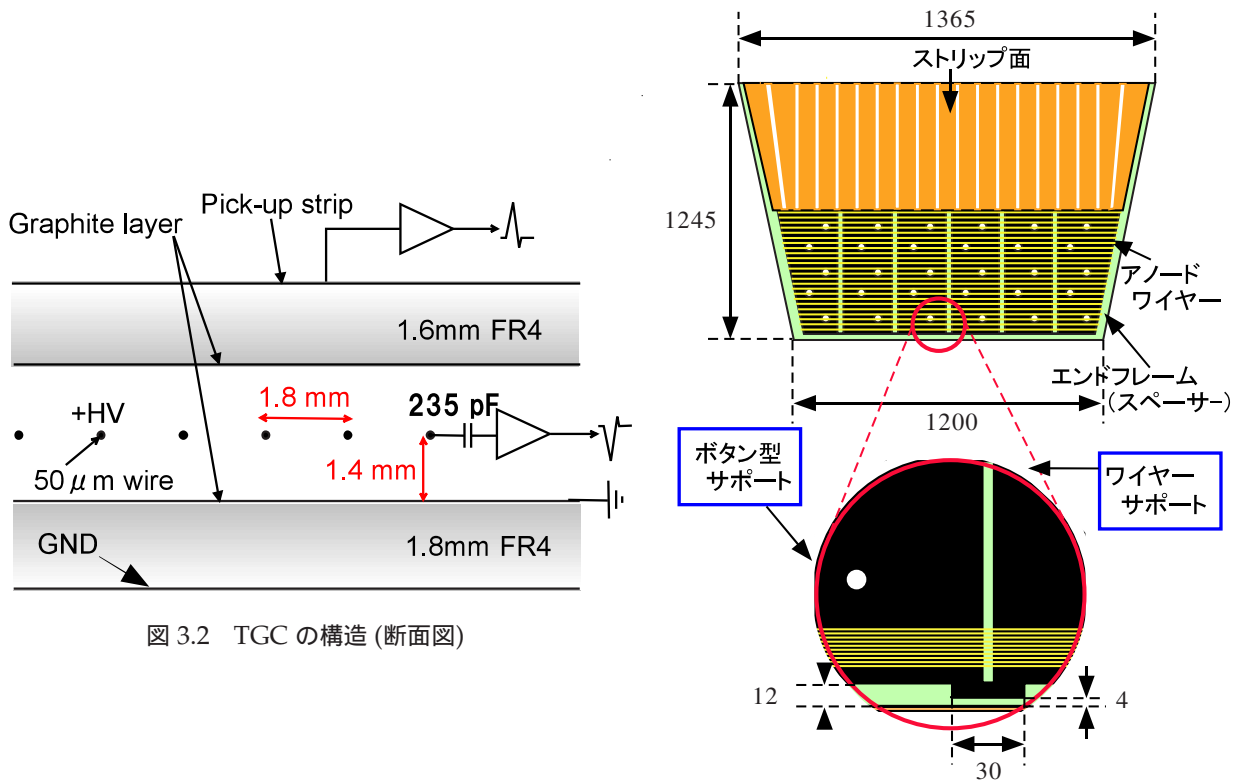


図 3.2 TGC の構造 (断面図)

図 3.3 TGC の構造 (平面図)

TGC の断面図は図 3.2 によって示される構造になっている、カソード面に挟まれた領域に  $\text{CO}_2/n\text{-pentane}(55/45)$  が封入されている。TGC を通過した荷電粒子は  $\text{CO}_2$  を電離して、電子・陽イオン対を作り出す。Wire には通常 2.9kV の高電圧が印加されていて、 $\text{CO}_2$  の電離により発生した一次電子がアノードワイヤーに向かってドリフトしていく。そして、アノードワイヤー付近の高い電場で加速され、周りのガス分子を電離して二次電子を生成し、この電子群がアノードワイヤーに達することで信号が出力される。ここでガス増幅率は  $10^6$  となっている。ワイヤー間が 1.8mm と短いのはこの電子のドリフト時間を短くするためで、これにより LHC の 25nsec のバンチ衝突頻度に対応していく。電子がアノードワイヤーにドリフトしていくのと同時に、陽イオンはカソード面に向かってドリフトしていき、カソード面に塗布された高抵抗のカーボン面に電荷が誘起される。このときストリップにも電荷が誘起され、信号が出力される。アノードワイヤーとカソード面の間隔を 1.4mm と狭くして、陽イオンのドリフト距離を短くし、高レートの粒子の入射時の検出効率の低下を抑える。荷電粒子によって励起状態にある分子が基底状態に戻るときにでる紫外線がカソード面やガスに衝突して発生する二次電子によって自己放電を起こす可能性がある



が、クエンチ効果のある n-pentane を封入し、紫外線を吸収することで放電を抑えている。

ATLAS 実験では、TGC は 1 層 (Singlet) では用いず、チェンバー 1 枚あたりに、2 層 (Doublet) または 3 層 (Triplet) を重ねた構造にしている (図 3.4)。多重構造にすることで、コインシデンスをとり、バックグラウンドによるノイズを抑え、チェンバーの補強部分であるワイヤーサポートの不感領域をなくすようにしている。これにより検出効率は 99 % となっている。Doublet は 2 層のワイヤー面と、2 層のストリップ面から信号の読み出しを行う。Triplet は 2 層目にストリップをなくし、3 層のワイヤー面と 2 層のストリップ面から読み出しを行う。

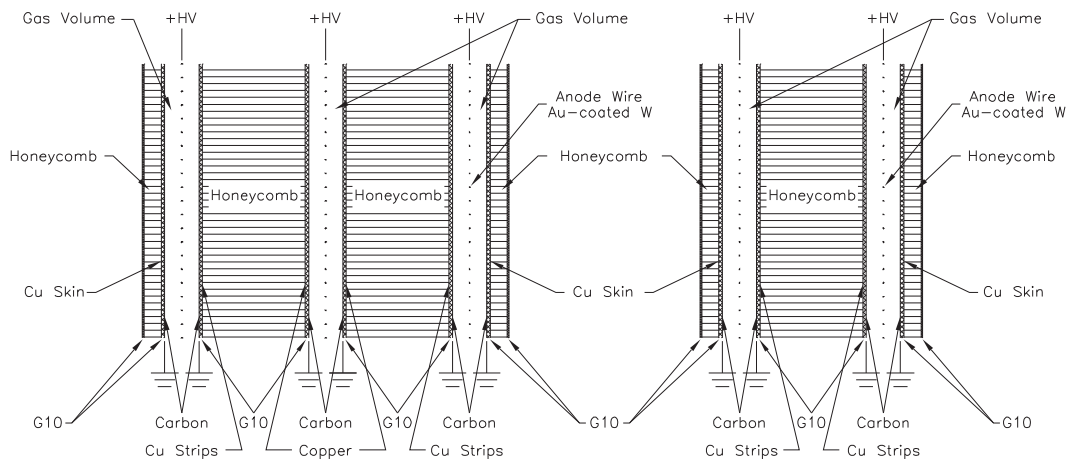


図 3.4 左 : Triplet 右 : Doublet

### 3.1.2 配置

TGC は ATLAS 測定器のエンドキャップ全体 ( $1 < |\eta| < 2.7$ ) をカバーする (図 3.5)。  $1 < |\eta| < 1.9$  の領域をエンドキャップ、  $1.9 < |\eta| < 2.7$  の領域をフォワードという。エンドキャップ部では、MDT のカバーする領域は  $1.0 < |\eta| < 2.0$  となっているので、TGC は MDT の領域を全てカバーできることになる。

TGC の station はビーム軸に対して垂直に設置され、ATLAS 測定器の両側のエンドキャップに、衝突地点側から順に M1,M2(middle),M3(pivot)-station と並んでいる。M1-station には Triplet(T1,T2,T3)、 M2-station(D4,D5)、 M3-station(D6,D7) には Doublet が設置されている。このように 2 次元読み出しが可能な TGC の station を平行に配列することで 3 次元での読み出しを可能にしている。

station は 8 つの Octant から構成され、またそれぞれの Octant は 9 つのトリガーセクターから構成される。トリガーセクターは複数枚の TGC を 1 枚のセクターとして扱ったもので、トリガーシステムではトリガーセクター単位で処理が行われる。

トリガーセクターはさらに、エンドキャップ部で  $\phi$  方向に 37 分割、  $\eta$  方向に 4 分割の合計 148 の領域に分割され、フォワード部では  $\phi$  方向に 17 分割、  $\eta$  方向に 4 分割の合計 64 の領域に分割される。この分割されたそれぞれの領域をサブセクターと呼び、8 ワイヤグループと 8 ストリップに対応している。このサブセクターはトリガー処理の最小単位で、RoI(Region of Interest) とも呼ばれる。

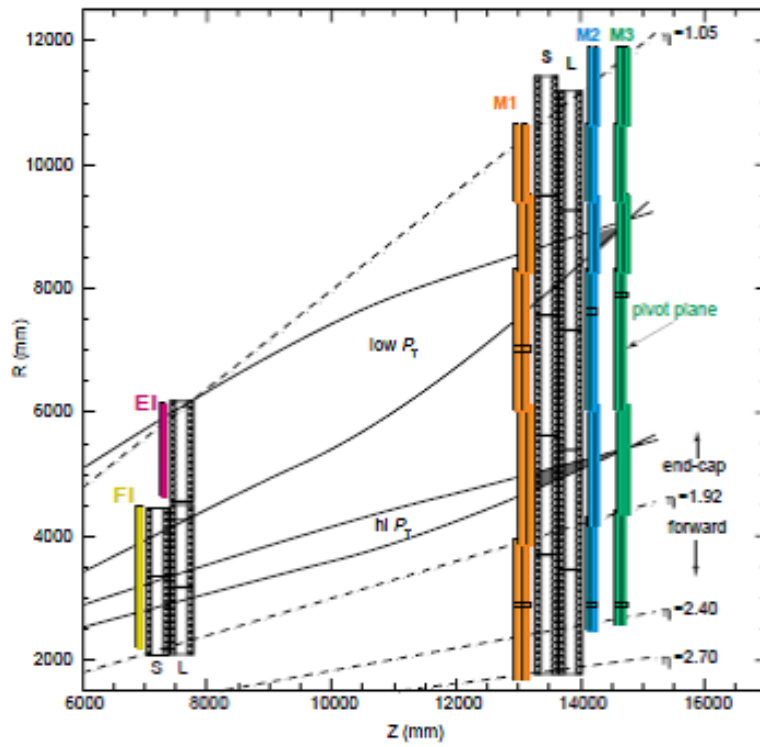


図 3.5 TGC の配置 Z-R 平面

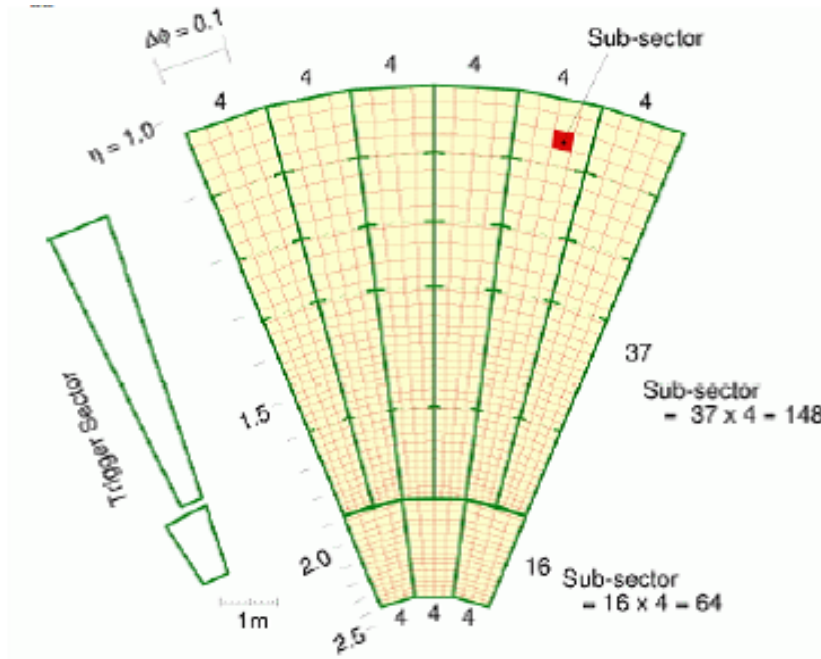


図 3.6 トリガーセクターの構成

## 3.2 MDT

MDT は TGC からのトリガー情報を受けて、ミュオンの位置情報、運動量をより高い精度で割り出す運動量精密測定用のチェンバーである。MDT はバレル部、エンドキャップ部の両方をカバーするが、今回は TGC と関連してくるエンドキャップ部に焦点を当てて説明する。

### 3.2.1 構造

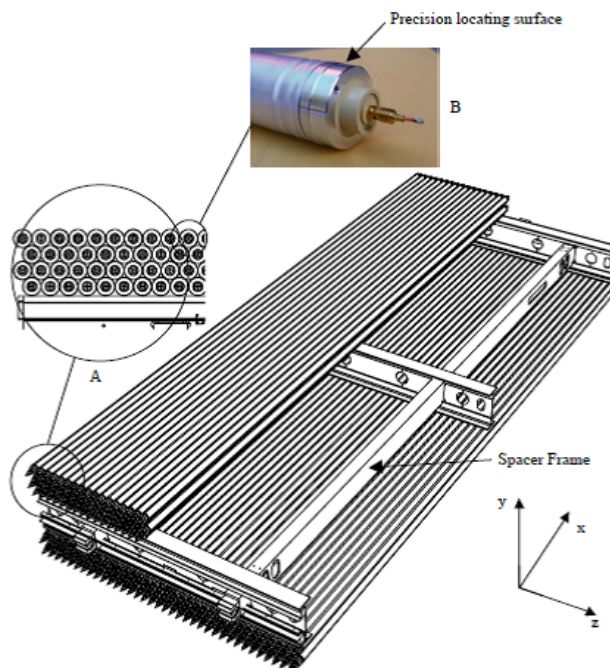


図 3.7 MDT の構造

MDT(Monitored Drift Tube) は名前の通り、ドリフトチューブの一種であり、30 mmの直径をもったアルミニウムチューブの集合体である。チューブの筒の厚さは  $400 \mu\text{m}$ 、チューブの中央に張られている W-Re ワイヤは  $50 \mu\text{m}$  の直径を持つ。ガスは Ar/CO<sub>2</sub> (93/7) で 3bar の圧力がかけられる。ミュオンがチューブを通過する際に生じた一次電子の数を増やし、拡散を抑えることで位置分解能を良くするために低いガス増幅率 ( $2 \times 10^4$ ) が求められる。これを実現するためワイヤーには 3,080V の電圧が印加される。ワイヤー 1 本に対する位置分解能はバックグラウンドがない状態で  $50 \mu\text{m}$ 、最もバックグラウンドがある状況でも  $80 \mu\text{m}$  となる。

MDTの1枚のチェンバーは分解能を上げるために、3~4層を依積みにしたマルチレイヤー2つから構成されていて、この2つのマルチレイヤーの間にはスペーサーやサポート構造が存在している。スペーサー構造はエンドキャップのMDT用に、高さが121mmと170mmの二種類が用意されていて、MDTの配置される場所やチェンバーのサイズによって使い分けされる。

MDTの全横幅はMDTを構成するチューブの長さ、エレクトロニクスを収めるケースの大きさに依存している。長さはチューブの本数( $n \times 30\text{mm}$ 、 $n$ はチューブの本数)による。高さはスペーサー、マルチレイヤー、防護層(MDTの両サイドの外側に設置される)のそれぞれの高さの足し合わせになる。

MDTの高い位置分解能を実現するためには正確な設計、配置が求められる。ドリフトチューブの位置、チェンバー間の配置をモニターシステムによって校正することでこの高い位置分解能が実現される。これがMDT(Monitored Drift Tube)という名前の由来になっている。

### 3.2.2 配置

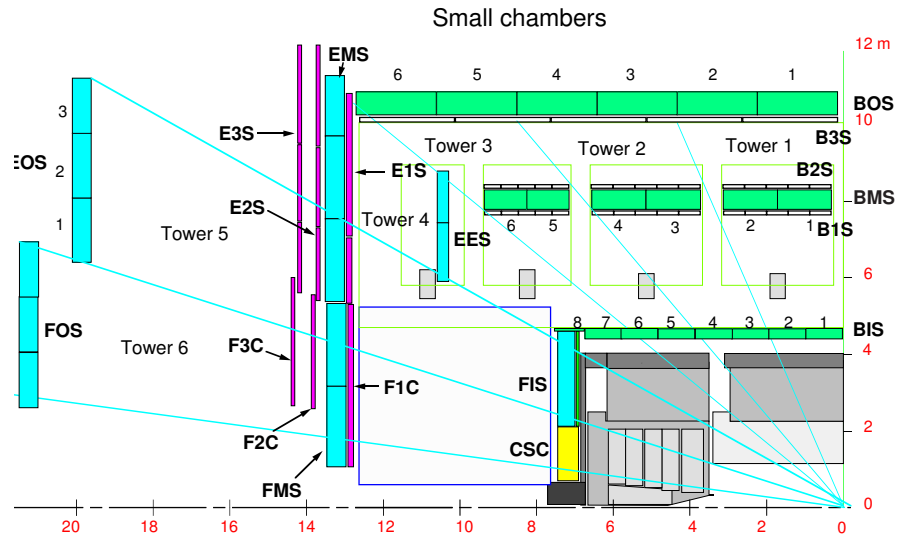


图 3.8 MDT small chamber layout

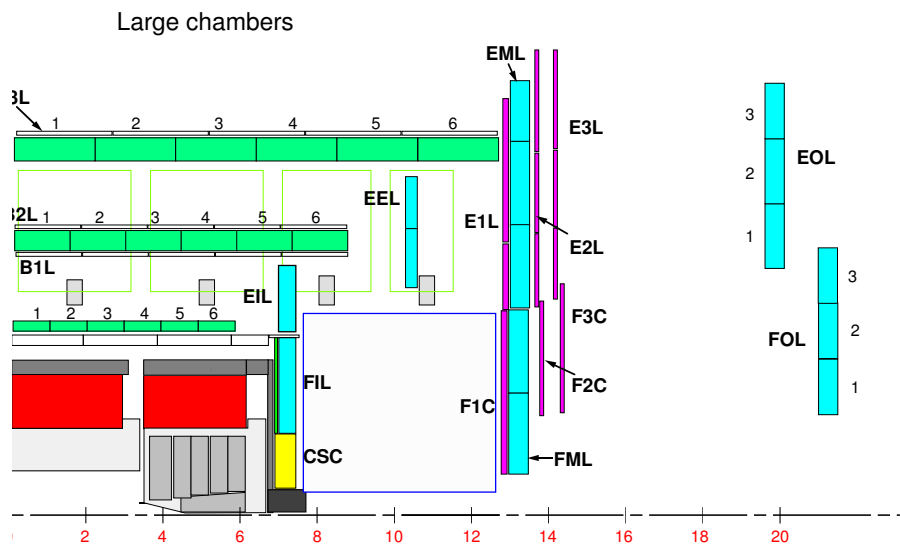


图 3.9 MDT large chamber layout

エンドキャップ部の MDT は  $1.0 < | \eta | < 2.0$  の範囲をカバーする。TGC と同じく station はビーム軸に垂直に配置され、ATLAS 測定器の衝突地点側から順に EI, EM, EO の 3 種類があり、衝突地点から発生した粒子がエンドキャップのどの方向に飛んで行っても 3-station を通過するように配置されている。それぞれの station の名前のつけ方は、最初にくるアルファベットが E ならエンドキャップ、B ならバレル部を指し、二文字目のアルファベットはビーム衝突地点からの距離を示し、I がインナー、M がミドル、O がアウターを意味している。

1 つの station は 16 のセクターから構成されている。このセクターには幅の広い (チューブ長の長い) Large チェンバーから構成されるものと、Large に比べて幅の狭い (チューブ長の短い) Small チェンバーから構成されるものがあり、この Large チェンバーと Small チェンバーからなるそれぞれのセクターが交互に並ぶことで 1 つの station を構成している (図 3.10 : 図は EM-station を例にしている)。

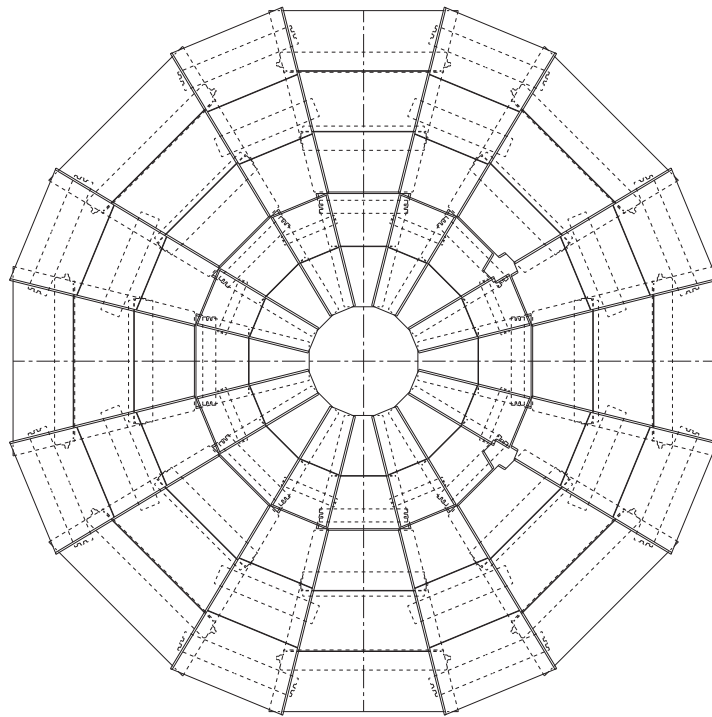


図 3.10 EM-station におけるチェンバーの配置 X-Y 平面

さらに EO-station の Large チェンバー、つまり EOL chamber を例にとって、チェンバー ID、セクター ID の割り振りを説明する。同一セクター内ではチェンバー ID は設置される場所の  $|R|$  が大きくなるにつれ、EOL1 ~ EOL6 まで ID が振られていることが図 3.11 を見るとわかる。またセクターは時計周りに ID が大きくなることもこの図から見て取れる。これによりチェンバーは、station の名前、セクター ID、チェンバー ID の 3 つを指定してやればある 1 つを特定することができる。

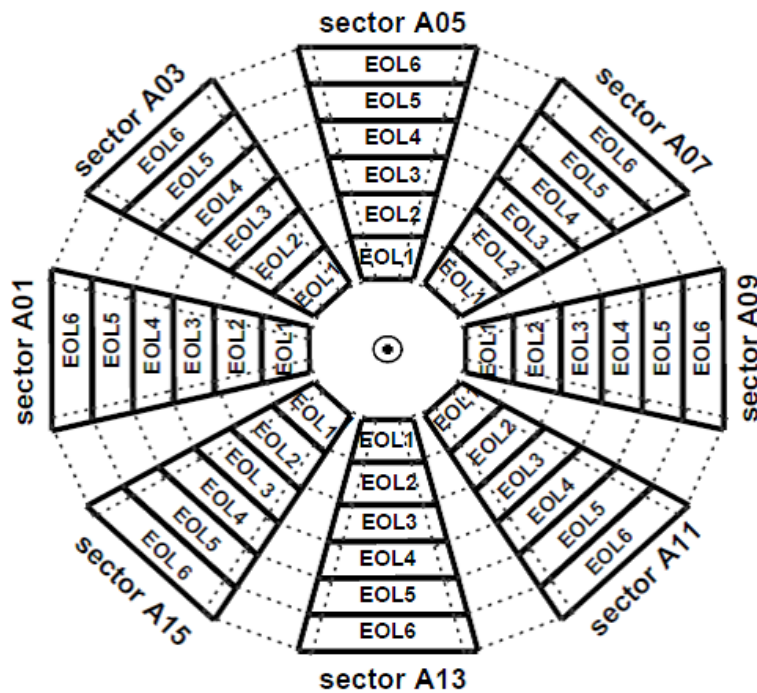


図 3.11 EOL chamber の ID の割り振り

また図 3.10 と図 3.11 を見比べると、1 つのセクターを構成するチェンバーの枚数が EM-station では 5 枚、EO-station では 6 枚になっていることがわかる。このように、station によって、その station を構成するチェンバーの枚数は変化する。



ビーム衝突地点に最も近い位置に配置される EI-station はカロリメータのサポート構造やケーブル等の配線の都合上、図 3.12 で示される特異な形状になる。

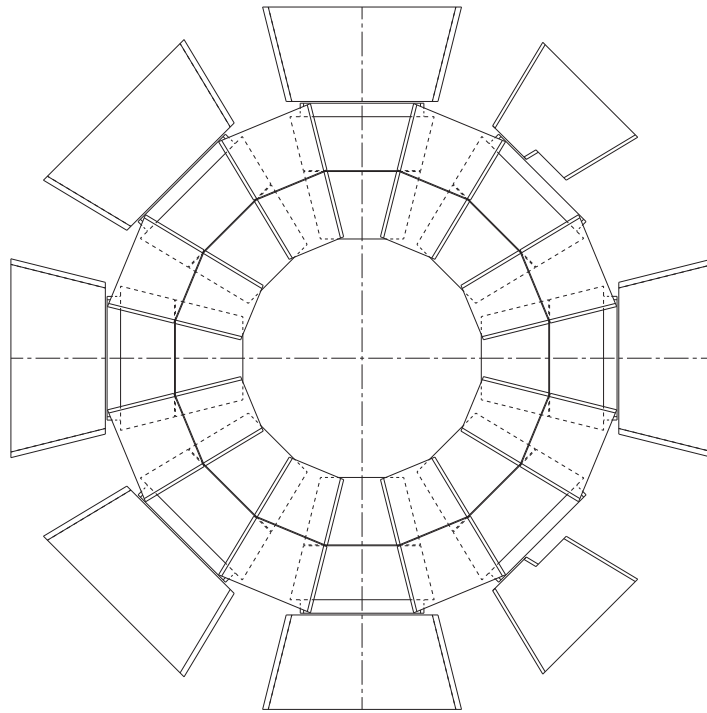


図 3.12 EI-station

ATLAS 測定器内ではエンドキャップの MDT のチューブはビーム軸回りに平行になるように配置されている。チューブの長さは 754.1mm ~ 6245.4mm のバリエーションがあり、同一セクター内ではビーム軸からの距離  $R$  が大きくなるにつれて長くなる。

### 3.3 トリガーシステム

LHC では 40MHz でビームの衝突を起こし、1 バンチあたりに約 20 個のイベントが発生するので、イベントレートは 1GHz にもなる。

全てのイベントの情報を採ってくる则情報量が大きくなりすぎるため、データストレージへ保存することが困難になる。よって、興味のある事象だけをトリガーシステムを用いて選別し、100Hz 程度までイベントレートを絞るようにする。

ATLAS のトリガーとデータ収集 (DAQ) システムは選別の効率を上げるために 3 段階に分かれている。各段階では前段階で絞り込まれた領域にさらに精度の高い情報を加えることで、精密な選別を行う。3 段階の選別は LVL1 Trigger、LVL2 Trigger、Event Filter の順で行われ、以下にその概略図を示す。

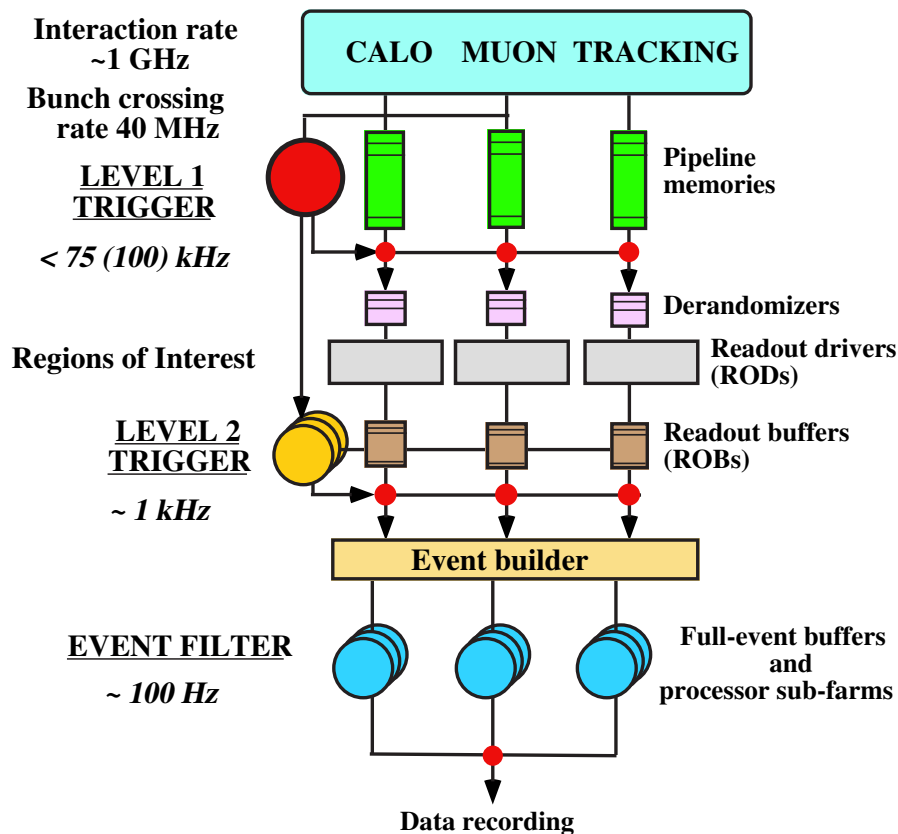


図 3.13 トリガーシステムの構成

### 3.3.1 LVL1 Trigger

Level-1(LVL1) Trigger ではトリガー用ミュオン検出器 (TGC,RPC) から得られる  $R_x$  座標、横運動量、全てのカロリメータのエネルギー情報をもとに選別を行う。この段階では情報量がとても多いためにカロリメータのエネルギー情報は位置精度を落としている。これにより、大きな運動量を持ったジェット、電子、ミュオンなどの検出された領域 (RoI) の情報が出力される。イベントレートは陽子の衝突頻度である 1GHz から約 1 万分の 1 の 75kHz まで落とされる。

LVL1 End Cap Muon Trigger は TGC の異なる層のワイヤグループ、ストリップが、ほぼ同じ  $R_x$  の範囲、同じバンチ内にヒットがあった場合、TGC の station 間でコインシデンスを採ることで選別を行う。

### 3.3.2 LVL2 Trigger

Level-2(LVL2) Trigger では LVL1 Trigger によって与えられる RoI のデータを利用して、注目する検出器の領域を絞り込むことで精度のよい選別を行う。LVL1 では各検出器が独立して判定をしていたが、LVL2 では内部飛跡検出器および MDT からの精度の高い情報を組み合わせて処理していく。

ミュオンについては MDT の情報を追加することで  $P_t$ (横運動量) の精度が高くなり、閾値付近での選別がより正確になる。イベントレートは 75kHz から 1kHz 程度まで絞りこまれる。

### 3.3.3 Event Filter

各検出器の完全な位置情報、トリガー条件を基に最終的な判定が行われ、選別されたイベントはオフライン解析のためにデータストレージに書き込まれる。イベントレートは 100Hz 程度まで絞りこまれる。

## 3.4 LVL1 End Cap Muon Trigger

LVL1 Trigger の役割はビーム衝突により発生する粒子以外による検出器の信号や、検出器自体のノイズを取り除き、高い  $P_t$ (横運動量) のミュオンの事象を選別することである。

LVL1 Trigger では RPC と TGC の二種類の検出器が用いられる。ここで、RPC は  $|\eta| < 1.05$  の領域 (パレル部)、TGC が  $1.05 < |\eta| < 2.4$  の領域 (フォワード、エンドキャップ部) をそれぞれトリガーすることになっている。

今回はエンドキャップ部について考えていくので、TGC での LVL1 Trigger について詳しく見ていく。ここからは、LVL1 Trigger という言葉を使うときは TGC によるトリガーのことを指すことにする。

では、LVL1 Trigger の条件をこれから示していく。

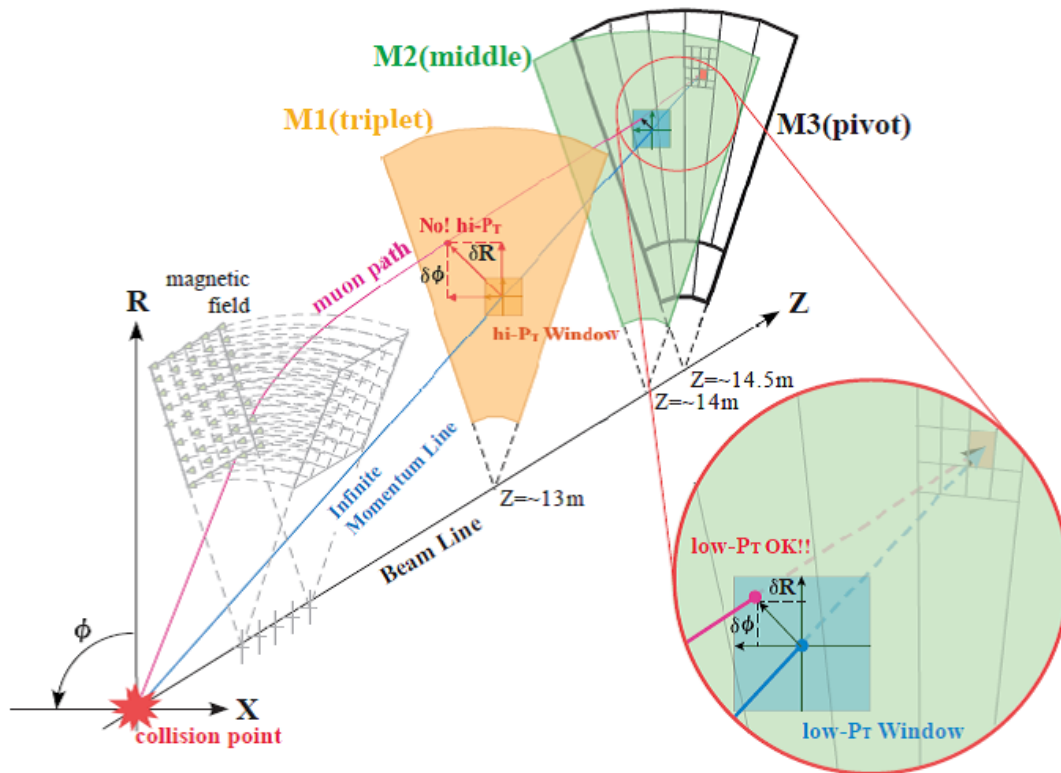


図 3.14 コインシデンス ウィンドウによる Pt 判定

### 3.4.1 R- コインシデンス

ビームの衝突地点と M3-station でのヒット位置を直線で結ぶトラックを考え、これを磁場の影響を受けなかった無限運動量トラックと呼ぶことにする。しかし、実際のビームの衝突によりエンドキャップ部に向けて発生したミュオンは磁場によって軌道が曲げられた後、TGC で検出される。ここでトロイド磁石による磁場が理想的な 方向成分のみの磁場であれば、R 方向のみの曲がりだけになるが、実際は漏れ磁場が存在するため 方向の曲がりも存在する。エンドキャップミュオンシステムはトロイド中心部だけでなく、その周辺部、コイルの外側をもカバーしているので、この R、 両方の曲がりを考慮する必要がある。この無限運動量トラックと実際のミュオンによる M1 および M2-station でのヒット位置の差を R- 方向それぞれで比較し、このズレ (  $\Delta R$ ,  $\Delta \phi$  ) を求めることで Pt の判別は行われる。

ミュオンの Pt の閾値は LowPt (6GeV 以上) 用に 3 段階、HighPt (20GeV 以上) 用に 3 段階の計 6 段階が用意されていて、その閾値以上の Pt を持つミュオンだけを選択することになっている。ここで Pt の閾値の定義はこの値より大きな Pt のミュオンのトリガー効率が 90 % 以上になる値のことをいう。M1-station, M2-station ではそれぞれ  $\Delta R$ ,  $\Delta \phi$  の上限値が決まっています、こ

の上限値で形成される  $R_{\pm}$  領域をウィンドウと呼ぶ。

M2-station のウィンドウは LowPt 以上の Pt を持つミュオンが通過できる領域になっていて、この領域を LowPt コインシデンス ウィンドウと呼ぶ。LowPt コインシデンス ウィンドウの領域は、無限運動量トラックと M2-station との交点を基準点として、 $R_{\pm}$  はワイヤグループ  $\pm 7$  分、

はストリップ  $\pm 3$  分の範囲になっている。LowPt コインシデンスの条件は M2, M3-station の 2 つの Doublet において、このウィンドウの範囲内のワイヤ、ストリップでそれぞれ 4 層中 3 層以上 (3-out-of-4) にヒットがあるかどうかで判定される。

同様に M3-station のウィンドウは HighPt 以上の Pt を持つミュオンが通過できる領域のことで、HighPt コインシデンス ウィンドウと呼び、LowPt コインシデンスの条件に加え、さらに M1-station の Triplet のウィンドウ内にワイヤ 3 層中 2 層以上 (2-out-of-3)、ストリップ 2 層中 1 層以上 (1-out-of-2) でヒットがあれば HighPt コインシデンス (3-station コインシデンス) の条件が満たされる。HighPt コインシデンス は M1, M2, M3-station 間のコインシデンスでもあるので 3-station コインシデンスとも呼ばれる。

HighPt コインシデンス ウィンドウは Pt が 20GeV 以上の場合、確実にその範囲を通過するが、Pt が 6GeV 以上のミュオンでも多くの場合このウィンドウの範囲を通過するため、基本的には Pt の判定は High-Pt コインシデンス情報を基に決定される。

そして、最終的に Pt の閾値ごとにトリガーしたミュオンの個数を LVL1 Trigger の結果として出力する。

### 3.4.2 トリガーのタイミング

TGC からの各ヒットの信号は、TGC のタイムジッター、TOF (Time Of Flight) やケーブルによる遅延が原因となり、到達時間はそれぞれ異なってくる。TOF、ケーブルによる遅延はエレクトロニクスにより補正されているが、TGC のタイムジッター ( $\sim 25\text{nsec}$ ) による差を考慮して、ビームの衝突時間を  $t=0$  として、それから 50nsec 分のゲートを開け、その間に信号があった事象だけを採ってくることで出力信号のバンチ識別を行うことになっている。

このタイミングを設定することで、衝突地点から発生した粒子をバンチごとに区別してトリガーしていくことが可能となる。また、バックグラウンドの事象やノイズによる偶発的なトリガーを取り除くこともできる。

### 3.5 TGC エレクトロニクス

TGC エレクトロニクスについてシステム全体の流れ及び配置について述べる。

TGC には LVL1 ミューオントリガーシステムとしてトリガー判定のための情報を得ることと、MDT が測定できないミューオンの 方向の情報を出力することにある。データの流は大きく分けて、25nsec ごとのトリガー判定のための情報を扱う「トリガー系」、L1A(LVL1 Accept: LVL1 Trigger によってトリガーされたという信号) が来ると読み出される TGC 各層でのミューオンのヒットチャンネル情報を扱う「リードアウト系」、TGC エレクトロニクスの各モジュールをコントロールするための情報を扱う「コントロール系」の3つがある。

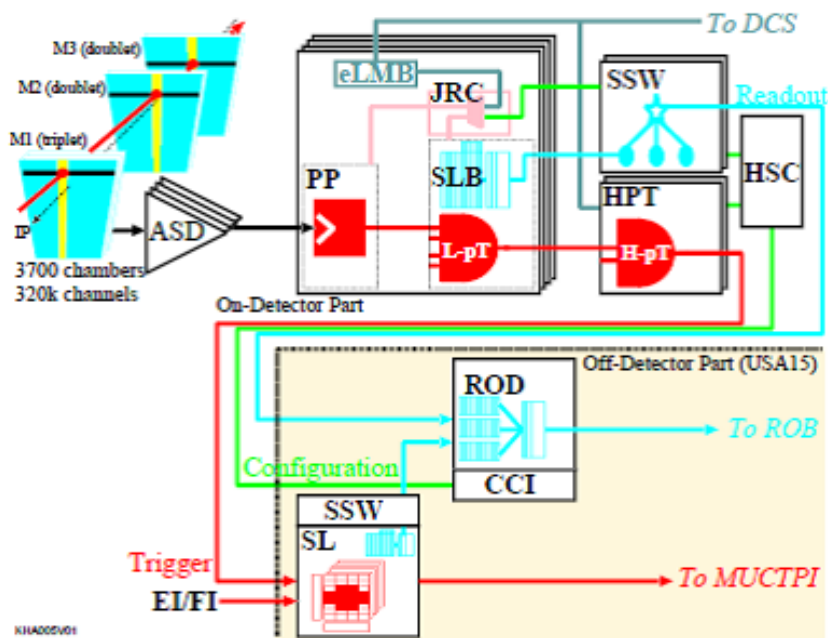


図 3.15 TGC エレクトロニクス

#### 3.5.1 トリガー系

トリガー系の流れは、ASD(Amplifier Shaper Discriminator) ボード, PP(Patch Panel ASIC), SLB(Slave Board ASIC)、HPT(High-Pt ボード), SL(Sector Logic) の順に信号が処理される。TGC から出力されるアナログ信号は、ASD ボードに送られ、信号の増幅・整形・デジタル化が行われ、LVDS 信号で PP へと送られる。PP では、各チャンネルへ粒子が到達するまでの飛行時間である TOF(Time of Flight) やケーブル遅延などから生じるタイミングのずれを調整し、バンチ識別 (信号を LHC clock に同期させる) を行う。SLB では、PP からの信号を受け取り、4 層からなる pivot,middle Doublet からの信号をもとにコインシデンス処理 (3-out-of-4) が行われ、

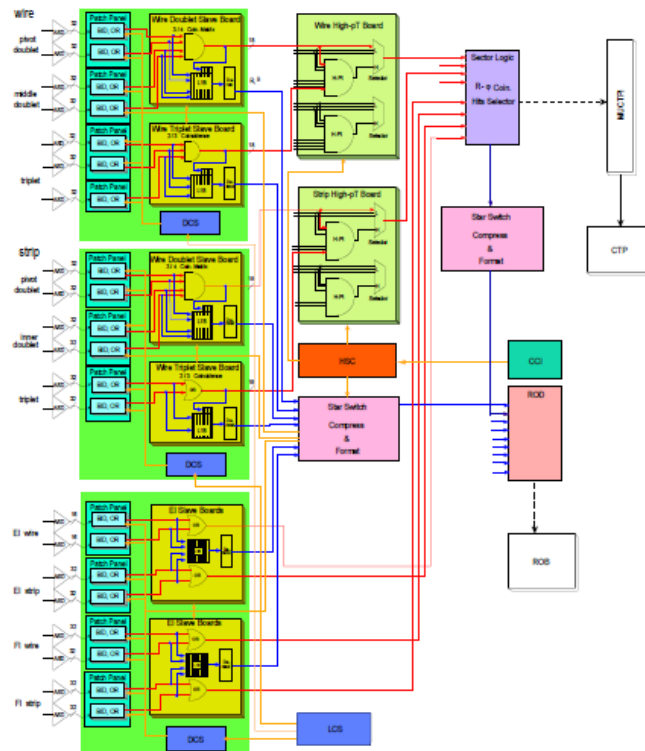


図 3.16 TGC エレクトロニクスのデータの流れ

Low-Pt トリガーの判定が行われる。また Triplet からの信号についてもコインシデンス処理 (ワイヤ:2-out-of-3, ストリップ:1-out-of-2) が行われる。HPT では、SLB で測定した Doublet 及び Triplet のコインシデンス処理の結果を基に、High-Pt コインシデンス情報が生成される。SL では、それまで独立に扱われていたワイヤ・ストリップの情報を統合し、コインシデンス処理が行われ、TGC のトリガー系の最終的な情報として Pt が大きな 2 つのトラックをセクタ毎に選び出す。SL の結果は、MUCTPI(Muon CTP Interface) に送られ、RPC の情報と合わせて、ミュオンの最終的なトリガー判定が下される。

### 3.5.2 リードアウト系

リードアウト系の流れは図 3.16 の青線で示される。PP から送られてきたデータは、SLB の中にあるレベル 1 バッファに蓄えられ、L1A 信号を受けたデータのみがデランダムマイザを通じて、次段の SSW(Star Switch) へと送られる。SSW では、データの圧縮を行い、あるフォーマットにデータを変換する。またトリガー情報 (コインシデンス処理の結果) は SL に搭載された SLB から同様に SSW に送られる。変換されたデータは ROD(Readout Driver) に送られ、ROD では最大 8 個の SSW からの情報を収集し、それらのデータと TTC から送られてくる情報との整合性を確認し、データが正しいものであれば、要求されるフォーマットにデータを変換して、ROB(Readout Buffer) に送られる。

### 3.5.3 コントロール系

コントロール系は、ATLAS 実験では各検出器の制御と監視を統一的な方法で行うために DCS(Detector Control System) が導入され、フロントエンドには ADC(Analog-Digital Converter) や DAC(Digital-Analog Converter) などの機能を持った eLMB(embedded Local Monitor Box) が PS Board 上に設置される。HPT/SSW が搭載される VME. クレート (HSC クレート) は実験室外の CCI(Control Configuration Interface Board) から HSC(High-pT Star-switch Controller Board) を介してコントロールされ、PS Board 上の PP/SLB の設定は SSW から行う。また、TGC エレクトロニクスでは、DCS は温度状態管理や供給電源の監視、さらに SSW から行われる PP/SLB の設定も、バックアップのために eLMB から行えるようにしてある。PS Board 上には JTAG プロトコルの PP/SLB への経路選択を行うために JRC(JTAG Routing Controller) が設置される。



## 4 エンドキャップミュオンシステムのシミュレーションによるコミッショニング

### 4.1 宇宙線ミュオンによるコミッショニング

現在、ATLAS 測定器内部を構成する内部飛跡検出器、カロリメータ、トロイド磁石が ATLAS 測定器に順次インストールされ、アウター部のエンドキャップミュオンシステムを構成する TGC、MDT の設置作業が進行中であり、インストールの完了が近づきつつある。これに伴い、各検出器の動作確認だけではなく、統合された検出器におけるデータ収集やトリガーシステムの検証が可能になってきている。

インストール完了後から検出器全体を質のよいデータを収集できる状態にもっていくことは特に ATLAS のような巨大で複雑な実験では困難を極め、通常予測していたよりも多くの時間を要する。このため、コミッショニングをなるべく早い時期に開始するという事は非常に重要である。

本実験が開始される前に、陽子ビーム同士の衝突から発生した粒子ではなく、その代わりとなる高エネルギー粒子を用いて、初の実データによるコミッショニングを行う。2.4.1 章でも述べた通り、この粒子の候補としては宇宙線ミュオンや、シングルビーム実験の際に生じるビームハロー・ビームガス事象が挙げられる。

本論文ではシミュレーションにより、物理事象を用いたコミッショニングの初期段階である、宇宙線ミュオン事象を用いたエンドキャップミュオンシステムのコミッショニングの研究について述べる。

#### 4.1.1 宇宙線ミュオン

ビームを走らせる環境にない現在、地下約 100m の実験ホールで利用可能な唯一の高エネルギー粒子は宇宙線ミュオンである。宇宙線ミュオンは詳細に研究されていて、入射角度やエネルギー分布といった情報が良く知られているため検証に適しているといえる。

##### < 宇宙線 >

宇宙線とは宇宙空間に存在する高エネルギー放射線であり、地上で観測される宇宙線はその起源によって 2 つに大別される。その 1 つである一次宇宙線は 79 % が陽子、15 % がヘリウム原子核、その他 (鉄原子核、電子など) で構成されている。もう 1 つは二次宇宙線で、一次宇宙線と大気の原子核との相互作用により生じるパイ粒子、ミュオン、電子、光子といった二次粒子が主な成分である。電子・光子 ( $^0 \rightarrow$  ) 群は電磁カスケードをおこすことで徐々にエネルギーを失い、大気中で停止する。荷電パイ粒子 ( $^\pm$ ; 寿命  $2.6 \times 10^{-8}\text{sec}$ ) はミュオン、ニュートリノ ( $^\pm \rightarrow \mu$  ) に崩壊するので地表に到達する荷電粒子のほとんどがミュオン (寿命  $2.2 \times 10^{-6}\text{sec}$ ) となる (図 4.1)。

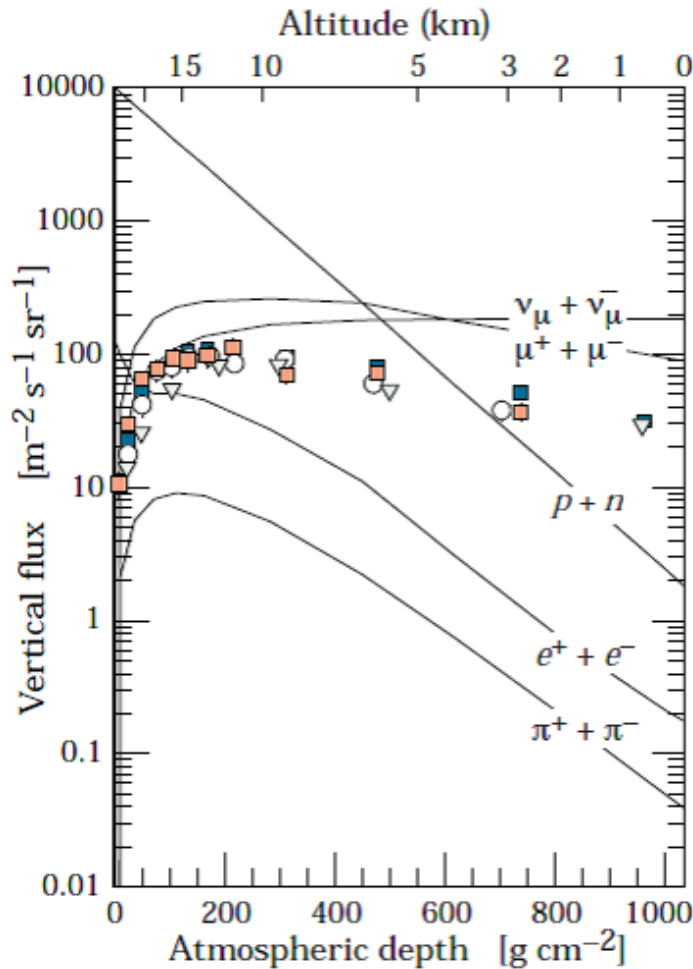


図 4.1 一次宇宙線のフラックスから推測される大気中におけるエネルギーが 7GeV 以上の宇宙線の垂直方向のフラックスと高度の関係  
 図中の点は地表での負電荷をもったミュオンのフラックスの測定値

地表における宇宙線ミュオンのエネルギーと角度分布は大気中における生成スペクトルとエネルギー損失並びに崩壊率によって決まる。地上における宇宙線ミュオンのフラックスの天頂角分布は飛来角度により通過する大気の厚さが異なることに起因し、 $\sim \cos^2$  ( $\theta$  は天頂角) に比例することが知られている。エネルギー分布は 1GeV 以下ではほぼフラットでエネルギーが 10~100GeV、1TeV 以上となるにつれてその勾配は急になる。地表での平均エネルギーは約 4GeV である。

宇宙線の中でも地下深くまで達することができるのはミューオンとニュートリノである。ミューオンは地中を進むときに、周りの物質をイオン化したり、放射過程 (制動放射、電子・陽電子対生成、光核反応) によってエネルギーを失っていく。物質を通過するミューオンの全エネルギー損失は物質量の関数として、

$$-\frac{dE_{\mu}}{dX} = a + bE_{\mu} \quad (4.1)$$

と表される。ここで、 $a$  は単位物質あたりの電離によるエネルギー損失、 $b$  は放射過程によるエネルギー損失にかかる係数である。

## 4.2 LVL1 Cosmic Muon Trigger の構築

通常 LVL1 Trigger がかかるためには、station 間コインシデンス、R- コインシデンス、タイミングの条件をみたさなければならない。

LVL1 Trigger がかかるためには、3 章で述べたように HighPt コインシデンスの条件が要求される。しかし、宇宙線ミュオンはビームの衝突地点付近を通過するとは限らず、またタイミングも本実験のそれとはまったく異なってくるので、ほとんどの宇宙線ミュオン事象は通常のトリガーの条件をみたさない。トリガー条件をみたさなければデータ収集は行われないので、宇宙線ミュオンを用いたコミッションングを行うためには、宇宙線ミュオン事象のための特別なトリガー条件の構築が必須となる。

ここで宇宙線をトリガーするためのトリガー構成を LVL1 Cosmic Muon Trigger と呼ぶことにする。

### 4.2.1 コインシデンス

LVL1 Cosmic Muon Trigger の設定について述べる。

M3-station のストリップ、ワイヤーにそれぞれ 1 つ以上の宇宙線ミュオンによるヒットがあった事象をトリガーするために、M2-station の 2 層の TGC にダミーのヒット情報を与え、3-out-of-4 の LowPt コインシデンス条件をみたすようにする。この M2-station ダミーヒットのことをマスクと呼ぶことにする。

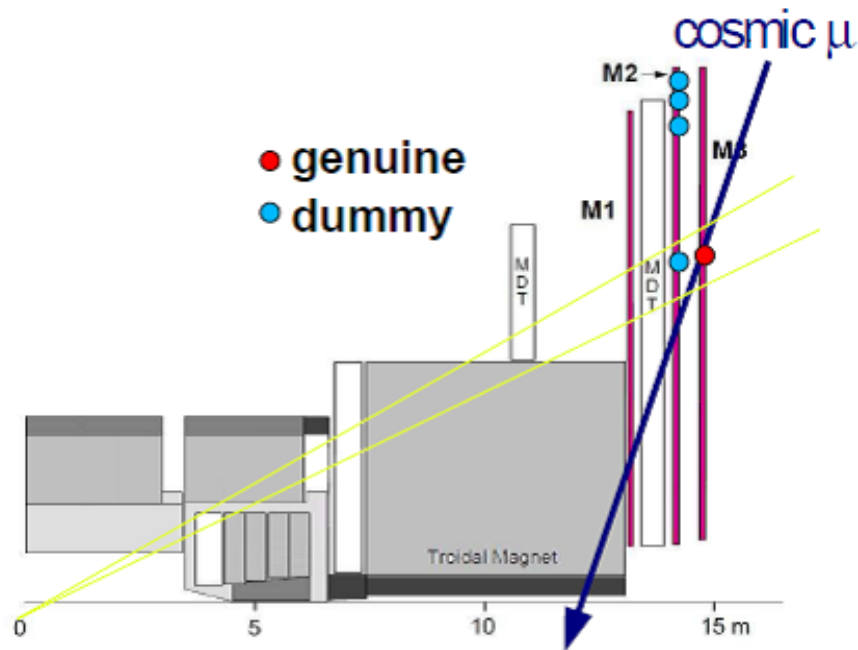


図 4.2 LVL1 Cosmic Muon Trigger

#### < マスク >

M2-station のマスクは、ストリップには 4 つ置き、ワイヤーには 8 つ置きに作る。これにより、M3-station のストリップ、ワイヤーのどこにヒットがあっても必ず LowPt コインシデンスをみたくすることができる。

今回は M2-station のダミーヒットと M3-station のミュオンによる本物のヒットによる LowPt コインシデンスでトリガーすることにした。しかし、M2-station と M3-station を合わせた 4 層全ての TGC のレイヤーにマスクをかけ、M1-station への宇宙線ミュオンによるヒットにより HighPt コインシデンスがとれることをトリガーの条件とする等、他のトリガー条件を構築することも可能である。

#### 4.2.2 トリガーのタイミング

本実験では粒子はビームの衝突地点付近から発生するため、その衝突時間を  $t=0$  として、その前後 50nsec の間に発生した事象をトリガーできるよう各 station のタイミングを設定している。

これにより、ビーム衝突地点から発生した粒子だけをトリガーすることができるが、今回のような宇宙線ミュオンによるコミッショニングでは、タイミングは本実験のそれとはまったく異なってくる。しかし、LVL1 Cosmic Muon Trigger では宇宙線ミュオンによる M3-station のヒットのみ用いるので、station 間のタイミングを考慮する必要はない。よって宇宙線ミュオンのための環境設定としてタイミングは無視してシミュレーションを行った。

#### 4.2.3 トロイド磁場

本実験で運動量の測定のためにトロイド磁場は必要であるが、宇宙線ミュオンでのコミッショニングを考えると、磁場が存在すると宇宙線ミュオンの運動が複雑になり、出力されるデータの解析が困難になる。よって、研究の第一歩として今回は磁場を取り除いてシミュレーションを行った。

実際にコミッショニングを行うときは磁場をかける可能性もあるが、そのときは随時シミュレーションでも対応していけると考えられる。

## 4.3 シミュレーション

### 4.3.1 目的

シミュレーションの目的は、実際の観測で起こりうるノイズを除去し、理想的な状況での検出器の反応を見ることで、実観測での結果の予測に役立てようとするものである。

チェンバーは高電圧をかけると、自己放電による信号が生じたり、他の検出器から発生する電磁波による信号が出力される可能性がある。シミュレーションでは、これら宇宙線以外に起因するノイズ信号を除去して、理想的な状況での宇宙線ミュオンによる検出器の反応の予測をたてる。そして、これを実際の検出器からの観測データと比較することで、読み出し回路・増幅率・検出効率などの検出器の性能評価、残留放射線・実験ホールからのバックグラウンドなどの環境の評価を行っていく。

今回は理想的な状況下でシミュレーションを行い、各検出器 (TGC, MDT) での宇宙線ミュオンのヒットレートやトリガーレートなど、実際の検出器の出力データと比較する参考データを作った。

### 4.3.2 シミュレーションの流れ

宇宙線ミュオンが ATLAS 検出器と反応し、トリガー判定が出力されるまでの様子はシミュレーションを用いて再現していく。まず最初に一般的なシミュレーションの流れについて説明し、その後今回の宇宙線ミュオン事象のシミュレーションで導入した環境設定について触れる。

シミュレーションの流れを以下に示していく。

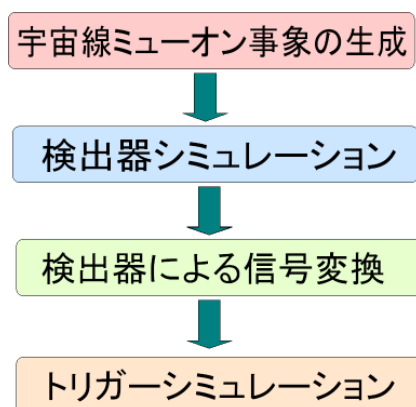


図 4.3 シミュレーションのデータの流れ

#### 1. 宇宙線ミュオン事象の生成

最初の宇宙線ミュオン事象の生成ではモンテカル口法により、ある 4 元運動量を持った宇宙線ミュオン事象を地上におけるエネルギー分布及び角度分布に基づいて発生させる。

## 2. 検出器シミュレーション

宇宙線ミュオン事象の生成の次の段階である検出器シミュレーションは Geant4 を用いて行われる。Geant4 は、陽子・中性子・電子・ガンマ線・パイ粒子・ミュオンなどの素粒子が物質中で起こす複雑な振舞や反応を正確にシミュレートする大規模フレームワークである。

検出器シミュレーションでは、実験ホールや竖穴などの形状・材質、並びに ATLAS 測定器とその周辺の構造が詳細に再現されている (図 4.4 , 図 4.5)。Geant4 により、粒子の検出器や構造体との相互作用をシミュレートし、粒子が物質内を運動していく際の各ステップにおける粒子の状態 (位置、時間、エネルギー損失) のスナップショット情報 (ヒット) を得ている。

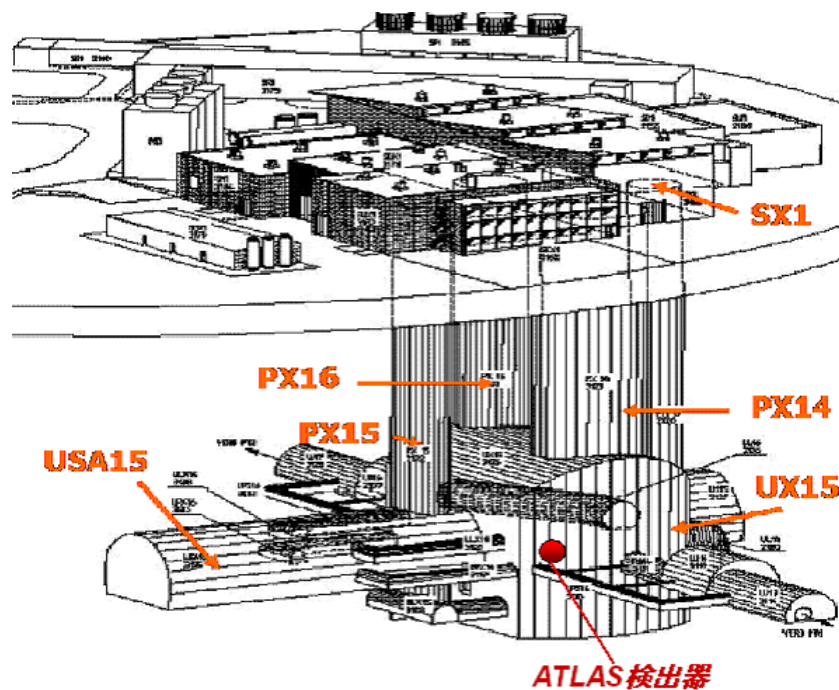


図 4.4 ATLAS 検出器が設置されている実験ホールとその周辺の構造

図 4.4 は ATLAS 測定器を収納している地下の実験ホール。地上から地下に検出器などの搬入を行う竖穴 (PX14, PX15, PX16) など、ATLAS 測定器周辺の構造を示している。

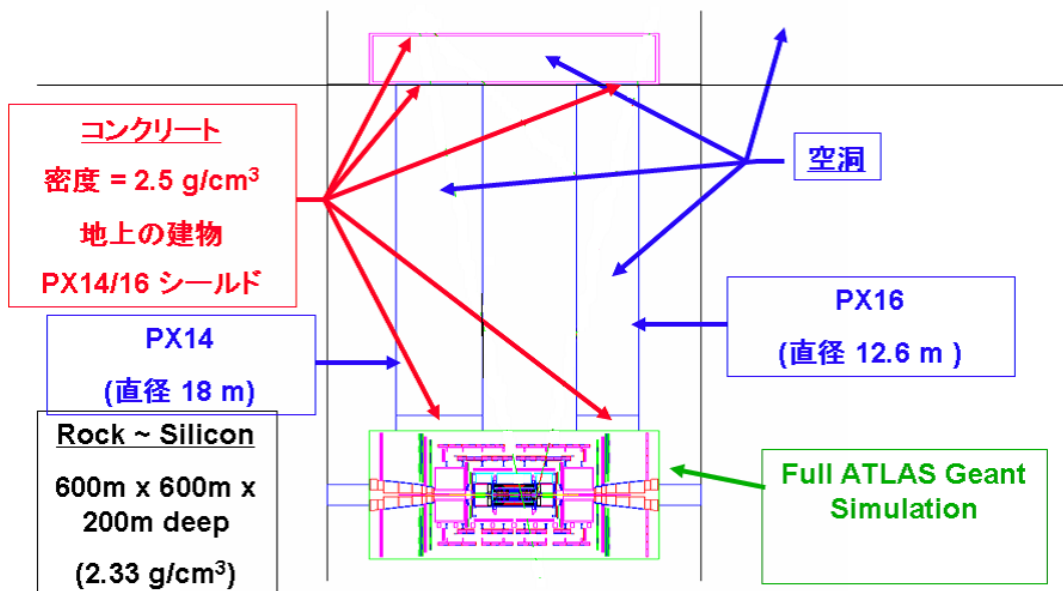


図 4.5 ATLAS 測定器周辺のパラメータ

図 4.5 に Geant4 で再現されている豎穴の形状と物質の密度を示す。PX14, PX16 の豎穴は ATLAS エンドキャップ部のほぼ真上に位置している。

### 3. 検出器による信号変換

検出器による信号変換とは、実際の検出器に近い動作特性をシミュレーション上に再現し、検出器シミュレーション時に出力されたヒット情報（エネルギー、運動量、速度、時間、絶対位置など）に基づいて検出器の出力信号を作り出す作業のことである。

### 4. トリガーシミュレーション

検出器シミュレーションと同様、実際のトリガーエレクトロニクス動作を再現し、ASD での検出器の出力から SL でのトリガー判定の出力を得るまでの工程をシミュレートする。

以上により、宇宙線ミュオン事象の生成からトリガー判定の出力を得るまでの流れを説明した。今回は宇宙線ミュオンを使ったコミッションングという、本実験とは異なる環境での実験なので、シミュレーションでも宇宙線ミュオン事象に対応した設定を行っていく必要がある。

次に宇宙線ミュオンのための環境設定について説明する。



- ATLAS 宇宙線事象選択フィルター

すべての宇宙線ミュオンに対して検出器シミュレーションを行うと膨大な時間がかかるため、興味のある事象だけを検出器シミュレーションにかけるようにしたい。よって、今回は地上で生成された宇宙線ミュオンのうち、LVL1 Cosmic Muon Trigger のかかる可能性のある事象のみを抽出し (事象選択フィルター)、シミュレーションを行うのに必要な時間の短縮を試みる。

地上から発生した宇宙線ミュオンが M3-station の方向に初速度を持っていた場合にのみ、その事象に対して検出器シミュレーションを行うようにし、その他の事象は切り捨てることにした。現在、初期設定では事象選択フィルターで定義された有感領域は  $0m \leq R \leq 12.0m, 15.0m \leq |Z| \leq 15.3m$  の円柱形をしていて、Z 座標が正負両方の M3-station 全体を囲いこむ形状になっている (図 4.6, 表 2)。

この事象選択フィルターの有感領域のパラメータ  $R, Z$  は、実行時にプログラムを再コンパイルせずに変更することが可能で、M1-station を覆う形にするなど、LVL1 Cosmic Muon Trigger の環境設定の変更に随時対応することができる。

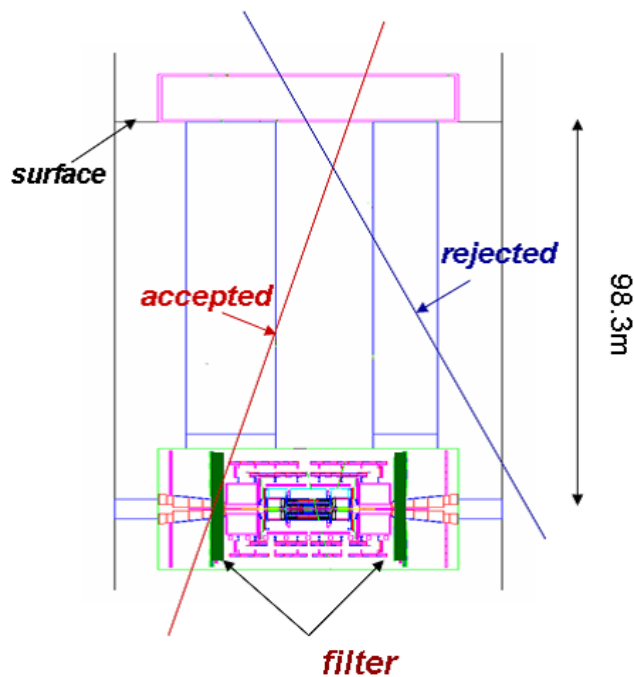


図 4.6 事象選択フィルターの有感領域

この事象選択フィルターにより、検出器シミュレーション以下、シミュレーション手順全体を通してかかる時間は約 1/400 となり、作業時間を大幅に短縮することができるようになった。

|                | $R(m)$     | $ Z (m)$    |
|----------------|------------|-------------|
| M1-station     | 1.9 ~ 10.7 | 13.2 ~ 13.6 |
| M2-station     | 2.5 ~ 11.9 | 14.6 ~ 14.9 |
| M3-station     | 2.6 ~ 11.9 | 15.0 ~ 15.3 |
| 事象選別フィルターの有感領域 | 0 ~ 12.0   | 15.0 ~ 15.3 |

表2 TGC の各 station の領域、及び 事象選別フィルターの有感領域 (Z-R 座標)

- **LVL1 Cosmic Muon Trigger** の環境設定の導入

宇宙線ミュオン事象を再現するためのトリガーシミュレーションにも LVL1 Cosmic Muon Trigger 用の環境設定を導入する必要がある。

トリガーシミュレーションを実行するとき、M2-station にマスクをかけ、さらに station 間のタイミングを無視する。そして宇宙線ミュオンの M3-station へのヒットによる LowPt コインシデンスをとることでトリガーをかけるようにする。これにより、宇宙線ミュオンのランダムな発生地点、入射方向、タイミングに対応し、トリガーすることが可能になる。

## 4.4 解析

前節で述べた LVL1 Cosmic Muon Trigger と事象選択フィルターを用いて、地下の実験ホールに設置した ATLAS 検出器のエンドキャップミュオンシステムでトリガーされるような宇宙線ミュオンについてシミュレーションを行った。

以下に解析の対象となった宇宙線ミュオン事象、その検出器反応、並びにトリガー判定についてデータ解析を行った結果を示す。

### 4.4.1 宇宙線ミュオン

地上付近で生成された宇宙線ミュオンのうち、エンドキャップミュオンシステムの方に飛跡を持ち、かつ ATLAS 実験ホール上部の物質質量を通過したミュオンだけがコミッショングに使うことができる。

まず、(1) 地上付近で生成された事象、(2) 事象選択フィルターにかかった事象、(3) トリガー条件をみたした事象、のそれぞれにおいて宇宙線ミュオンのエネルギー、並びに角度分布を調べた。

#### 1. 地上付近で生成された事象

まず最初に事象選択フィルターを用いずに事象生成したときの宇宙線ミュオンのデータについて述べる。地上付近の宇宙線ミュオン事象は LEP/ALEPH 実験のコミッショングの際に使われたジェネレーターを用いている。これは論文 [4] にある解析的アプローチにより計算された宇宙線ミュオンのフラックスを実際の測定データにフィットすることで得られたものであり、エネルギー 10GeV から 1TeV までの垂直方向のフラックスにおいて実測定 [5] と数%の精度で合っている。

ここで地上とは、

$$-300m \leq X \leq 300m, \quad Y = 98.3m, \quad -300m \leq Z \leq 300m$$

の範囲と定義している (図 4.7)。

(参考：(X,Y,Z)=(0,0,0) はビームの衝突点、Y = 98.3m は地表での Y 座標)

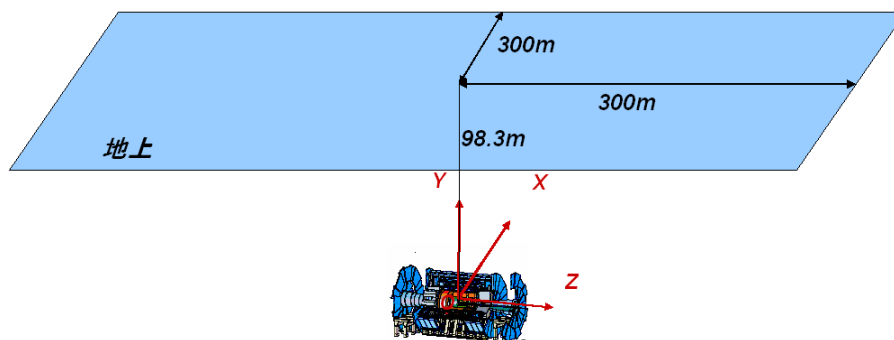


図 4.7 地上領域の定義

地上付近における宇宙線ミュオン事象は

エネルギー 10GeV ~ 2TeV

天頂角  $0 \leq \cos \theta \leq 1.0$

の範囲で生成し、このときのフラックスは  $2.47 \times 10^{-3} \mu/cm^2/s$  であった。

地上付近での宇宙線ミュオンのエネルギー、天頂角の分布を図 4.8 に示す。

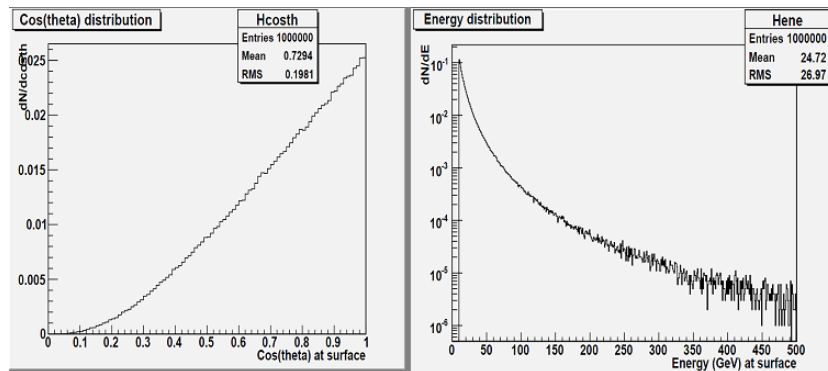


図 4.8 ジェネレーターにより生成された地表付近での宇宙線ミュオンの天頂角分布 (左) とエネルギー分布 (右)

## 2. 事象選択フィルターにかかった事象

先ほど述べた地上付近で生成された事象の中で、事象選択フィルターにかかった、つまり検出器シミュレーション以下のシミュレーション過程が行われる事象について、その事象のパーティックス分布 (ここでは宇宙線ミュオンの地表での座標分布のことを意味する)、天頂角分布とエネルギー分布をみていく。

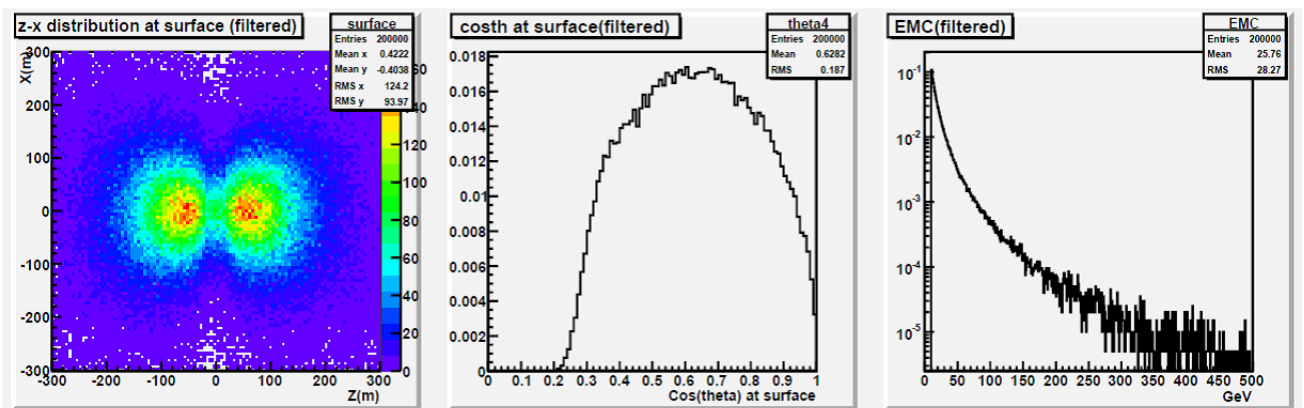


図 4.9 地上付近で生成された事象のうち、事象選択フィルター条件をみたす宇宙線ミュオンのパーティックス分布 (左)、天頂角分布 (中央)、エネルギー分布 (右)

図 4.9 のバーテックス分布を見ると、宇宙線ミュオンの生成位置が 2 ヶ所に集中していることがわかる。M3-station は  $Z=0$  の平面を境に左右対称に配置されているため、バーテックス分布も同じく  $Z=0$  の平面を境に対称になることが理解できる。

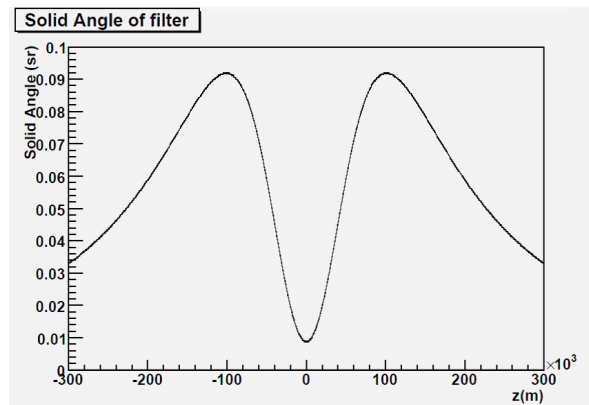


図 4.10 ( $X = 0m, Y = 98.3m, -300m \leq Z \leq 300m$ ) の地点からみた事象選択フィルター有感領域の立体角

図 4.10 は横軸が ( $X = 0m, Y = 98.3m$ ) における  $Z$  座標 (単位  $m$ ) で、縦軸がその地点からみた事象選択フィルターの立体角 (単位  $sr$ ) である。( $X = 0m, Y = 98.3m, -300m \leq Z \leq 300m$ ) 上のある地点からみた事象選択フィルターの立体角に、その地点から事象選択フィルターに向かう速度を持った粒子が生成される割合 (図 4.8 の天頂角分布) を掛け合わせることで、図 4.9 のバーテックス分布で見られるような 2 箇所にピークを持った分布になることが説明できる。

天頂角分布もバーテックス分布のときと同等の理由で、地面に垂直に入射してくるものよりもある程度角度を持っている事象が事象選択フィルターにかかるという結果が出た。

これにより、地面に垂直 ( $\cos \theta = 1$ ) に入射してくる事象は生成時の段階ではもっとも大きい比率で生成されるが、事象選択フィルター有感領域の立体角を考えると  $\cos \theta = 0.65$  付近にピークが立ち、角度を持った粒子が入射してくることがわかった。

### 3. トリガー条件をみたした事象

最後に事象選択フィルターにかかった事象のなかで、M3-station にヒットし、さらにトリガー条件を満たした事象について見ていく。

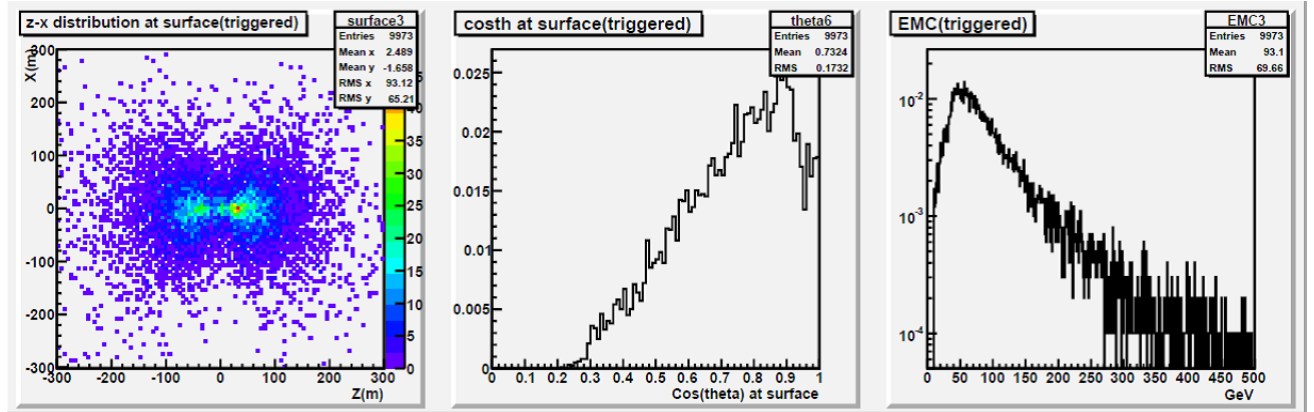


図 4.11 トリガー条件をみたした宇宙線ミュオンのパーテックス分布 (左)、天頂角分布 (中央)、エネルギー分布 (右)

図 4.11 の天頂角分布は先ほどの事象選択フィルターにかかった事象 (図 4.9 中央図) に比べて、地面に垂直な方向に分布が偏ってきている。これは垂直方向ほど ATLAS 実験ホールに到達するまでに通過する物質質量が小さいので、エネルギーを失って途中で止まってしまうという確率が小さくなるためである。

また ATLAS 実験ホールにつながる竖穴は、コンクリートに比べ遥かに物質質量が小さいためミュオンが通過しやすく、このシャフトの存在するところに分布が偏り、天頂角分布も図 4.9 の天頂角分布に比べて垂直方向の強度が大きい。

エネルギーの低い宇宙線ミュオンは実験ホールに到達するまでにエネルギーを失って途中で止まる確率が高いため、エネルギー分布のピークは図 4.9 のエネルギー分布に比べて高くなる。

以上のデータから、どのようなパーテックス位置、入射角度、エネルギーを持った宇宙線ミュオンがトリガー条件をみたすのかということがわかった。フィルターにかかった事象での天頂角分布と比べると、地面に対して垂直に入射してくる事象の割合が増えた。とは言え、地面に対して垂直に入射してくる事象よりある程度角度を持った事象の割合のほうが多いことが示されている。このことから、TGC の M3-station にヒットし、さらに LVL1 Cosmic Muon Trigger の条件をみたした事象の多くは他の TGC ,MDT の station にもヒットする可能性が高いことが示された。(各 station のヒットレートは次節で示していく。)

#### 4.4.2 トリガーレートとトリガー効率

地上付近で生成された事象、事象選択フィルターにかかった事象、M3-station にヒットのあった事象、並びにトリガー条件をみたした事象の頻度について述べる。表 3 にそれぞれの事象の統計量と頻度を示す。

|                       | 統計量    | 頻度 (Hz) |
|-----------------------|--------|---------|
| 地上付近で生成された事象          | 130M   | 8.88M   |
| 事象選択フィルターにかかった事象      | 200k   | 13.7k   |
| M3-station にヒットのあった事象 | 11,075 | 757     |
| トリガー条件をみたした事象         | 9973   | 682     |

表 3 地上付近で生成された事象、事象選択フィルターにかかった事象、M3-station にヒットのあった事象、トリガー条件をみたした事象の統計量と頻度

ここでトリガー効率を

$$\text{トリガー効率 (\%)} = \frac{\text{トリガー条件をみたした事象}}{\text{M3-station にヒットがあった事象}} \times 100$$

のように定義するとトリガー効率は 90 % という結果になった。

10 % の非効率性は 3-station を通過した宇宙線ミュオンがストリップ方向の HighPt コインシデンスの条件 ( 12) をみたさず、また HighPt コインシデンスが LowPt コインシデンスの判定より優先されるため生じる。これは M1-station の全てのストリップのヒットを無効にすることで避けることが可能である。

この表から見て取れるように、14.6 秒間にトリガー条件をみたした事象は 9,973 個、つまり 682Hz でトリガーがかかるという結果が出た。この数字はエンドキャップシステムがコミッションを行う為に必要な統計量を集めるに当たっての指標となる。

次にこのトリガー条件をみたした 9,973 の宇宙線ミュオン事象に対する検出器応答やトリガー判定について調べる。図 4.12 には M3-station 上でのヒット分布を示す。

M3-station 上にヒット位置をプロットするにあたって、1 つの事象において M3-station のワイヤー、ストリップのヒットがそれぞれ 1 つだけである場合はヒット位置を特定できる。しかし、M3-station(Doublet) は TGC が二層構造であり、また実際は隣り合うワイヤー、ストリップで信号がある場合もあるので、M3-station のヒット位置の定義は、「1 つの事象中に M3-station にヒットのあった全てのワイヤー、ストリップの平均の位置」としてプロットされている。

・ TGC の M3-station のヒット数分布

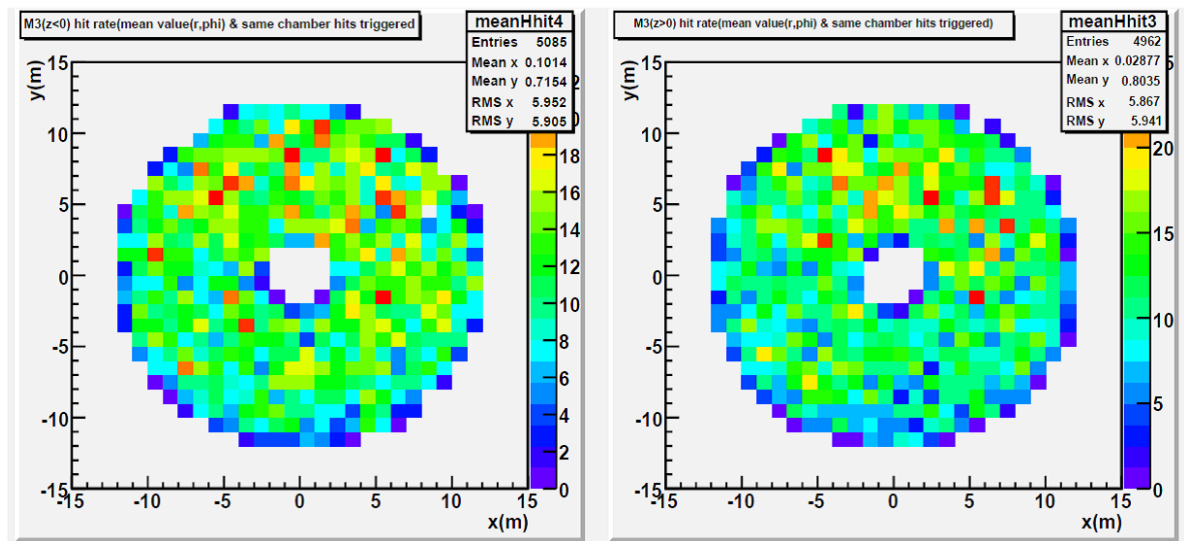


図 4.12 トリガー条件をみたした宇宙線ミュオンが 14.6 秒間に M3-station に残したヒット数分布 左 ( $Z < 0$  に位置する station) 右 ( $Z > 0$  に位置する station)

この図によるとヒット数は  $Z > 0$  の M3-station で 4,962 個、 $Z < 0$  の M3-station で 5,085 個となり、 $Z < 0$  のほうがヒット数が 2 % 程度多い。大きな天頂角を持って入射し、両 M3-station にヒットがあった事象が 74 (0.7 %) 存在している。

また、 $Y > 0$  の位置のほうが  $Y < 0$  の部分よりもヒット数が若干多いことが見て取れる。これは M3( $Z < 0$ ) の真上に位置する竪穴 (PX14) のほうが M3( $Z > 0$ ) の真上の竪穴 (PX16) よりも大きいため、粒子がより通過しやすくなるからである。

トリガー条件をみたしたヒットは両側の station において全域に存在しており、M3-station 上でトリガーのかからないヒット領域はないということが示せた。



#### 4.4.3 ヒットレート

3.3章で述べたように、ATLASトリガーシステムでは、トリガー条件をみたした事象のみがデータとして保存される。よってこれから述べていくヒットレートはすべてトリガー条件をみたした事象について考えている。

TGC, MDT のヒットレートを station 単位、チェンバーの種類別、さらにはチューブ単位で見えていくことで、それぞれの検出器の性能評価がどれほど効率的に行うことができるか知ることができる。

まず最初に 14.6 秒間にトリガー条件を満たした 9,973 個の事象の中で、MDT,TGC の各検出器にヒットのあった事象の数、割合 ( $\frac{\text{MDT,TGC の各検出器にヒットした事象数}}{\text{トリガー条件をみたした事象数 (9,973)}}$ )、そしてヒットレートを表 4 に示す。

|                     | 統計量   | 割合    | ヒットレート (Hz) |
|---------------------|-------|-------|-------------|
| トリガー条件をみたした事象 (MDT) | 9,973 |       | 682         |
| EIL にヒットした事象        | 318   | 3.2 % | 22          |
| EIS にヒットした事象        | 30    | 0.3 % | 2           |
| EML にヒットした事象        | 5407  | 54 %  | 370         |
| EMS にヒットした事象        | 2968  | 30 %  | 203         |
| EOL にヒットした事象        | 1849  | 19 %  | 126         |
| EOS にヒットした事象 (TGC)  | 581   | 6 %   | 40          |
| M1-station にヒットした事象 | 6534  | 66 %  | 447         |
| M2-station にヒットした事象 | 8937  | 90 %  | 611         |

表 4 トリガー条件をみたした事象において MDT、TGC の各 station にヒットがある割合

表 4 より、TGC では M3station に最も近い位置に設置されている M2station のヒットレートが M3station のヒットレートとほぼ同じ (約 90 %) の 611Hz となり、また M1-station へのヒットレートも 447Hz と大きい値を示していることがわかる。図 4.13 と図 4.14 に M1-station、M2-station におけるヒット数分布を示す。

MDT では M1-station と M2-station の間に位置している EM-station(EML+EMS chamber) のヒットレートが 573 (= 370 + 203)Hz と最も大きく、そのほかにも EO-station(EOL+EOS chamber)、EI-station(EIL+EIS chamber) へのヒットも存在し、エンドキャップ部のほぼ全ての MDT において宇宙線ミュオンによりコミッショニングを行える可能性があることがわかる。

M1,M2-station でも M3-station で定義したヒット位置でプロットを行った (図 4.13、 4.14)。M3-station で見られた結果と同様に  $Z < 0$  に位置する station のほうが  $Z > 0$  に位置する station よりもヒットが多いことがわかる。

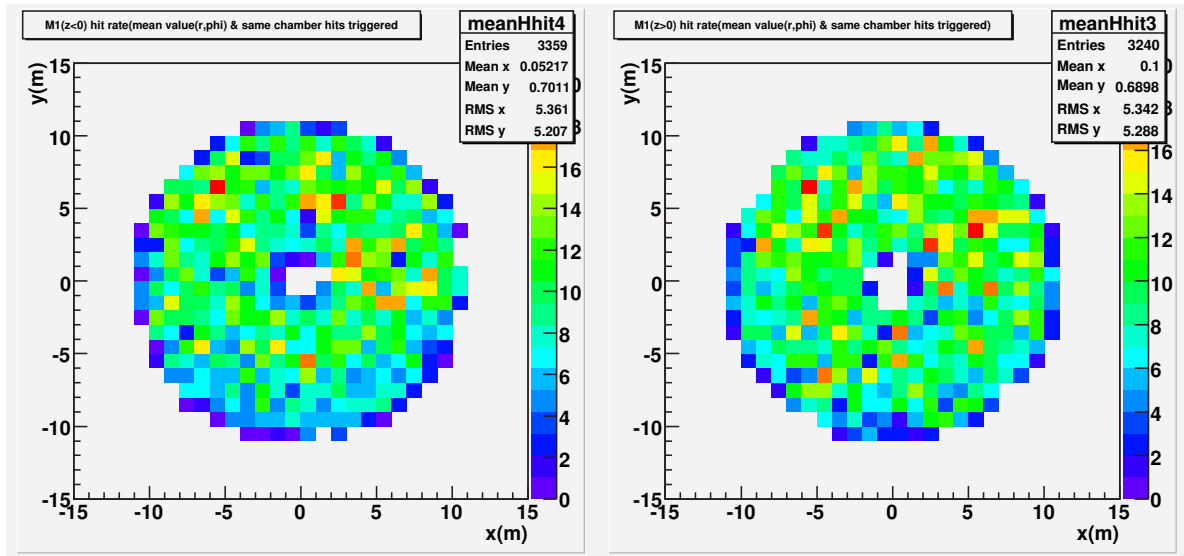


図 4.13 約 14.6 秒間での M1-station のヒット数分布 (14.627s) 左 : M1( $z < 0$ ) 右 : M1( $z > 0$ )

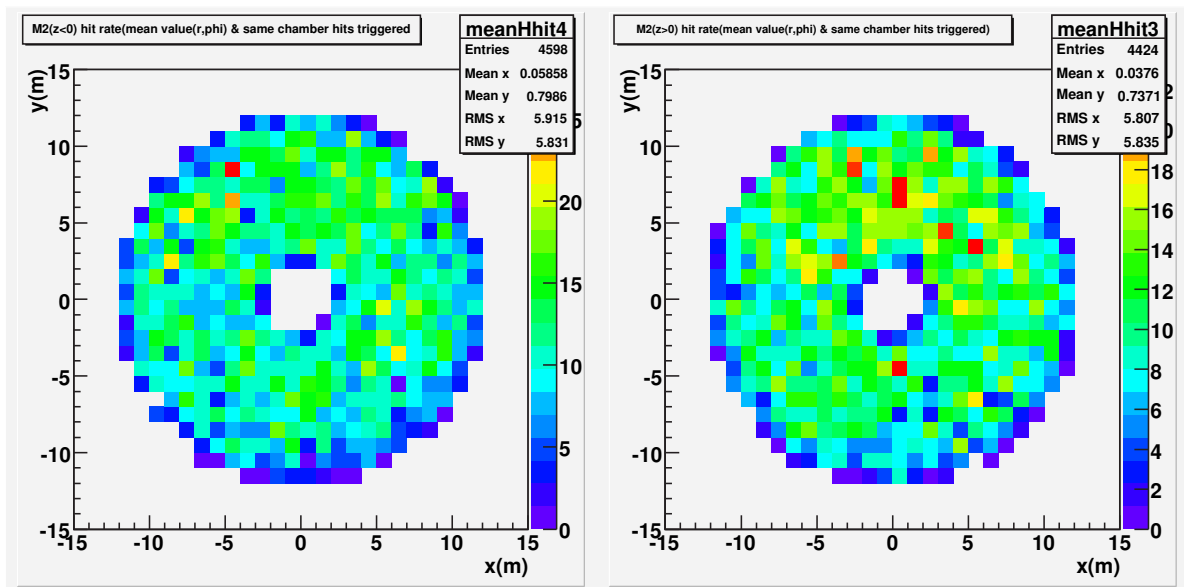


図 4.14 約 14.6 秒間での M2-station のヒット数分布 (14.627s) 左 : M2( $z < 0$ ) 右 : M2( $z > 0$ )

## MDT の各 station におけるチューブ単位のヒットレート

- EM-station におけるヒットレート (Hz)

エンドキャップ部の MDT の station の中で最もヒットが多かった EM-station のヒットレートを考える。EML chamber、EMS chamber それぞれのヒットレートについてチューブ単位で見ていく。これから示す全ての図では横軸がチューブ単位のヒットレート (Hz) を示し、縦軸が今回のシミュレーションによりそのヒットレートで信号が出力されたチューブの本数を示している。ここでヒットのなかった (ヒットレートが 0 である) チューブのデータは除き、ヒットが存在したチューブのみのデータを表示させている。

図 4.15 に EML chamber 全 80(セクター数 16 × チェンバー数 5) 枚のチューブ単位のヒットレート (左)、と EMS chamber 全 80(セクター数 16 × チェンバー数 5) 枚のチューブのヒットレート (右) を示す。

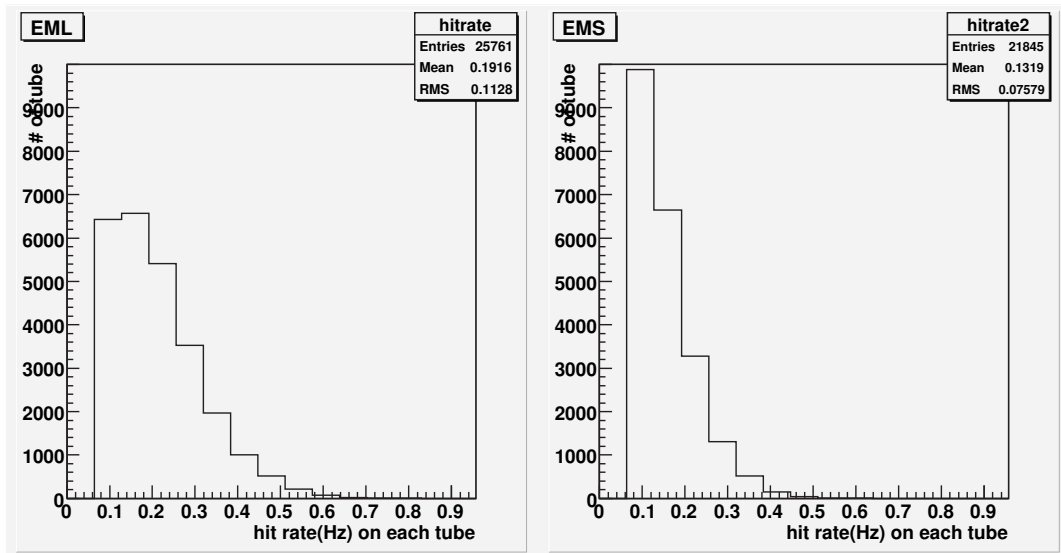


図 4.15 すべての EML chamber(80 枚分、左図)、EMS chamber(80 枚分、右図) のチューブ単位のヒットレート分布 [Hz]

ヒットがなかったチューブ数は EML 4,171 本、EMS 8,875 本

全ての EML chamber(80 枚) のチューブの合計は 29,952 本であり、この中でヒットが 1 つ以上あったチューブ数は 25,781 本であった。少なくとも 1 つ以上ヒットのあったチューブにおけるヒットレートは 0.192Hz で、EML chamber のチューブ全体では 0.165Hz であった。

同様に、全ての EMS chamber(80 枚) のチューブの合計は 30,720 本であり、この中でヒットが 1 つ以上あったチューブ数は 21,845 本であった。少なくとも 1 つ以上ヒットのあったチューブにおけるヒットレートは 0.132Hz で、EMS chamber のチューブ全体では 0.094Hz であった。

図 4.16 に異なる EML chamber 毎にチューブのヒットレート分布を示す。3.2.2 章でも述べたように、EML chamber の種類は 5 つ (ID=1~5) あり、それぞれ 16 枚ずつ存在する。この 16 枚を 1 つの単位として、それぞれの ID 毎にチューブ単位のヒットレート分布を図 4.16 に示す。

これを見ると、EML1 から EML5 に移っていくにつれて高いレートでヒットしているチューブの本数が増えていることがわかる。これはチューブの長さの違いに起因している。同じ EM-station を構成する EMS chamber においてもほぼ同じ傾向がみられた。

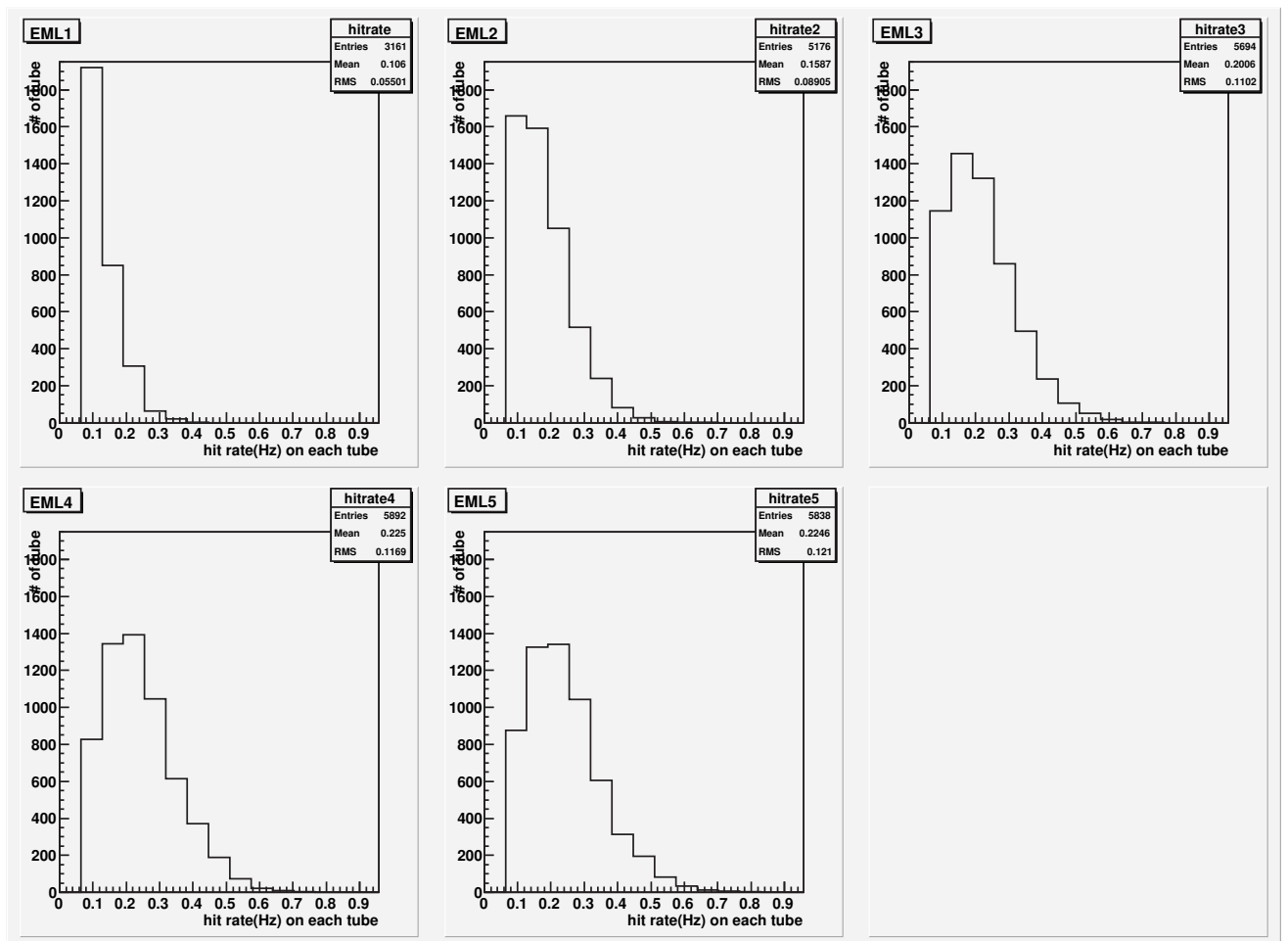


図 4.16 EML chamber の ID 毎のチューブ単位のヒットレート分布 [Hz] EML1(左上), EML2(上中央), EML3(右上), EML4(左下), EML5(下中央)

- **EO-station** におけるヒットレート (Hz)

EM-station の次にヒットレートの高い EO-station について考えていく。3.2.2 章で示したように、EOL, EOS の 1 セクターは異なる 6 種類のチェンバー (ID1~6) で構成されている。

図 4.17 に EOL chamber 全 96(セクター数 16 × チェンバー数 6) 枚のチューブ単位のヒットレート (左)、と EOS chamber 全 96(セクター数 16 × チェンバー数 6) 枚のチューブ単位のヒットレート (右) を示す。

全ての EOL chamber(96 枚) のチューブの合計は 29,952 本であり、この中でヒットが 1 つ以上あったチューブ数は 17,001 本であった。少なくとも 1 つ以上ヒットのあったチューブにおけるヒットレートは 0.109Hz で、EOL chamber のチューブ全体では 0.062Hz であった。

同様に、全ての EOS chamber(96 枚) のチューブの合計は 30,720 本であり、この中でヒットが 1 つ以上あったチューブ数は 8,131 本であった。少なくとも 1 つ以上ヒットのあったチューブにおけるヒットレートは 0.087Hz で、EOS chamber のチューブ全体では 0.023Hz であった。

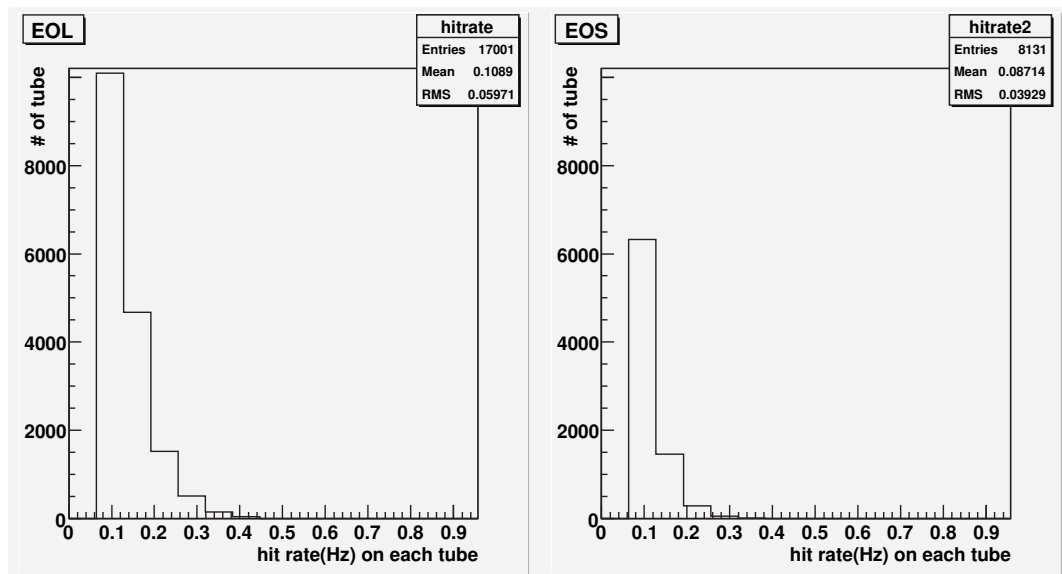


図 4.17 すべての EOL chamber(96 枚、左図)、EOS chamber(96 枚、右図) のチューブ単位のヒットレート分布 [Hz]

ヒットがなかったチューブ数は EOL 12,951 本、EOS 22,589 本

- **EI-station** におけるヒットレート (Hz)

最後に、最もヒットレートの低かった EI-station について考える。3.2.2 章で示したように、EI-station は EM-staion や EO-station とは異なり、綺麗な円盤状ではない。

EIL chamber は全 64(セクター数 16 × チェンバー数 3 + 16) 枚、EIS chamber は全 32(セクター数 16 × チェンバー数 2) 枚 という構成になっていて、図 4.17 に EIL chamber 全 64 枚のチューブのヒットレート(左)、と EIS chamber 全 32 枚のチューブのヒットレート(右)を示す。

全ての EIL chamber(64 枚) のチューブの合計は 17,152 本であり、この中でヒットが 1 つ以上あったチューブ数は 5,966 本であった。少なくとも 1 つ以上ヒットのあったチューブにおけるヒットレートは 0.036Hz で、EOL chamber のチューブ全体では 0.030Hz であった。

同様に、全ての EIS chamber(32 枚) のチューブの合計は 9,984 本であり、この中でヒットが 1 つ以上あったチューブ数は 2,181 本であった。少なくとも 1 つ以上ヒットのあったチューブにおけるヒットレートは 0.024Hz で、EOS chamber のチューブ全体では 0.017Hz であった。

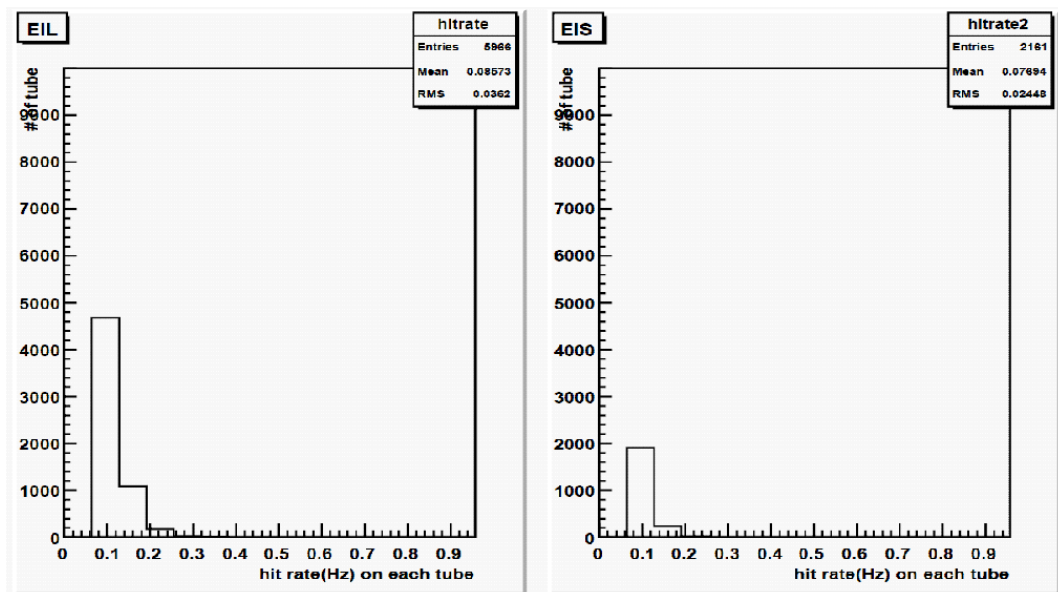


図 4.18 すべての EIL chamber(64 枚、左図)、EIS chamber(32 枚、右図) のチューブ単位のヒットレート分布 [Hz]

ヒットがなかったチューブ数は EIL 11,186 本、EIS 7,803 本

- MDT の各種チェンバーにおけるチューブ単位のヒットレート一覧

表 5 にそれぞれのチェンバーを構成するチューブ単位の平均ヒットレートを示す。

これにより、例えばデータ収集効率ならびにミュオンの飛跡再構成の効率を 100 % と仮定した場合、およそ 1 時間のデータ収集で EML チューブの検出効率を 1 % の精度で検証できるといえる。

| チェンバー名 | 全チューブ数 | チューブ一本当たりの平均ヒットレート (Hz) |
|--------|--------|-------------------------|
| EIL    | 17,152 | 0.030 (0.036)           |
| EIS    | 9,984  | 0.017 (0.024)           |
| EML    | 29,952 | 0.165 (0.192)           |
| EMS    | 30,720 | 0.094 (0.094)           |
| EOL    | 29,952 | 0.062 (0.109)           |
| EOS    | 30,720 | 0.023 (0.087)           |

表 5 MDT の各種チェンバーにおけるチューブ単位のヒットレート一覧

() 内の数字はヒットが 1 つ以上あったチューブ一本当たりの平均ヒットレート

## 5 まとめ

現在標準理論で唯一未発見である Higgs 粒子の探索など、新たな物理を解明すべく LHC が建設中であり、2007 年末に完成が予定されている。LHC に設置される検出器の 1 つである ATLAS 測定器もそれを構成する検出器が順次インストールされていて、完成が近づきつつある。このインストールに平行して、ATLAS 測定器が正常に動作するためにコミッショニングが行われていく。ビームを走らせる環境にない現在は宇宙線ミュオンを用いて、初の実データによるコミッショニングが行われていく予定である。この宇宙線ミュオンによる ATLAS エンドキャップトリガーシステムのコミッショニングの目的は TGC,MDT のパラメータの最適化、LVL1 から LVL2 へのトリガーチェーンの検証などといったことがあげられる。

今回は宇宙線ミュオンを用いたエンドキャップミュオンシステムのコミッショニングについての研究をシミュレーションにより行った。宇宙線ミュオンは実際の実験でのビーム衝突から発生する粒子とは、検出器を通るタイミングも方向も異なってくる。よって、ビーム衝突による本実験用に設定されたトリガー環境を変更して、宇宙線ミュオン用にトリガーできる環境を整える必要があった。

この宇宙線ミュオン用のトリガー条件でシミュレーションを行っていくが、明らかにトリガー条件をみたさない宇宙線ミュオン事象までフルシミュレーションすると作業時間の無駄が多くなる。このため、トリガーのかかる可能性の高い事象だけをフルシミュレーションするために事象選択フィルターという有感領域を作り、シミュレーション時間を約 1/400 に短縮することができた。

シミュレーションにより出てきたデータを基に解析を行い、トリガーレートや、トリガー条件をみたした事象による TGC, MDT のヒットレートを算出した。トリガーレートは 682Hz となり、さらにこのトリガーされた事象は TGC の各 station だけではなく、エンドキャップ部の MDT の全ての station にヒットがあることがわかった。そしてそれぞれのヒット数またはヒットレートを求めることができた。

ここで算出されたレートは TGC, MDT の検出器のパラメータの最適化を行うにあたってのヒットの統計量をためる指標になる。また TGC, MDT 問わず複数の station にヒットがある事象が多いことがわかり、LVL1 から LVL2 へのトリガーチェーンを検証できる可能性が十分あることが示せた。

実際に宇宙線ミュオン事象によるコミッショニングを行うときに、これらの解析データを参考にすることでコミッショニングの効率化が期待できる。



## 参考文献

- [1] ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report, CERN/LHCC/97-22 ATLAS TDR (1997)
- [2] "COSMIC RAYS", Particle Data Group Astrophysics and Cosmology (2002)
- [3] "A Hierarchical Software Identifier Scheme for the ATLAS Muon Spectrometer", ATLAS Muon Communication (2002)
- [4] Phys. Rev. Lett. 51 (1983) 227
- [5] Phys. Lett. 36B (1971) 425
- [6] 信州大学 戸塚真義、修士学位論文「ATLAS 実験ミュオン検出器用トリガーシステムの現実的シミュレータの開発研究」、2002 年
- [7] 神戸大学 大町千尋、修士学位論文「ATLAS 実験におけるシミュレーションを用いたエンドキャップトリガーの性能」、2006 年
- [8] 神戸大学 緒方岳、修士学位論文「ATLAS 実験前後方ミュオントリガー用 Sector Logic の開発」、2006 年
- [9] 神戸大学 喜屋村裕宣、修士学位論文「TGC(Thin Gap Chamber) の中性子に対する放射線耐性の研究」、2006 年

## 謝辞

本研究を行うにあたり、様々な機会を与えて頂くとともに適切なお指導を頂いた蔵重久弥助教授に深く感謝いたします。本研究に参加し、絶えず惜しめない協力と適切な助言を頂いた金谷奈央子助手に深く感謝いたします。高エネルギー研究室の教授として助言を頂いた川越清以教授、幅広い知識を惜しみなく提供して下さった越智敦彦助手、そして本研究を行うなかで身近な立場から補助をしていただいた大町千尋氏、喜家村裕宣氏、及び研究室のみなさまに深く感謝いたします。