

修士学位論文

ATLAS実験におけるレベル2ミューオン トリガー飛跡パターン認識法の改良

2013年2月8日

専攻名 物理学専攻
学籍番号 117s106s
氏名 北村 拓己

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 LHC と ATLAS 実験	2
2.1 LHC	2
2.1.1 LHC の主なパラメータ及び 2012 年の運転状況	3
2.1.2 LHC に設置されている検出器	4
2.2 ATLAS 実験の目指す物理	5
2.2.1 標準模型ヒッグス粒子	5
2.2.2 標準理論の検証	8
2.2.3 超対称性粒子 (SUSY)	8
2.3 ATLAS 検出器	8
2.3.1 内部飛跡検出器	10
2.3.2 カロリメータ	11
2.3.3 ミューオン飛跡検出器	12
2.3.4 超伝導マグネットシステム	14
第 3 章 ミューオントリガーシステム	17
3.1 ミューオントリガーシステム	17
3.2 レベル 2 ミューオントリガー	18
3.3 MuonSA アルゴリズム	18
3.3.1 バレル領域	18
3.3.2 エンドキャップ領域	19
3.4 MuonSA 飛跡パターン認識アルゴリズム	22
第 4 章 レベル 2 ミューオントリガー飛跡パターン認識法の改良	25
4.1 MuonSA 飛跡パターン認識アルゴリズムで起きうる問題点	25
4.1.1 フィットに使用するチューブの誤選択	25
4.1.2 フェイクヒットによるパターン誤認識	26
4.2 MuonSA 飛跡パターン認識アルゴリズムの改良	26
4.2.1 フィットに使用するチューブの選択法の改良	26
4.2.2 フェイクヒットの除去	28
4.3 オフラインミューオン及び性能判定の指標	29
4.3.1 $Z \rightarrow \mu\mu$ Tag and Probe 法	30
4.3.2 性能評価に使用する指標	30
4.4 ロード幅の最適化	32

4.5	実データによる性能評価	32
4.5.1	改良前後での Δ slope 分布の比較	33
4.5.2	飛跡パターン認識アルゴリズムの性能評価まとめ	33
第 5 章	レベル 2 エンドキャップミュオントリガー運動量推定法の改良	36
5.1	ミドルステーションとアウトーステーションのマッチング	36
5.1.1	マッチングアルゴリズムの手順	37
5.1.2	マッチングによる効果	37
5.2	MDT 情報のインナーステーションへの外挿 (Extrapolate)	39
5.2.1	MDT 情報のインナーステーションへの外挿の手順	39
5.2.2	MDT 情報の外挿法による効果	40
5.3	性能評価まとめ	41
第 6 章	まとめ	44
	謝辞	45
	付録 A η 及び p_T 領域で分割した Δslope 分布	46
	参考文献	50

第1章 序論

LHC(Large Hadron Collider)はスイス・ジュネーヴ郊外にある欧州原子核研究機構(CERN)にて稼働している陽子・陽子衝突型加速器である。2009年に稼働を開始し、2012年現在で重心系エネルギー8TeVで運転中である。標準模型で唯一未発見であるヒッグス粒子の探索や、超対称性粒子など標準模型を超える物理の探索が行われている。2012年において、LHCは瞬間ルミノシティ $7.73 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成し、積分ルミノシティで 23.3fb^{-1} を記録した。2013年から二年間の長期シャットダウンの後、設計時の目標とほぼ同じ重心系エネルギー約13TeVでの運転が行われる予定である。

LHCの衝突点の一つに設置されているATLAS検出器は様々な粒子検出器によって構成されている大型汎用粒子検出器である。2012年の運転ではLHCの積分ルミノシティ 23.3fb^{-1} に対し、 21.7fb^{-1} という高い効率でデータ取得に成功した。2012年現在の段階でバンチあたりの陽子数が設計値を超える条件下でデータ取得を行なっている。長期シャットダウン後にはさらにルミノシティの向上や重心系エネルギーの上昇により、二倍以上の頻度でデータ取得が行われる。

ATLAS検出器では記録レートの制限によってこの膨大な量のデータをすべて記録することはできない。そのため、ATLAS実験ではその中から興味のある事象を選別するためにトリガーシステムを用いて事象選別を行っている。トリガーシステムは3段階のステップで構成されており、段階的に事象レートを落としていく。長期シャットダウン後に現状よりもさらに事象レートが上昇すると、検出器からの情報を取捨選択し保存するTDAQ(Trigger and Data Acquisition)システムの処理できる速度を超えてしまう。トリガーは事象レートの削減に対して非常に重要な役割を担っており、これの改良は急務である。

本研究の対象であるレベル2ミューオントリガーシステムはミューオンを対象にしたトリガーシステムの第二段階にあたり、レベル1よりも精度のよい飛跡再構成を行う。トリガーはミューオンの横方向運動量(p_T)をしきい値として事象選別を行う。トリガーでの p_T 分解能が向上するとしきい値をデータ解析で要求する値より近い値まで上げることができる。したがって p_T 分解能の向上はトリガーレートの削減につながる。

本研究ではレベル2ミューオントリガーに対する改良のうち、ミューオン検出器のみの情報で高速に飛跡を概算するMuonSA(Muon Stand Alone)アルゴリズムの改良を行った。飛跡再構成の精度を改善し、トリガーにおける横方向運動量 p_T の分解能を向上させることで、今後さらに増加すると予想されるトリガーレートを削減することを目的とする。また、改良を行ったアルゴリズムに対して実データを用いて性能評価を行った。

本論文では、まず2章でLHC及びATLAS実験の現状とATLAS検出器の構成について述べる。次に3章にて本研究の対象であるミューオントリガーのシステムの詳細について説明する。その後4章、5章において本研究で行ったレベル2ミューオントリガーの飛跡パターン認識アルゴリズムの改良についての詳細を述べる。最後に6章を本論文のまとめとする。

第2章 LHCとATLAS実験

2.1 LHC

LHC(Large Hadron Collider)とはスイス・ジュネーヴ近郊に位置する欧州原子核研究機構(CERN)の陽子陽子衝突型円形加速器である。2000年に実験を終了した大型電子陽電子衝突型加速器LEP(Large Electron Coliider)で使用された地下100mのトンネル内に設置される。周長26.6kmのシンクロトロンリングにピーク値8.33Tの磁場をかけることによって陽子を円形軌道で加速する。衝突時による重心系エネルギーは2012年で最大8TeVであり、最大デザイン値は14TeVに達する。また瞬間最高ルミノシティは $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の予定である。テラスケールのエネルギー領域における新たな物理現象が期待される。

加速時に発生するシンクロトロン放射によるエネルギー損失は $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2} = E/mc^2$ ($\beta = v/c$)の4乗に比例するため、電子の約2000倍の質量をもつ陽子では、エネルギー損失は非常に小さい。したがってLHCは重心系エネルギー14TeVというLEPよりも遥かに高いエネルギーは実現することが可能である。一方で、陽子衝突は散乱断面積が大きく、その構成粒子であるクォークやグルーオン同士の散乱によるジェット等の背景事象(バックグラウンド)を非常に多く生成する。また陽子衝突を25ns間隔という高頻度で起こすためバックグラウンドの量も膨大になる。したがってLHCに設置されている検出器は入射粒子数が高頻度な環境に耐え、かつ効率よく目的の物理事象の選別が行えることを要請される。

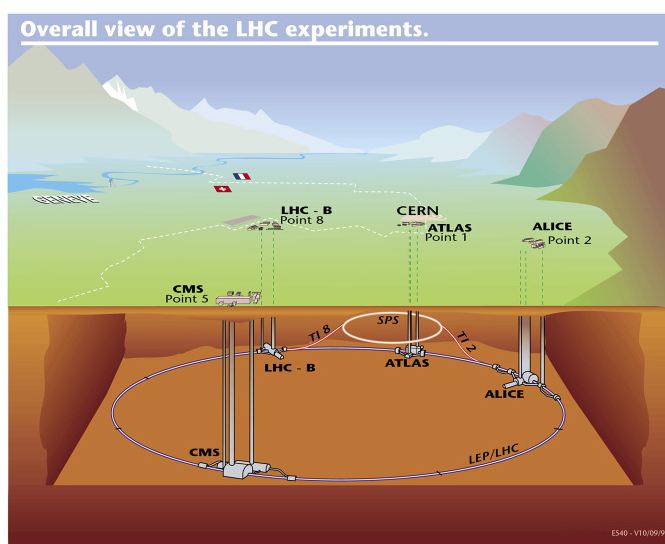


図 2.1: LHC の全体図

2.1.1 LHC の主なパラメータ及び 2012 年の運転状況

LHC には 4 つの衝突点があり、 1.15×10^{11} 個の陽子を含むバンチと呼ばれる状態のビームを各衝突点で衝突させる。衝突頻度は 40.08MHz であり、瞬間最高ルミノシティが $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の際には 1 つのバンチ当たり平均 23 回の陽子衝突が予想される。その他 LHC の主要なパラメータを表 2.1 に示す。

表 2.1: LHC の主なパラメータ (デザイン値)[1]

リング周長	26.66km	重心系エネルギー	14TeV
瞬間最高ルミノシティ	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	ルミノシティ寿命	15 時間
バンチ間隔	24.95ns	1 バンチあたりの陽子数	1.15×10^{11}
バンチ数	2835 個	バンチ衝突あたりの陽子衝突数	23 個
衝突点のビーム半径	$16 \mu\text{m}$	衝突角度	$200 \mu\text{rad}$

2012 年の LHC は重心系エネルギー 8TeV で運転を行った。瞬間最高ルミノシティは $7.73 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を記録し、2012 年全体で積分ルミノシティで 23.3fb^{-1} のデータ量を供給した。このうち ATLAS では 21.7fb^{-1} のデータ取得に成功した。図 2.2 は一日あたりの瞬間最高ルミノシティの推移を表している。また図 2.3 は 2012 年 3 月 26 日から 2012 年 12 月 17 日までの積分ルミノシティの推移を示している。

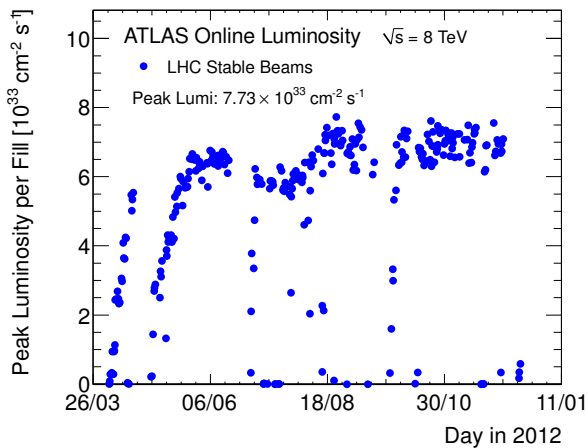


図 2.2: 2012 年の最高ルミノシティの遷移 [2]

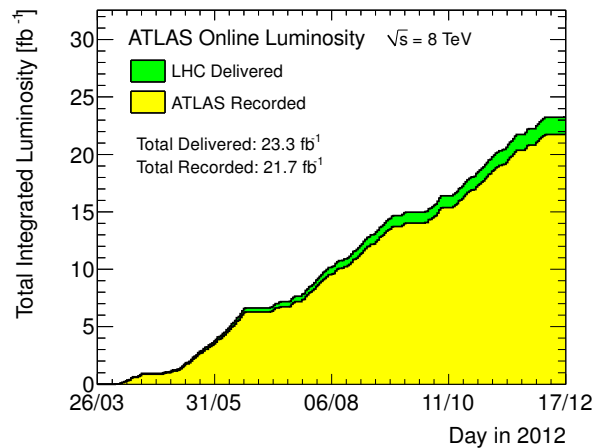


図 2.3: 2012 年の積分ルミノシティの遷移 [2]

2.1.2 LHC に設置されている検出器

LHC には 4 つの衝突点にそれぞれ ATLAS(A Toroidal LHC ApparatuS)、CMS(Compact Muon Solenoid)、ALICE(A Large Ion Collider Experiment)、LHCb(Large Hadron Collider Beauty) と呼ばれる検出器が設置されている。ATLAS 及び CMS はヒッグス粒子探索、標準模型の精密検証、超対称性粒子など標準模型を超える物理の探索等を目的とした汎用粒子検出器である。なお ATLAS 検出器の詳細については 2.3 で説明する。ALICE 検出器は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) の究明を目的とした、重イオン衝突に特化した検出器である。LHCb は 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る、標準模型を超える物理の探索を目的とする。

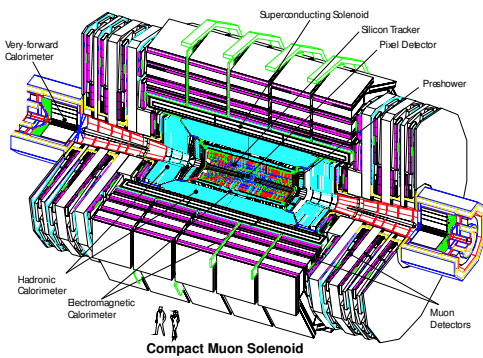


図 2.4: CMS 検出器

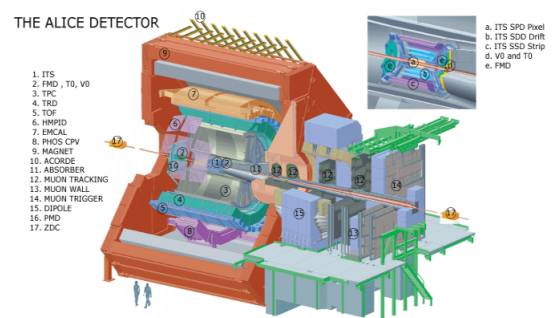


図 2.5: ALICE 検出器

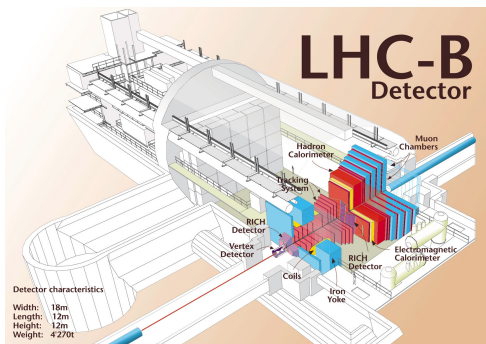


図 2.6: LHC 検出器

2.2 ATLAS 実験の目指す物理

ATLAS 実験は主に標準模型ヒッグス粒子、超対称性粒子の発見などを目的としている。ここではこれらの物理の概要について述べる。

2.2.1 標準模型ヒッグス粒子

標準模型とは素粒子とその相互作用を記述する理論であり現在の素粒子物理学の基礎となっている。この理論は数多くの実験によって精密に検証されている。標準模型はクォーク、レプトン、ゲージボソン、ヒッグス場で構成されており、ヒッグス粒子以外は実験的に発見されている。ヒッグス場は他の粒子に質量を与えると考えられる。ヒッグス粒子はヒッグス場の振動の自由度から生成される粒子であり、ヒッグス粒子の発見は万物の質量起源の解明につながると期待されている。ヒッグス粒子の質量は LEP 実験により 114GeV 以上であることが分かっており、また理論的な制約によって 1TeV 以下であると考えられている。ATLAS 実験ではこれらの予想される全質量領域で標準模型ヒッグス粒子の探索が可能である。

ヒッグス粒子の生成過程

ヒッグス粒子 (H) の結合定数は質量と比例するため、トップクォークや W 粒子、 Z 粒子など質量の大きい粒子と強く相互作用すると考えられる。LHC では主に以下の 4 つの生成過程を予想している。これらの 4 つの生成過程のファインマンダイアグラムと生成断面積をそれぞれ図 2.7、図 2.8 に示す。

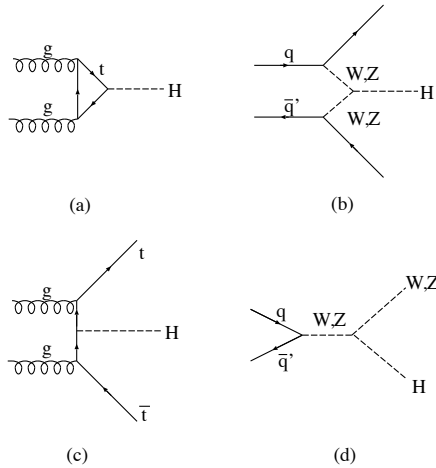


図 2.7: ヒッグス粒子の生成過程

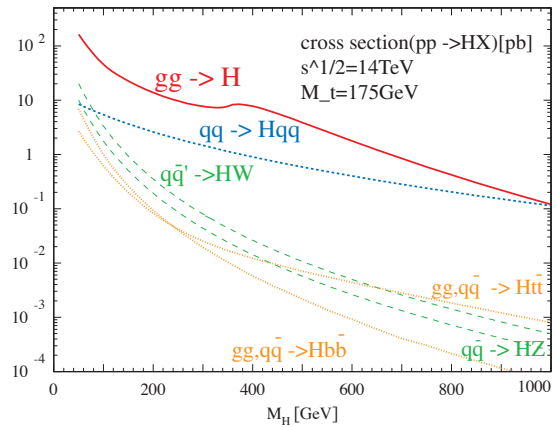


図 2.8: ヒッグス粒子の生成断面積

- $gg \rightarrow H$ (グルーオン融合(a))

トップクォークやボトムクォークのループを介した生成過程で、最も大きな生成断面積を占める。その反面、ヒッグス粒子の崩壊に伴って生成される粒子以外に反応を特徴づける粒子が存在せず、バックグラウンドとの選別が困難である。したがって ATLAS 実験では $H \rightarrow \gamma\gamma$ 、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ のようなヒッグス粒子の質量再構成が可能な崩壊が主な解析チャンネルである。

- $qq \rightarrow qqH$ (弱ボソン融合(b))
2つのクォークから放出されたベージボソンからヒッグス粒子が生成される過程である。生成断面積は比較的大きな値であり、また散乱角前方にクォーク由来のジェットが2本観測されるため、事象選別が比較的行い易い。
- $gg \rightarrow (t\bar{t}/b\bar{b}) H(t/b \text{ 随伴生成}(c))$
グルーオンから対生成されたトップ/ボトムクォークの対消滅によってヒッグス粒子が生成される過程。終状態にトップ/ボトムクォークによるジェットを伴う。
- $qq \rightarrow (W/Z) H(W/Z \text{ 随伴生成}(d))$
クォークの対消滅によって生成されたゲージボソンからヒッグス粒子が放出される過程。生成断面積は大きくないが終状態にゲージボソンが観測されるという特徴があり、事象選別は行い易い。

ヒッグス粒子の崩壊モード

ヒッグス粒子の崩壊モードはヒッグス粒子の質量 M_H に依存しており、各質量領域で特徴的な崩壊モードを有する。以下にヒッグス粒子の主な崩壊モードを示す。また図 2.9 はヒッグス粒子の質量に対する崩壊分岐比を表す。

- $H \rightarrow \tau\tau (M_H < 150\text{GeV})$
ヒッグス粒子が軽い場合に有効なモードであり、 $\gamma\gamma$ よりも崩壊分岐比が高い。弱ボソン融合と組み合わせることでバックグラウンドと区別することが可能である。また τ の崩壊にニュートリノを伴うため横方向損失エネルギー E_T^{miss} の精密測定が重要である。
- $H \rightarrow \gamma\gamma (M_H < 150\text{GeV})$
 $M_H < 150\text{GeV}$ の領域では $b\bar{b}$ 、 $c\bar{c}$ への崩壊が支配的であるが、これらの崩壊は陽子衝突による QCD バックグラウンドとの区別が困難である。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ の観測によって不変質量 $M_{\gamma\gamma}$ を再構成することによりヒッグス粒子探索を行う。したがって、電磁カロリメータの測定精度が重要となる。
- $H \rightarrow WW \rightarrow ll (150\text{GeV} < M_H < 180\text{GeV})$
この質量領域では 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ヒッグス粒子の質量再構成は行えない。したがって2つのレプトンの横方向運動量 p_T と2つのニュートリノ由来の E_T^{miss} から横方向質量 M_T を測定しヒッグス粒子の探索を行う。
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l (180\text{GeV} < M_H < 800\text{GeV})$
 M_H が比較的大きな場合に有効な崩壊モードである。バックグラウンドが少なく、4つのレプトンからヒッグス粒子の質量を再構成することが可能である。
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu (400\text{GeV} < M_H)$
 $M_H > 400\text{GeV}$ の領域ではこの崩壊モードの崩壊分岐比は $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ の6倍である。終状態の2つのニュートリノに対しては不変質量は再構成できないため、 E_T^{miss} の精密測定が重要である。
- $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj, H \rightarrow ZZ \rightarrow lljj (600\text{GeV} < M_H)$
この質量領域では $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ と比較して $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ は150倍、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow lljj$ は20

倍もの崩壊分岐比を有する。弱ボソン融合と組み合わせることでバックグラウンドと区別可能である。

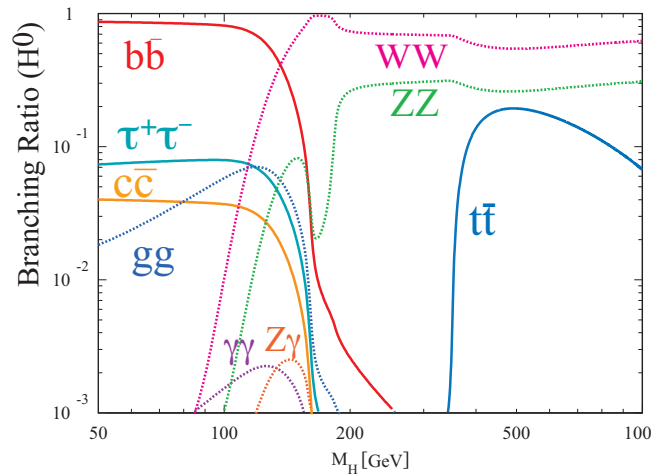


図 2.9: ヒッグス粒子の崩壊分岐比

2012 年におけるヒッグス探索の現状

ここでは2012年のヒッグス粒子探索の現状について述べる。図2.10はヒッグス粒子の質量に対する観測によって求めたヒッグス粒子の生成断面積の95%信頼度における上限値(σ)と標準模型の予想による生成断面積(σ_{SM})の比($\mu = \sigma/\sigma_{SM}$)の相関を表す。この μ の値が1以下の領域は標準模型ヒッグス粒子の存在が排除されたことを意味する。黒実線 (Observed) は実際の観測結果による値を示し、黒点線はヒッグス粒子が存在しない場合の理論予想値を示している。ATLASでの2012年の結果では、 $110\text{GeV} < M_H < 582\text{GeV}$ の探索領域に対して $111\text{GeV} < M_H < 122\text{GeV}$ 、 $131\text{GeV} < M_H < 559\text{GeV}$ の領域を95%信頼度で排除している。 $113\text{GeV} < M_H < 114\text{GeV}$ 、 $117\text{GeV} < M_H < 121\text{GeV}$ 、 $132\text{GeV} < M_H < 527\text{GeV}$ においては信頼度99%でヒッグス粒子の存在を排除している。また、図2.13はヒッグス粒子の質量に対するローカルp値の分布である。 $M_H = 126.5\text{GeV}$ でp値が 6σ となっており、これは新粒子発見の基準である 5σ を超えている。この結果は何らかの未知の粒子の発見を示している。

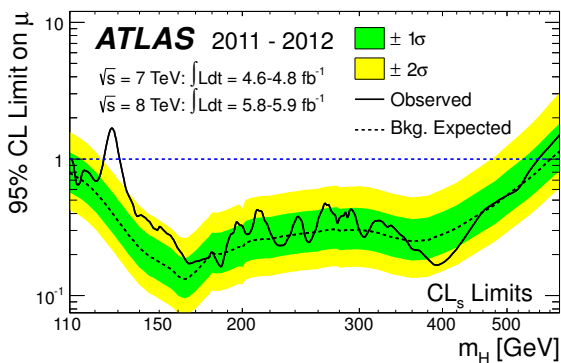


図 2.10: ヒッグス粒子の質量排除領域 [3]

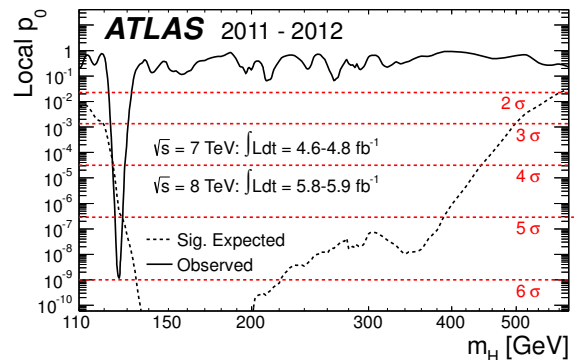


図 2.11: local p-value[3]

2.2.2 標準理論の検証

2.2.1 で述べた標準模型におけるヒッグス粒子など、新粒子探索において標準理論の精密な検証は必須である。ヒッグス粒子などの事象に対するバックグラウンドの理解には、標準理論を理解することが必要であり、そのため標準模型粒子の生成断面積の精密測定などが行われている。図 2.12 は各標準模型粒子に対する生成断面積の観測値と理論予想値を示す。現在、観測値と理論予想値の矛盾は発見されておらず、非常に良い精度で一致を示している。

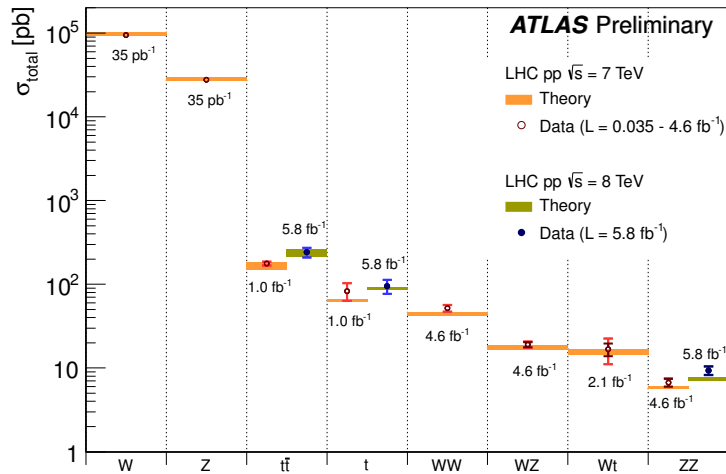


図 2.12: 各標準模型粒子の生成断面積 [4]

2.2.3 超対称性粒子 (SUSY)

超対称性粒子 (SUSY) はボソンとフェルミオンが対をなして存在するものである。つまり、現在ボソン/フェルミオンとして知られている粒子に対して、スピンの $1/2$ だけ異なるスーパーパートナーと呼ばれる超対称性粒子の存在を预言する。もしこの理論が正しいものであれば、LHC では強い相互作用をするスクォークやグルイーノ対が大量に生成され、超対称性粒子が発見できる可能性がある。超対称性粒子の主な崩壊モードの終状態にはレプトンが含まれており、レプトンの精密測定は超対称性粒子の物理探索において重要な役割を担っている。

2.3 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は直径 22m、全長 44m の円筒形であり、総重量はおよそ 7000t になる汎用粒子検出器である。図 2.13 に ATLAS 検出器の全体図を示す。主に各粒子の透過性の差異を利用して粒子識別を行う。検出器の内側から内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミューオン検出器、の順に設置されており、検出器間には超伝導マグネットが設置されている。

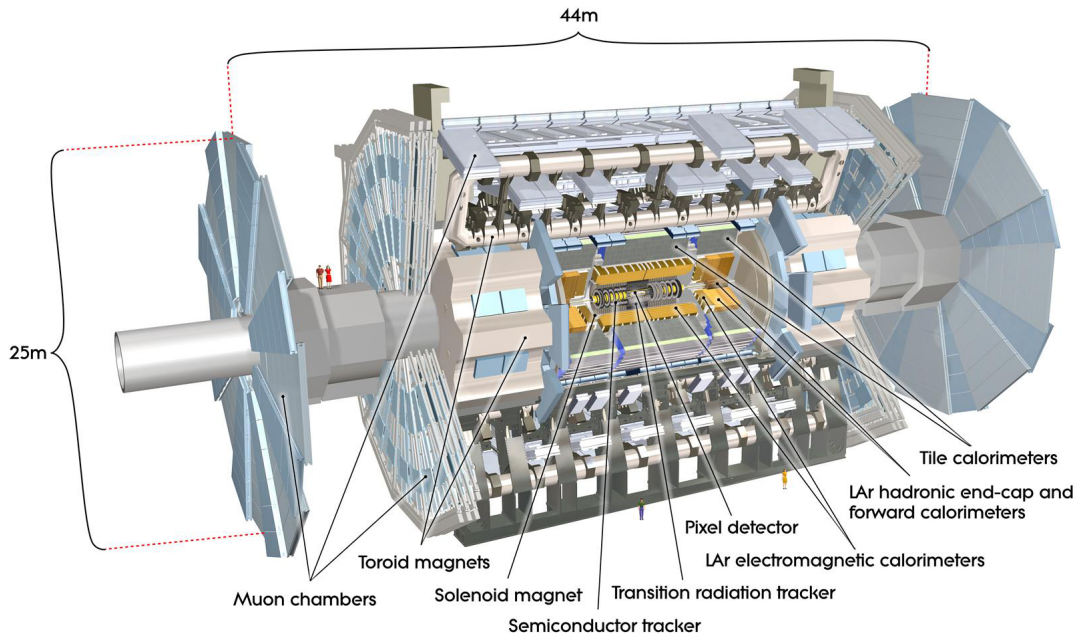


図 2.13: ATLAS 検出器

ATLAS 検出器の座標系はビーム軸を z 軸と定義し、 z 軸と直交する面内で LHC ビームリングの中心方向を x 軸、天頂方向を y 軸とする。この際、衝突点に対して $+z$ 方向を A-Side、 $-z$ 方向を C-Side と呼ぶ。また円筒座標系において (r, θ, ϕ) を図 2.15 のように定義する。加えて擬ラピディティ $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$ を定義する。ハドロンコライダーでは散乱断面積が η に対してほぼ一定の値となる。また円筒の筒にあたる $|\eta| \leq 1.05$ の領域をバレル部、円筒の蓋にあたる $|\eta| > 1.05$ の領域をエンドキャップ部と定義する。以下より各検出器についての概要を説明する。

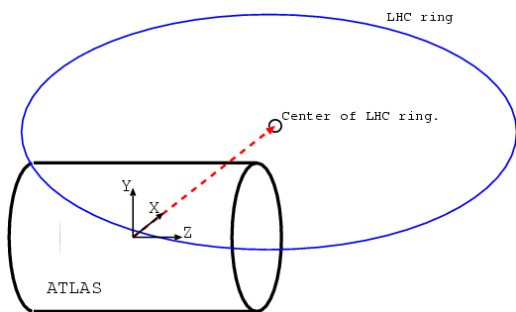


図 2.14: ATLAS 検出器の座標系

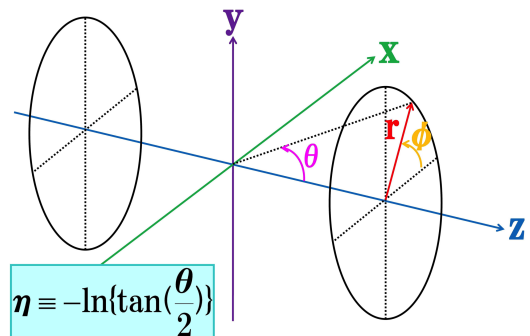


図 2.15: ATLAS 検出器の座標系 (円筒座標系)

2.3.1 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器(図2.16)はビーム衝突点に最も近い位置に設置され、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。検出器は大量の放射線下に置かれているため、高い放射線耐性が要求される。内部検出器は内側からピクセル検出器(Pixel)、シリコン検出器(Semi-Conductor Tracker(SCT))、遷移輻射検出器(Transition Radiation Tracker(TRT))の3つの検出器で構成されている。

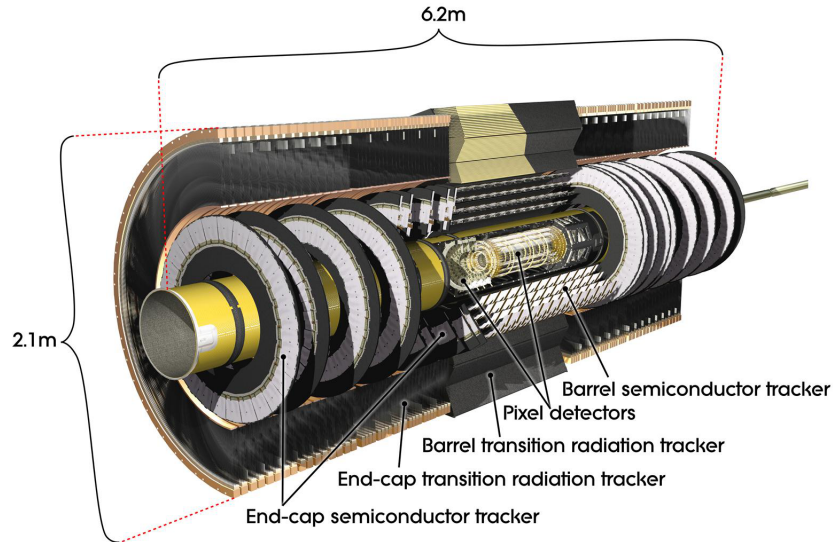


図 2.16: 内部飛跡検出器

ピクセル検出器 (Pixel)

ピクセル検出器は最内層にある半導体検出器である。1ピクセルが $50\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ または $50\mu\text{m} \times 600\mu\text{m}$ の大きさとなっており、1つのモジュールは47,268個のピクセルで構成されている。総チャンネル数は8040万チャンネルに達する。位置分解能は非常に高く、 r - ϕ 方向で $10\mu\text{m}$ 、 z 方向では $115\mu\text{m}$ である。

シリコン検出器 (SCT)

シリコンマイクロストリップと称され、ピクセル検出器の外側に設置されている。シリコンセンサーを $80\mu\text{m}$ 間隔で並べた半導体検出器であり、1つのSCTモジュールはシリコンセンサー2層を 40mrad ずらして設置することによって2次元読み出しが可能になっている。SCTは4088モジュールで構成されている。位置分解能は r - ϕ 方向で $17\mu\text{m}$ 、 z 方向では $580\mu\text{m}$ である。

遷移輻射検出器 (TRT)

TRTは半径4mmのドリフトストローチューブ検出器を積層することで構成されている。シリコン検出器の外側に設置されており、遷移輻射の原理を用いてより精密な飛跡測定を行うことが目的である。

遷移輻射とは荷電粒子が誘電率の異なる2つの物質を通過する際に、境界面で電磁的な放射をする現象であり、放射されるエネルギーは荷電粒子のエネルギーと質量の比 $\gamma = E/m$ に比例する。これによって電子とその他の荷電粒子の識別が可能になる。バレル部ではビーム軸と平行に52,444本のストローチューブが73層あり、エンドキャップ部では径方向に122,880本のチューブが160層並べられている。位置情報は r - ϕ 方向にのみ有し、分解能は $170\mu\text{m}$ である。

2.3.2 カロリメータ

カロリメータは電子や γ 、ジェットなどのエネルギー及び位置測定を目的とする。有感領域は $|\eta| < 4.9$ の領域であり電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータで構成されている。図2.17はカロリメータの全体図を表す。

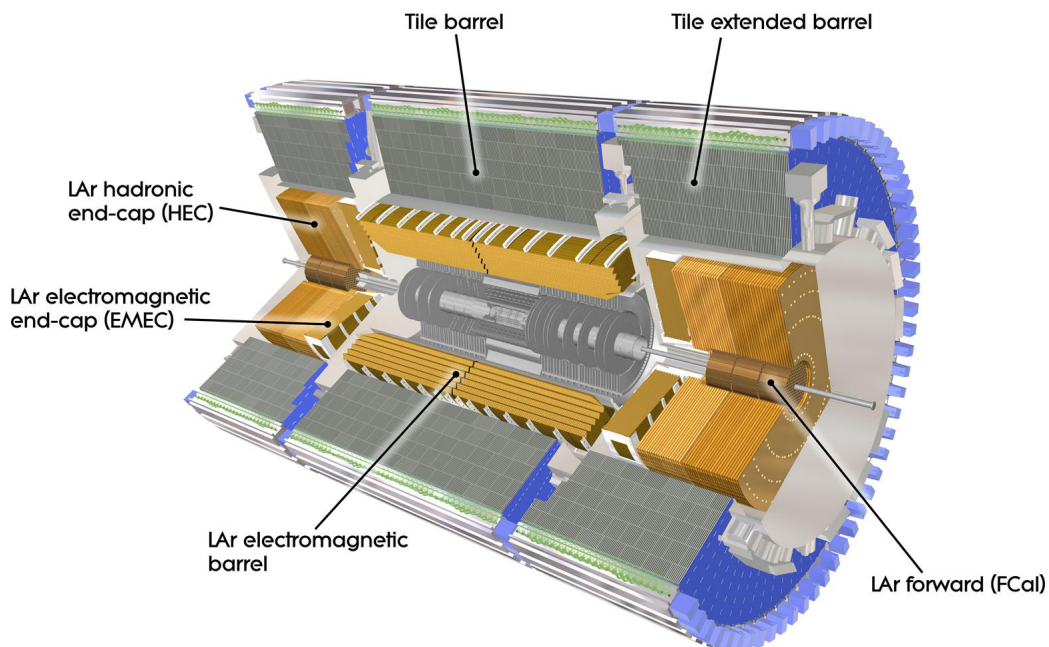


図 2.17: カロリメータ全体図

電磁カロリメータ

電磁カロリメータはアコーディオン構造の鉛の吸収体と液体アルゴン (LAr) から構成されている。超伝導ソレノイドマグネットの外側に設置されており、電子及び光子はここで電磁シャワーを発生し、エネルギーを失う。有感領域は $|\eta| < 3.2$ の領域であり、エネルギー分解能は式 2.1 で与えられる。

$$\frac{\Delta\sigma_E}{E} = \frac{9.5\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\% \quad (2.1)$$

式 2.1 での第 1 項は電子数 N をエネルギーに換算した場合の統計的な揺らぎを表し、第 2 項は校正精度や温度の揺らぎなどによる定数項である。

ハドロンカロリメータ

電磁カロリメータの外側に設置されており、ハドロンはここでエネルギーを失う。ハドロンカロリメータはジェットの方法の再構成及びエネルギー測定を目的とする。バレル部 ($|\eta| < 1.7$) では鉄の吸収体とプラスチックシンチレータからなるタイルカロリメータが用いられ、エンドキャップ部 ($1.5 < |\eta| < 3.2$) では銅の吸収体と LAr シンチレータからなる LAr ハドロンカロリメータが用いられる。単一のハドロン粒子に対するエネルギー分解能は式 3.2 で示される。

$$\frac{\Delta\sigma_E}{E} = \frac{52.3\%}{\sqrt{E}} \oplus 1.7\%(\text{バレル}), \quad \frac{\Delta\sigma_E}{E} = \frac{62.4\%}{\sqrt{E}} \oplus 3.6\%(\text{エンドキャップ}) \quad (2.2)$$

また、 $3.1 < |\eta| < 4.9$ の領域には電子、光子とハドロン両方に用いられる LAr 前方カロリメータが設置されている。

2.3.3 ミューオン飛跡検出器

ミューオン検出器は 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。ミューオンは物質透過力が強く、比較的長寿命 ($2.2\mu\text{s}$) であるため、最も外側の検出器であるミューオン検出器に到達する。ミューオン検出器は位置の精密測定を行う Monitored Drift Tube(MDT)、Cathod Strip Chamber(CSC) とトリガー発行を担う Resistive Plate Chamber(RPC)、Thin Gap Chamber(TGC) で構成されている (図 2.18)。ミューオン検出器での p_T 分解能は 1TeV のミューオンに対して $\sigma_{p_T}/p_T \sim 7\%$ である。またバレル部では大きさの異なる 2 種類のチェンバーがそれぞれ 8 枚ずつ入れ子構造に配置されており、それぞれ Large 検出器、Small 検出器と呼ばれる。検出器を支えるフレーム部分は構造上特殊な形状の検出器 (図 2.19 のセクター 11、12、14、15) を用いている。これらの検出器は Large Special 検出器、Small Special 検出器と呼ばれている。

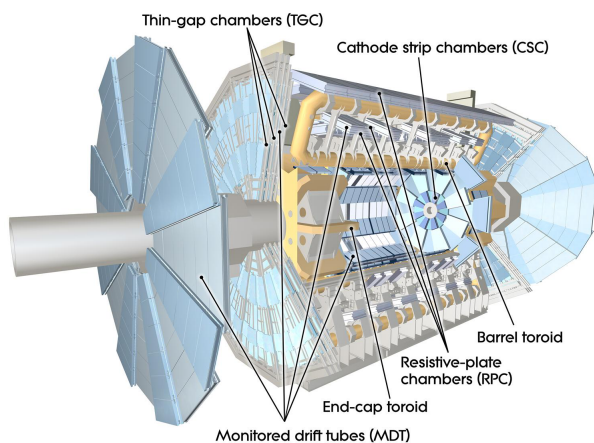


図 2.18: ミューオン検出器の全体図

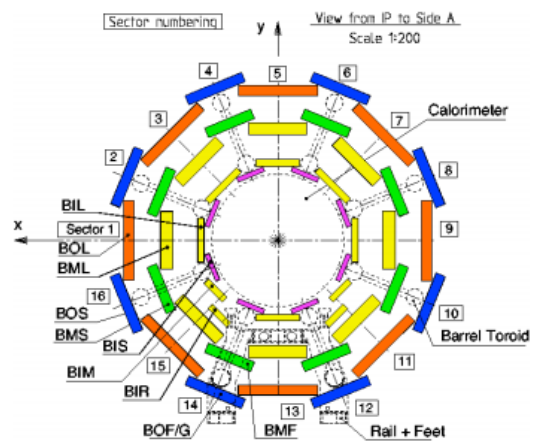


図 2.19: ミューオン検出器の断面図 (x - y 平面)

セクター 11、12、14、15 の部分が Special 検出器である。

Monitored Drift Tube(MDT)

MDTは $|\eta| < 2.7$ の領域に有感領域を持ち、バレルとエンドキャップ両方で3層(3ステーション)存在する(バレルの例は図2.19参照)。1つのMDTチェンバー(ステーション)はガスとワイヤーのドリフトチューブを積層した構造(図2.20)であり、バレル部では各ステーションにおいて6層のドリフトチューブ、エンドキャップ部では最内層(インナーステーション)では8層、その他の層(ミドルステーション、アウトーステーション)では6層で構成されている。MDTは直径約30mmのカソードチューブに直径約50 μm のアノードワイヤーが張られている。チューブ内のガスは $\text{Ar} : \text{CO}_2 = 93 : 3$ の混合比率のものを使用し、3気圧で封入されている。印加電圧は3080Vで最大ドリフト時間は700ナノ秒である。チューブはR軸に垂直、 ϕ 軸に平行に並べられているため、各チューブの平均位置分解能はバレル領域ではz方向、エンドキャップ領域ではR方向で80 μm である。荷電粒子がチューブ内を通過することでチューブ内ガスが電離を起こす。これらの電離電子はアノードワイヤーに向かってドリフトする。これに要した時間を距離に換算することでドリフト距離を計算し、飛跡測定に用いる。各ステーションで最大6層(エンドキャップでは8層)のチューブのドリフト距離を使用し飛跡の断片を再構成することによって35 μm (z/R座標)の高い位置分解能を実現する。

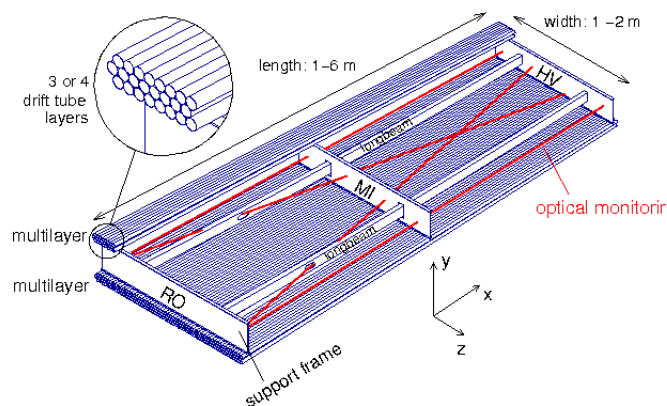


図 2.20: MDT の構造

Cathod Strip Chamber(CSC)

CSCは $2.0 < |\eta| < 2.7$ に感度を持つMulti Wire Proportional Chamber(MWPC)の一種である。検出器前方ではミュオンのレートが高く、MDTの読み出し速度(150Hz/cm²)では対応できないためCSCを用いて測定を行う。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である。印加電圧は1900Vであり、陰極ワイヤーの間隔は30 μm 、ドリフト時間は30ナノ秒以下である。位置分解能はR方向で40 μm で読み出し速度は1000Hz/cm²とMDTより高速読み出しが可能である。

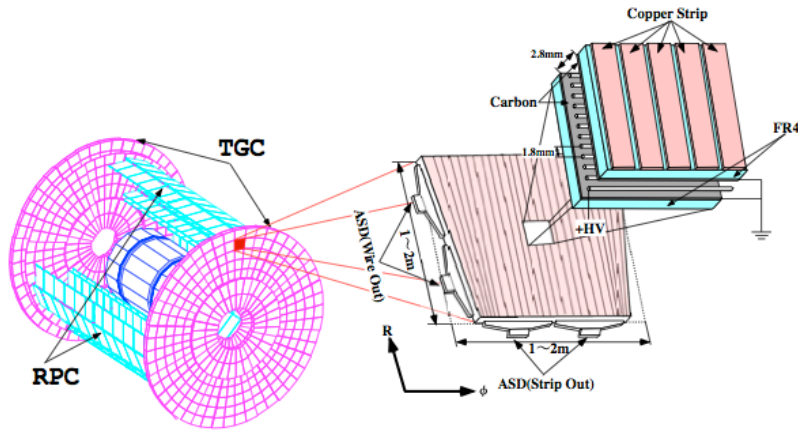


図 2.22: TGC の配置と構造図

超伝導ソレノイドマグネット

超伝導ソレノイドマグネットは内部飛跡検出器において荷電粒子の横方向運動量 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 方向の全長は 5.3m、直径 2.4m、径方向の厚さ 45cm の円筒形をしており、円筒内部 z 方向に最大約 2T の磁束密度を与える。

超伝導トロイドマグネット

超伝導トロイドマグネットはバレル部とエンドキャップ部で別れて存在し、ミュオン¹の横方向運動量 p_T の測定を目的としている。バレル部超伝導トロイドマグネットはカロリメータを覆うように設置されており、全長 25.3m、内径 9.4m、外径 20.1m で ϕ 方向に 0.5T の磁束密度を与える。エンドキャップ部超伝導トロイドマグネットは最内層のミュオン検出器の外側に設置されている。直径 5.0m、内径 1.65m、外径 10.7m でバレル部と同様 ϕ 方向に 1T の磁束密度を与える。図 2.23 は z - y 平面及び z - x 平面での磁場分布を示している。

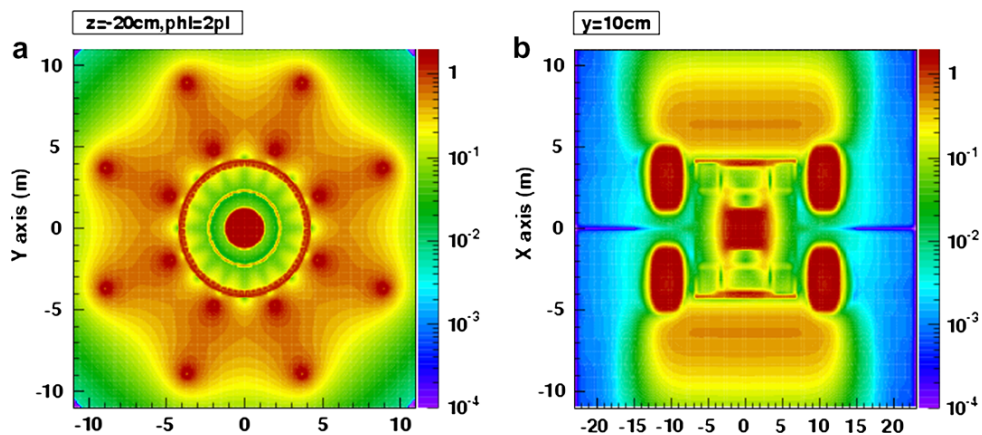


図 2.23: z - y 平面及び z - x 平面での磁場分布 [5]

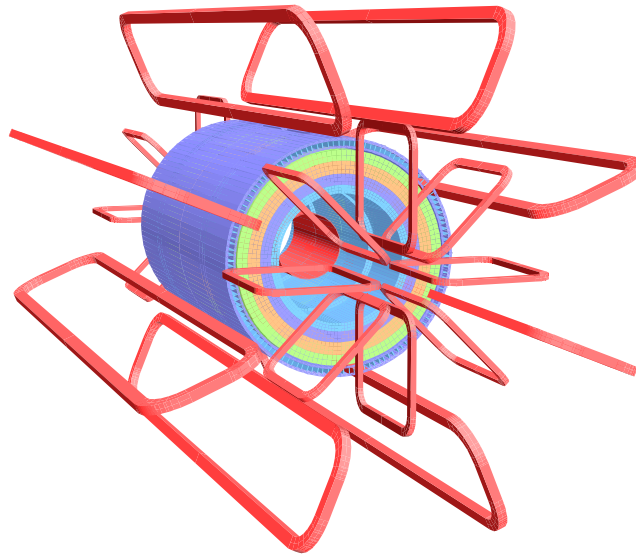


図 2.24: ATLAS マグネットシステム概観図 [5]

第3章 ミューオントリガーシステム

3.1 ミューオントリガーシステム

LHC 加速器による高ルミノシティ時では、1回のバンチ交差あたり平均 23 回の陽子陽子衝突が予想される。バンチ交差のレートは 40MHz であるので ATLAS 検出器の衝突点で発生する陽子陽子衝突のレートは 1GHz に及ぶ。これらの多量なイベントの中から目的とする物理事象のイベントを同定する必要がある。トリガーシステムは目的とする物理事象を含むイベントのみを収集するための判断をオンラインで行う。DAQ システムに送られるイベントレートはデータストレージ容量の制約及び計算機の能力の制約で $O(400\text{Hz}-1\text{kHz})$ にまで落とす必要があり、同時に ATLAS 実験で興味のある物理事象の信号領域において高い検出効率を持つことが要求される。ATLAS 実験のトリガーシステムはハードウェアで高速

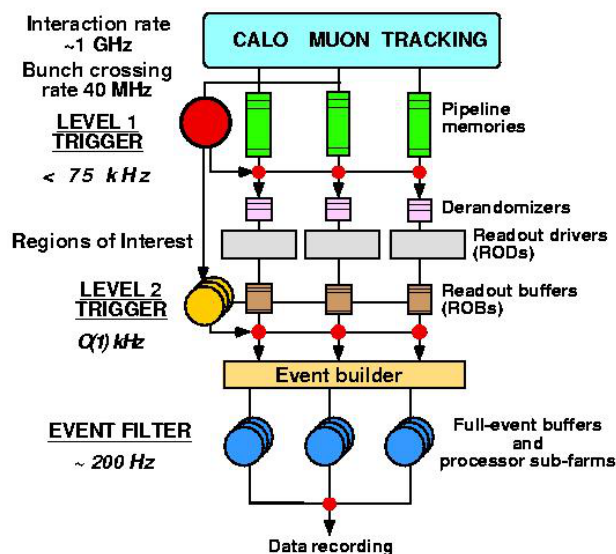


図 3.1: ATLAS トリガーシステム

処理を行うレベル 1、ソフトウェアを用いて詳細な事象再構成を行うレベル 2、オフラインとほぼ同等の再構成が行われるイベントフィルターの三段階で構成されており、段階的にイベントレートを落としていく。このうちソフトウェアを用いるレベル 2 とイベントフィルターをハイレベルトリガー (HLT) と呼ぶ。各々のトリガーは前段のトリガー条件を満たしたイベントにのみ働き、必要に応じてさらなる選別を行う (図 3.1)。レベル 1 トリガーではハードウェアを用いて高い p_T のミュオン、電子、光子、ハドロンジェット、 τ レプトンなどの領域を探す。これらの信号が観測された $(\eta-\phi)$ 平面での領域を Region of Interest (RoI) と呼ぶ。レベル 1 ではイベントレートは陽子の衝突頻度である 1GHz から 75kHz まで

落とす。また、バンチ交差の頻度から 2.5 マイクロ秒以内に RoI を決定する必要がある。

レベル 2 トリガーではレベル 1 トリガー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短い演算時間で精度のよい選別を行う。レベル 2 ではソフトウェアを用い、レートを 3.5kHz まで削減する。

イベントフィルターは各検出器の完全な位置情報、トリガー条件を基にほぼオフライン解析と同等のアルゴリズムを用いて最終的な判定が行われる。物理解析に用いるものとほぼ同等の事象選別を行うことでイベントレートを 200Hz 程度まで削減する。

本研究に関連するレベル 2 ミューオントリガーの詳細を次節で説明する。

3.2 レベル 2 ミューオントリガー

レベル 2 ミューオントリガーは三段階のステップで p_T の再構成を行う。第一段階としてスタンドアロン (Stand-Alone) ミューオントリガーアルゴリズム MuonSA で、レベル 1 RoI 情報周辺のミュオン検出器の情報のみを用いて p_T 計算を行う。MuonSA で計算された p_T を用いて事象選別が行われた後、第二段階である MuonCB に情報を渡す。MuonCB はコンバインド (Combined) ミューオントリガーアルゴリズムの意で、MuonSA の情報と内部飛跡検出器の情報を組み合わせ、より高精度の p_T を計算する。また最終的に第三段階である muIso アルゴリズムによってミュオンの飛跡の周辺に他の飛跡が存在しないことを要求することも可能であり、これによってハドロンジェット由来のミュオンバックグラウンドを除去する。

本研究では三段階あるレベル 2 ミューオントリガーアルゴリズムのうち、第一段階にあたる MuonSA アルゴリズムについて改良を行った。次節にて MuonSA アルゴリズムの詳細を説明する。

3.3 MuonSA アルゴリズム

MuonSA ではレベル 1 RoI の周辺で MDT ヒットを探索、磁場によって曲げられたミュオンの飛跡から p_T を再構成する。レベル 1 のミュオンのイベントレートは 20kHz であるため、高速処理を必要とする。したがって MuonSA では各 MDT ステーションごとで飛跡の断片 (スーパーポイント) を再構成し、その後各スーパーポイントの傾き、切片、位置を利用して p_T を計算するアルゴリズムである。また MuonSA アルゴリズムはバレル領域とエンドキャップ領域で異なるアルゴリズムで構成されている。ここでは、バレル、エンドキャップ各々での MuonSA アルゴリズムを説明する。

3.3.1 バレル領域

バレル領域では 3 層の MDT ステーションの間に磁場領域が存在する。(図 3.2) よって 3 点の MDT ヒット情報をフィットして曲率半径 R を再構成することが可能である。この R を使用し、以下の関係式によって p_T を計算する。

$$p_T = A_{ij}R + B_{ij} \quad (3.1)$$

曲率半径 R に対する係数 A_{ij} は積分磁場の強さに対応する。また B_{ij} は物質中での運動量損失に対応する。磁場が一定ではないため A_{ij} 、 B_{ij} は位置依存性を持つ。このため Large 検出器、Small 検出器、Large Special 検出器、Small Special 検出器の各々で η 方向に 30、 Φ 方向に 30 ずつ分割した計 900 領域

での A_{ij} 、 B_{ij} を定義したテーブルを用意する。また電荷によって飛跡の曲がる方向が反転するので、各電荷についてこのテーブルが用意されている。

MDT のヒットが2ステーションしかない場合でも原点を通ることを仮定し、フィットを行うことによって検出効率を向上させている。

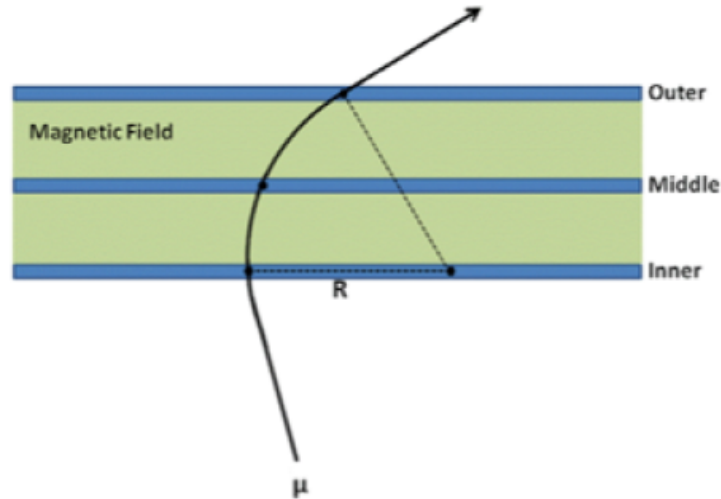


図 3.2: バレル部の曲率半径 R の再構成 [6]

3.3.2 エンドキャップ領域

エンドキャップ領域では磁場領域がインナーステーションとミドルステーションの間だけであるため、バレルと同様に軌跡を円としてフィットすることは出来ない。よってエンドキャップ領域では以下の手法を用いて p_T を再構成する。まず衝突点 (原点) とミドルステーションの MDT ヒットを結んだ直線とミドルステーションの MDT ヒットとアウトーステーションの MDT ヒットを結んだ直線のなす角を α と定義する。(図 3.3) レベル 1 トリガーはミドルステーションにヒットを要求するため RoI に基づいた飛跡探索では、ミドルステーションに多くのヒットがある可能性が高い。従ってミドルステーションを用いて α を定義することで検出効率を高くすることが出来る。またアウトーステーションにヒットがない場合はミドルステーションの MDT で再構成された飛跡の断片 (スーパーポイント) の傾きを用いて α を定義する。この α と p_T の相関は以下の関係式

$$\alpha = A + B \frac{1}{p_T} + C \left(\frac{1}{p_T} \right)^2 \quad (3.2)$$

で近似的に表せることが知られている (図 3.5[7])。この関係式において、 $p_T \rightarrow \infty$ で $\alpha \rightarrow 0$ の条件から $A = 0$ と定められ、また定数 C を正の値に限定することで得られる解を一意に限定する。二次方程式の解の公式より、

$$\frac{1}{p_T} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4(A - \alpha)C}}{2C} = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4\alpha C}}{2C} \quad (3.3)$$

と p_T について解くことができ、この関係式を用いて p_T を再構成する。

また、ミドルステーションのMDTヒットとアウトーステーションのMDTヒットを結んだ直線と衝突点とインナーステーションのMDTヒットを結んだ直線のなす角を β と定義する。(図3.4) この β を用いて α と同様に p_T との関係式を立てることができる。

$$\beta = A' + B' \frac{1}{p_T} + C' \left(\frac{1}{p_T} \right)^2 \quad (3.4)$$

この場合も $A' = 0$ とし、 C' は正の値に限定する(図3.6)。 β を用いることによってミドルステーションとアウトーステーションだけでなくインナーステーションの情報も使用することができるため、 p_T 再構成の精度が向上する[7]。しかし、 β はインナーステーションにヒットがない場合は求めることができない。インナーステーションの有感領域は $|\eta| < 2.0$ であり、 $|\eta| > 2.0$ の場合は β の使用は不可能である。

TGCのヒットで計算した α から再構成した p_T 、MDTのヒットで計算した α で再構成した p_T 、 β から再構成した p_T の三通りから最も信頼度の高い p_T を選択する。以下に詳細な選択基準を示す。

- 全ステーションにヒットがある場合

インナー、ミドル、アウトーのすべてのステーションにヒットがある場合は3点の情報を用いており、より精度が高いと考えられる β を使用できる。この際、 α から求めた p_T が10GeV以上かつ、

$$\frac{|\beta p_T - \alpha p_T|}{\alpha p_T} < 0.5 \quad (3.5)$$

の条件を満たした場合、 βp_T を選択し、3.5式の条件に当てはまらない場合は αp_T を選択する。

- ミドル、アウトーのみにヒットがある場合

ミドル、アウトーの2ステーションにヒットがある場合は、 αp_T を選択する。

- インナー、ミドルのみにヒットがある場合

この場合は、TGC由来、 α 由来、 β 由来の全ての場合の p_T を使用できる。まず、

$$\beta p_T > \alpha p_T, \quad \frac{|TGC p_T - \alpha p_T|}{\alpha p_T} > \frac{|TGC p_T - \beta p_T|}{\beta p_T} \quad (3.6)$$

のどちらか条件を満たせば βp_T を選択する。それ以外でTGC p_T が8GeV以上の場合は αp_T を選択し、 p_T が低い事象ではMDTでのスーパーポイント再構成の精度が悪いので、TGC p_T が8GeV未満の場合はTGC p_T を選択する。

- ミドルにのみヒットがある場合

ミドルステーションのみにヒットがある場合は、ミドルステーションで再構成されたスーパーポイントの傾きを用いて α を計算している。TGC p_T が8GeV未満の場合はTGC p_T を選択する。それ以上では αp_T の方が精度が良いため αp_T を選択する。

最終的に得られた p_T を第2段階のMuonCBに渡す。

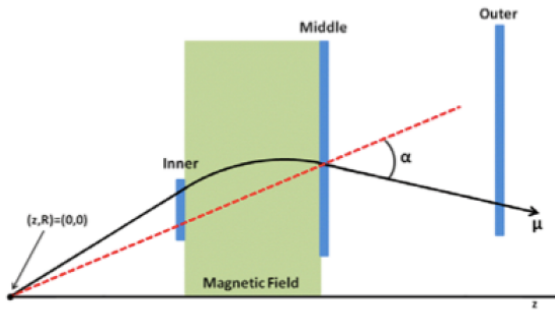


図 3.3: α の定義 [6]

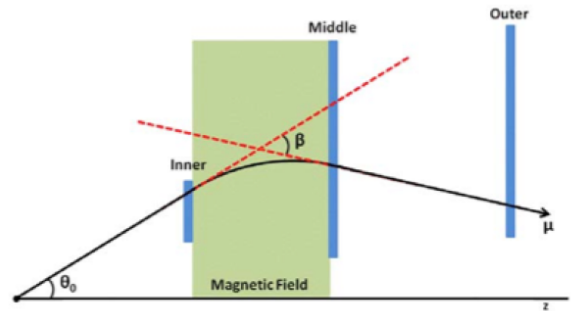


図 3.4: β の定義 [6]

黒矢印はミュオンの飛跡、赤点線は無限運動量の場合の飛跡を表す

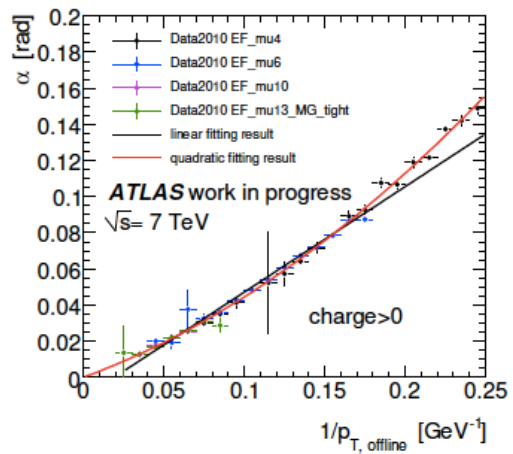
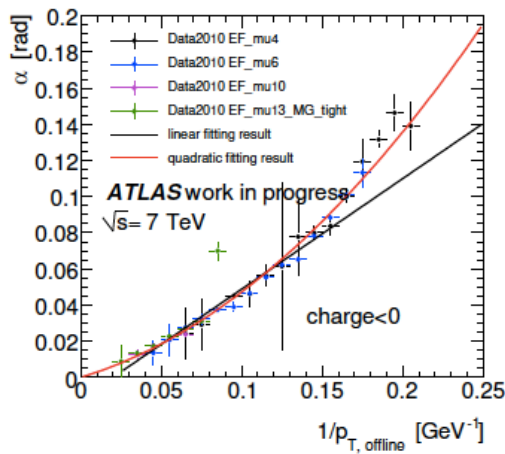


図 3.5: p_T と α の相関 [7]
左図は負電荷、右図は正電荷の場合を表す。

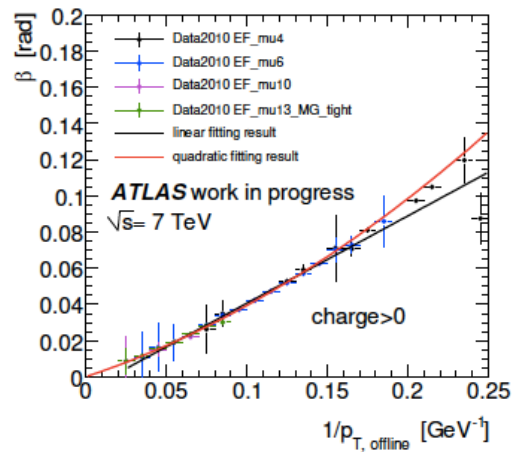
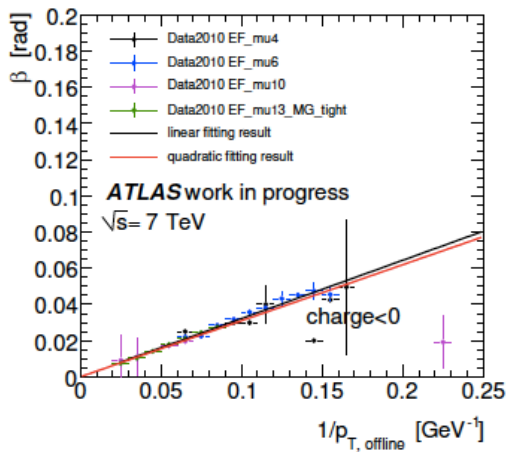


図 3.6: p_T と β の相関 [7]
左図は負電荷、右図は正電荷の場合を表す。

3.4 MuonSA 飛跡パターン認識アルゴリズム

本研究では MuonSA アルゴリズムの一部であるミュオンの飛跡パターン認識アルゴリズムの改良を中心に行った。この節では現在 MuonSA アルゴリズムで用いられている飛跡パターン認識アルゴリズムの詳細を説明する。

MDT はバレル部でインナー、ミドル、アウター全てのステーションにおいて6層で構成されている。一方エンドキャップ部ではインナーステーションでは8層、ミドル、アウターステーションでは6層となっている。MuonSA 飛跡パターン認識アルゴリズムは、インナー、ミドル、アウターの各ステーションでMDTのヒットを直線でフィットすることで飛跡の断片であるスーパーポイントを再構成する。この際、レベル1トリガーの情報を用いて粗く推定されたミュオンの飛跡を基準にMDTヒットを探す。この飛跡はMDTステーション内で直線で与えられ、その直線を中心として一定の幅を持ったMDTチューブの探索領域をロードと定義する。図3.8の破線はロードの中心を表し、それに並行な2本の実線がロードの幅を示す。各MDT層につき一本、ロードの中に含まれるチューブからロード中心に最も近いヒットがあるチューブを選択する。

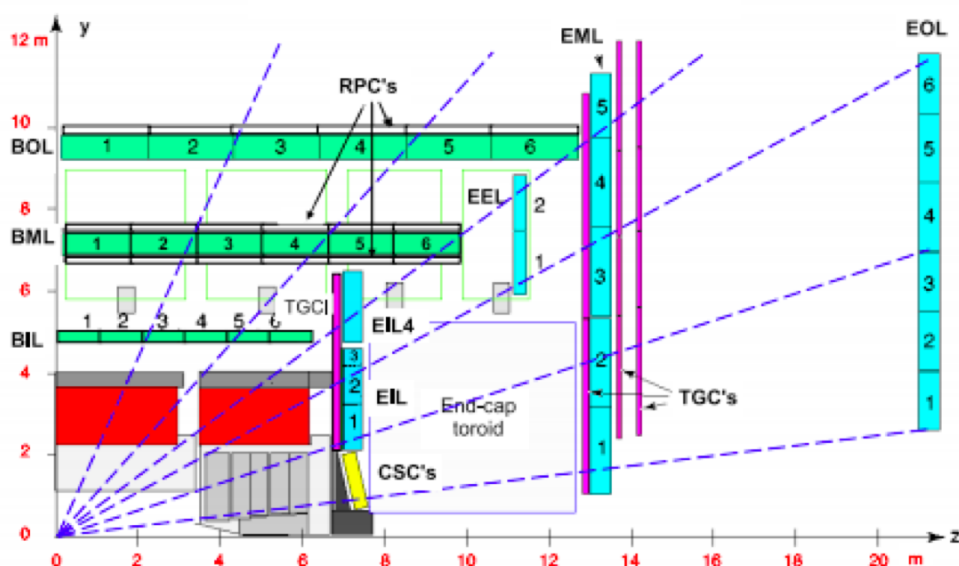


図 3.7: ミュオン検出器の断面図 (Z - R 座標系)

緑がバレル部 MDT ステーション、水色がエンドキャップ部 MDT ステーションを表している。

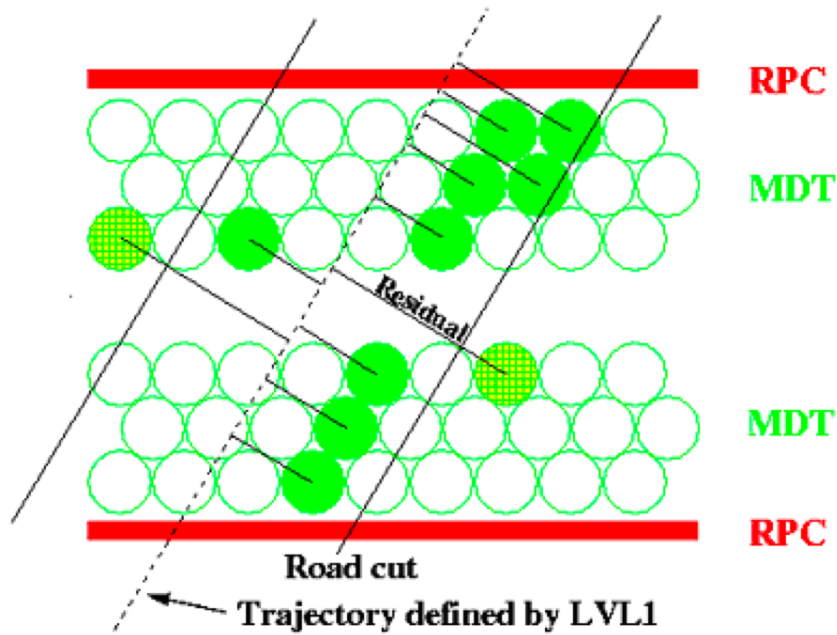


図 3.8: ロード内のチューブ選択の例 [8]

次のステップでは各ステーションで選択されたチューブのドリフト時間から距離に換算したドリフト円の半径 (ドリフト半径) をもとに、その円に対する接線を直線としてフィットを行う。この際、MDT のヒットはドリフト円として与えられるため、一つのチューブに対して接点が二点存在する。これを以降、左右不定性と呼ぶ。図 3.9 にこの左右不定性の例を示す。左右不定性を解きミューオンの飛跡を再構成するために、各ステーションで図 3.10 のように衝突点に最も近いものから 2 本及び最も遠いものから 2 本の、計 4 本のチューブを選択する。これら 4 本のチューブを用いて各チューブの左右組み合わせを変更して 16 回の直線フィットを最小二乗法を用いて行う。その 16 回の左右組み合わせパターンの中から χ^2 が最小のパターンを選択する。 χ^2 は以下の式で定義され、

$$\chi^2 \equiv \sum_i \left(\frac{dY_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3.7)$$

dY_i は i 番目のチューブのドリフト円と共通接線との距離をあらわし、 σ_i は i 番目のチューブのドリフト半径の誤差を示す。この際、全ての MDT 層のヒットを使用せず、最も離れたチューブを 2 本ずつ使用することで処理速度を損なわず精度を保っている。

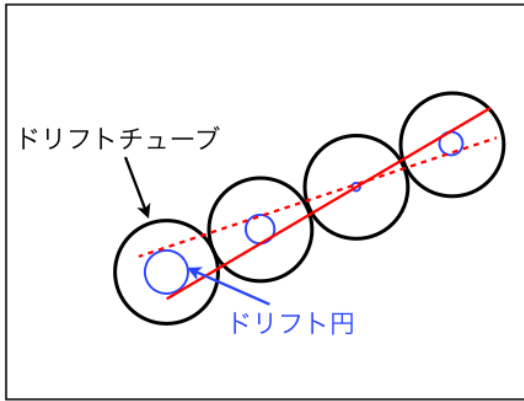


図 3.9: 左右不定性の概略図

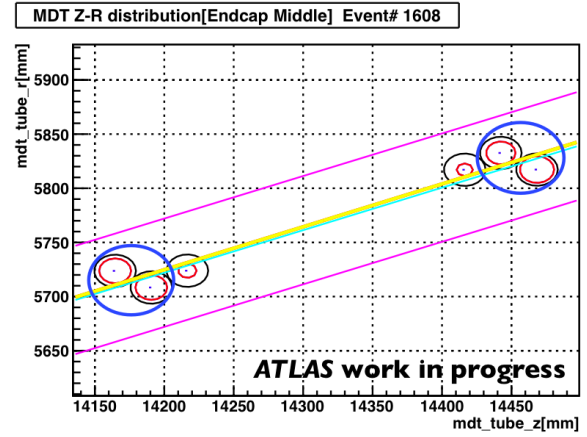


図 3.10: イベントディスプレイ

黄色線は MuonSA で再構成されたスーパーポイント、水色線はロード中心を表す。またピンクの2線はロードの幅を示す。

最終的に得られた χ^2 が最小のフィットパターンの直線の傾き、切片をスーパーポイントの傾き、切片とする。Z 座標はステーションの中心に固定し、得られた傾き、切片から R 座標を求める。これらをスーパーポイントの Z、R 座標と定義し、この座標及び傾きを用いて α 及び β を計算する。

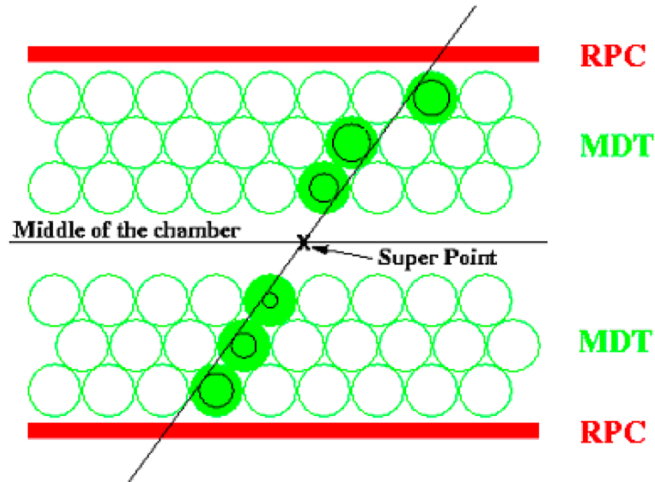


図 3.11: スーパーポイント再構成の例 [8]

第4章 レベル2 ミューオントリガー飛跡パターン認識法の改良

MuonSA アルゴリズムは各ステーションで飛跡の断片であるスーパーポイントを再構成し、スーパーポイントの情報を用いて p_T を計算する。本章では、MuonSA エンドキャップ部のスーパーポイント再構成に用いる飛跡パターン認識アルゴリズムの改良について述べる。

4.1 MuonSA 飛跡パターン認識アルゴリズムで起きうる問題点

MuonSA 飛跡パターン認識アルゴリズムでは、以下に述べるような特定の問題によって、スーパーポイントの傾きの再構成を有意に間違えたと誤った p_T を発行する原因になる場合がある。本研究では2つの問題点を指摘し、飛跡パターン認識アルゴリズムの改良を行った。

4.1.1 フィットに使用するチューブの誤選択

MuonSA アルゴリズムでは前章の通り、ロード内に含まれるチューブの中からロード中心に最も近いチューブを各層1本選択している。しかし、一層に複数のヒットがありロードとの距離が同程度であったり、同じチューブで異なるタイミングで2回ヒットがある場合等は、必ずしもロードから最近接チューブを選択することが正しいとは限らない。この際、選択するチューブを誤ると正しいスーパーポイントを再構成できない。特にスーパーポイントの傾きの再構成を有意に間違えたと、誤った p_T を計算してしまう。図4.1は最外層でチューブの誤選択が生じた場合のイベントディスプレイである。青実線はロード中心から最近チューブを選択した場合に再構成されたスーパーポイントを示し、黒実線は二番目にロード中心に近いチューブを選択した場合のスーパーポイントをあらわす。また水色実線はロードの幅を示している。この場合、 χ^2 (式3.7)は黒実線で最小になり、ロード中心に最近接のチューブを使用するよりも二番目に近いチューブを使用する方がより正しくスーパーポイントが再構成されていると考えられる。

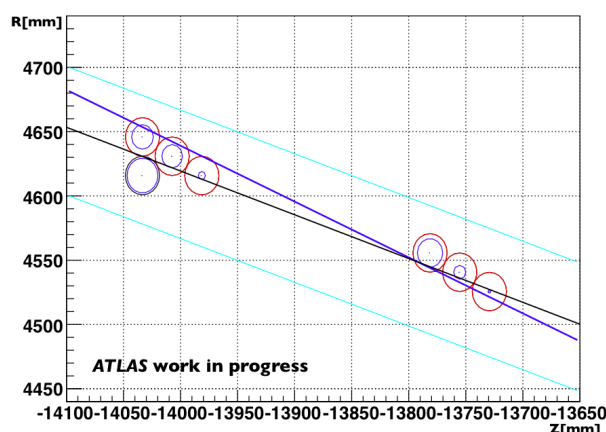


図 4.1: フィットに使用するチューブを誤選択した場合のイベントディスプレイ

赤円は MDT チューブ、青円はドリフト円を表し、青線は MuonSA で再構成されたスーパーポイント、黒線はフィットに使用するチューブを変更したスーパーポイントを表す。また水色線はロード幅を示す。

4.1.2 フェイクヒットによるパターン誤認識

2つ目の問題点となりうる事象はフェイクヒットによるパターン誤認識である。本研究ではフェイクヒットとはロード内に存在するチューブのうち、ミュオンの飛跡に関連のないヒットと定義する。フェイクヒットは後のバンチ由来の MDT ヒットであることが多く、ミュオンの飛跡とは関連のない位置に点在する。これらのヒットがロード内にありスーパーポイントの再構成に使用されると、傾きを大きく誤って再構成してしまう場合がある。特に、左右不定性を解くために使用されるステーションの両端から2本ずつの4本にフェイクヒットであるチューブを選択してしまう場合にこの問題は顕著になる。

図 4.2 はフェイクヒットによって誤ったスーパーポイントが再構成された事象のイベントディスプレイ

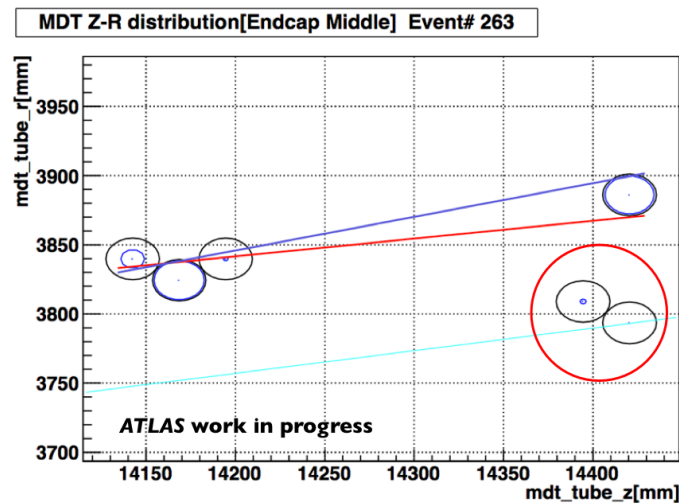


図 4.2: フェイクヒットによってスーパーポイント再構成を誤った例

黒円は MDT チューブ、青円はドリフト円を表す。青線はオフラインミュオンの飛跡であり赤線は MuonSA で再構成されたスーパーポイントを示す。水色線はロード幅の下限値を表す。また赤の円で囲まれたチューブがフェイクヒットである。

イである。青実線はオフライン解析によって再構成されたミュオンの飛跡をあらわす (4.3 節)。赤実線はフェイクヒットによって誤って再構成されたスーパーポイントを示し、水色実線はロードの下限値を示している。赤円で囲まれたチューブはフェイクヒットであり、最外層から二番目のチューブがスーパーポイントの再構成に誤って使用されている。

4.2 MuonSA 飛跡パターン認識アルゴリズムの改良

前節で挙げられた問題点は完全に取り除くことは不可能である。従って本研究ではこれらの問題点の起こりうる確率を抑える方法を考案しアルゴリズムの改良を行った。本研究で飛跡パターン認識アルゴリズムに対して行った改良は以下の3点である。

4.2.1 フィットに使用するチューブの選択法の改良

フィットに使用するチューブの誤選択を防ぐため、各層で複数のヒットがある場合にチューブの候補を2つまで保持しておき、全てのチューブ組み合わせに対して前章にて説明した最小二乗法を用いた左右組み合わせに対する試行を行う。この場合、複数のチューブが存在する層の数を n とすると試行回数

は 2^n 回となる。また左右組み合わせに対する試行回数は最大16回($2^4 = 16$)であるため、エンドキャップのインナーステーションでは最大4096回($2^8 \times 16$)、その他のステーションでは最大1024回($2^6 \times 16$)の試行回数が必要になる。このパターンの中から最も χ^2 が最小になるパターンを選択する。この手法によって各層でロード中心に最近接のチューブと二番目に近いチューブの距離がほぼ等しい場合や、同じチューブが異なったタイミングで2回ヒットした場合に χ^2 の大きさに基づいて使用するチューブを決定することができるため、チューブの誤選択の頻度は減少することが期待される。

MuonSAでは高速処理が求められ、計算時間には制限がある。図4.3[9]はMuonSA(エンドキャップ部)の各段階の処理時間を表している。左上図はレベル1の情報準備(Data Preparation)の段階、右上図はパターン認識(Pattern Finding)、左下図はステーション探索(Station Finding)、右下図は飛跡フィッティング(Track Fitting)に要する時間を表す。図4.3により、レベル1の情報を準備する段階の処理時間のピークがパターン認識の処理時間のピークより10倍以上の時間を要している。従って本研究で改良を行ったパターン認識アルゴリズムには、処理時間の問題はないものとして改良を行った。

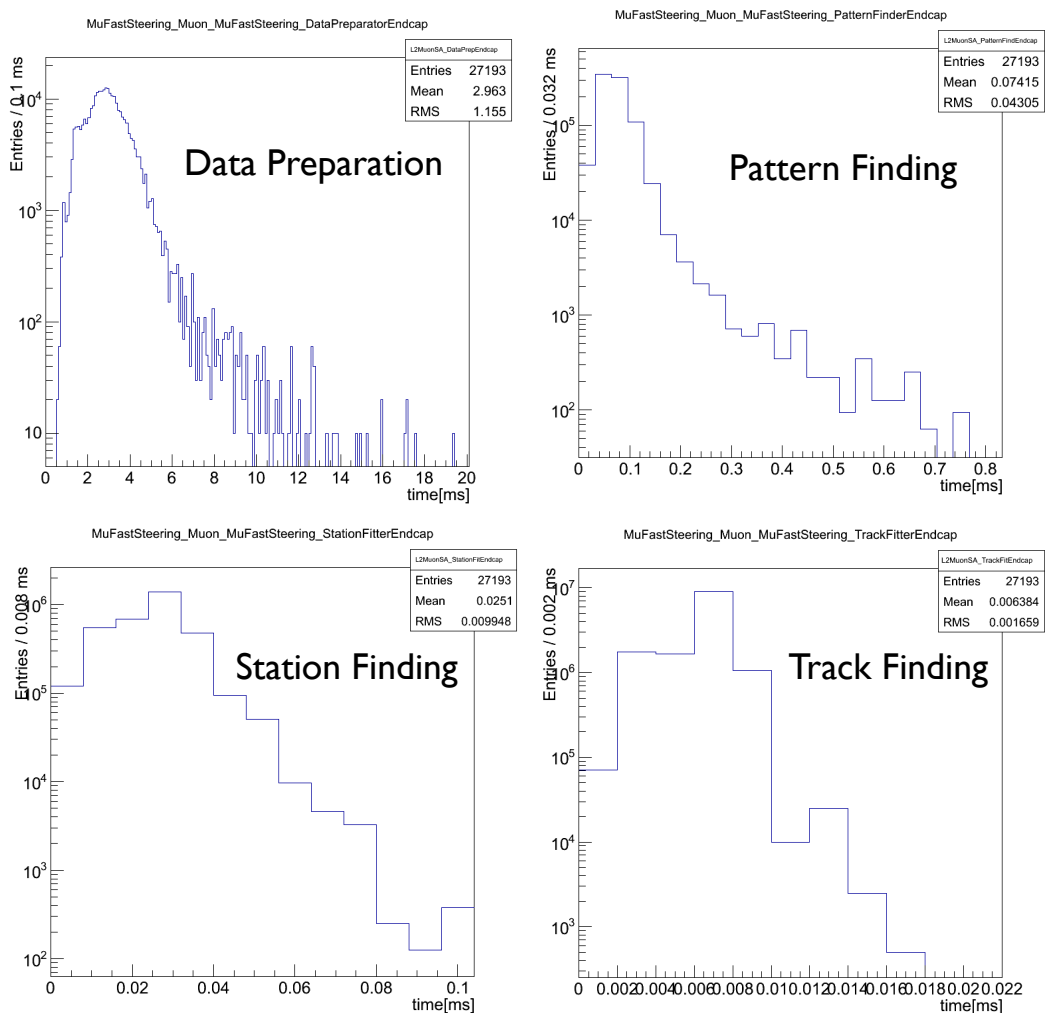


図 4.3: 各段階の処理時間 [9]
Data Preparation は左上図、Pattern Finding は右上図である。

4.2.2 フェイクヒットの除去

ドリフト時間によるカット

フェイクヒットに対する改良点は二点あり、一つ目はドリフト時間にカットを設け予めフェイクヒットになりうるチューブを取り除く手法である。フェイクヒットは後のバンチ由来のヒットが多く、そのためドリフト時間が大きな値になりドリフト半径は最大値である 15mm をを超えてしまう傾向がある。

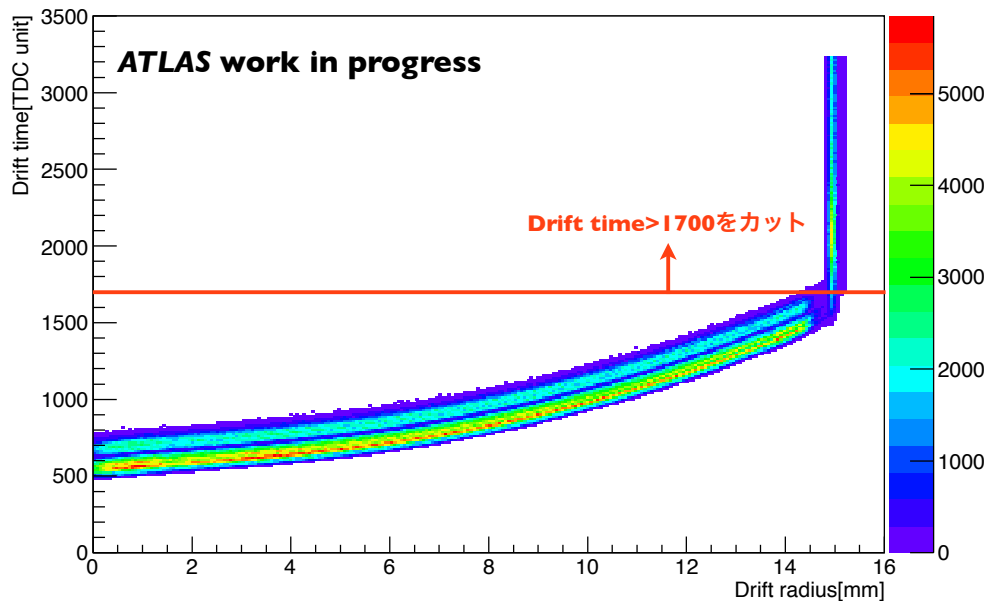


図 4.4: ドリフト半径とドリフト時間との相関

図 4.4 はドリフト半径とドリフト時間の相関図である。ドリフト半径が 15mm 以上のチューブは全て 15mm と記録されるため、ドリフト半径が 15mm の位置に本来のドリフト半径とドリフト時間の関係がないピークが生じる。これらピークを構成するチューブは全てフェイクヒットとみなし、ドリフト時間の値が 1700 以上のチューブは除去するカットを設けた。これによってロード内に存在するチューブのうち、約 14.3% のチューブを削減することができる。

ロード位置と幅の調整

2つ目のフェイクヒットに対する改良点として、ロードの位置を決定するアルゴリズムの改良とロード幅の最適化を行った。MuonSA ではロード幅は各ステーション、 p_T で異なる。表 4.1 にエンドキャップ部の各ステーションでのロード幅を記載する。ロードはレベル 1 トリガーの情報を用いて計算する。エンドキャップ部では TGC の情報を用いてミューオンの飛跡を粗く推定すること (TGC フィット) によってロードを計算する。この TGC フィットが正常に行われた事象と TGC にヒットがない等の理由でフィットに失敗した場合でロードの精度は異なる。従って TGC フィットに失敗した場合は成功時と比較してロード幅を広く設定する。本研究ではエンドキャップ部のロードについて中心位置と幅の最適化を行った。まずロードの中心が飛跡由来のヒットがある座標と大きく異なっている場合の対策として、ロード内に存在するチューブの ($Z-R$) 平面での平均座標を計算し、ロードの傾きは保持したまま平均座標に

表 4.1: エンドキャップ部のロード幅の設定値

ステーション	ロード幅 (TGC フィット成功時)	ロード幅 (TGC フィット失敗時)
インナー	100mm	200mm
ミドル	100mm	150mm
アウター	100mm	150mm

ロード中心を平行移動させる。この操作によってより正しい位置にロードを引くことが可能になると考えられる。ロード中心を移動させた後はチューブはロードに近い位置に集中していると考えられ、ロード幅を狭く設定することができると考えられる。これによってロード中心から離れたフェイクヒットを削減できる。図 4.5 はエンドキャップ各ステーションでのチューブの残差 (Residual) を表す。残差はロード中心からチューブの中心までの距離で定義する。青線はロードを移動させる前の残差を示し、赤線はロードを移動させた後の残差を示す。ロードを移動させた後では残差が小さくなっていることがわかる。ロード中心の移動後、各ステーションでロード幅の値を 30mm~130mm まで 10mm 毎に変化させ最も飛跡再構成の精度が高いロード幅を選択し、ロード幅を再度設定する。これについては 4.4 節で述べる。

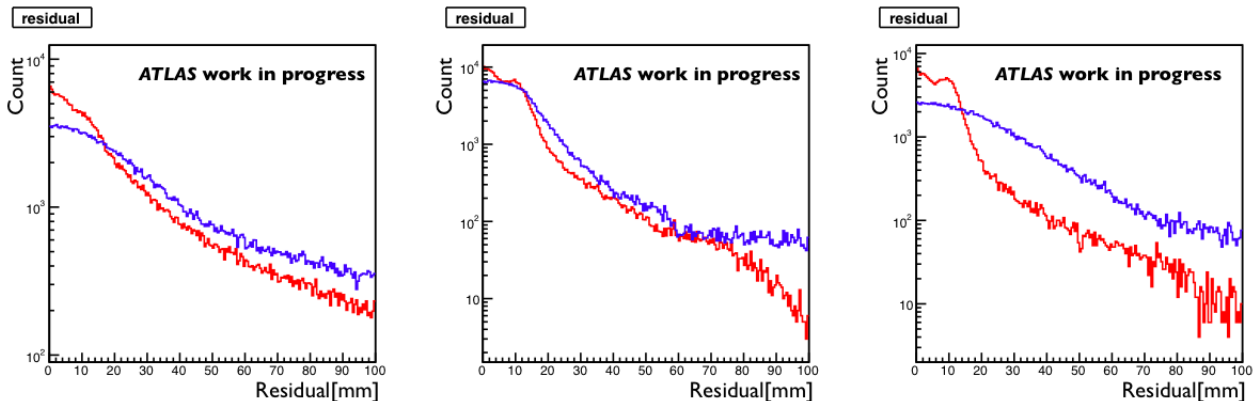


図 4.5: 各ステーションでの各チューブとロード中心までの距離

左図からインナー、ミドル、アウターそれぞれのステーションでの残差の分布を表す。青線はロード中心を移動させる前の残差 (Residual)。赤線は移動させた後の残差を示す。

4.3 オフラインミュオン及び性能判定の指標

本研究では MuonSA アルゴリズムで再構成されたスーパーポイントと、オフライン解析によって再構成された精度の高いミュオン (オフラインミュオン) の飛跡を比較することによって MuonSA アルゴリズムの精度を評価した。使用するオフラインミュオンは Tag and Probe 法を用いて Z 粒子由来のミュオンを選択し、衝突点由来でないミュオンからのバックグラウンドを削減する。ここでは $Z \rightarrow \mu\mu$ Tag and Probe 法の解析手法と、データを用いた MuonSA アルゴリズムの性能評価に必要な量の定義について述べる。

4.3.1 $Z \rightarrow \mu\mu$ Tag and Probe 法

Tag and Probe 法とは粒子のダイミュオン (2 ミューオン) 崩壊を用いてバックグラウンドの削減を行う方法である。特に $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象 (図 4.6) を用いることで π 粒子や K 粒子の崩壊に伴うミュオンによるバックグラウンドを 1% 以下に抑制することができる。 $Z \rightarrow \mu\mu$ Tag and Probe 法の解析手順は以下の通りである。

まずダイミュオン事象の一つのオフライン解析で再構成されたミュオンに対してイベントフィルターにおいてトリガーが発行されているかどうかの判定を行う。トリガーが発行されている場合、そのミュオンを “Tag” ミューオンとする。次に同事象の中で他のミュオンを探索し、 Z 粒子由来であることを要求するために Tag ミューオンと不変質量を計算する。不変質量が Z 粒子付近であれば、そのミュオンを “Probe” ミューオンとする。図 4.7 は Tag ミューオンと Probe ミューオンで計算した不変質量分布を表す。このような手法によって Probe ミューオンは事象のトリガーに対して独立となり、これまでのレベル 2 アルゴリズムでは再構成できなかった飛跡についても新しいアルゴリズムを試すことができる。また得られた Probe ミューオンは低バックグラウンドで衝突点由来のミュオンである。この Probe ミューオンと MuonSA で再構成された飛跡を比較することで MuonSA の飛跡再構成の精度を評価する。この Probe ミューオンを用いて第 5 章では改良された MuonSA アルゴリズムのミュオン再構成効率を評価する。

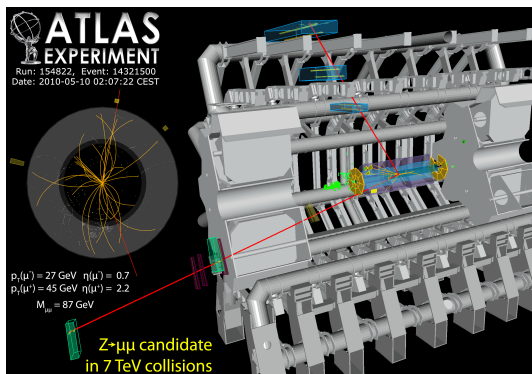


図 4.6: $Z \rightarrow \mu\mu$ 事象のイベントディスプレイ

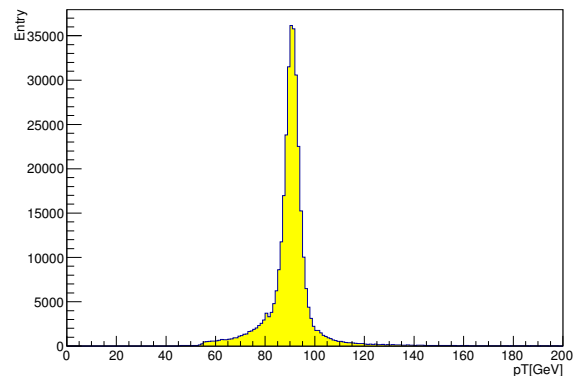


図 4.7: Tag ミューオンと Probe ミューオンで再構成された不変質量分布

4.3.2 性能評価に使用する指標

本研究では、MuonSA アルゴリズムで再構成されたスーパーポイントの傾きと前節で説明したオフラインミュオンの飛跡の傾きを比較することで性能評価を行った。この際、性能を表す量を幾つか定義する必要がある。これらの量の詳細を以下で説明する。

Δ slope

Δ slope はオフラインミュオンの飛跡の傾きと MuonSA で再構成されたスーパーポイントの傾きの差で定義される。図 4.8 に Δ slope の概略図を示す。この Δ slope は MuonSA で再構成されたスーパーポ

イントの精度を表す量として使用する。

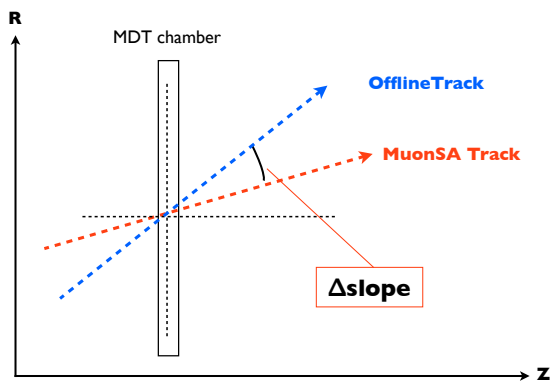


図 4.8: Δ slope の概略図

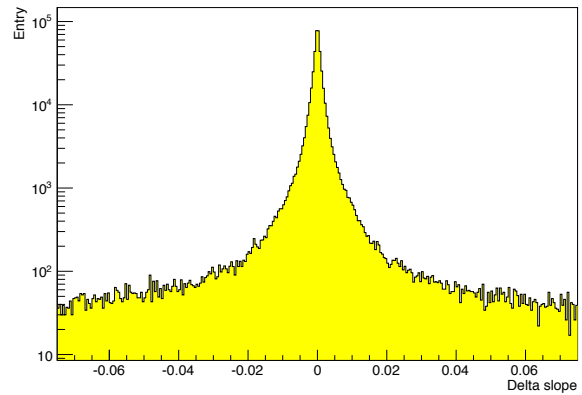


図 4.9: Δ slope 分布 (ミドルステーション)

Good 及び Tail

Δ slope はオフラインミュオンとの傾きのずれを表す量であり、本研究ではその量にある任意の閾値を設け Good 及び Tail の 2 つの量に区別している。図 4.10 は Good 及び Tail の定義を表している。 $|\Delta$ slope $| < 0.02$ の事象に対して Good と定義し、 $|\Delta$ slope $| \geq 0.02$ の事象を Tail と定義する。 Δ slope = 0.02 の事象では各ステーションの Z 方向の全長の平均を 30cm であるため、R 方向に 0.6mm (チューブ 1/5 本分) のずれとなる。Good 事象はオフラインミュオンの飛跡と精度よくマッチングがとれた事象とみなし、MuonSA でのスーパーポイントの再構成が成功した事象とする。また Tail 事象はオフラインミュオンとのマッチングが取れず、MuonSA でのスーパーポイント再構成の精度が低い事象と定義する。これらの量を用いた改良後の MuonSA アルゴリズムの性能評価の詳細を次節より説明する。

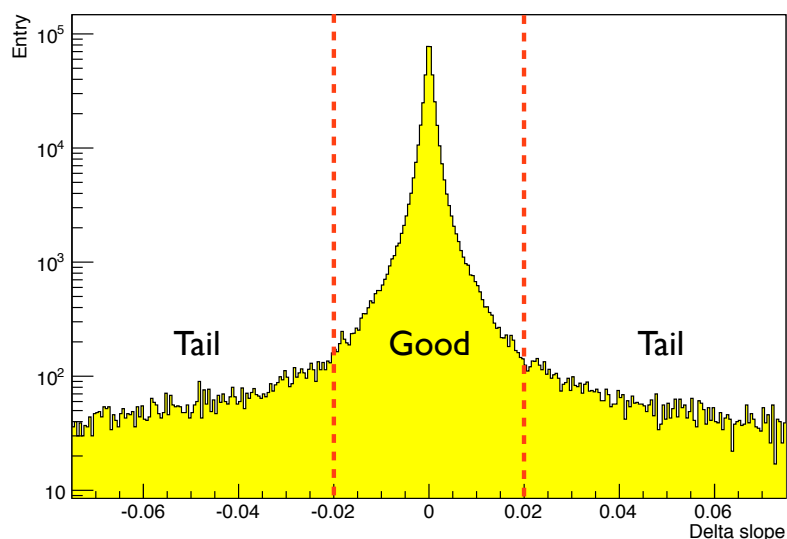


図 4.10: Good 及び Tail 領域の定義

4.4 ロード幅の最適化

ロード中心を適切な座標に移動させた後のロード幅の最適点の探索を行った。図 4.11 は各ステーション(左からインナー、ミドル、アウター)でのロード中心移動後のロード幅を変えたことによりオフラインミュオンの事象数に対する Good 事象の割合がどのように変化するかを表したものである。ロード中心移動後はすべてのステーションにおいて、初期のロード幅の設定値(表 4.1)よりも小さな値で Good 事象の割合が最大となる。その時の値をロード幅の再設定値として採用した。ロード中心移動後のロード幅を表 4.2 に記載する。

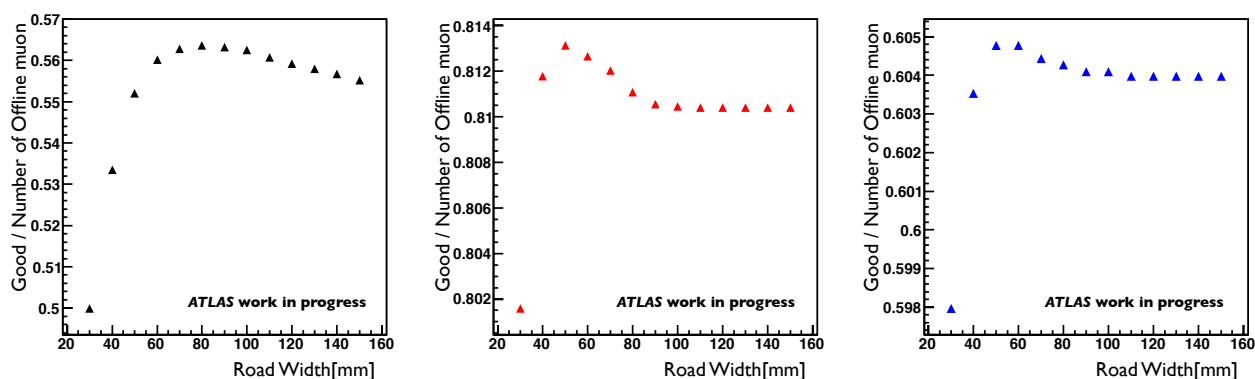


図 4.11: Good 事象再構成の割合のロード幅依存性

4.5 実データによる性能評価

前々節で説明した改良点をアルゴリズムに加え、実データによって性能評価を行った。本節では主に改良前後のパターン認識アルゴリズムの性能比較について述べる。

表 4.2: ロード中心移動前後のロード幅

ステーション	ロード幅 (初期設定最大値)	ロード幅 (ロード中心移動後)
インナー	200mm	80mm
ミドル	150mm	50mm
アウター	150mm	60mm

4.5.1 改良前後での Δ slope 分布の比較

ここでは本研究で行った3つの改良点を取り入れた MuonSA アルゴリズムと、改良前のアルゴリズムの Δ slope 分布を比較することでスーパーポイント再構成の精度を評価した。図 4.12 は各ステーションでの改良前後の Δ slope 分布を示す。(左図からインナー、ミドル、アウター) 青色のグラフは改良前の Δ slope 分布を表し、黄色のグラフは改良後を示している。すべてのステーションにおいて、Tail 事象を削減することに成功した。また図 4.13 は図 4.12 の $|\Delta$ slope| < 0.2 の範囲を拡大したものである。さらに

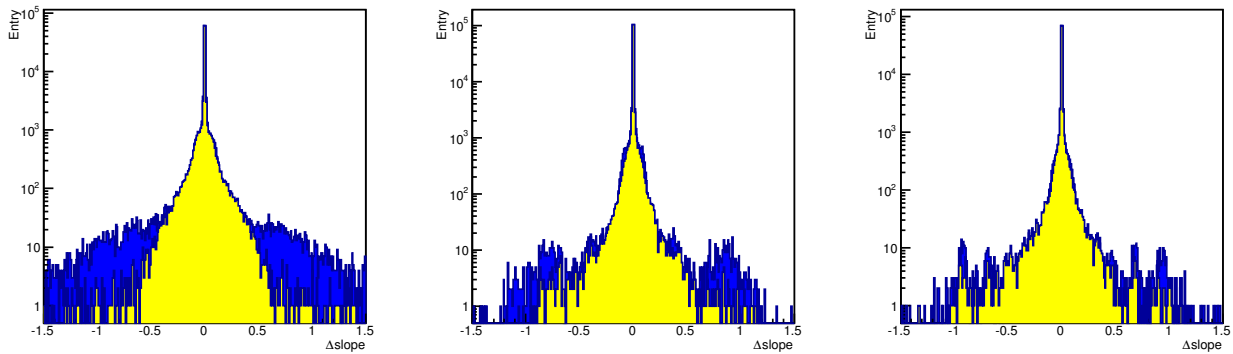


図 4.12: 改良前後での各ステーションにおける Δ slope 分布

これらを η 領域及び p_T 領域で分割したものを付録 A に記載する。なお依然残っている Tail 事象については 5 章で説明する。

4.5.2 飛跡パターン認識アルゴリズムの性能評価まとめ

これまでの Δ slope 分布は、改良を加えた MuonSA 飛跡パターン認識アルゴリズムは改良前と比較して Tail 事象が減少していることを示している。ここでは改良前後の性能の定量的な評価について述べる。

図 4.14、図 4.15 は表 A.1 のように η 領域、 p_T 領域を分割した場合の全事象に対する Good 事象の割合を示している。(左図からインナー、ミドル、アウター) 黒印は改良前の値を表し、赤印は改良後の値である。図 4.13 において、インナーステーションでは $\eta > 2$ の事象は改良前後で値が大きく変化しているが、これはインナーステーションの有感領域は $|\eta| < 2.1$ であり、統計数が少ないためである。またミドルステーションにおいては全ての η 領域で Good 事象の割合を増加させることに成功した。また図 4.14 から、ミドル、アウターの両ステーションにおいて $p_T < 20\text{GeV}$ の領域で大きな改善がみられた。

最終的に各ステーションにおいて MuonSA パターン認識アルゴリズムの改良による効果を図 4.16 及び表 4.5 に示す。図 4.15 は各ステーションにおける Tail 事象と Good 事象の比を表す。これらの結果から

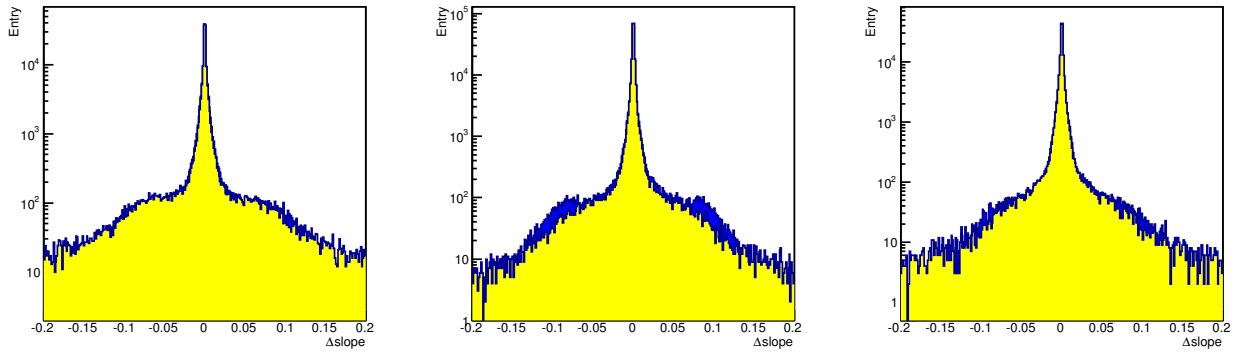


図 4.13: 改良前後での各ステーションにおける Δ slope 分布 (拡大図)

左からインナー、ミドル、アウター。ミドルでの改善が目立つ。

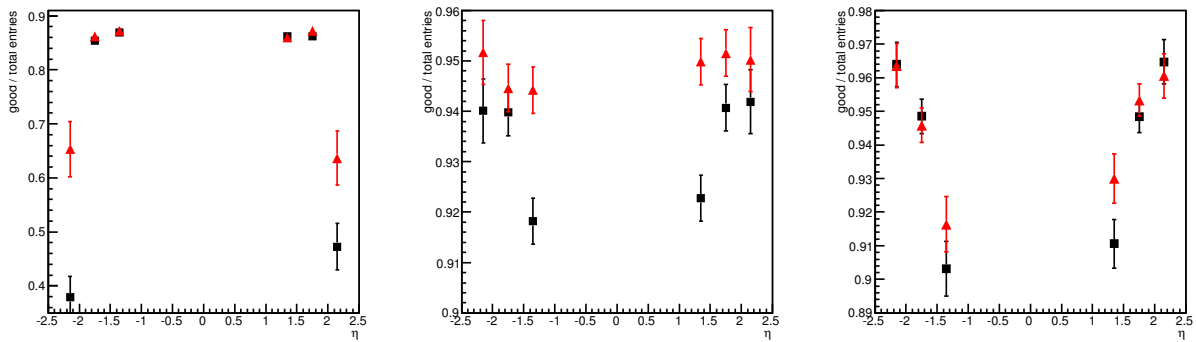


図 4.14: 6 個の η 領域に分割した場合の全事象に対する Good 事象の割合

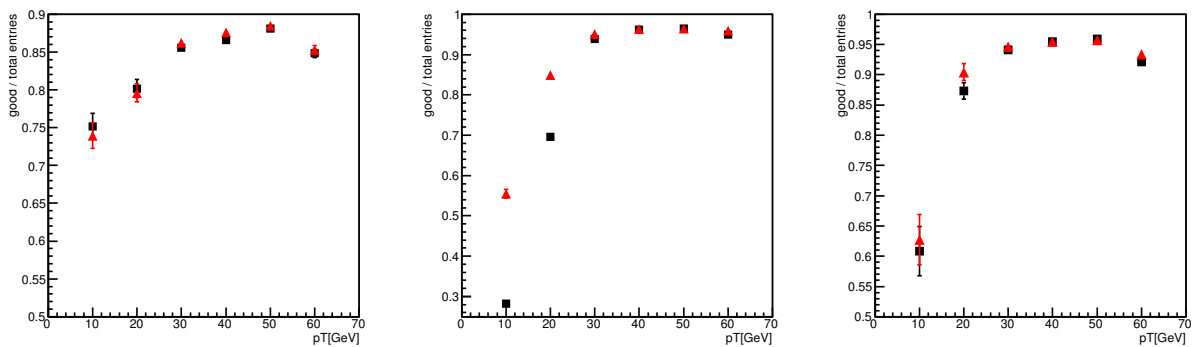


図 4.15: 6 個の p_T 領域に分割した場合の全事象に対する Good 事象の割合

全てのステーションにおいて Tail 事象の割合は減少しており、改良による一定の効果がみられた。特にミドルステーションでは 1.5% の改善がみられた。

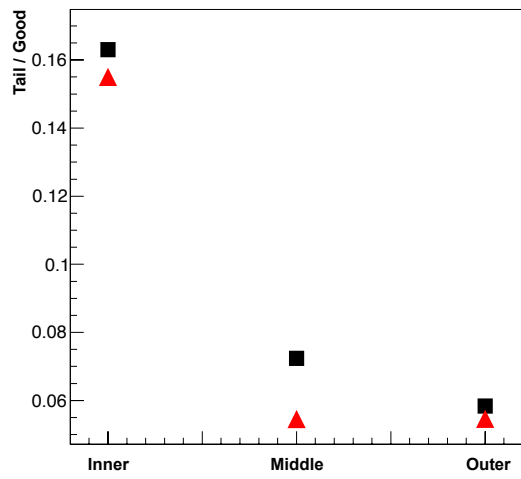


図 4.16: 各ステーションでの Tail/Good 比

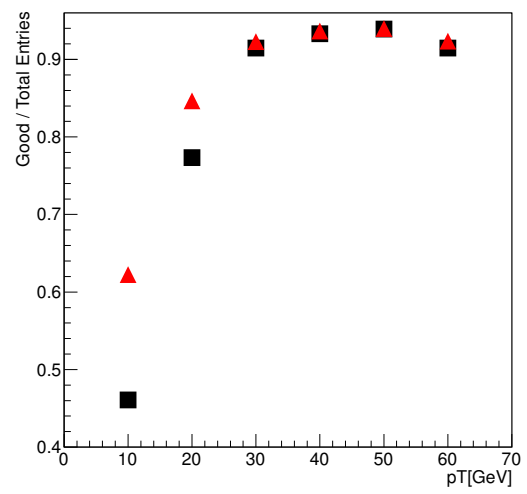


図 4.17: 各 p_T 領域での Good/全事象の割合

第5章 レベル2エンドキャップミュートリガー 運動量推定法の改良

4章では各ステーションでの飛跡パターン認識アルゴリズムの改良によって、再構成されたスーパーポイントの傾きの改善について述べた。しかし依然 Tail 事象は存在している。これらの単一のステーションでの飛跡パターン認識アルゴリズムの改良では改善されなかった事象に対して、各ステーションの情報を結びつけてスーパーポイントを再構成を行った。本章ではこれらの改良の手法及び効果について説明し、改良前後での性能評価について述べる。

5.1 ミドルステーションとアウトーステーションのマッチング

前章の改良で改善がみられなかった事象について考えられる原因は、チューブのドリフト円を用いてフィッティングを行う際の左右不定性が、対称性の問題によって解けない場合が考えられる。図 5.1 は対称性の例を表したものである。図 5.1 のようにヒットのある MDT が 3 本しかない場合、パターン 1 とパターン 2 では χ^2 が非常に近い値となる。たとえ χ^2 が最小の候補を選択したとしても、正しい解とは限らなくなってしまう。例えば、パターン 1 が正しい飛跡であるが χ^2 はパターン 2 が最小の値をとり、パターン 2 を選択してしまう。この問題は単一のステーションのみの情報では解決できない。本研究ではミドルステーションとアウトーステーションのスーパーポイントのマッチングをとることで、単一のステーションでは解決できない対称性の問題を解決できると考えた。マッチングの手法と効果を以下より説明する。

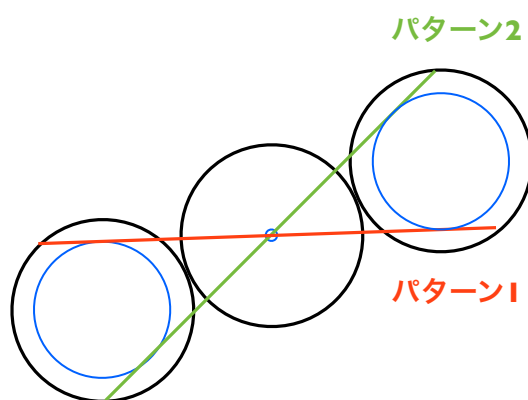


図 5.1: 対称性問題の例

5.1.1 マッチングアルゴリズムの手順

図 5.2 にマッチング手法の概略図を示す。まずインナー、アウター両方でスーパーポイントを再構成する際に χ^2 が最小のパターン (赤矢印) と 2 番目に小さいパターン (緑矢印) の情報を保持しておく。その後それぞれのスーパーポイントの (Z, R) 座標を結んだ線 (reference line、図 5.2 の点線) を引き、この線の傾きと各ステーションで用意した 2 つのパターンの候補の傾きを比較する。最終的に各ステーションで reference line の傾きに近い候補を選択する。図 5.3 は reference line の傾きとオフラインミュオン線の傾きの差を分布を表しており、Tail 事象はわずか 0.45% である。これより reference line の傾きはオフラインミュオン線の傾きに対して良い一致を示すことがわかる。したがって、reference line と各ステーションでの 2 つの候補を比較することで対称性の問題を解決でき、スーパーポイント再構成の精度がより向上すると考えられる。しかし、この手法はミドルステーション、アウターステーションにヒットがありスーパーポイントが再構成可能な事象にのみ有効である。ミドルステーション、アウターステーション両方にヒットがある事象は全事象中の約 67.1% であり、これらの事象以外でミドルステーション及びアウターステーションのどちらか 1 つのステーションでのみスーパーポイントが再構成された場合はロードの reference line の代わりにロードの傾きを用いる。

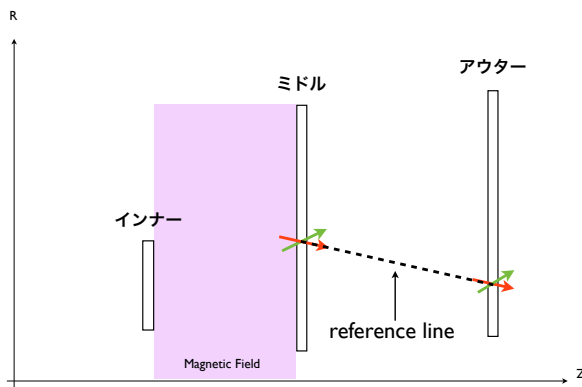


図 5.2: マッチング法の概略図

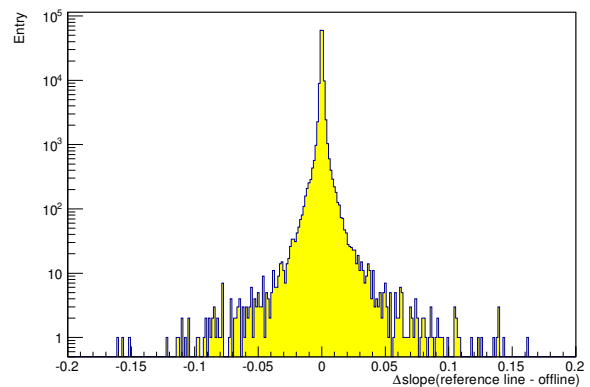


図 5.3: reference line の Δslope 分布

5.1.2 マッチングによる効果

図 5.4 はマッチングを取り入れる前後でのミドル、アウターステーションの Δslope を表したものである。また図 5.5 はマッチングを取り入れる前後での Tail 事象と Good 事象の比を示す。インナーステーションではマッチング法の対象外なのでマッチング前後で変化はない。ミドルステーション及びアウターステーションではマッチングを行う前と比較して Tail 事象を削減すること成功した。図 5.6 はマッチングを取った場合の Δslope (横軸) とマッチングを取らない場合の Δslope (縦軸) の相関図である。赤四角で囲んだ部分がマッチングを取った場合の Good 事象領域、緑四角で囲んだ部分はマッチングを取らない場合の Good 事象領域を表している。マッチングをとることによってマッチングをとる前の Δslope の値が Good 事象でない事象もマッチングをとることで Good 事象領域に入っていることがわかる。マッチング前後の Tail 事象と Good 事象の比及びその削減率の詳細な数値を表 5.1 にまとめる。

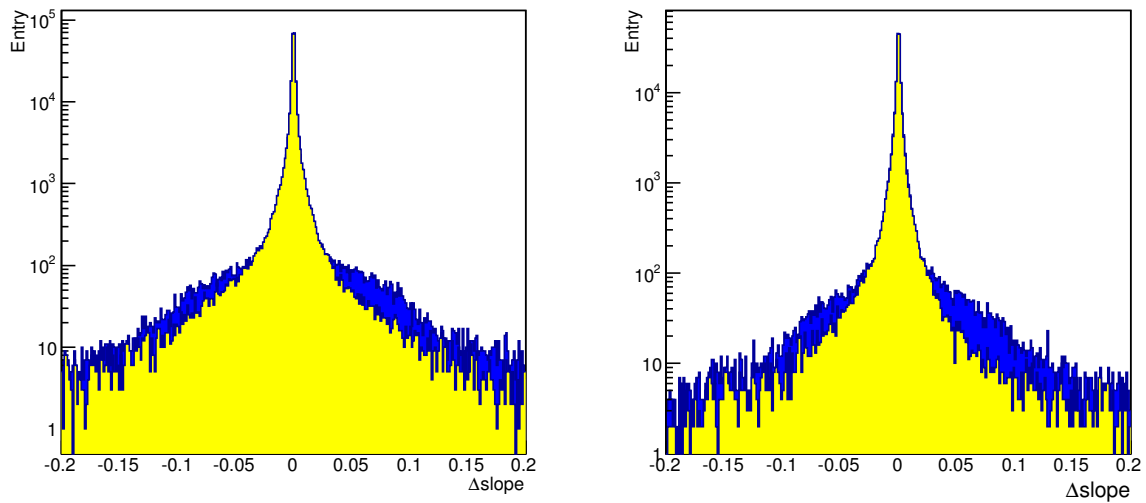


図 5.4: マッチングを取り入れる前後での Δ slope 分布
 左図はミドルステーション、右図はアウトーステーションを表す。

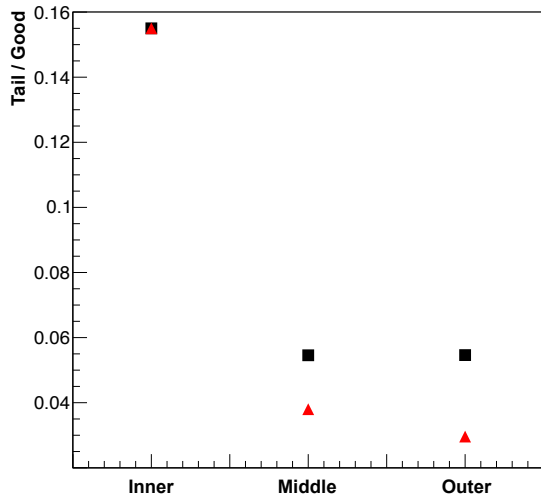


図 5.5: 改良前後の Tail 事象と Good 事象の比

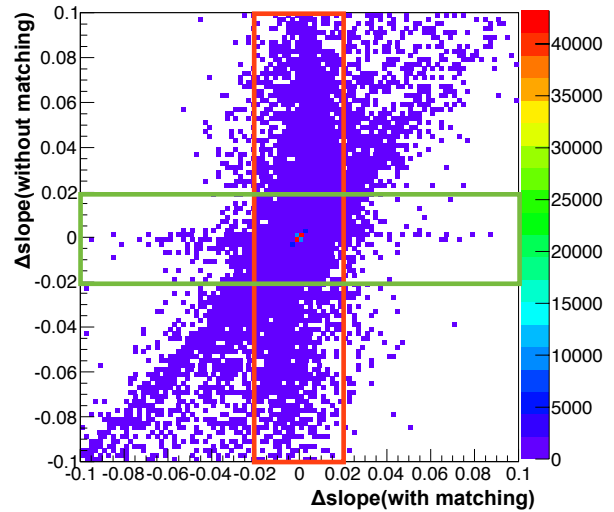


図 5.6: マッチング前後の Δ slope の相関

表 5.1: 改良前後の Tail 事象と Good 事象の比

ステーション	Tail/Good(マッチング前)	Tail/Good(マッチング後)	Tail/Good 減少率
ミドル	5.5%	3.8%	1.7%
アウトター	5.5%	3.0%	2.5%

5.2 MDT 情報のインナーステーションへの外挿 (Extrapolate)

MuonSA アルゴリズムはレベル 1 の情報 (TGC ヒット情報) を用いて直線フィット (TGC フィット) を行うことでロードをつくり、その周囲の MDT を使用して精密な p_T 計算を行う。TGC は MDT ミドルステーションを挟み込むように配置されており、インナーステーションとの間には磁場領域が存在する。ミュオンは磁場によって飛跡が曲げられるため、TGC フィットではロードが作れない。そのため MuonSA では TGC の p_T 情報を外挿 (Extrapolate) し、磁場領域の飛跡を概算することでインナーステーションのロードを作っている。本研究ではインナーステーションのロードを構成する際に、TGC より精度のよい MDT 情報で再構成した p_T を外挿した。これによってより精度の良いインナーステーションのロードをつくるのが可能になると考えられ、インナーステーションでのスーパーポイント再構成の精度の向上が期待できる。図 5.7 にインナー外挿法の概略図を示す。

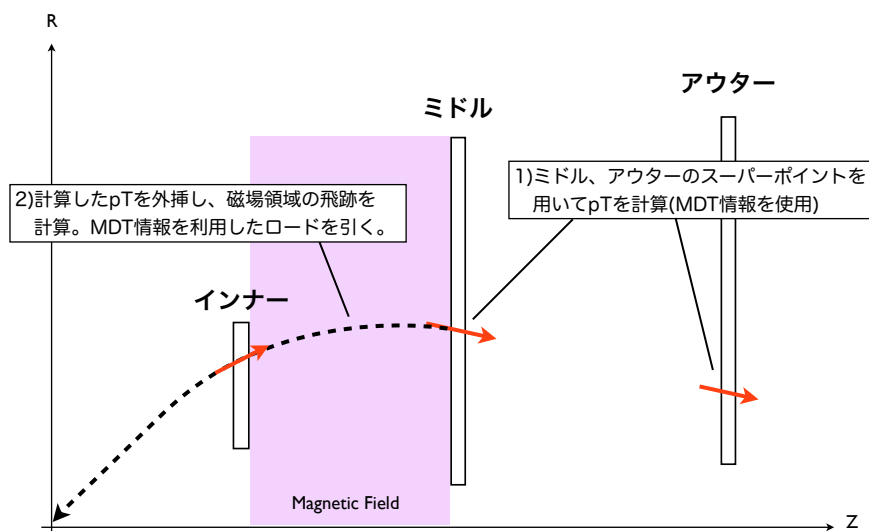


図 5.7: インナーステーションへの外挿法の概略図

5.2.1 MDT 情報のインナーステーションへの外挿の手順

ここでは MDT 情報を用いて計算した p_T をインナーステーションへ外挿する手順について述べる。まず、ミドルステーション、アウターステーションそれぞれのステーションでスーパーポイントを再構成する。再構成されたスーパーポイントから 3.3.2 で説明した α を計算し、式 3.3 を用いて p_T を再構成する。この p_T は MDT 情報を用いたものであり、TGC で再構成された p_T より精度が高いと考えられる。 p_T と電荷、ミドルステーションでのスーパーポイントの $(\eta-\phi)$ 座標が既知ならばインナーステーションとミドルステーションの間に存在する磁場領域の飛跡を求めることができる。MuonSA では p_T を符号付きで求めることで、その電荷と p_T 、ミドルスーパーポイントの座標を用いてミドルステーションから衝突点までの飛跡を計算し、衝突点での η 、 ϕ の値を求める。この際、 η は MDT で精度よく測定できるので、MDT の η 情報を用いる。衝突点からインナーステーションまでの間は η 方向にはほとんど曲がらないため、インナーステーションでの飛跡の傾きは衝突点での傾きとほぼ等しくなる。よって衝突

点での η はインナーステーションでの η と同値とする。この η から図 2.5 の式を用いて傾きを計算し、この値を新たなインナーステーションのロードの傾きとする。この後、新たなロードの周囲に存在する MDT の用いてインナーステーションのスーパーポイントを再構成する。

5.2.2 MDT 情報の外挿法による効果

図 5.8 は MDT 情報をインナーステーションへ外挿する前後のロードの傾きとオフラインミュウオンの傾きの差の分布である。赤線が外挿法を用いた場合の分布を示し、青線が外挿法を行わない場合の分布である。外挿を行った場合のロードの傾きはよりオフラインミュウオンの飛跡の傾きに近くなり、ピークが鋭くなっている。また図 5.9 は改良前後のインナーステーションにおける Δ slope 分布及びその拡大図である。黄色のグラフは改良後を示し、青色のグラフは改良前の結果を示す。MDT 情報の外挿を行うことで、 Δ slope 分布の Tail 事象を削減する事に成功した。図 5.10 は MDT 外挿法以外の改良を行った場合のインナーステーションにおける Δ slope 分布を青色で、MDT 外挿法を含む全ての改良を行った場合のインナーステーションにおける Δ slope 分布を黄色のグラフで表したものである。また図 5.10 左図は $|\Delta$ slope| < 1.5 の領域を表し、右図は $|\Delta$ slope| < 0.2 の領域についての分布である。

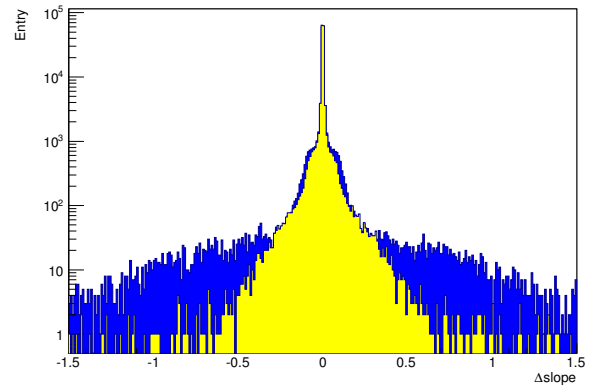
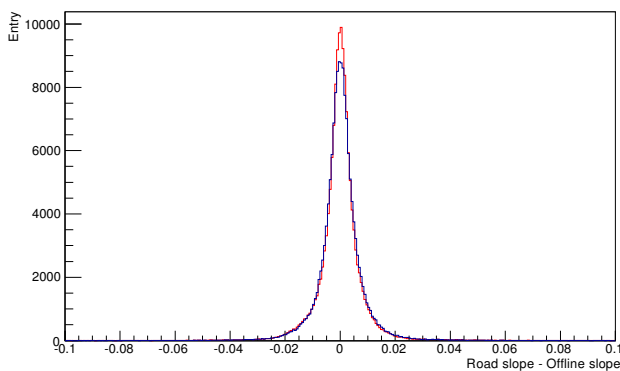


図 5.8: MDT 情報で引いたロード傾きとオフラインミュウオンの傾きの差
 図 5.9: MDT 外挿法を行った場合のインナーステーションでの Δ slope

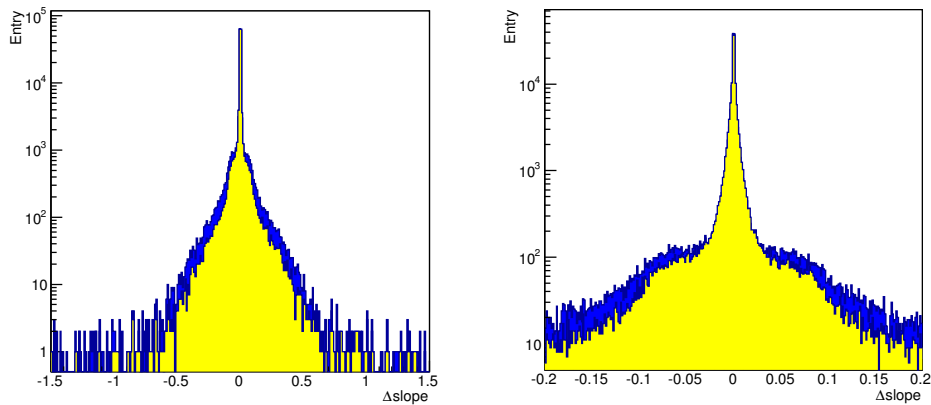


図 5.10: 改良前後の Δ slope 分布 (左) とその拡大図 (右)

5.3 性能評価まとめ

4章ではフェイクヒットによるパターン誤認識など、単一のステーションで起きうる問題点に対する改良を行った。また本章では複数のステーションの情報を結びつけることで、対称性問題などの単一のステーションの情報では解決できない問題に対する改良を行った。ここでは4章、5章で行った改良結果を全て含めた性能評価について述べる。

図 5.11 はこれまでのすべての改良を加えた場合の Δ slope 分布 (黄色) と改良前の Δ slope 分布 (青色) を表している。また図 5.12 はその拡大図である。左図からそれぞれインナー、ミドル、アウターを示す。改良後では Tail 事象を大きく削減することに成功した。また図 5.13 は改良前後での各ステーションにおける Tail 事象と Good 事象の比を表す。それらの詳細な値を示す。インナーステーションでは主に MDT 情報の外挿法によって 5.8%もの改善がみられた。またミドル、アウターそれぞれで、3.5%、2.9%の改善に成功した。

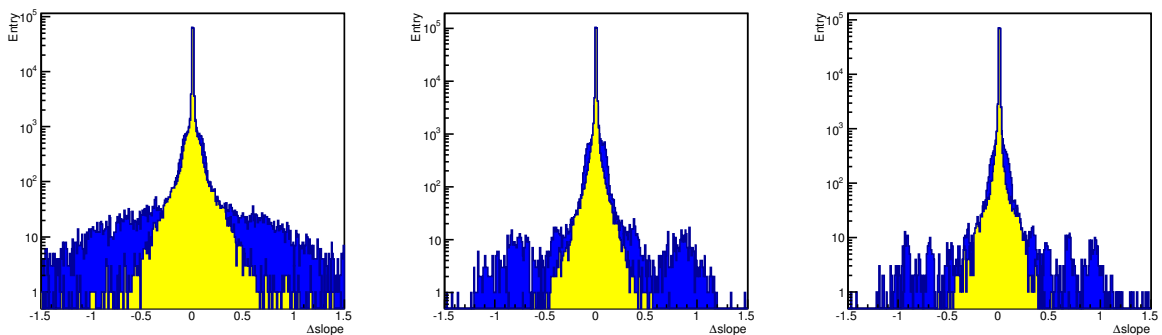


図 5.11: 各ステーションでの Δ 分布 (左からインナー、ミドル、アウター)

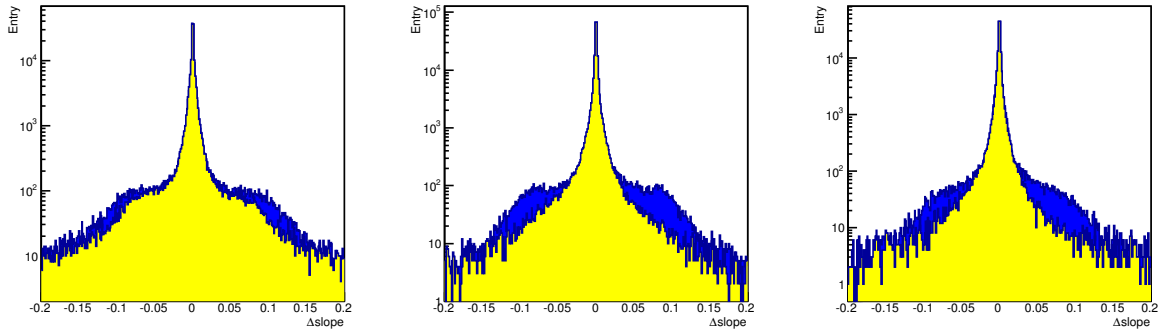


図 5.12: 各ステーションでの Δ 分布 (拡大図)

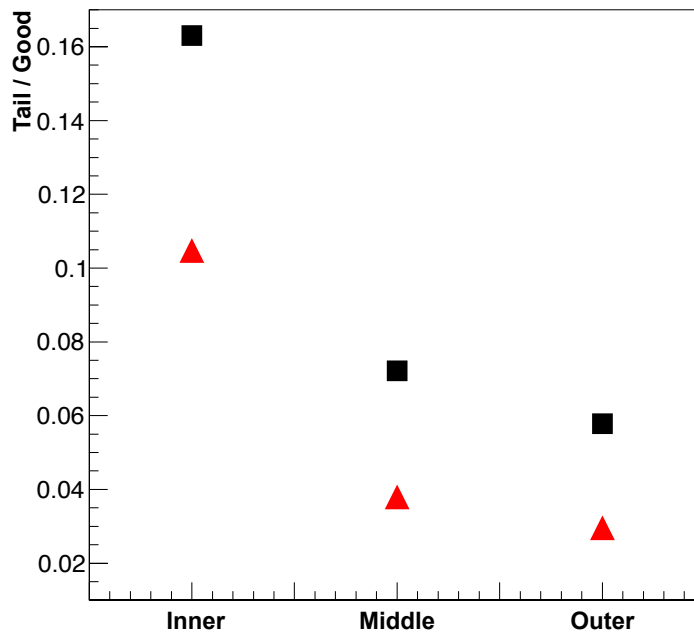


図 5.13: 各ステーションでの Tail 事象と Good 事象の比

表 5.2: 改良前後の Tail 事象と Good 事象の比

ステーション	Tail/Good(改良前)	Tail/Good(改良後)	Tail/Good の減少率
インナー	16.3%	10.5%	5.8%
ミドル	7.3%	3.8%	3.5%
アウター	5.9%	3.0%	2.9%

第6章 まとめ

本研究では、ATLAS 実験におけるレベル 2 ミューオントリガーの飛跡パターン認識アルゴリズムの改良を行った。

レベル 2 ミューオントリガーの第一段階である MuonSA アルゴリズムで用いられる飛跡パターン認識アルゴリズムでは、フェイクヒットなどの原因によってパターン認識を誤る問題点があった。チューブ選択アルゴリズムにおいて、1つの MDT 層でロード中心に最も近いチューブを 1 本選択するアルゴリズムから、各 MDT 層につき最大 2 本まで候補を保持し、最小の χ^2 になるパターンを選択するアルゴリズムに改良した。またドリフト時間の上限値の設定、ロードの位置及び幅の最適化を行うことでフェイクヒットを削減した。これらの改良によって再構成されたスーパーポイントの傾きの精度を向上することに成功した。

また単一のステーションの情報では解決できない対象なパターン認識の問題に対し、ミドルステーションとアウトーステーションのマッチングをとる手法によってこの問題の対策を行った。この結果ミドルステーション、アウトーステーションともにスーパーポイント再構成の精度が向上した。特にミドルステーションではこれらすべての改良を加えることによって、改良前と比較して再構成の精度が低かった事象の約半数を改善することに成功した。

さらにインナーステーションのスーパーポイント再構成の精度向上のため、MDT 情報のインナーステーションへの外挿を行った。この結果、インナーステーションでのロードの傾きの精度を高めることができ、インナーステーションのスーパーポイント再構成の精度を向上させる事に成功した。

謝辞

本論文の執筆にあたり、多くの方々の力をお借りしました。まず初めに指導教官である藏重久弥教授には、このような国際的な研究ができる機会を与えていただき深く感謝します。研究に対する鋭いアドバイスや様々な知識についてご教授いただき、非常に参考になりました。その他研究室での会議、行事など様々な場面で支えていただきました。深く感謝致します。

また山崎祐司准教授には、研究開始当初から一つ一つ丁寧にご教授いただき、適切なアドバイスをいただいたことで本研究を進めることができました。また日露間会議など、貴重な経験ができる機会を与えていただきました。加えて日々の生活に関しても色々ご指摘いただきました。感謝とともに、ご迷惑をおかけしたことを深くお詫び申し上げます。

CERN 滞在時に現地でご指導いただいた高エネルギー加速器研究機構の長野邦浩准教授には、研究の具体的な知識や技術を教えていただき、本研究の道筋を立てていただきました。また、ハイレベルトリガーのグループミーティングでは毎回の確なコメントをいただきました。深く感謝致します。

東京工業大学の石塚正基助教には本研究の開始当初から、解析に用いるデータサンプルやアルゴリズムの動かし方をご教授いただきました。グループミーティングでの適切なアドバイスは大変参考になりました。ありがとうございました。

研究室秘書の横山有美様には出張時の手続きや、日々の生活に関連する様々な手続きなどを全てお願いしてきました。支障なく研究、出張などが行えたのは横山様のおかげです。ありがとうございました。

また、CERN 滞在時にはたくさんの先輩方にお助けいただきました。まず東京大学の道前武さんには CERN での生活、研究に対するアドバイスなど、非常に多くの場面でお助けいただきました。CERN 滞在中、思うように結果が出ていない時に気分転換で一緒に飲んだコーヒーの味は忘れません。誠にありがとうございました。次に東京工業大学の野辺拓也さんには、初めての CERN 出張から全ての滞在中でお世話になりました。また本研究の内容であるレベル 2 トリガー及び MuonSA アルゴリズムの知識が深く、たくさんのアドバイスをいただきました。深く感謝します。その他同じオフィスで研究を行った東京工業大学大学の菅野貴之さん、東京大学の奥山豊信さん、二宮陽一さんには日々の生活に関することや些細な質問にも気軽にお答えいただき大変感謝します。ありがとうございました。その他 ATLAS 日本グループのみなさまに、大変感謝しております。

研究室の ATLAS グループの先輩である Yuan Li さん、Matthew King さん、岸本巴さんには本研究で行う解析についてなどを教えていただきました。ありがとうございました。また研究室の ATLAS グループの同期である谷和俊さん、渡邊一平さんには、研究に対するアドバイスをいただき感謝しております。日々のくだらない会話のお陰で研究室での時間が楽しいものとなりました。深く感謝致します。その他研究室の同期の江戸勇樹さん、駒井英俊さん、細川佳志さん、村田亜紀さん、山口貴弘さんには公私ともにお世話になりました。ありがとうございました。

東京大学の森永真央さんには解析に使用するツールに関してなど様々な知識を教えていただきました。CERN 滞在時に同じ部屋で寝食を共にした時もあり、研究に対する姿勢は良い刺激となりました。深く感謝致します。その他、学生生活を楽しいものにしていただいた友人のみなさまに深く感謝致します。

最後に 25 歳まで何不自由なく学生で過ごさせていだき、日々の生活を支えていただいた家族に感謝の意を述べ、謝辞にかえさせていただきます。

付録A η 及び p_T 領域で分割した Δ slope 分布

第4章で行った改良を加える前後での、 η 及び p_T それぞれの分割領域を表 A.1 に示す。これらの領域

表 A.1: η 、 p_T の分割領域

領域	η の範囲	p_T の範囲	領域	η の範囲	p_T の範囲
1	$\eta < -2.0$	$p_T < 10\text{GeV}$	4	$1.05 < \eta < 1.5$	$30\text{GeV} < p_T < 40\text{GeV}$
2	$-2.0 < \eta < -1.5$	$10\text{GeV} < p_T < 20\text{GeV}$	5	$1.5 < \eta < 2.0$	$40\text{GeV} < p_T < 50\text{GeV}$
3	$-1.5 < \eta < 1.05$	$20\text{GeV} < p_T < 30\text{GeV}$	6	$2.0 < \eta$	$50\text{GeV} < p_T$

ごとに Δ slope 分布を作成した。図 A.1、図 A.2 はそれぞれインナーステーションに対する η 、 p_T 分割した Δ slope 分布を示す。図 A.3、図 A.4 は同様の分布をミドルステーションに対して表したものであり、図 A.5、図 A.6 はアウトーステーションに対するものである。またこれらをまとめたものが図 4.14-図 4.17 である。

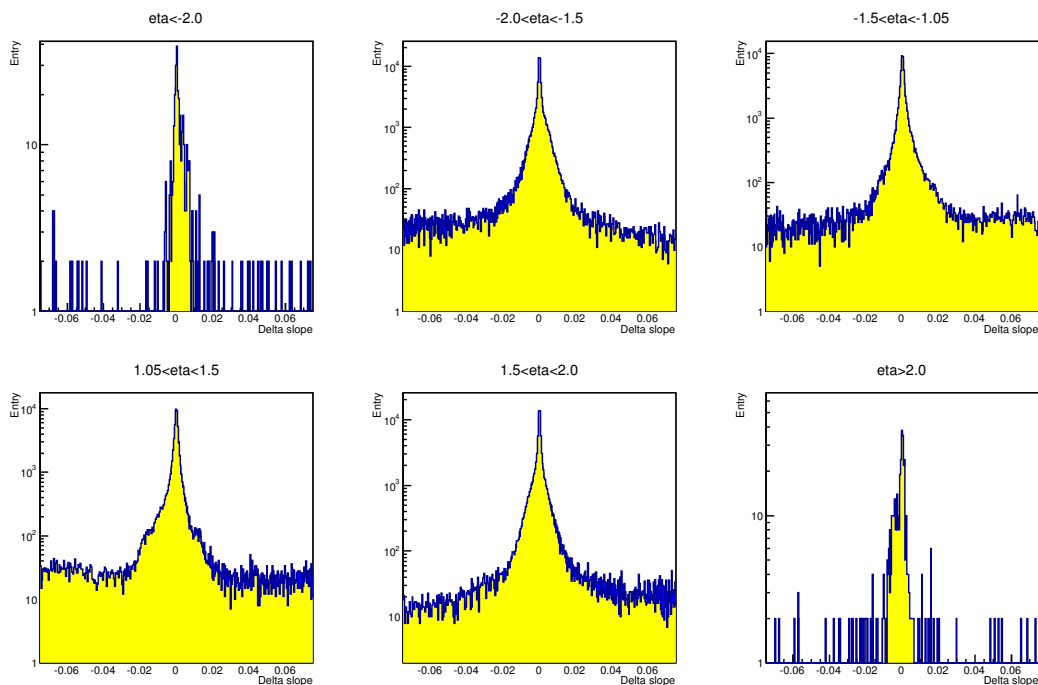


図 A.1: η 領域で分割した Δ slope 分布 (インナー)

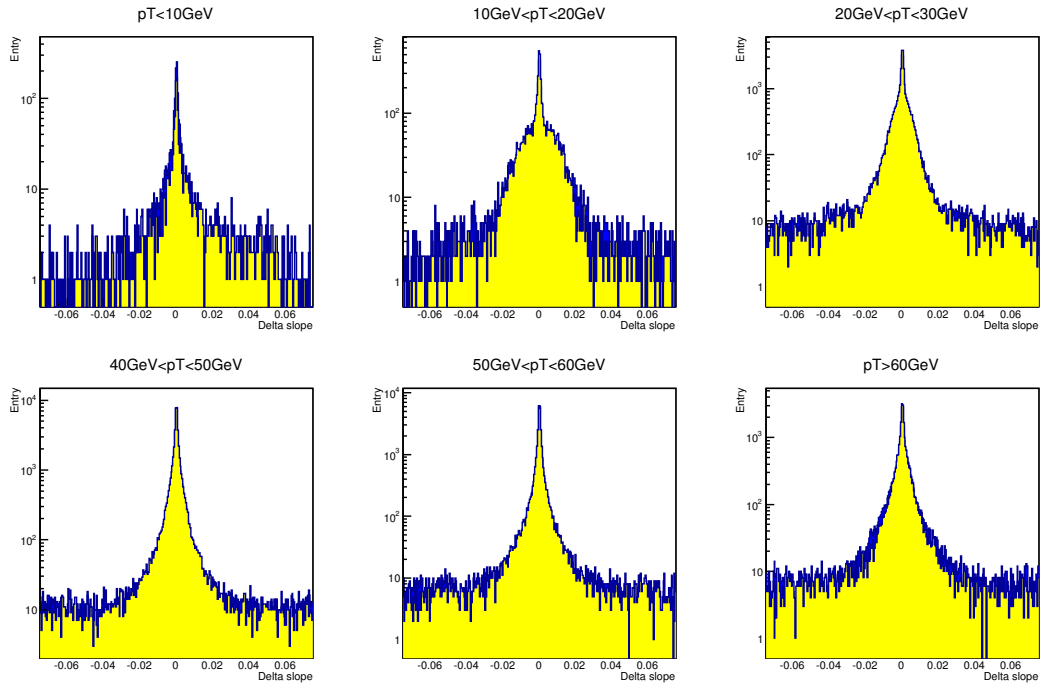


図 A.2: p_T 領域で分割した Δ slope 分布 (インナー)

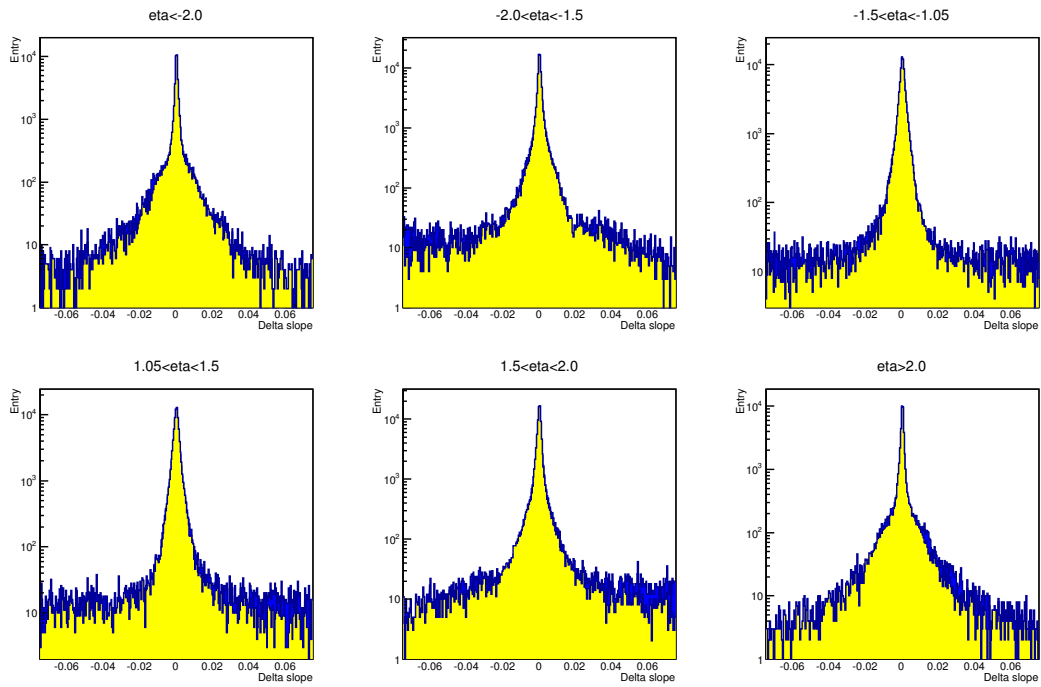


図 A.3: η 領域で分割した Δ slope 分布 (ミドル)

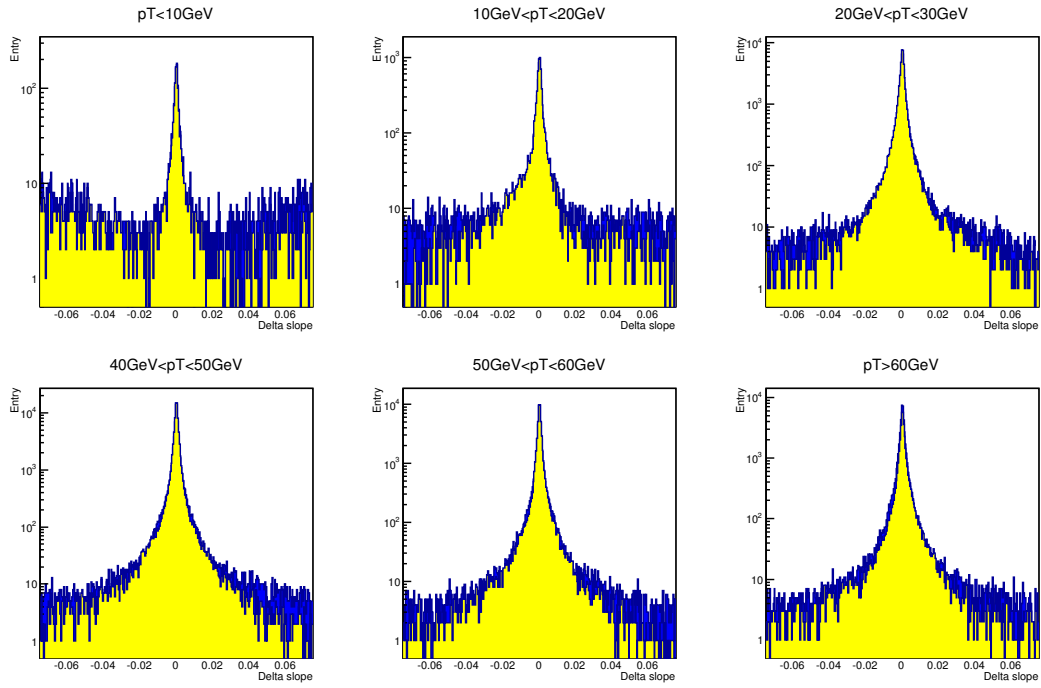


図 A.4: p_T 領域で分割した Δ slope 分布 (ミドル)

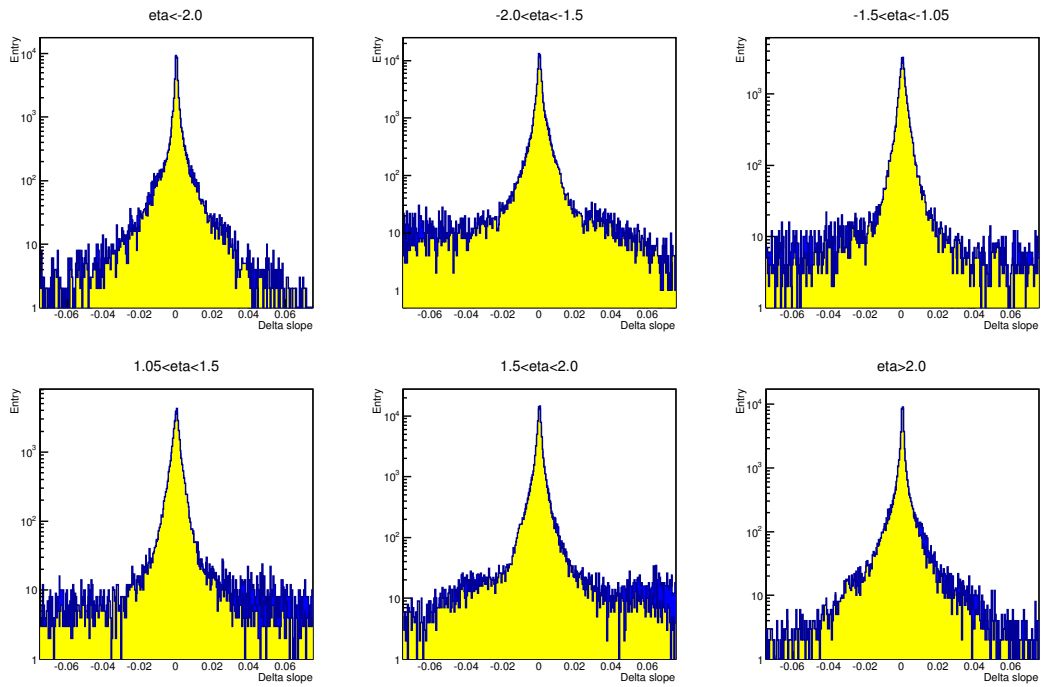


図 A.5: η 領域で分割した Δ slope 分布 (アウター)

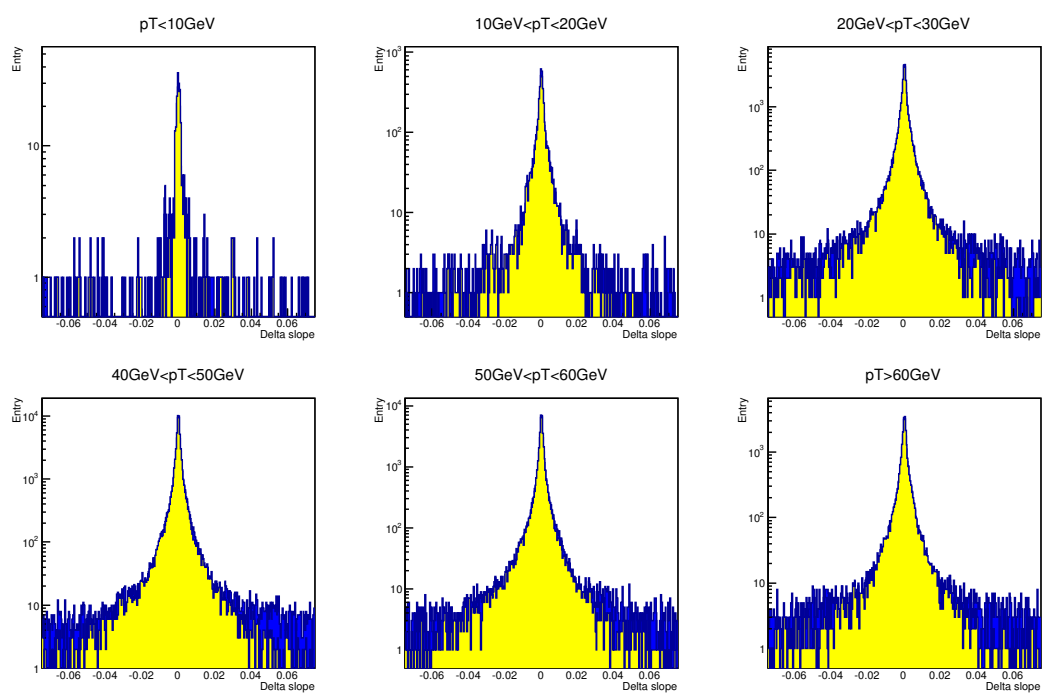


図 A.6: p_T 領域で分割した Δslope 分布 (アウトター)

参考文献

- [1] The ATLAS Collaboration, *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, JINST3 S08003, 2008
- [2] ATLAS EXPERIMENT, URL:<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResults>
- [3] The ATLAS Collaboration, *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, arXiv:1207.7214, 31 July 2012
- [4] ATLAS EXPERIMENT, URL:<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/CombinedSummaryPlots>
- [5] H.H.J. ten Kate, *The ATLAS superconducting magnet system at the Large Hadron Collider*, Physica C468, 1 July 2008
- [6] T.Dohmae, *Performance study of Level2 Muon Trigger System in the ATLAS experiment*, Master Thesis, The University of Tokyo, Department of Physics, 2008
- [7] 野辺 拓也著, *ATLAS実験におけるミューオンのトリガーの性能改良*, 修士学位論文, 東京工業大学理学研究科 博士前期課程, 2012
- [8] Di Mattia, *Online Muon Reconstruction in the ATLAS Level-2 trigger system*, ATL-DAQ-CONF-2005-013, 2004
- [9] Alex Long, *MuFast Timing*, MuFast Monthly Meeting, 18, Sep, 2012
- [10] 堀 卓也著, *ATLAS実験レベル1 ミューオントリガーのシミュレーションによる性能評価*, 修士学位論文, 神戸大学大学院理学研究科博士前期課程, 2009
- [11] 岸本 巴著, *ATLAS実験におけるミューオントリガー効率の評価*, 修士学位論文, 神戸大学大学院理学研究科博士前期課程, 2012