

修士論文

高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた RPC 検出器を用いた バレル部ミューオントリガーの開発

京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室

学生番号 0530-29-9377

國吉 宏一郎

2020 年 1 月 29 日

概要

ATLAS 検出器は、欧州原子核研究機構 (CERN) の陽子陽子衝突型加速器、Large Hadron Collider (LHC) の衝突点の 1 つに設置された汎用検出器である。LHC は最大重心系エネルギー 13 TeV または 14 TeV で 10^{11} 個の陽子バンチ同士を 40 MHz という高頻度で衝突させ、TeV 領域までの新粒子の直接探索やヒッグス粒子の精密測定等の手法で標準模型を超えた物理にアプローチしている。

ATLAS 実験ではデータ記録速度の限界により、LHC での全陽子衝突事象を記録することはできない。また新物理に由来するような事象は稀にしか起きないため、全衝突事象の中から興味のある事象を選別 (トリガー) し記録する必要がある。本研究で扱うミューオントリガーはミューオンの横運動量 (p_T) に閾値を設けて事象の選別を行う。現在は高速処理が可能なハードウェアで実装された Level-1 トリガーと、ソフトウェアで実装された精密なトリガー判定が可能なハイレベルトリガーの 2 段階に分けて選別が行われている。

LHC は 2024-2026 年に加速器のアップグレードを行い、瞬間ルミノシティを現在の約 5 倍の $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に増加させて運転する予定である (高輝度 LHC-ATLAS 実験)。ルミノシティの増加に伴いイベントレートが増加するため、トリガーレートの許容値が 100 kHz の Level-1 トリガーを刷新し、1 MHz まで対応可能な Level-0 トリガーを導入する予定である。また現在のトリガーロジックのままではトリガーレートが許容値を超えてしまうため p_T の閾値を上げるなどの対策が必要になり、その場合物理に対する感度を失ってしまい高輝度環境を活かすことができない。そのためより高い p_T 分解能を持ったトリガーアルゴリズムを開発することが必要である。そこで私は p_T 分解能の改善のために、高輝度 LHC-ATLAS 実験から新たに ATLAS 検出器バレル内部領域に導入される Resistive Plate Chamber (RPC) の情報を用いたトリガーアルゴリズムの開発を行った。

1 つ目の研究として、シミュレーションデータを使用し RPC のヒットから飛跡に対して磁場中での円軌道を仮定してフィッティングを行う新しいアルゴリズム (「円フィッティング」と呼ぶ) を開発し性能評価を行った。高輝度 LHC-ATLAS 実験で現在採用予定のアルゴリズム (「ヒットファインダー」と呼ぶ) に対して円フィッティングを適用することで、ヒットファインダーに対して p_T が 20 GeV 以上の領域での相対効率を 99 % 以上に保ちながら、 p_T が 20 GeV より低い領域での相対効率を約 74 % に削減できることを示した。

2 つ目の研究として、円フィッティングを回路設計の変更が可能な集積回路にパターンマッチングという手法を用いて実装する方法を考案した。パターンマッチングでは、事前に RPC のヒット位置と p_T を対応付けるパターンリストを作成しておき実際のヒットとパターンリストを照らし合わせることでトリガー判定を行う。ヒットファインダーをもとにして作成したヒットパターンに対して円フィッティングを行い、低い p_T のヒットパターンを削減することでパターンリストを作成しパターンマッチングの実装を行った。その結果、ヒットファインダーに対して p_T が 20 GeV 以上領域での相対効率を 99 % 以上に保ちながら、 p_T が 20 GeV より低い領域での相対効率を約 84 % に削減できることを示した。パターンマッチングで円フィッティングの性能を完全に再現することはできなかったが、ハードウェアにおいて低い p_T のミューオンを大きく落とすことができることを示した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	標準理論と新物理	1
1.2	ATLAS 実験の目指す物理	1
第 2 章	LHC と ATLAS 検出器	5
2.1	LHC	5
2.2	ATLAS 検出器	5
2.2.1	ATLAS 実験で用いる座標	5
2.2.2	超電導磁石	7
2.2.3	内部飛跡検出器	9
2.2.4	カロリメータ	9
2.2.5	ミューオン検出器	9
2.3	トリガーシステム	13
2.3.1	Level-1 トリガー	16
2.3.2	ハイレベルトリガー	18
第 3 章	高輝度 LHC 計画	19
3.1	高輝度 LHC について	19
3.2	高輝度 LHC-ALTAS 実験に向けたアップグレード	19
3.2.1	ミューオントリガーアップグレードの重要性	19
3.2.2	ミューオントリガーアップグレードの概要	19
3.2.3	ミューオン検出器のアップグレード	20
3.2.4	Level-0 トリガーシステム	22
第 4 章	高輝度 LHC でのバレル部ミューオントリガーのアップグレード	27
4.1	現行のバレル部ミューオントリガー	27
4.1.1	トリガー判定の概要	27
4.1.2	トリガー単位	27
4.1.3	トリガーとデータの読み出し	28
4.2	現在のバレル部ミューオントリガーの問題点とアップグレード	28
4.3	バレル部 Level-0 ミューオントリガー	32

4.3.1	バレル部 Level-0 ミューオントリガーの流れ	32
第 5 章	バレル部 Level-0 ミューオントリガーアルゴリズムの開発	35
5.1	高輝度 LHC のためのバレル部ミューオントリガーの概要	35
5.2	ヒットファインダー	35
5.3	円フィッティング	41
5.3.1	円フィッティングの概要	41
5.3.2	円フィッティングの方法	43
5.3.3	初期値の決定方法	43
5.3.4	RPC0 にヒットがない場合	45
5.3.5	磁場の考慮	46
5.3.6	閾値の決定方法	46
5.4	パターンマッチング	47
5.4.1	パターンマッチングの概要	50
5.4.2	パターンリスト	51
5.4.3	パターンリストの作成方法	51
5.4.4	円フィッティングによる low p_T パターンの削減	51
第 6 章	バレル部ミューオントリガーアルゴリズムの性能評価	54
6.1	トリガー効率	54
6.2	円フィッティングの性能評価	55
6.3	パターンマッチングの性能評価	56
第 7 章	結論と今後の展望	58
	謝辞	60
	参考文献	61
付 録 A	ヒットファインダーのウィンドウの大きさの決定方法	62
A.1	ウィンドウの大きさの決定方法	62
A.1.1	η ストリップに対応するウィンドウ	62
A.1.2	ϕ ストリップに対応するウィンドウ	62
A.2	ウィンドウの大きさ	63

目 次

1.1	標準理論で導入されている素粒子。	2
1.2	LHC におけるヒッグス粒子の生成過程。	2
1.3	ヒッグス粒子の主な崩壊過程。	3
1.4	超対称性粒子の一覧。	4
2.1	LHC 加速器の運転とアップグレード。	6
2.2	ATLAS 検出器。	6
2.3	ATLAS 実験で用いられる座標系。	7
2.4	ATLAS 実験で用いられる超伝導磁石。	8
2.5	内部飛跡検出器。	8
2.6	カロリメータの配置。	9
2.7	ミューオン検出器。	10
2.8	ミューオン検出器 x-y 断面図。	10
2.9	ミューオン検出器 z-y 断面図。	11
2.10	RPC の内部構造。	12
2.11	RPC 検出器の配置。	13
2.12	現行の RPC のトリガー。	14
2.13	TGC の内部構造と TGC の構造。	14
2.14	MDT の構造。	15
2.15	(左) MDT のドリフトチューブの x-y 断面図 (右) MDT のドリフトチューブ。	15
2.16	CSC の内部構造。	16
2.17	ATLAS 実験の Run-3 におけるトリガーシステムのブロック図。	17
3.1	終状態にレプトンを含む各物理プロセスに対するアクセプタンスを p_T の関数として表したグラフ。	20
3.2	Phase-2 アップグレードで導入される RPC BI(Large Sector)。	21
3.3	Phase 2 アップグレードで導入される RPC BI と sMDT(Small Sector)。	21
3.4	BI 領域の x-y 断面図。	22
3.5	オフラインの解析で p_T が 25 GeV として判定されたミューオンに対する Level-0 バレル部ミューオントリガーのアクセプタンス。	23
3.6	(左) 現行の MDT のドリフトチューブ。(右)sMDT のドリフトチューブ。	23

3.7	Level-0 トリガーシステムのブロック図。	25
3.8	Level-0 ミューオントリガーシステムのブロック図。	26
4.1	Level-1 トリガーロジック。	28
4.2	RPC のトリガーセクター。	29
4.3	RPC のトリガーセクター及び RoI の配置図 (縦軸が ϕ で横軸が η)。	30
4.4	バレル部 Level-1 トリガーのトリガー・読み出しシステムの全体図。	31
4.5	バレル部 Level-0 トリガーのトリガー・読み出し回路の全体像。	33
4.6	DCT ボードの全体図。	34
5.1	Run-2 における Level-1 トリガーで p_T 閾値 20 GeV で取得した事象について、データ取得後にオフラインで解析を行った後のミューオンの p_T 分布。	36
5.2	ヒットファインダーアルゴリズム。	37
5.3	ヒットファインダーのイメージ図。	38
5.4	η ストリップのヒットを探す際に用いる z/x 。	39
5.5	ϕ ストリップのヒットを探す際に用いる y/x 。	39
5.6	dMM と dMO の定義。	40
5.7	Quality 決定の例。	42
5.8	バレル部でのミューオンの軌道。	43
5.9	p_T と $R \sin \theta$ の関係。	44
5.10	円フィッティングの方法。	44
5.11	フィッティングを行う際の初期値の決め方。	45
5.12	RPC0 にヒットがない場合の磁場の境界上の点の求め方。	46
5.13	x-y 平面における磁場の方向と大きさ。	47
5.14	η 方向の領域の分割。	48
5.15	ϕ 方向の領域の分割。	49
5.16	閾値の決定方法。	49
5.17	$20 \leq p_T < 21$ GeV での $R \sin \theta$ の分布のガウス関数でのフィット結果 (η 領域⑤と ϕ 領域⑤)。	50
5.18	パターンリスト作成の概念図。	52
5.19	RPC0 を通らないミューオンの飛跡。	52
6.1	p_T 閾値 20 GeV の円フィッティングによるトリガー効率 $\epsilon_{\text{trigger}}$ とヒットファインダーのトリガー効率 $\epsilon_{\text{hitfinder}}$ の p_T 依存性の比較。	55
6.2	p_T 閾値 20 GeV の円フィッティングの相対効率 $\epsilon_{\text{relative}}$ の p_T 依存性。	56
6.3	p_T 閾値 20 GeV のパターンマッチングによるトリガー効率 $\epsilon_{\text{trigger}}$ とヒットファインダーのトリガー効率 $\epsilon_{\text{hitfinder}}$ の p_T 依存性の比較。	57

6.4	p_T 閾値 20 GeV のパターンマッチングの相対効率 $\epsilon_{\text{relative}}$ の p_T 依存性。	57
A.1	トリガータワーごとの p_T 20 GeV のミューオンが BM(RPC1) と BO に残すヒットの z/x の差の分布。	63
A.2	トリガータワーごとの p_T 20 GeV のミューオンが BI と BM(RPC1) に残すヒットの y/x の差の分布。	66

表 目 次

5.1	ウィンドウの種類。	40
5.2	Quality の定義。	41
6.1	p_T 閾値 20 GeV での円フィッティングによる各 p_T 領域のトリガー効率 $\epsilon_{\text{trigger}}$	55
6.2	p_T 閾値 20 GeV での円フィッティングによる各 p_T 領域の相対効率 $\epsilon_{\text{relative}}$	55
6.3	p_T 閾値 20 GeV でのパターンマッチングによる各 p_T 領域のトリガー効率 $\epsilon_{\text{trigger}}$	56
6.4	p_T 閾値でのパターンマッチングによる各 p_T 領域の相対効率 $\epsilon_{\text{relative}}$	57
A.1	p_T 閾値 20 GeV の Large Sector での η ストリップに対するウィンドウの大きさ。	64
A.2	p_T 閾値 20 GeV の Large Sector での ϕ ストリップに対するウィンドウの大きさ。	65

第1章 序論

1.1 標準理論と新物理

標準理論は素粒子の相互作用を記述する理論である。標準理論には 17 種類の素粒子が登場し、2012 年に LHC-ATLAS 実験と CMS 実験によりヒッグス粒子が発見され^[1] 全ての粒子が発見された。素粒子はフェルミオンとボソンに分けることができ、12 種類のフェルミオンと 5 種類のボソンがある。素粒子の間に働く相互作用は、電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、重力相互作用の 4 種類である。この中で重力相互作用は、他の 3 つの相互作用に比べて何十倍も弱く素粒子反応中に検出できるほどの影響を与えないため標準理論では扱っていない。これらの 3 つの相互作用はゲージボソンによって媒介される。図 1.1 に標準理論に登場する素粒子を示す。

標準理論は多くの実験結果を説明することができているが、ダークマターの起源や階層性問題などの標準理論では説明できない問題が存在する。これらの問題を解決するために、標準理論を超える物理が必要である。

1.2 ATLAS 実験の目指す物理

LHC-ATLAS 実験では高エネルギーの陽子同士を衝突させることにより発生する粒子の崩壊を精密に測定し、ヒッグス粒子の湯川結合の測定や超対称性粒子等の新粒子の直接探索を行っている。新粒子やヒッグス粒子の生成断面積は非常に小さいため、精密に測定するには多くのデータが必要である。2026 年には LHC 加速器のビーム輝度を現在の 5 倍の $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、重心系エネルギー 14 TeV で運転する高輝度 LHC 加速器が運転開始予定であり、これにより多くのデータを取得することができる。ここではヒッグス粒子の精密測定と超対称性粒子に絞って説明する。

ヒッグス粒子の精密測定

ヒッグス粒子の他の粒子との結合定数の精密な測定は非常に重要である。標準理論ではヒッグス粒子は 1 種類でフェルミオンと質量に比例した湯川結合をするとされているが、標準理論を超える物理の寄与があればこの結合定数にずれが生じる可能性がある。そこで実験でヒッグス粒子の結合定数を精度良く測定することで、新物理に対する手がかりを得ることができる。図 1.2 と図 1.3 に LHC でのヒッグス粒子の生成過程と崩壊過程を示す。

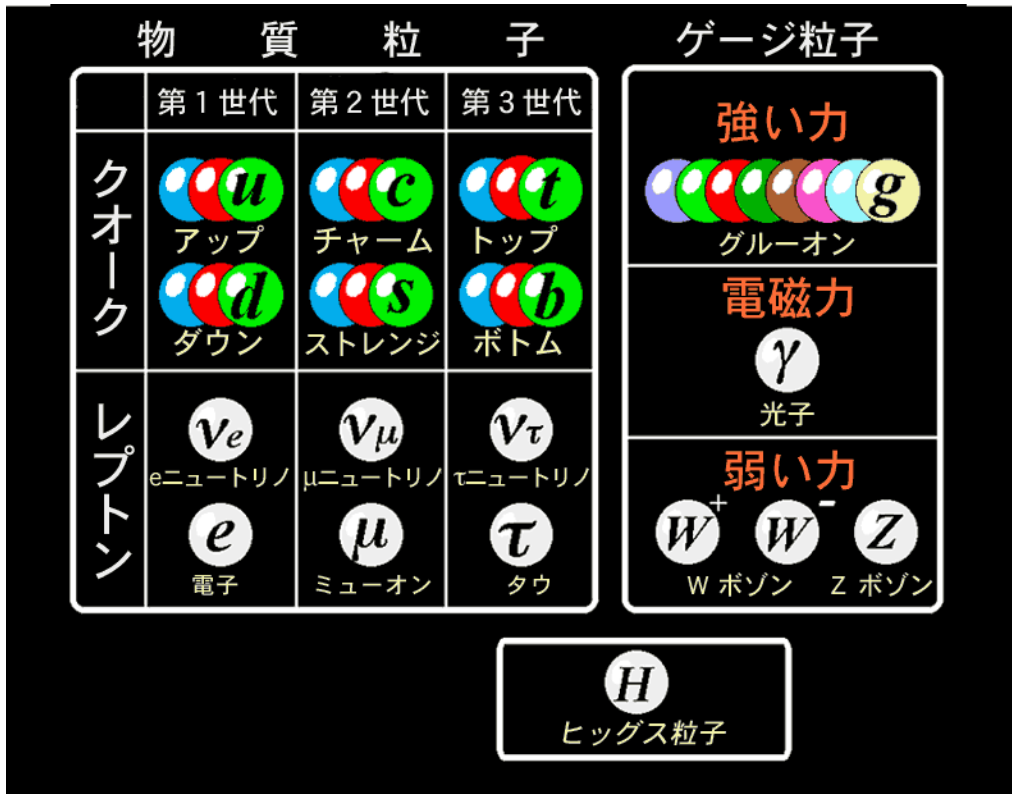


図 1.1 標準理論で導入されている素粒子。

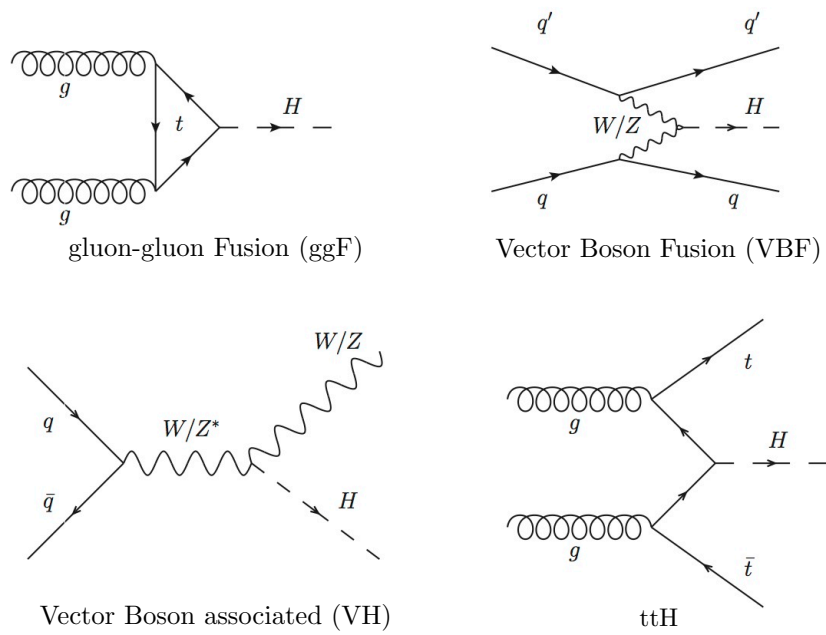


図 1.2 LHC におけるヒッグス粒子の生成過程。

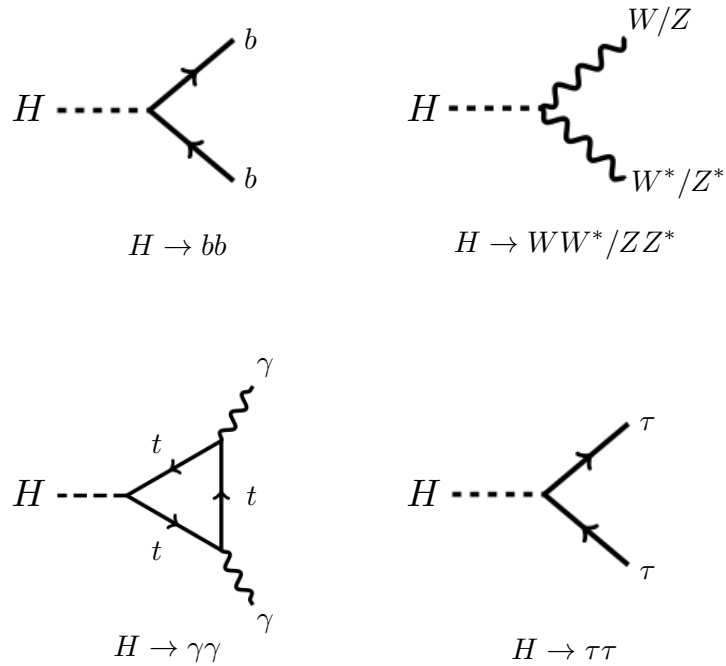


図 1.3 ヒッグス粒子の主な崩壊過程。

超対称性粒子

超対称性粒子は、ボソンとフェルミオンに対する対称性を仮定した際に導入される粒子の総称である。図 1.4 に示すように、超対称性理論では標準理論の粒子に対して超対称性パートナーが存在する。ところで現在、ヒッグス粒子の質量はおよそ 125 GeV と測定されている。観測されるヒッグス粒子の質量が 125 GeV になるためには、裸の質量と輻射補正の間で 10^{15} GeV の量を微調整しなければならない。これは非常に不自然なことである。この問題を階層性問題と呼ぶ。もし数 TeV の質量領域に超対称性粒子が存在すれば階層性問題を解決することができる [2]。そのため LHC での直接生成により超対称性粒子の探索を行っている。

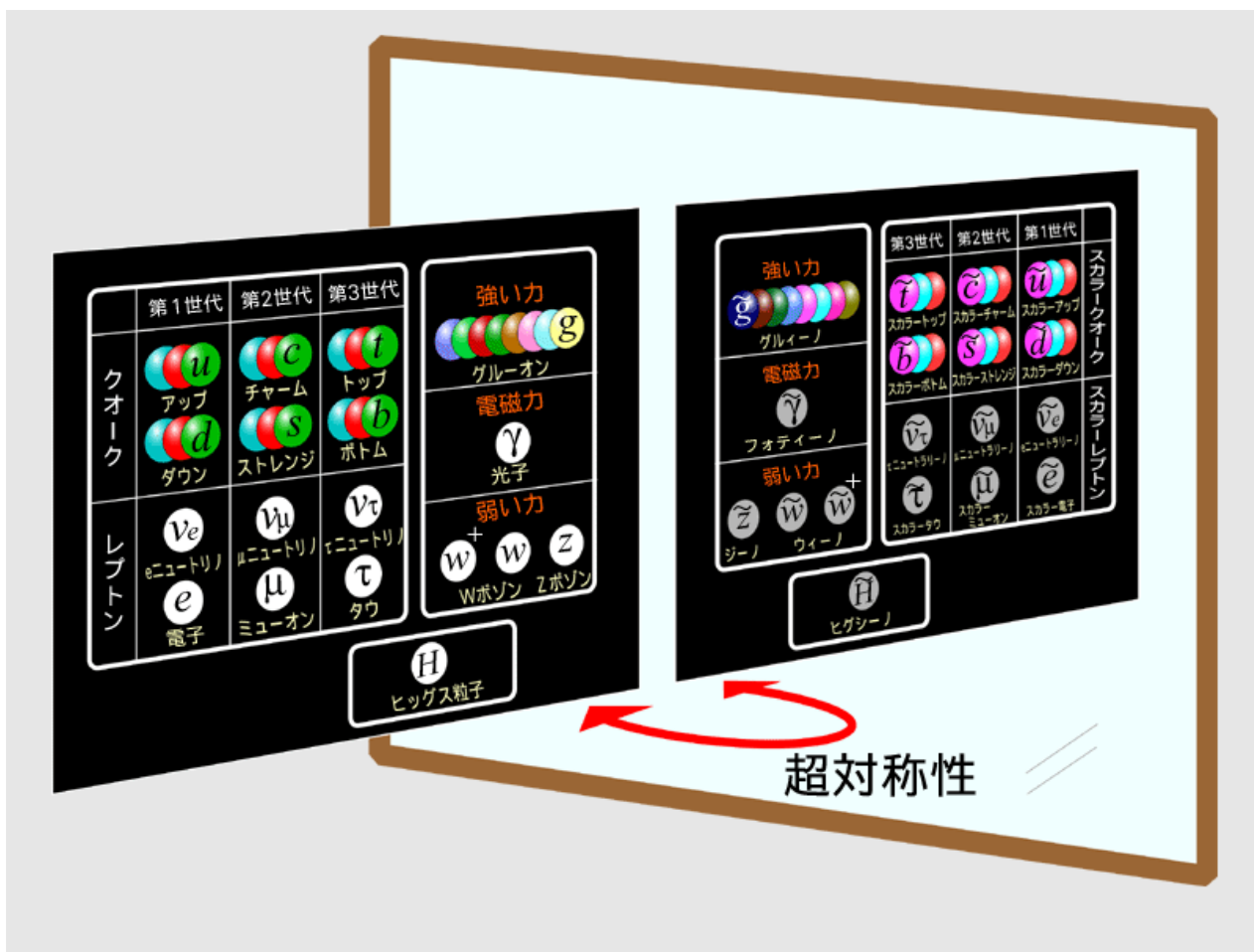


図 1.4 超対称性粒子の一覧。標準理論粒子に対して超対称性パートナーが存在することが予言される。

第2章 LHC と ATLAS 検出器

2.1 LHC

LHC(Large Hadron Collider) はジュネーブ近郊の欧州原子核研究機構 (CERN) に設置された世界最高エネルギーの陽子陽子衝突型加速器である。周長は 27 km であり、2020 年現在は 2021 年からの運転に向けてアップグレードを行っており運転を休止している。

図 2.1 に LHC 加速器の運転とアップグレード計画を示す。LHC は 2010 年から本格的に稼働し、2012 年までの間に重心系エネルギー 7~8 TeV、最高瞬間ルミノシティ $0.77 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転を行った (Run-1)。その後、LHC は 2013 年から 2015 年までの間 LHC は運転を休止し、加速器のアップグレードを行った (Phase 0 アップグレード)。2015 年から 2018 年までの間は、重心系エネルギー 13 TeV、最高瞬間ルミノシティ $2.06 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転を行った (Run-2)。現在は運転を休止しており、2021 年以降の Run-3 に向けて加速器のアップグレードを行っている (Phase 1 アップグレード)。2021 年から 2023 年の間は、重心系エネルギーを 14 TeV に変更し、瞬間最高ルミノシティを $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転を行う予定である (Run-3)。2024 年からは運転を休止し加速器と ATLAS 検出器のアップグレードを行う予定である (Phase 2 アップグレード)。2027 年からは重心系エネルギー 14 TeV、瞬間最高ルミノシティを現在の約 5 倍の $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転をする高輝度 LHC-ATLAS 実験が行われる予定である。

2.2 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は、LHC の衝突点の 1 つに設置されている直径 25 m、長さ 44 m の大型汎用検出器である。全体図を図 2.2 に示す。ATLAS 検出器は内側から順番に内部飛跡検出器、ソレノイド磁石、カロリメータ、ミューオン検出器で構成されている。それぞれの検出器から得られる情報を用いて衝突点で生じた粒子の種類とエネルギーと運動量の測定を行う。

2.2.1 ATLAS 実験で用いる座標

ATLAS 実験で使用される座標系の説明をする。ATLAS 実験では図 2.3 で示すように 直交座標系と円筒座標系を使用する。どの座標系でも衝突点を原点とする。

直交座標系では、ビーム軸方向に z 軸をとり、 x 軸を検出器の衝突点から LHC 加速器の円の中心方向を正とする。 y 軸は地面に対してほぼ垂直で上方向を正に取る。

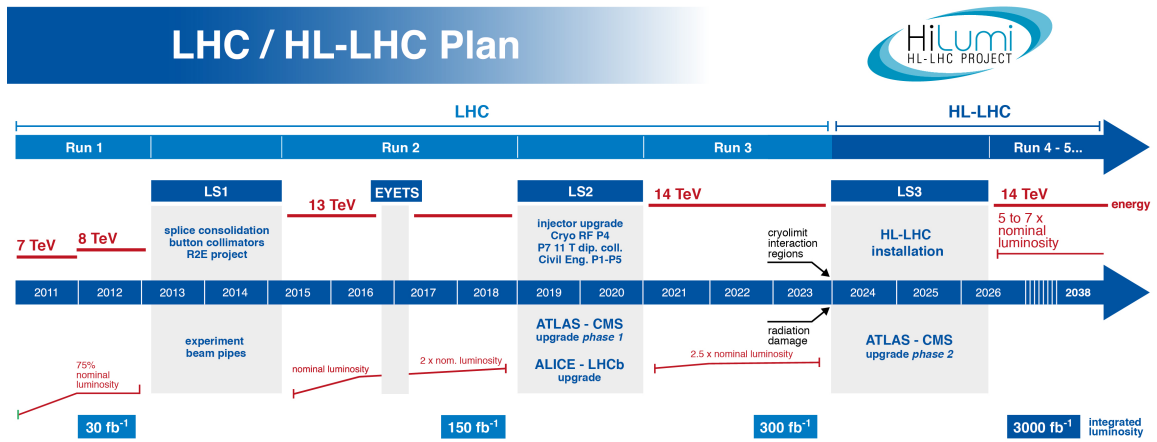


図 2.1 LHC 加速器の運転とアップグレード計画 [5]。LHC では Run-1、Run-2、Run-3 の運転と、それぞれの運転感のシャットダウン機関に Phase 0、Phase 1 アップグレードを行う。さらに高輝度 LHC に向けて 2024 年から 2026 年まで Phase 2 アップグレードを行い、2027 年から高輝度 LHC の運転が始まる。

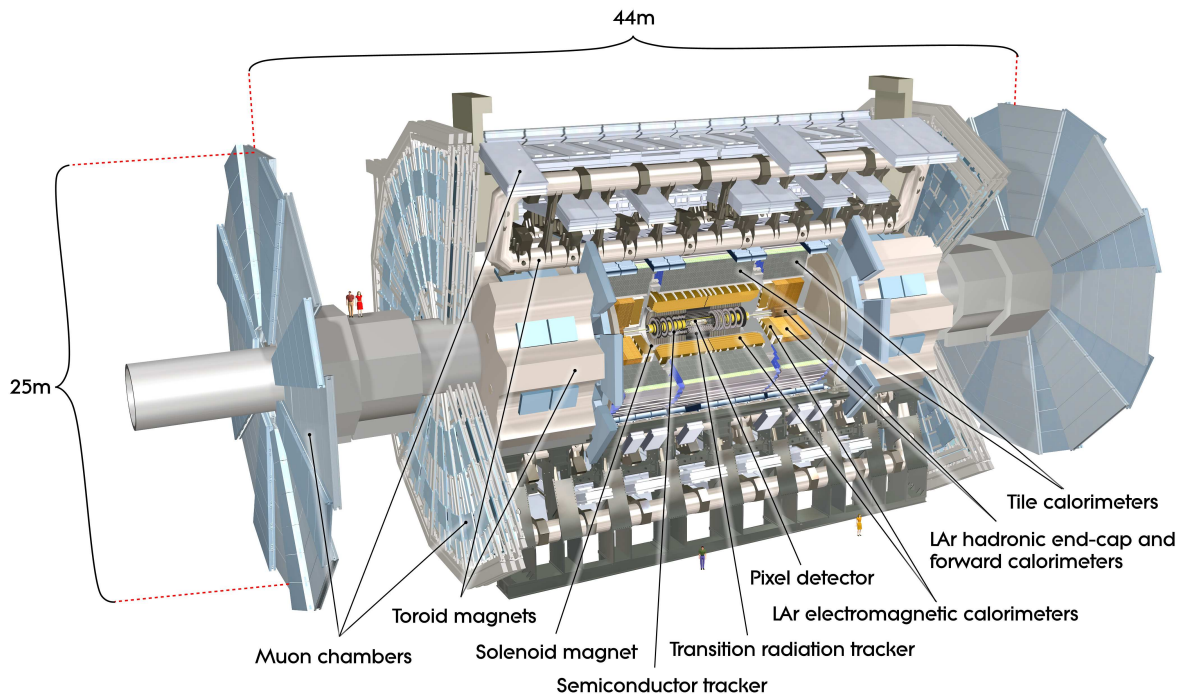


図 2.2 ATLAS 検出器 [3]。直径 25 m、長さ 44 m、重さ 7000 トンの円筒形汎用検出器。

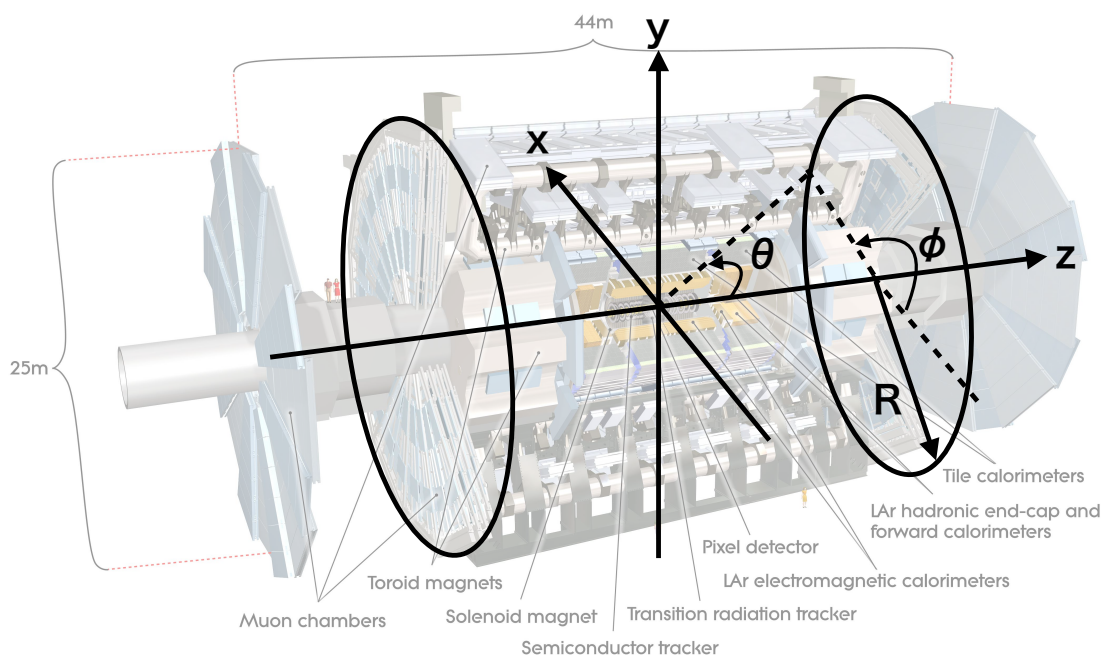


図 2.3 ATLAS 実験で用いられる座標系 [3]。x, y, z 軸を取った直交座標系と、R, z, ϕ を用いた円筒座標系が用いられる。 θ 方向を表す量としては擬ラピディティ $\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$ が用いられる。

またビーム軸からの角度を表すのに擬ラピディティ η を用いる。擬ラピディティは θ を天頂角とすると $\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$ で定義される。ATLAS 検出器は側面部のバレル部と底面のエンドキャップ部に分けることができ、それぞれの部分で検出器の配置や構成が大きく異なる。ミュオン検出器では $|\eta| < 1.0$ の領域をバレル部、 $|\eta| > 1.0$ の領域をエンドキャップ部と呼ぶ。

ATLAS 実験では粒子のエネルギーと運動量を表す際に E_T と p_T を用いる。陽子陽子衝突実験においては、実際に主な反応を起こしているのはクォークやグルーオンである。クォークとグルーオンの z 軸方向のエネルギーと運動量は不定であるため保存則を用いることができない。しかしビーム軸に垂直な方向ではエネルギーや運動量が保存しており保存則を用いることができる。そのため、ビーム軸に垂直な成分である E_T と p_T を物理測定ではよく用いる。

2.2.2 超電導磁石

ATLAS 検出器では荷電粒子の運動量の測定のために超電導磁石を用いている。図 2.4 に超電導磁石の配置を示す。超電導磁石は 2 種類あり、1 つは衝突点で発生した荷電粒子の運動量の測定のためのソレノイド磁石であり、もう一方はミュオンの運動量の測定のためのトロイド磁石である。

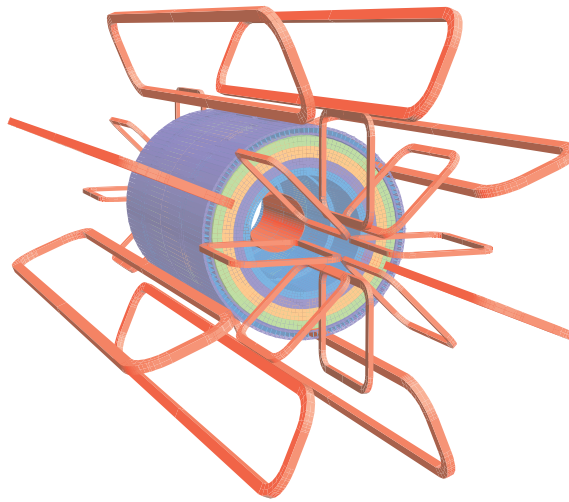


図 2.4 ATLAS 実験で用いられる超電導磁石 [3]。衝突点付近のソレノイド磁石とミュオン測定のためのトロイド磁石の 2 種類がある。

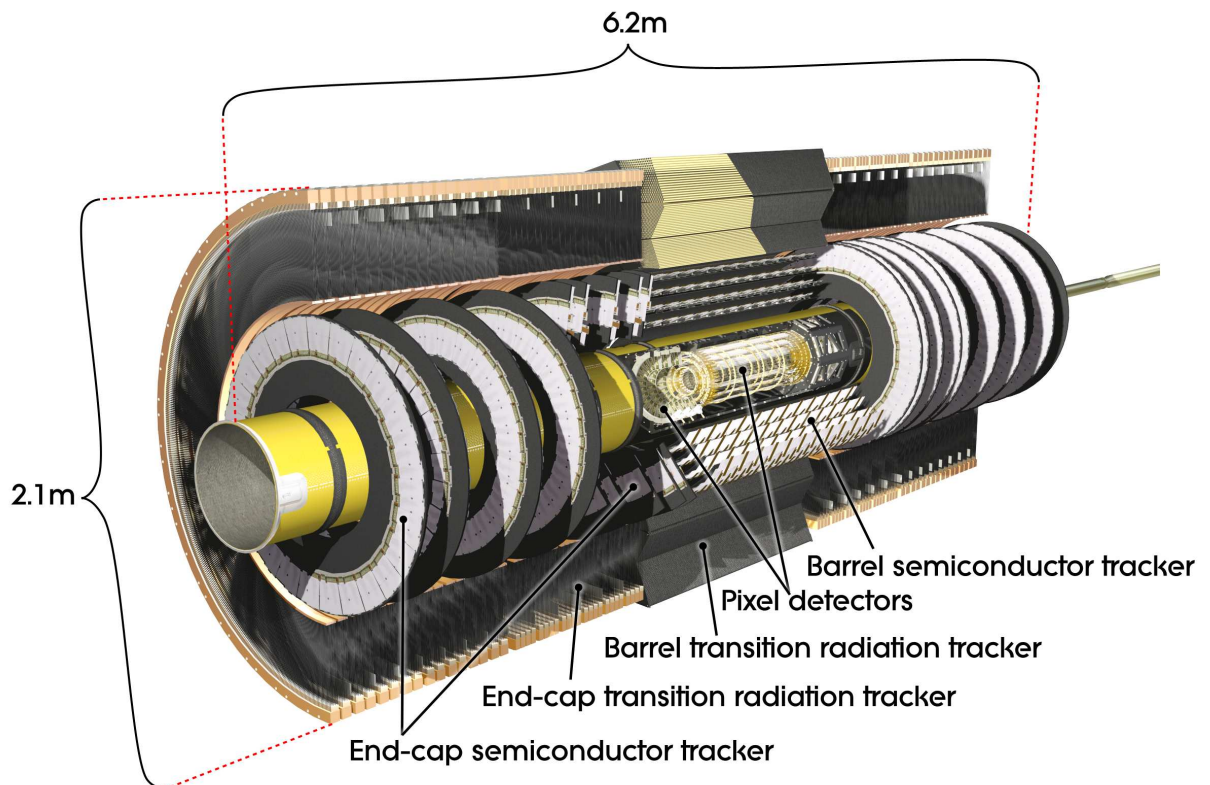


図 2.5 内部飛跡検出器。

ATLAS 検出器の内部飛跡検出器 [3]。内部から Pixel 検出器、SCT、TRT の順番に設置されている。

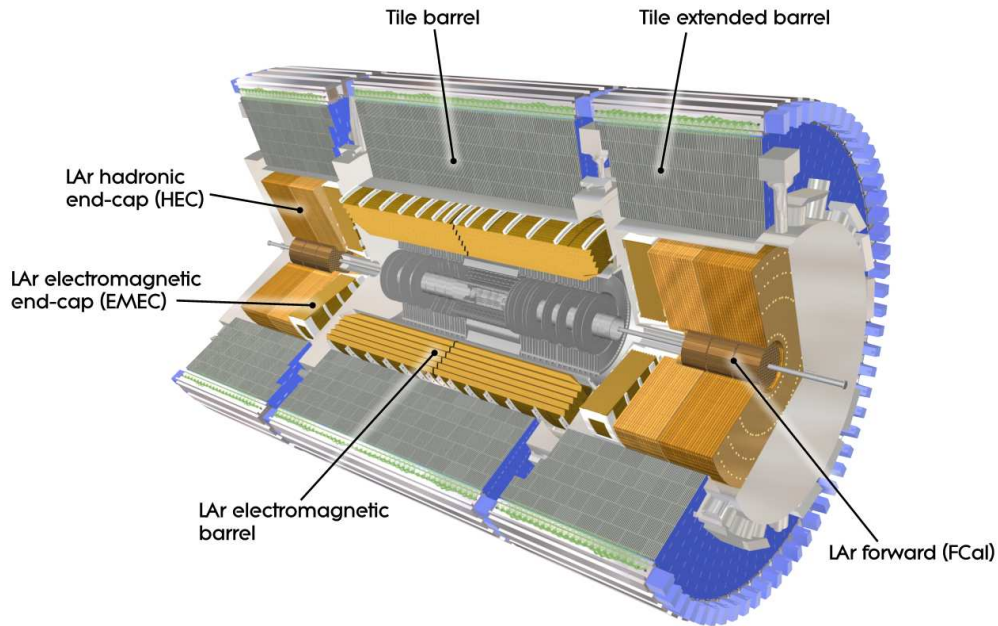


図 2.6 カロリーメータの配置 [3]。電磁カロリーメータはバレル部とエンドキャップ部に分けられる。ハドロンカロリーメータはバレル部の Tile とエンドキャップ部の HEC とよりビーム軸に近い領域の FCal に分けられる。

2.2.3 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器の構成を図 2.5 に示す。内部飛跡検出器は内側から順番に Insertable B-Layer (IBL)、Pixel 検出器、Semiconductor Tracker (SCT) と Transition Radiation Tracker (TRT) で構成されている。IBL は Run-2 から導入されており図 2.5 には描かれていない。これらの検出器はソレノイド磁場の内側に設置されておりソレノイド磁場によって曲げられた荷電粒子の曲がり具合から運動量を測定している。

2.2.4 カロリーメータ

カロリーメータの全体図を図 2.6 に示す。カロリーメータは内部飛跡検出器の外側に設置されており、内側から順番に電磁カロリーメータ、ハドロンカロリーメータが設置されている。電磁カロリーメータでは電子と光子のエネルギーを計測する。ハドロンカロリーメータでは強い相互作用で生じたシャワーを測定しジェットなどのエネルギーを計測する。

2.2.5 ミューオン検出器

現在のミューオン検出器の全体図を図 2.7 に示す。ミューオン検出器は ATLAS 検出器の最外層に位置する。ミューオン検出器は MDT、RPC、TGC、CSC の 4 種類の検出器で構成されている。RPC と TGC は事象選別 (トリガー) をする際に使用される。MDT と CSC は精密測定用の検出器であり、飛跡

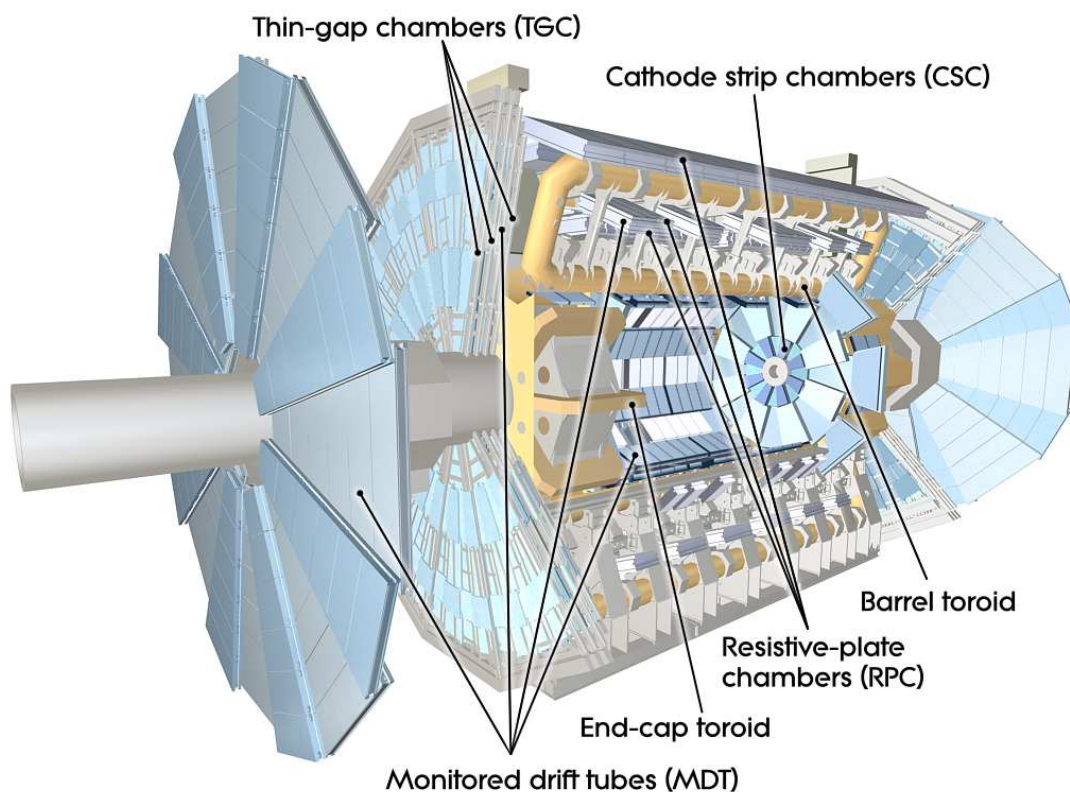


図 2.7 ミューオン検出器 [3]。ミューオン検出器は MDT、RPC、TGC、CSC の 4 種類の検出器で構成される。

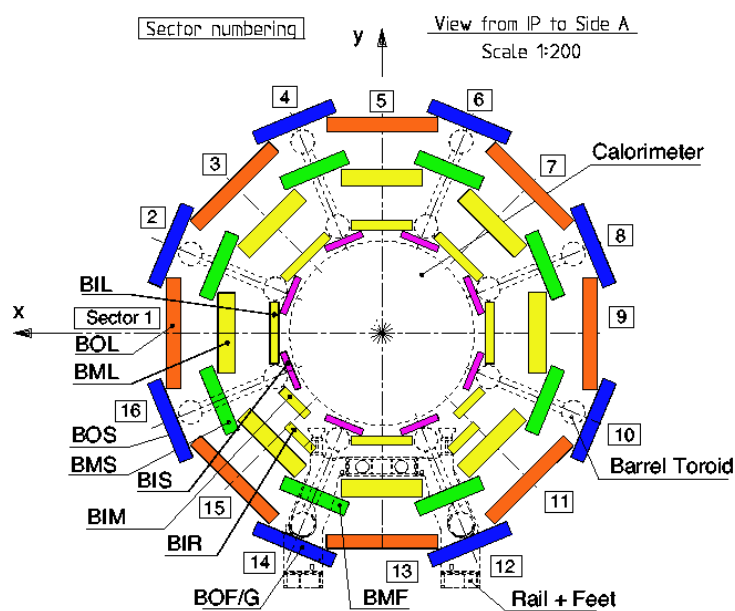


図 2.8 ミューオン検出器 x-y 断面図 [3]。

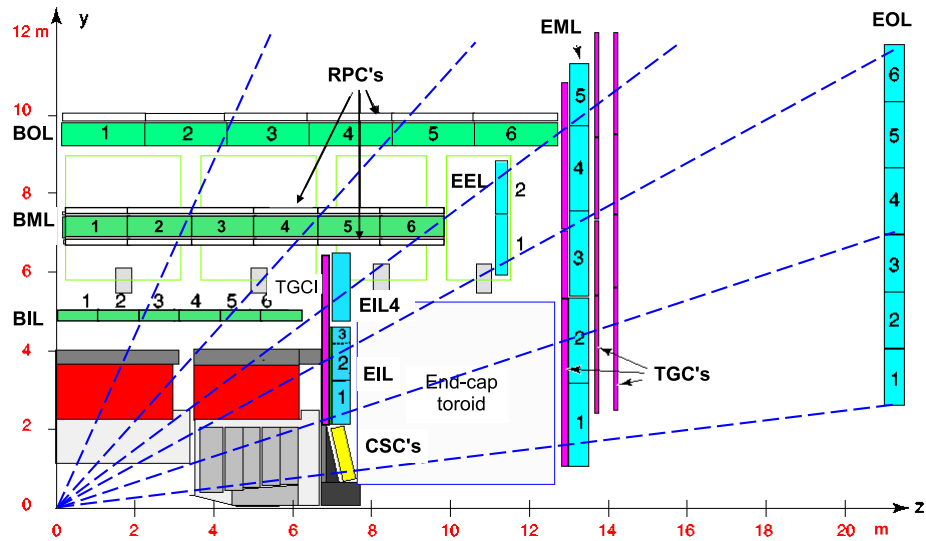


図 2.9 ミューオン検出器 z-y 断面図 [3]。

の再構成に使用される。ミューオン検出器のうち、RPC はバレル部、TGC はエンドキャップ部でミューオントリガーを発行するために用いられる。また精密測定用検出器としてバレル部では MDT、エンドキャップ部では MDT と CSC が用いられる。

ミューオン検出器はステーションと呼ばれる単位で構成されている。図 2.8 と図 2.9 に示すように、バレル部 (B) では同心円状に並べられたステーションで構成され、エンドキャップ部 (E) ではビーム軸に垂直なディスク状のステーションで構成される。これらのステーションは 3 つあり、内側から Inner(I)、Middle(M)、Outer(O) と呼ばれる。また ϕ 方向では、Large sector(L) と Small sector(S) の 2 種類のセクターに分けられている。例えば、バレル部の Middle の Large Sector のことを BML と呼ぶ。

Resistive Plate Chamber

Resistive Plate Chamber(RPC) は高抵抗のプレートを平行に並べたガス検出器である。図 2.10 に RPC 検出器の構造を示す。高抵抗のプレートが 2 mm の間隔で平行に配置されており、その間にガスが充填されている。この構造をガスボリュームと呼び、ガスボリューム 2 つで 1 つのユニット (チェンバー) が構成される。充填するガスとして $C_2H_2F_4$ 94.7%、 $Iso-C_4H_{10}$ 5%、 SF_6 0.3% の混合ガスを用いている。高抵抗のプレートの外側にはグラファイトでできた電極があり、その外側にはそれぞれの面で直交したストリップが配置されている。ミューオンの位置情報のうち η は z 軸に対して直交して配置されているストリップ (η ストリップ) から、 ϕ は z 軸に対して平行に配置されているストリップ (ϕ ストリップ) から読み出している。ガスギャップに 9.8 kV の高電圧をかけて運用している。ストリップは 23-35 mm の間隔で配置されている。

RPC は $|\eta| < 1.05$ のバレル部をカバーするトリガー用の検出器である。図 2.11 に示すように、現在は RPC1(BM) と RPC2(BM) と RPC3(BO) の 3 つのステーションで構成されており、各ステーションは

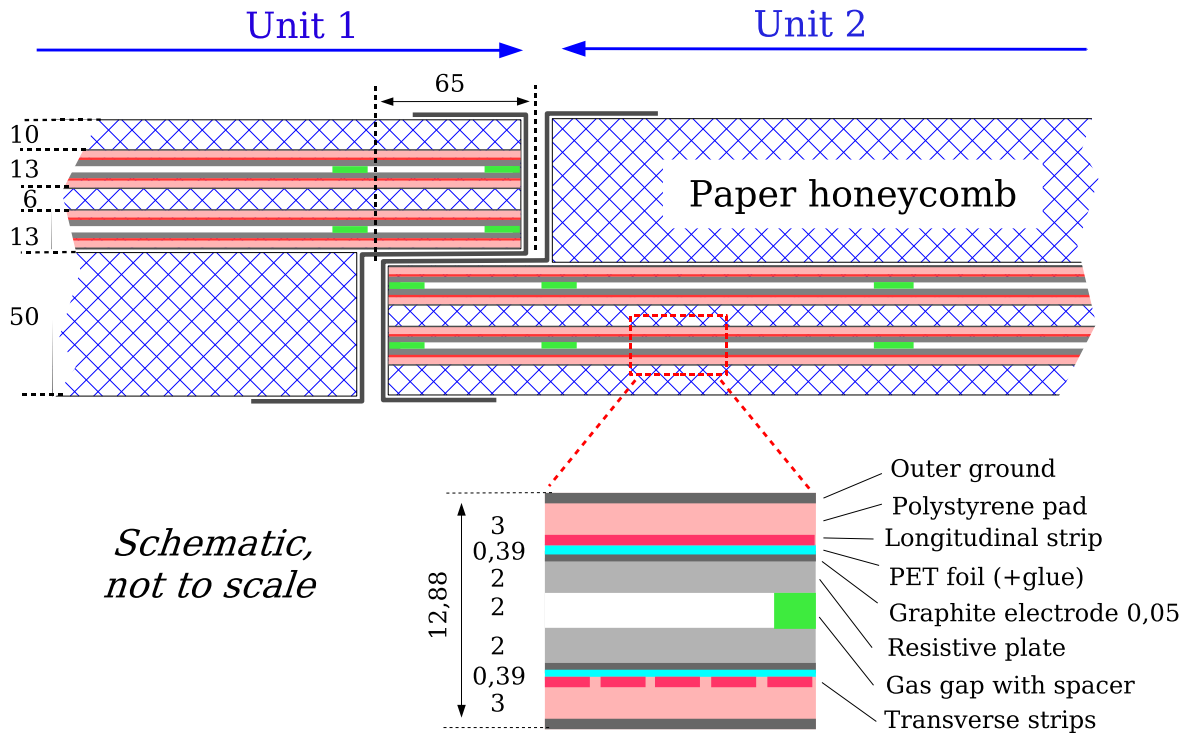


図 2.10 RPC の内部構造 [3]。

2層のチェンバーで構成されている。RPC は8回転対称に設計されており大きさの異なる Large Sector と Small Sector の2つのセクターが ϕ 方向に交互に並んでいる。図 2.12 に示すように、バレル部では RPC1 と RPC2 でコインシデンスを取り Low- p_T のトリガー判定を行っている。さらに RPC3 とコインシデンスを取ることで High- p_T のトリガー判定を行っている。

Thin Gap Chamber

Thin Gap Chamber は $1.05 < |\eta| < 2.4$ のエンドキャップ部をカバーするトリガー用の検出器である。TGC はガスギャップ 2.8 mm の Multi Wired Proportional Chamber(MWPC) である。図 2.13 に TGC の構造を示す。直交するアノードワイヤーとストリップが配置されており、それぞれから η と ϕ の情報を読み出している。

Monitored Drift Tube

MDT はミューオンの運動量を精密に測定するための検出器である。図 2.14 のようにドリフトチューブを並べた構造になっている。図 2.15 にドリフトチューブの構造を示す。バレル部では z 、エンドキャッ

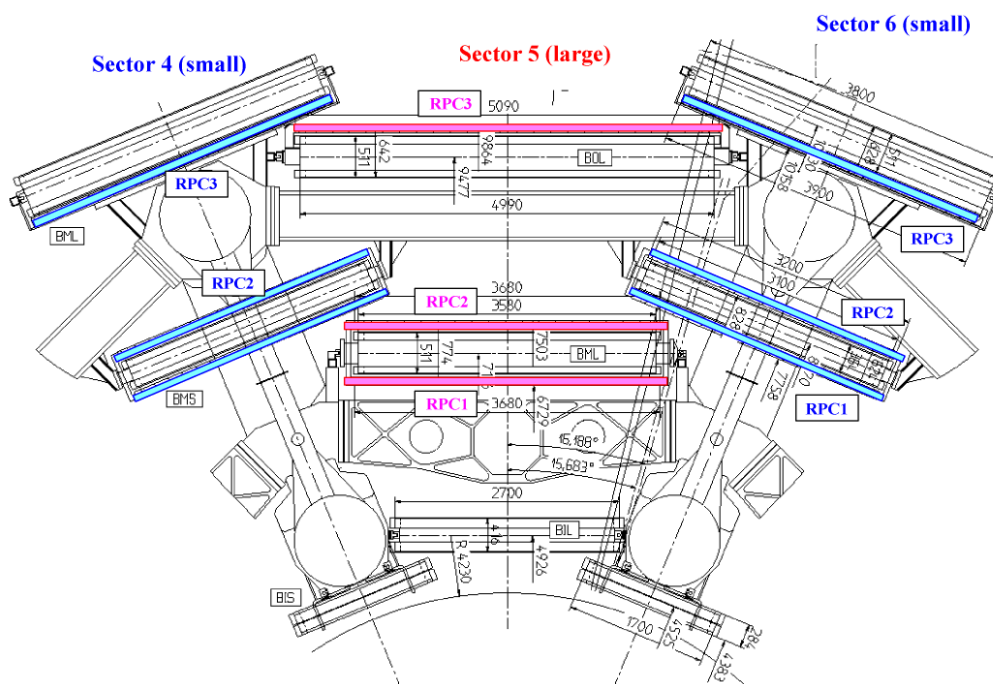


図 2.11 RPC 検出器の配置 [3]。内側から RPC1、RPC2 と RPC3 の 3 つのステーションで構成されている。

プ部では R を精密に測定する。MDT は電離した電子のドリフト時間から飛跡の位置を測定しており、ドリフト時間は最大で 700 ns と長いためトリガーには用いられていない。

Cathode Strip Chamber

CSC は $2.0 < |\eta| < 2.7$ の前方領域で用いられる精密測定用の検出器である。この領域ではヒットレートが高いため、MDT が動作できる限界ヒットレートの 150 Hz/cm^2 を超えてしまう。そのため高いイベントレートに耐えることができる CSC を用いる。図 2.16 に示すように、約 5 mm 幅のカソードストリップにおける電荷の情報から重心を計算することで $45 \mu\text{m}$ の位置分解能を達成している。

2.3 トリガーシステム

ATLAS 実験では、データの記録速度や容量の問題により陽子陽子衝突のすべての事象を記録することができない。そのため、すべての事象の中から物理的に重要な事象だけを選別して記録する必要がある。データとして記録できるイベントレートは約 1 kHz であり、40 MHz でおこる衝突事象から多段階のトリガーを用いて記録するべきイベントを選別している。ここでは Run-3 でのトリガーシステムに関して説明する。

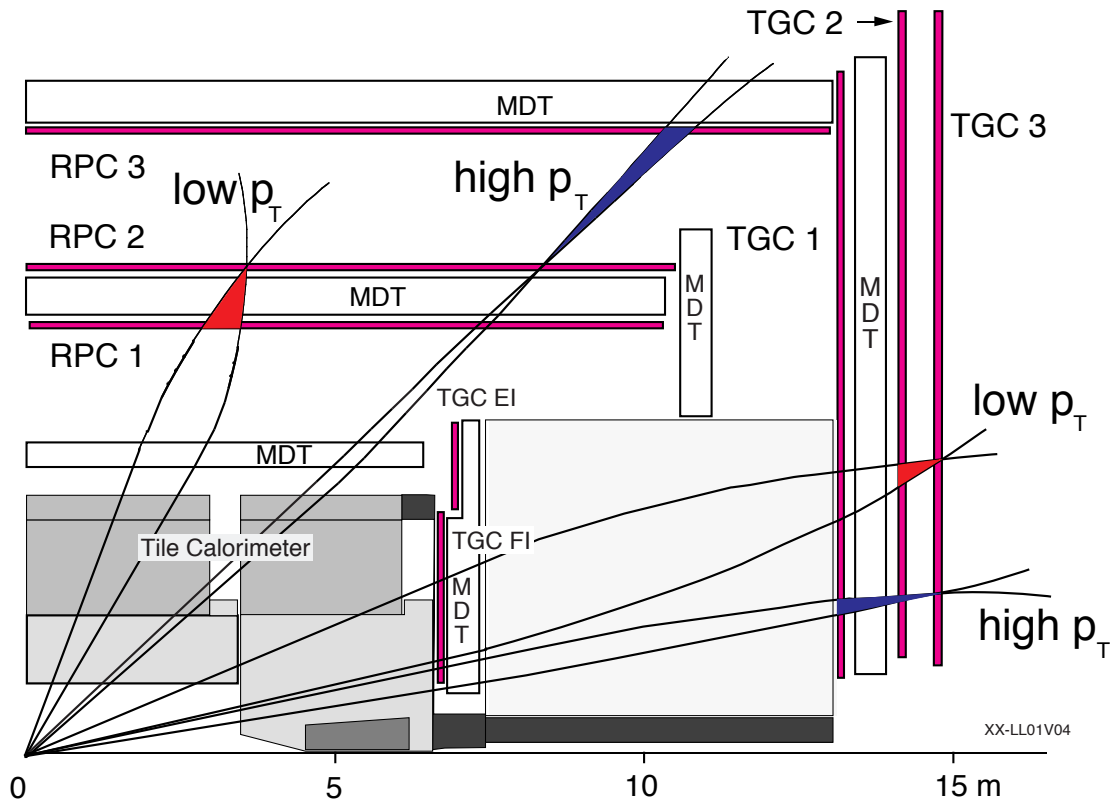


図 2.12 現行の RPC のトリガー [3]。RPC1 と RPC2 のコインシデンスを取り Low- p_T のミューオンのトリガー判定を行っている。さらに RPC3 とコインシデンスを取ることで High- p_T のトリガー判定を行っている。

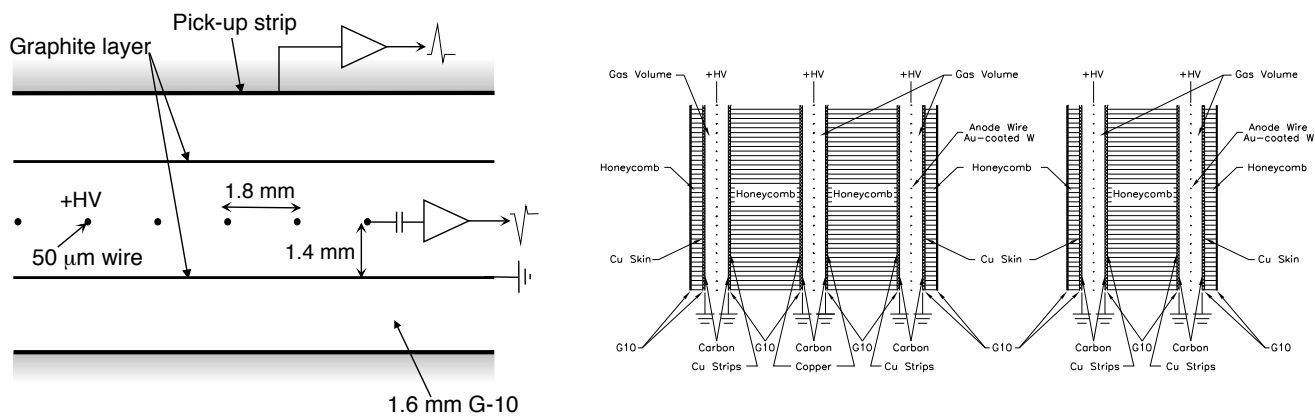


図 2.13 (左) TGC の内部構造 [3]。R の位置情報をアノードワイヤーから、 ϕ の位置情報をカソードストリップから読み出す。(右) TGC の構造 [3]。3層構造と2層構造の2種類がある。

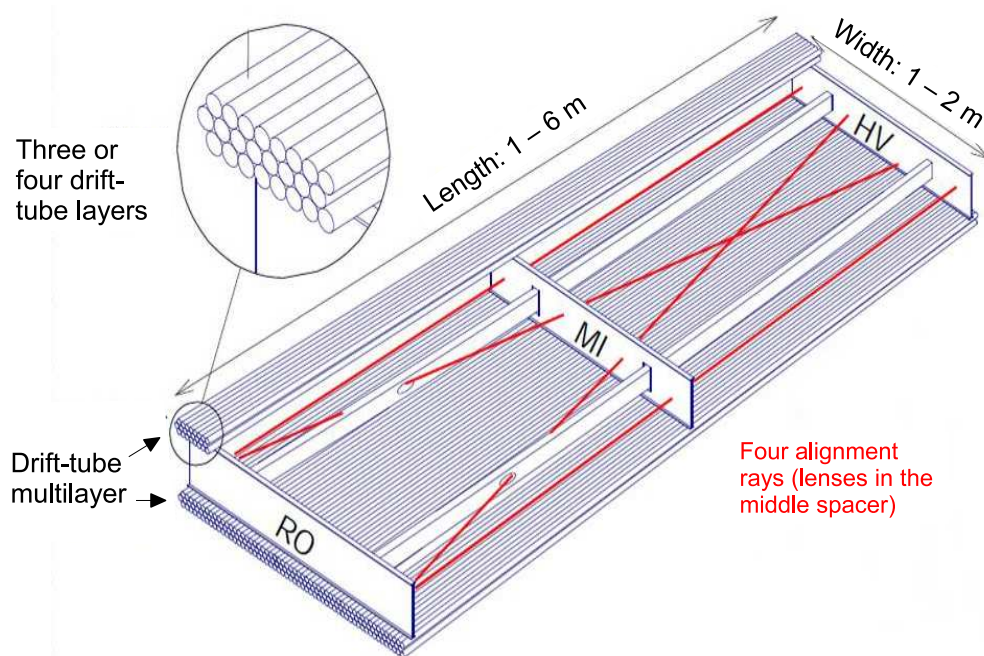


図 2.14 MDT の構造 [3]。MDT はドリフトチューブを 3 層または 4 層構造にしたものを 2 つ並べた構造になっている。

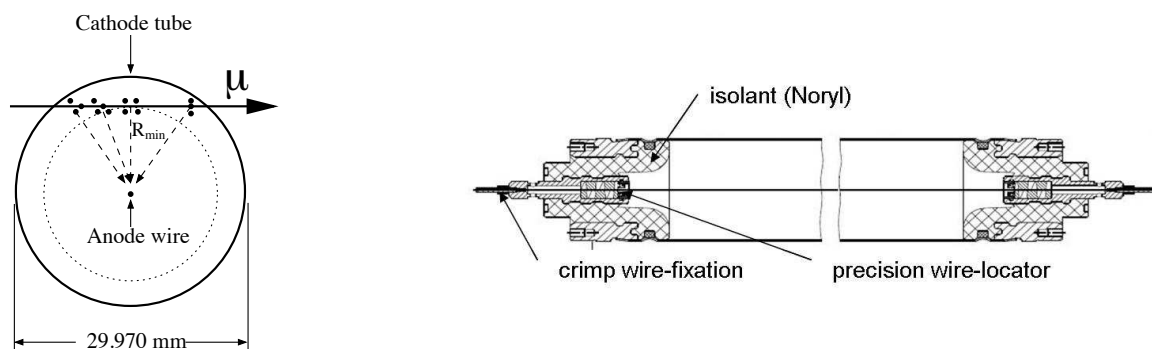


図 2.15 (左) MDT のドリフトチューブの x-y 断面図 [3]。(右) MDT のドリフトチューブ [3]。

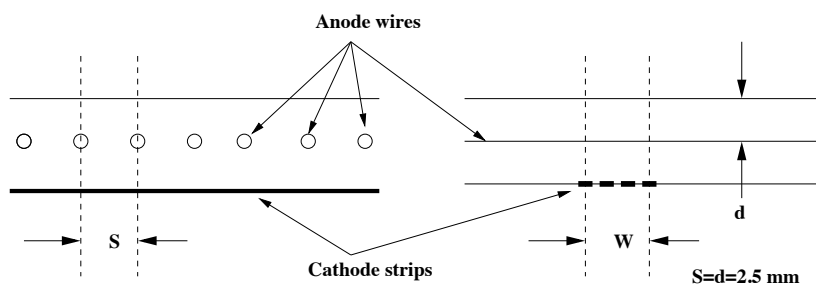


図 2.16 CSC の内部構造 [3]。ミュオンが入射すると、およそ 3~5 個のストリップで信号が読み出される。

2.3.1 Level-1 トリガー

初段のトリガーである Level-1 トリガーは 40 MHz で起きる衝突事象全てに対してトリガー判定を行う。また各イベントに対して $2.5 \mu\text{s}$ 以内にトリガー判定を行わなければならないためハードウェアで実装される。Level-1 トリガーはカロリメータとミュオン検出器の情報を使ってトリガー判定を行い、検出器のどの位置でトリガー判定が行われたかを表すために Region of Interest (RoI) を出力する。この RoI 情報は後段のハイレベルトリガーで使用される。図 2.17 に Run-3 でのトリガーシステムのブロック図を示す。

カロリメータの情報を用いて発行するトリガー (L1 Calo) は、電磁カロリメータとハドロンカロリメータの情報を統合してトリガー判定を行う。ミュオン検出器の情報を用いて発行するトリガー (L1 Mu) は、Barrel 部では RPC、Endcap 部では TGC と NSW の情報を用いる。ミュオンを含むイベントに対して計算した p_T の値からトリガー判定を行う。RPC、TGC と NSW で独立して判定された L1 Mu の情報は Muon-to-CTP Interface (MuCTPI) で統合される。その後、L1 Calo と MuCTPI で統合された L1 Mu の位置情報は Central Trigger Processor (CTP) と Level-1 Topological Processor (L1 Topo) に送られる。この L1 Topo は L1 Calo と L1 Mu の位置情報や数の情報を組み合わせてトリガー発行を行っている。このようにして判定されたトリガーは CTP に送られ、トリガー条件ごとに決められた pre-scaling ファクターをかけてトリガーを発行するかを決める。トリガーを発行した場合 Level-1 Accept (L1A) 信号を各検出器のフロントエンド回路に送り、トリガーを発行したイベントの情報を読み出す。

Level-1 トリガーでは Fixed Latency システムを採用している。これは衝突事象が起きてからトリガー判定されるまでにかかる処理時間が一定になるようなシステムである。各検出器のフロントエンド回路は一定時間データを保持して、L1A 信号を受け取らなければデータを捨てるようなシステムを実装している。

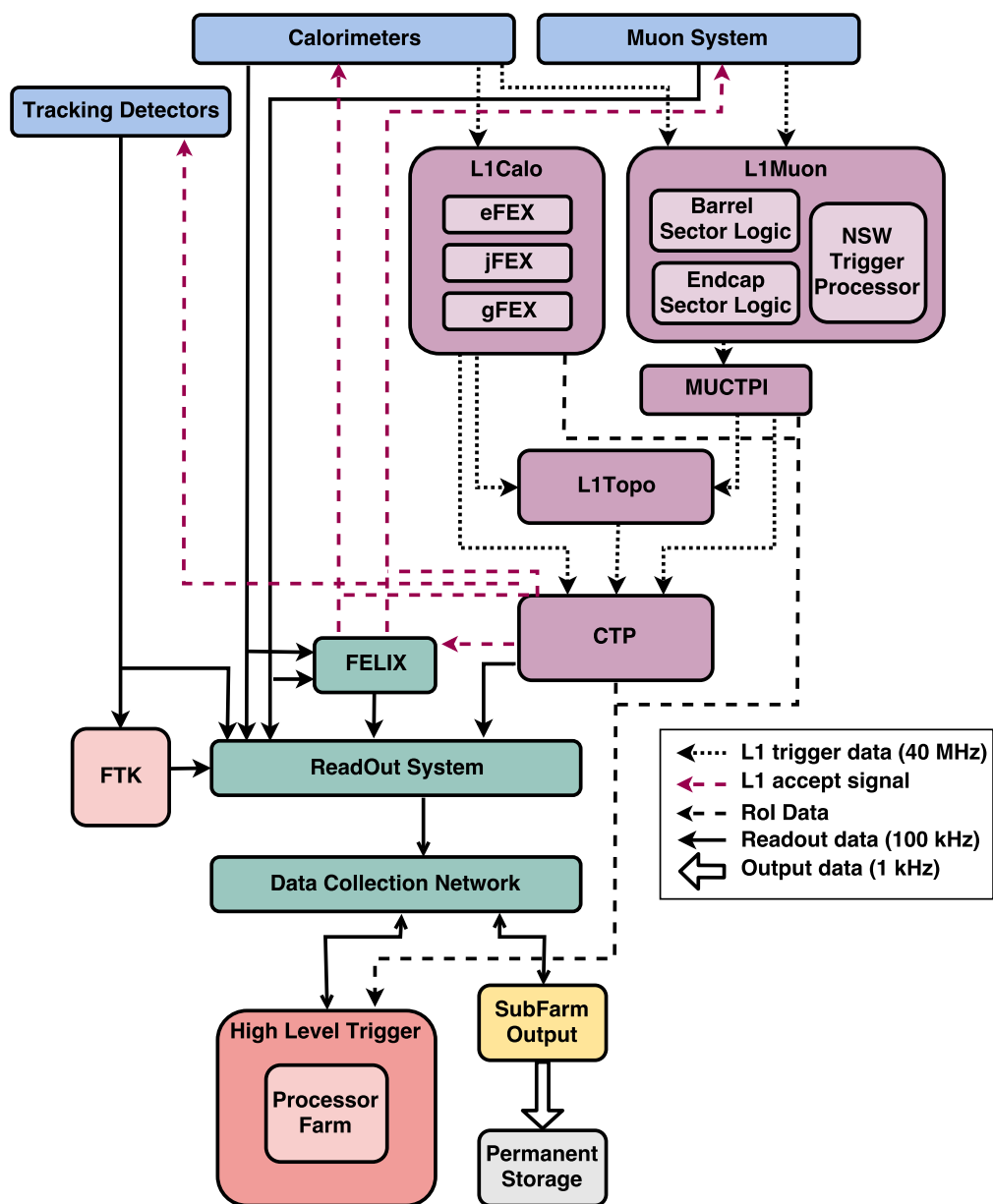


図 2.17 ATLAS 実験の Run-3 におけるトリガーシステムのブロック図 [5]。

2.3.2 ハイレベルトリガー

ハイレベルトリガーは、L1A が発行されたイベントに対し、ソフトウェアを用いて高精度の粒子再構成を行いトリガーを発行する。ハイレベルトリガーでは Inner Detector の情報も用いて荷電粒子の飛跡再構成を行い、検出器の全情報を用いて横運動量や横エネルギーを計算し、トリガーレート削減を行う。ハイレベルトリガーは衝突から約 1 s の時間内でイベントレートを 1 kHz まで落とし物理データとして保存する。

第3章 高輝度LHC計画

3.1 高輝度LHCについて

2027年以降より高統計の物理データを取得するため、LHCは2024-2026年に加速器のアップグレードを行い瞬間ルミノシティを現在の5倍の $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に増加させて運転する予定である(高輝度LHC)。このアップグレードをPhase 2アップグレードと呼ぶ、HL-LHCの運転期間10年での積分ルミノシティはベースラインの計画で 3000 fb^{-1} 、最高で 4000 fb^{-1} に達する予定である。

ルミノシティの増加に伴いイベントレートも増加するがデータ記録速度は増やすことができないため、従来と同じトリガーシステムのままではトリガーで要求するエネルギーや運動量の閾値を上げたりするなどの対策が必要である。しかしこれらの対策を取ると物理に対する感度を失ってしまうため高輝度環境を活かすことができない。そこで物理アクセプタンスを維持したまま高輝度環境でのデータを取得を行うために、ATLAS検出器やトリガーシステムのアップグレードを行う。

3.2 高輝度LHC-ALTAS実験に向けたアップグレード

ここでは、ミューオントリガーのシステムに関連したアップグレードの内容について説明する。

3.2.1 ミューオントリガーアップグレードの重要性

高い p_T のミューオンは W や Z ボソンの崩壊などで生成される。そのためミューオントリガーは W や Z ボソンを含むイベントのデータ取得に用いられる。トリガー判定に用いる横運動量閾値を上げると、これらの物理に対するアクセプタンスを失うことになる。図 3.1 にレプトンの横運動量に対するアクセプタンスを示す。アップグレードを行わない場合 p_T 閾値は 50 GeV にしなければならず、 $W \rightarrow l\nu$ の反応ではアクセプタンスを 40% 失うことになる。そのため p_T 閾値を維持するためにトリガーシステムのアップグレードを行う必要がある。

3.2.2 ミューオントリガーアップグレードの概要

Phase 2 アップグレードでは新しい検出器の導入とハードウェアベースの新しい初段トリガー (Level-0 トリガー) の導入を行う。さらに MDT の情報を Level-0 トリガーに利用し横運動量の分解能を改善する。また $|\eta| < 1$ の領域に新たに RPC と sMDT を導入する。

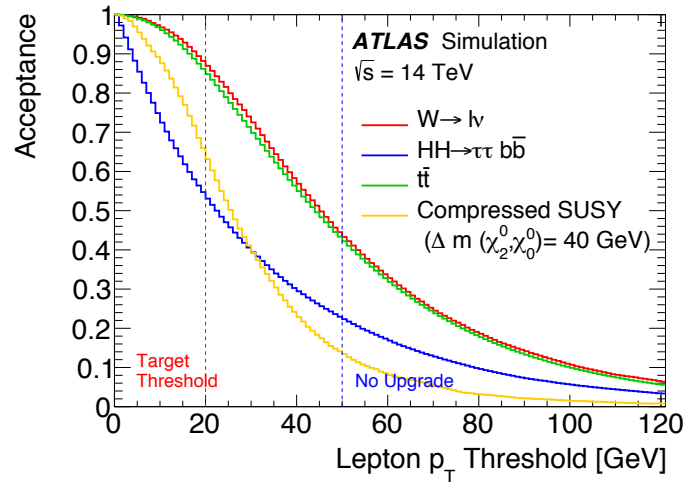


図 3.1 終状態にレプトンを含む各物理プロセスに対するアクセプタンスを p_T の関数として表したグラフ [5]。

3.2.3 ミューオン検出器のアップグレード

Phase 2 アップグレードでは新たに RPC BI と sMDT が導入される。図 3.2 と図 3.3 に新しく導入する検出器の図を示す。

RPC BI

RPC BI は新たに導入されるミュオントリガー用検出器であり、図 3.4 に示すように BI の部分に設置される予定である。RPC BI が導入されることで、RPC0(BI)、RPC1(BM)、RPC2(BM) と RPC3(BO) の 4 つのステーションでの構成になる。RPC BI は従来の RPC と比べて、ガスギャップの厚さが 2 mm から 1 mm、電極の厚さも 1.8 mm から 1 mm と薄くなっており、ギャップは 3 層構造になっている。Large Sector では MDT の外側、Small Sector では MDT の内側に設置される。

現在の RPC では、BM にトロイド磁石と干渉し検出器を置くことができない領域が存在する。現行のトリガーアルゴリズムでは BM に少なくとも 1 つのヒットがあることを要求するので、その領域がそのまま不感領域になってしまう。そのため現在のバレル部のトリガー効率約 70 % とエンドキャップ部に比べて低くなっている。RPC BI を導入することでその不感領域を補うことができる。図 3.5 に RPC BI を導入した場合のオフラインの解析で p_T が 25 GeV と判定されたミュオンに対する Level-0 ミュオントリガーのアクセプタンスを示す。(a) は RPC1、RPC2、RPC3 の 3 つのステーション全てにヒットがある場合のトリガーアクセプタンスを示す。(b) は RPC0、RPC1、RPC2、RPC3 の 4 つのステーションのうち 3 つ以上のステーションにヒットがある場合のトリガーアクセプタンスを示す。(c) は (b) の場合に加えて RPC0 と RPC3 だけにヒットがある場合のトリガーアクセプタンスを示す。(a) と (c) を見比べると、RPC0 と RPC3 だけにヒットがある事象を取り入れることで、前述した不感領域をカバーできていることがわかる。

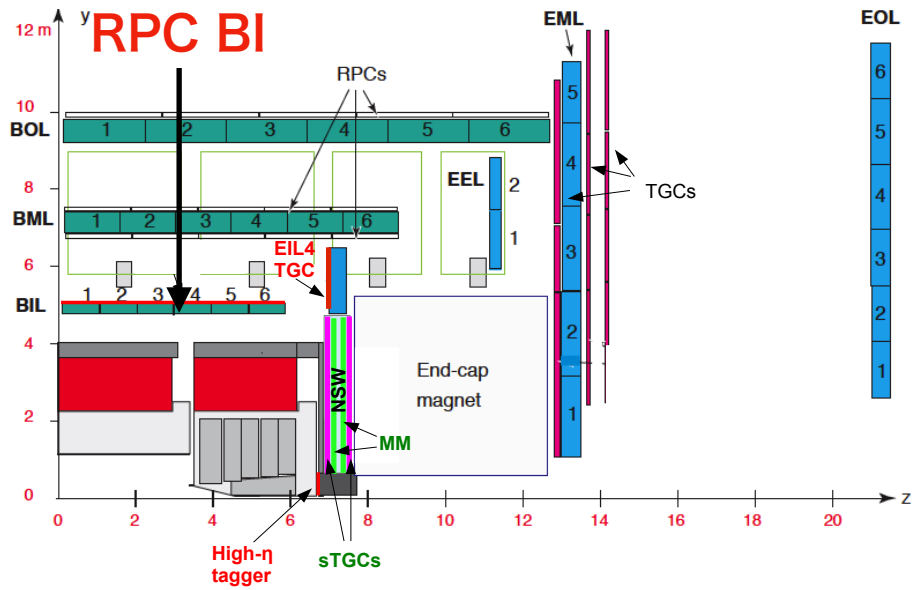


図 3.2 Phase-2 アップグレードで導入される RPC BI(Large Sector) [5]。

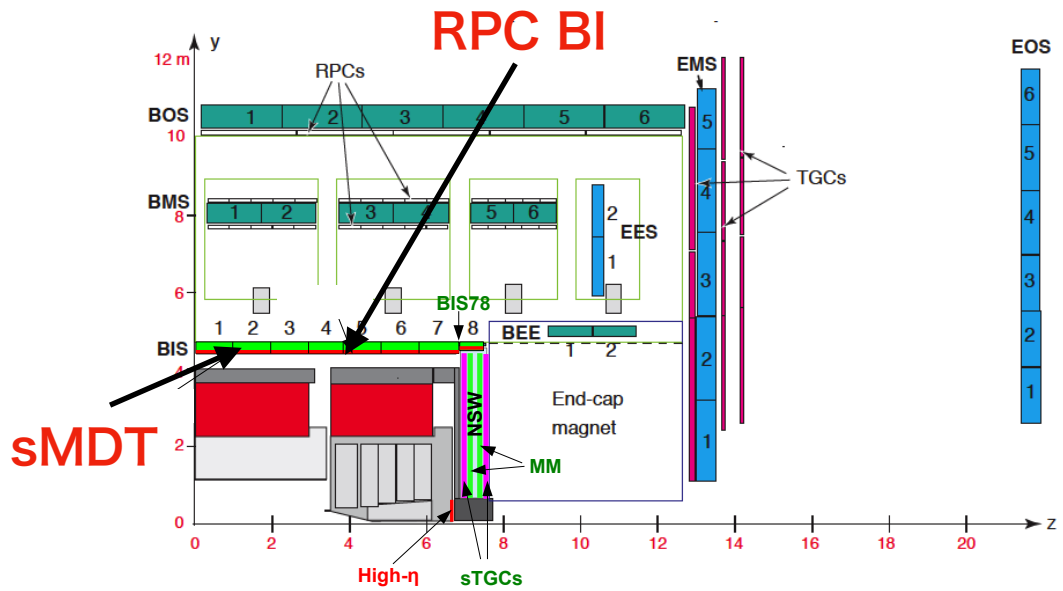


図 3.3 Phase 2 アップグレードで導入される RPC BI と sMDT(Small Sector) [5]。Small Sector では RPC BI を入れるスペースがないので、MDT を現在の MDT より薄い構造の sMDT に入れ替える。

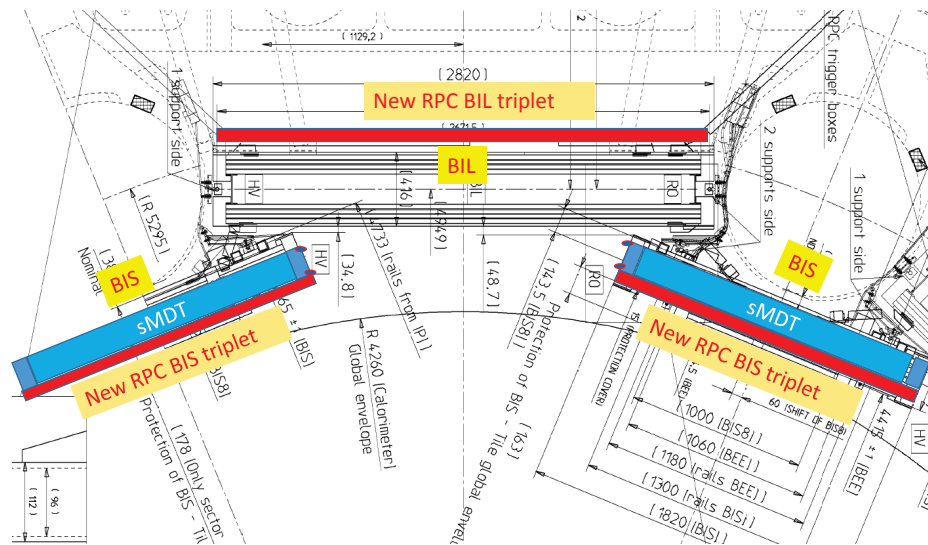


図 3.4 BI 領域の x-y 断面図 I [5]。Large Sector では MDT の外側、Small Sector では新しく導入される sMDT の内側に設置される予定である。

sMDT

現行の MDT のままでは Small Sector には RPC BI を設置するスペースが無いので、これを薄い small-diameter Monitored Drift Tube (sMDT) に置き換える。sMDT に置き換えるのは Small Sector の MDT のみである。sMDT の半径は MDT の半径の約半分の 15 mm であるため、ドリフト時間は現行の約 700 ns から 175 ns となり高輝度 LHC の高レート環境に対応できるようになっている。また位置分解能は MDT とほぼ同じ 110 μm である。

3.2.4 Level-0 トリガーシステム

高輝度 LHC-ATLAS 実験では新たに Level-0 トリガーを導入する。Level-0 トリガーはハードウェアで実装され 40 MHz で起きる衝突事象全てに対してトリガー判定を行う。図 3.7 に Level-0 トリガーシステムのブロック図を示す。このアップグレードで初段トリガーの許容レイテンシーは 2.5 μs から 10 μs に伸び、許容トリガーレートは 100 kHz から 1 MHz に増強される。Level-0 トリガーは、L0Calo と L0Muon、Global Trigger と Central Trigger subsystems で構成される。カロリメータの情報を用いて発行するトリガー (L0Calo) は、電磁カロリメータとハドロンカロリメータの情報を統合してトリガー判定を行う。ミューオン検出器の情報を用いて発行するトリガー (L0Mu) は、バレル部では RPC と MDT、エンドキャップ部では TGC、NSW、MDT と RPC の情報を用いる。高い p_T を持つミューオンを含むイベントに対してトリガー判定を行う。図 3.8 に示すようにバレル部とエンドキャップ部で独立して判定された L0 Mu の情報は Muon-to-CTP Interface (MuCTPI) で統合される。その後、L0Calo と MuCTPI で統合された L0 Mu の位置情報は Global Trigger に送られる。ここで処理された情報が Central Trigger

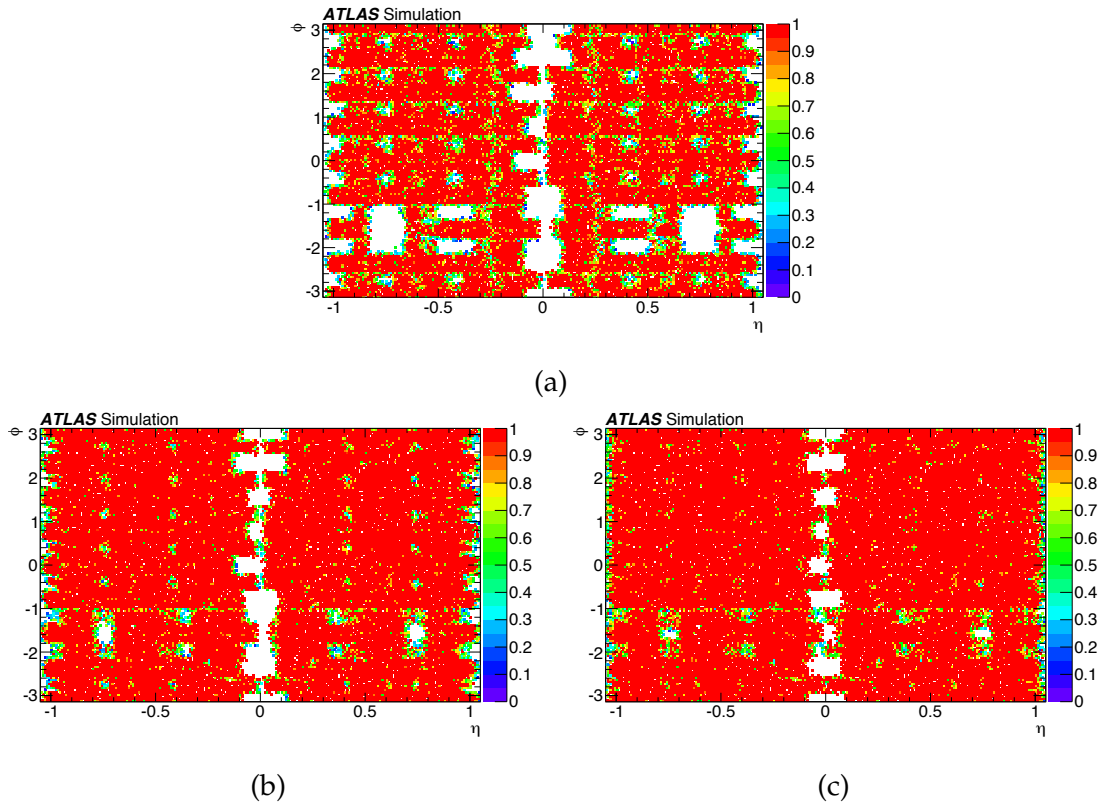


図 3.5 オフラインの解析で p_T が 25 GeV として判定されたミューオンに対する Level-0 バレル部ミューオントリガーのアクセプタンス [5]。(a) RPC1、RPC2、RPC3 の 3 つのステーション全てにヒットがある場合。(b) RPC0、RPC1、RPC2、RPC3 の 4 つのステーションのうち 3 つ以上のステーションにヒットがある場合。(c) (b)+RPC0 と RPC3 のみにヒットがある場合。これらの結果から RPC0 と RPC3 でのコインシデンスを取り入れることで不感領域でもトリガーを発行できることがわかる。



図 3.6 ドリフトチューブの径が小さくなりドリフト時間が短くなる。

(左) 現行の MDT のドリフトチューブ。(右) sMDT のドリフトチューブ [5]。ドリフトチューブの径が小さくなりドリフト時間が短くなる。

Processor(CTP)に送られ、トリガー条件ごとに決められた pre-scaling ファクターをかけてトリガーを発行するかを決める。トリガーを発行した場合 Level-0 Accept(L0A) 信号を各検出器のフロントエンド回路に送り、トリガーを発行したイベントの情報を読み出す。この Level-0 トリガーでも Fixed Latency システムを採用している。各検出器のフロントエンド回路は一定時間データを保持して、L0A 信号を受け取らなければデータを捨てるようなシステムを実装している。

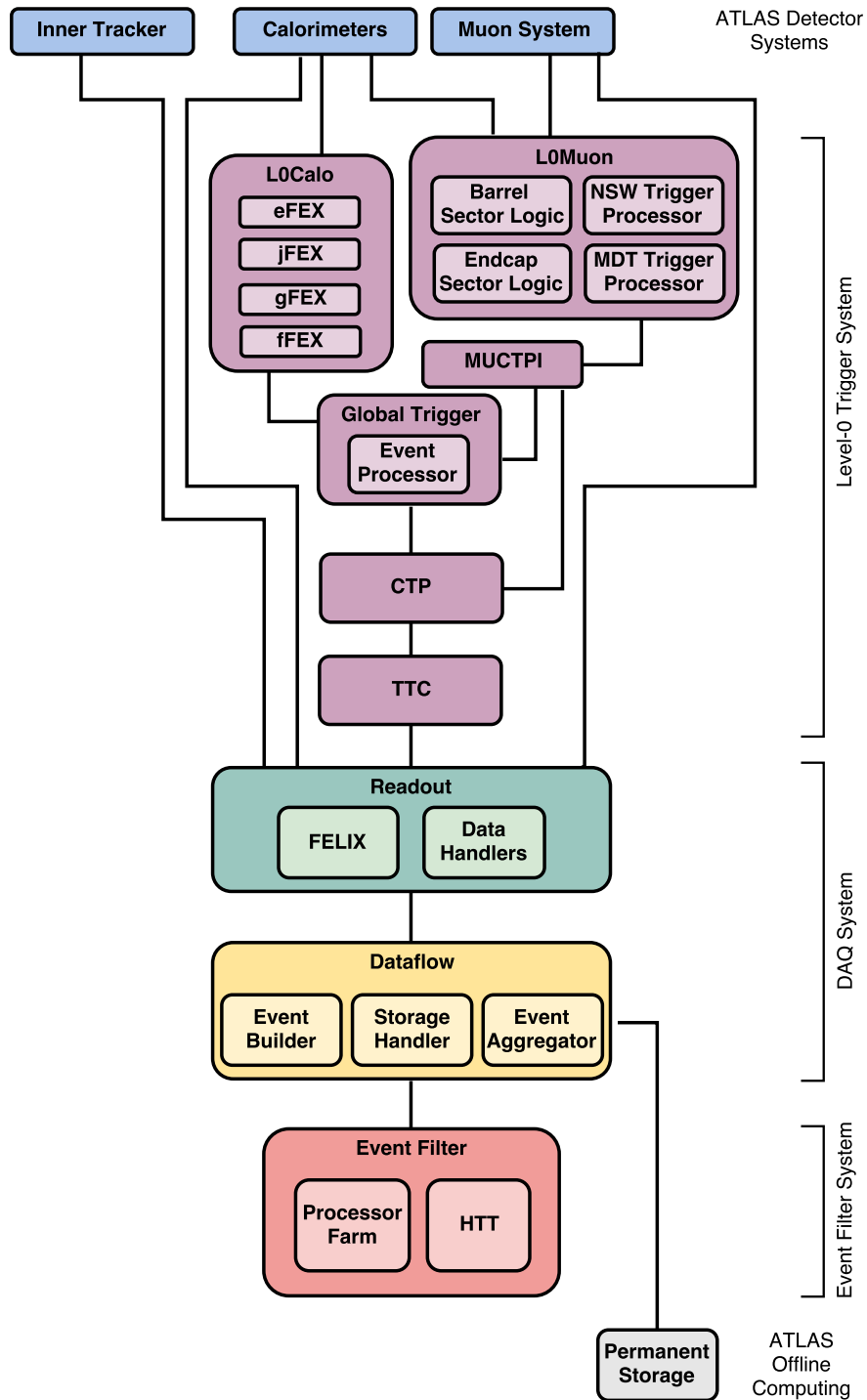


図 3.7 Level-0 トリガーシステムのブロック図 [5]。

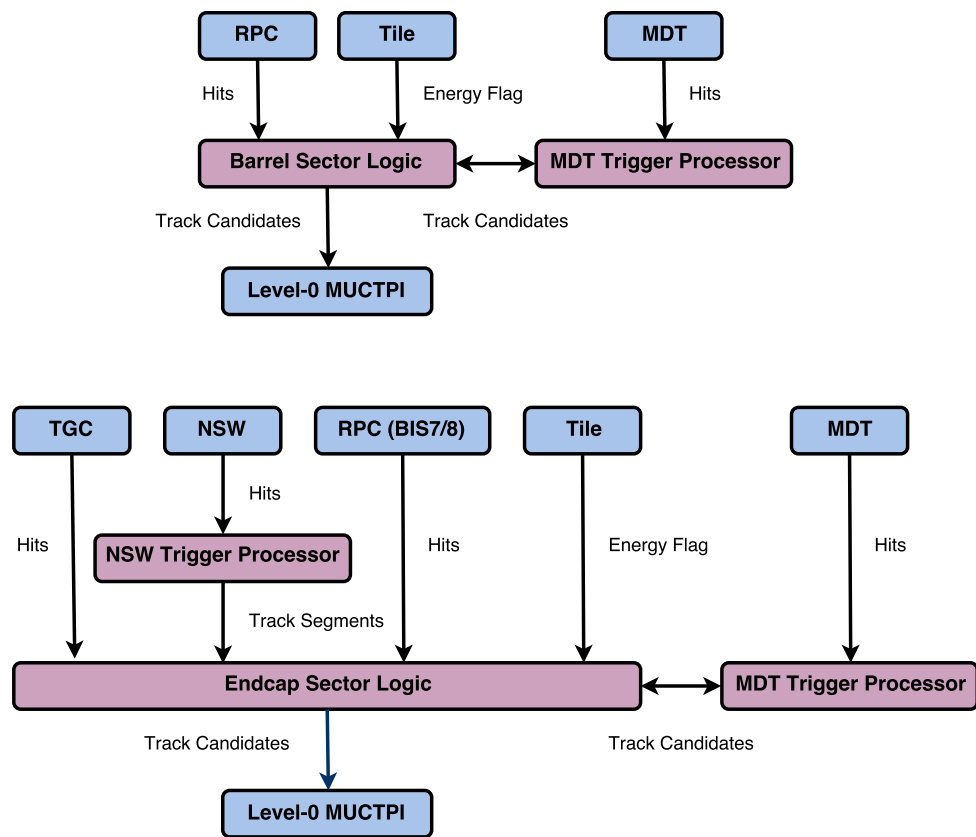


図 3.8 Level-0 ミューオントリガーシステムのブロック図 [5]。上段がバレル部、下段がエンドキャップ部を示す。

第4章 高輝度LHCでのバレル部ミュオントリガーのアップグレード

4.1 現行のバレル部ミュオントリガー

この節では現行のバレル部ミュオントリガーについて説明する。

4.1.1 トリガー判定の概要

現行の $|\eta| < 1.05$ のバレル部でのミュオントリガーは、Resistive Plate Chamber(RPC) の情報を用いて発行される。衝突点で生成されたミュオンは内部検出器とカロリメータを通った後、磁場中で η 方向に曲げられながら RPC 検出器を通過し信号を残す。ミュオンの η 方向の曲がり具合から p_T を計算し、決められた閾値に対してトリガー判定を行う。

図 4.1 に示すように、RPC のトリガーには High- p_T トリガーと Low- p_T トリガーの 2 種類がある。ミュオンの選別にはまず、RPC2 のヒットを要求する (この RPC2 のことを pivot plane と呼ぶ)。次に RPC2 のヒットと原点を結んだ直線を中心とした範囲内の RPC1 のヒットを探索する。このとき、高い p_T を要求するトリガーほど RPC1 のヒットの探索範囲が狭い。Low- p_T トリガーは内側の 2 層の検出器でコインシデンスを取って、 p_T 閾値 4 GeV、6 GeV と 10 GeV でミュオンを選別する。High- p_T トリガーはアウターの RPC3 でもコインシデンスを取り、20 GeV のミュオンを選別する。

4.1.2 トリガー単位

RPC のトリガー判定は A サイド、C サイドそれぞれでトリガーセクターと呼ばれる単位ごとに行われる。トリガーセクターは図 4.2 に示すように検出器を ϕ 方向に 32 分割したものである。また η 方向の領域を示すのにトリガータワーと呼ばれる単位が用いられる。各トリガーセクターは 6~7 個のトリガータワーから構成される。

図 4.3 に示すように、各トリガーセクターはさらに Region of Interest(RoI) に分割される。バレル部では検出器の η 方向のサイズがトリガーセクターにより異なっているため、1 トリガーセクター辺りの RoI の数も異なっている。1 トリガーセクターを η 方向に 8-14 分割することにより、トリガーセクターあたり 16-28 個の RoI になる。

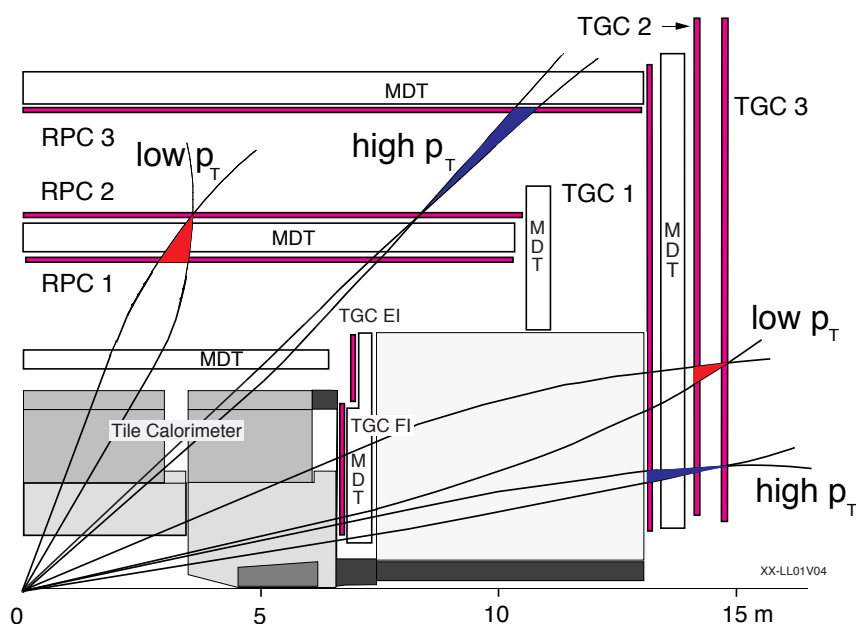


図 4.1 Level-1 トリガーロジック [5]。RPC1 と RPC2 のコインシデンスを取り Low- p_T のミュオンのトリガー判定を行っている。さらに RPC3 とコインシデンスを取ること High- p_T のトリガー判定を行っている。

4.1.3 トリガーとデータの読み出し

トリガー判定をどのように行っているかについて説明する。図 4.4 に RPC のトリガー回路とデータの流れを示す。ミュオンが RPC を通過すると RPC からアナログ信号は RPC に取り付けられている Amplifier Shaper Discriminator (ASD) ボードによって増幅、整形されデジタル信号へ変換される。RPC1 と RPC3 の信号は Splitter ボードで 2 つに分けられ、そのうち 1 つは Pad Logic ボードに送られ、もう一方は隣のトリガータワーの Pad Logic ボードに送られる。RPC1 と RPC2 の信号は Low p_T Pad Logic ボードに送られる。Low p_T Pad Logic ボードは 4 つの Coincidence Matrix ASIC (CMA) で構成されており、CMA で RPC1 と RPC2 のコインシデンスを取って、Low p_T トリガーの判定結果と RoI 情報を後段の High p_T Pad Logic ボードに送る。High p_T Pad Logic ボードも 4 つの CMA で構成されており、CMA で Low p_T Pad Logic ボードから送られてきた情報と RPC3 から送られてきた情報を用いてトリガー判定を行う。High p_T Pad Logic ボードでのトリガー判定の結果は Sector Logic (SL) ボードに送られる。

4.2 現在のバレル部ミュオントリガーの問題点とアップグレード

現在のバレル部ミュオントリガーには以下のような問題がある。

1. 現在のトリガーシステムのままでは高輝度 LHC に移行した際に、トリガーレートが許容値を超えてしまい、 p_T の閾値を上げるなどの対策が必要であり物理に対する感度を失ってしまう。

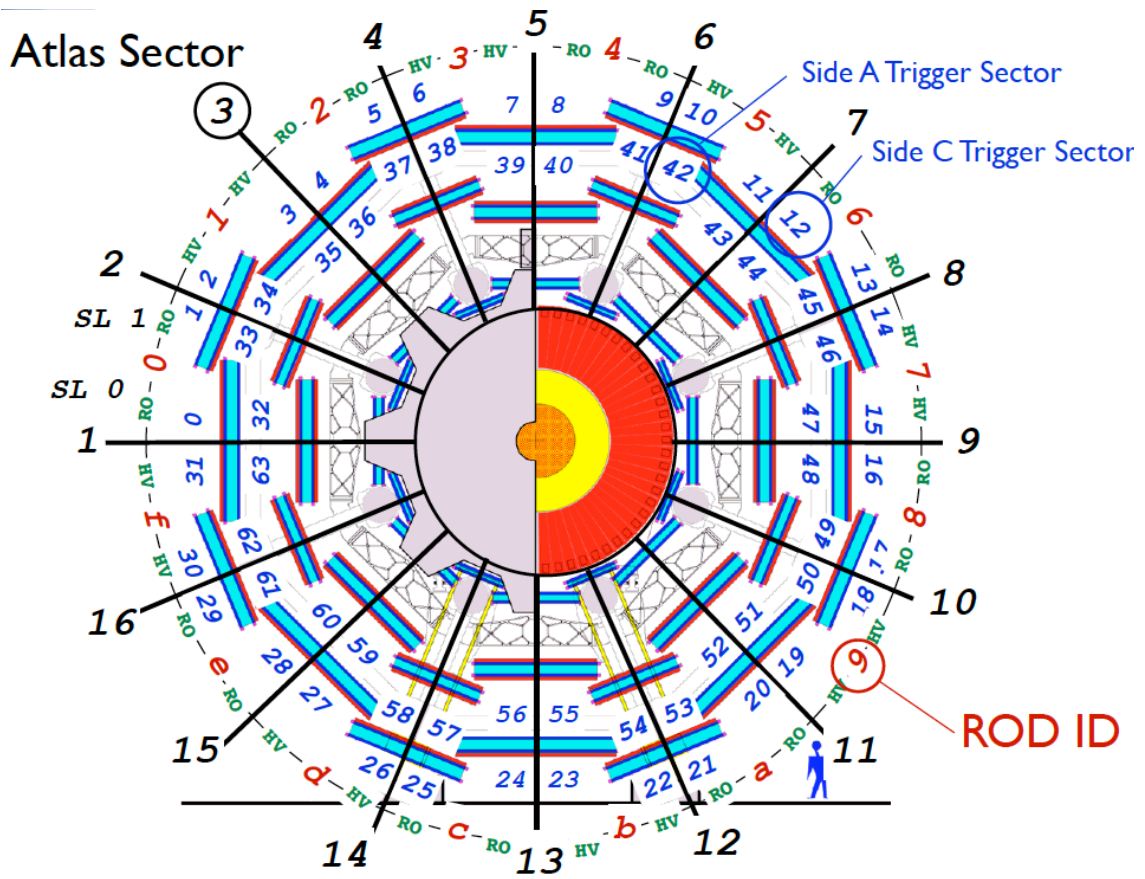


図 4.2 RPC のトリガーセクター。φ 方向に 32 分割した領域をトリガーセクターと呼ぶ。

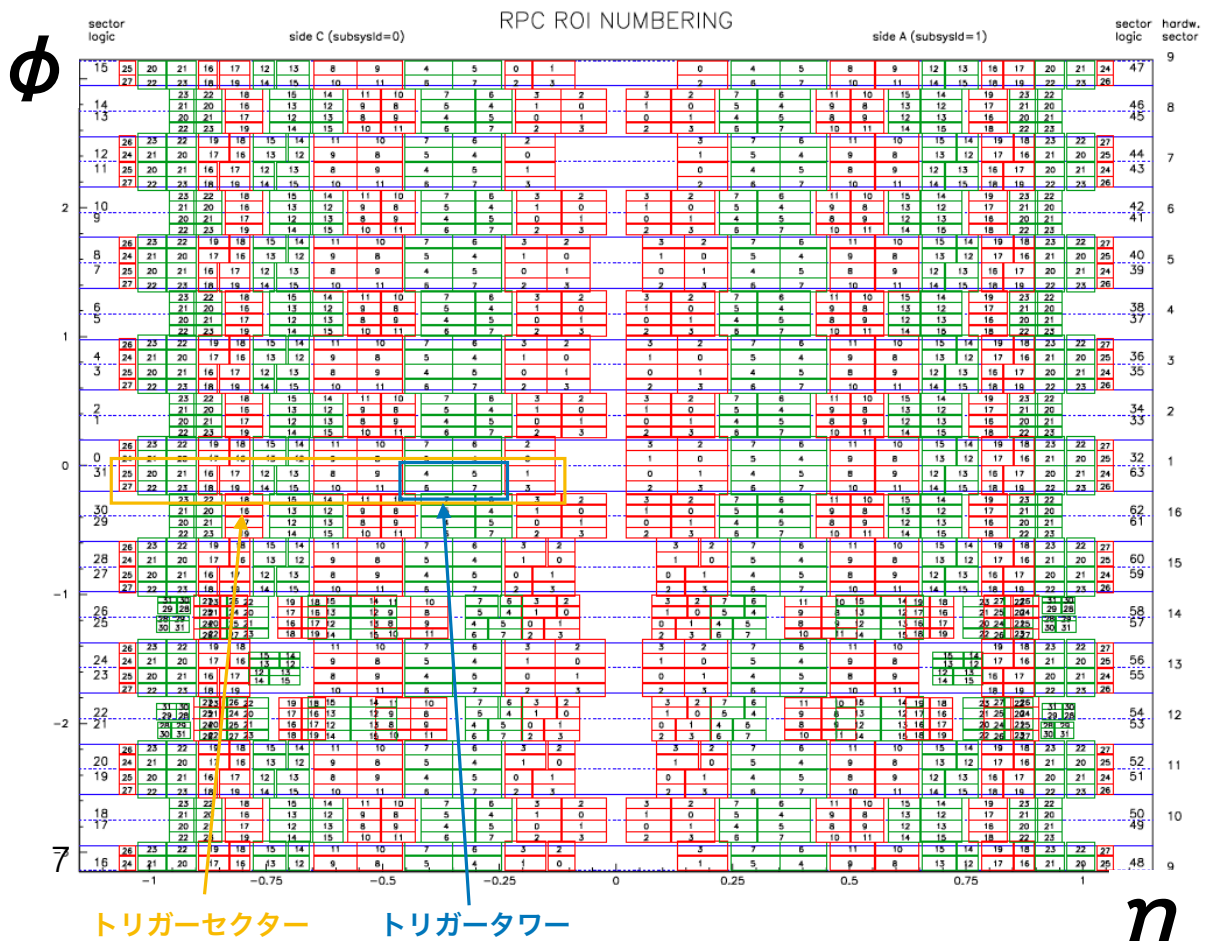


図 4.3 RPC のトリガーセクター及び RoI の配置図 (縦軸が ϕ で横軸が η)。 ϕ 方向に 32 分割した領域をトリガーセクターと呼ぶ (黄色線で囲まれた領域)。トリガーセクターを η 方向に 6~7 個に分割したものをトリガータワーと呼ぶ (青線で囲まれた領域)。トリガータワーは 2 つまたは 4 つの RoI で構成される。

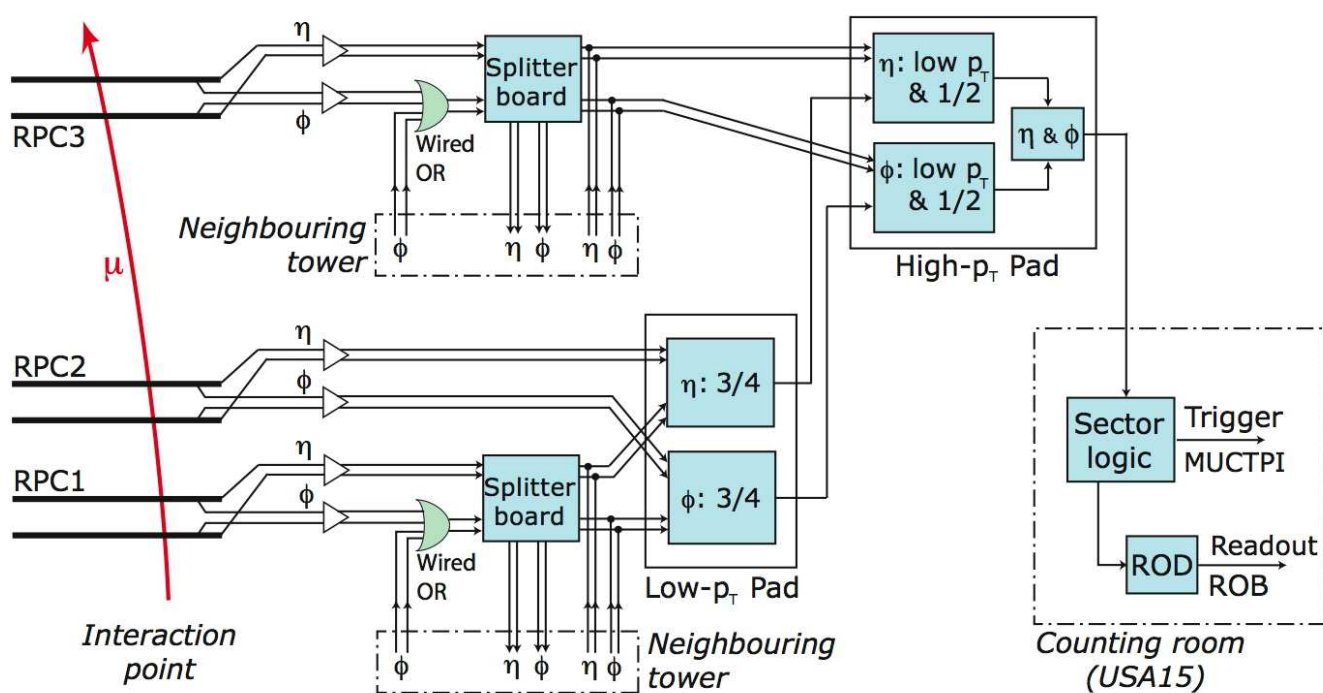


図 4.4 バレル部 Level-1 トリガーのトリガー・読み出しシステムの全体図 [3]。

2. 現在の RPC の BM には ATLAS 検出器の構造上の問題で検出器を置けない領域がある。現在のバレル部のトリガー判定では BM に少なくとも 1 つのヒットを要求するため、その領域がそのまま不感領域となってしまう。

この 2 つの問題を解決するために、以下の対策を行う。

1. トリガーシステムを刷新しトリガーレートの許容値を 100 kHz から 1 MHz に増強しレイテンシーの許容値を $2.5 \mu\text{s}$ から $10 \mu\text{s}$ にする。処理時間が伸びることを利用して閾値より p_T が大きいミュオンのトリガー効率を維持しながら閾値より p_T が低いミュオンを落とせる複雑で高性能なトリガーアルゴリズムを導入する。
2. RPC BI を導入することにより BM の不感領域をカバーしトリガー効率を改善する。

4.3 バレル部 Level-0 ミュオントリガー

高輝度 LHC-ATLAS 実験ではトリガー回路を刷新し Level-0 トリガーが導入される。バレル部のミュオントリガーでは、ヒットファインダーアルゴリズムが採用される予定である。高輝度 LHC-ATLAS 実験では 3 層構造の RPC BI が導入されるため、RPC0(BI)、RPC1(BM)、RPC2(BM)、RPC03(BO) の 4 つのステーションを用いてトリガー判定を行う。ヒットファインダーに加えて実行される新しいアルゴリズムを本研究で開発した。新アルゴリズムの詳細については次章で述べる。

4.3.1 バレル部 Level-0 ミュオントリガーの流れ

図 4.5 にバレル部 Level-0 ミュオントリガーの全体像を示す。高輝度 LHC-ATLAS 実験では BM と BO の RPC の ASD は現行と同じものを使用する。現在の Splitter box や on-detector トリガーは排除し、代わりに Data Collector and Transmitter(DCT) ボードを導入する。DCT ボードは RPC の全ヒット情報を光ファイバーを用いて高速で SL ボードに送る。図 4.6 に DCT ボードのブロックダイアグラムを示す。SL ボードでは DCT ボードから送られてきた RPC のヒット情報をもとにトリガー判定を行う。最終的に SL ボードでトリガー判定されたミュオンの情報は MUCTPi に送られる。

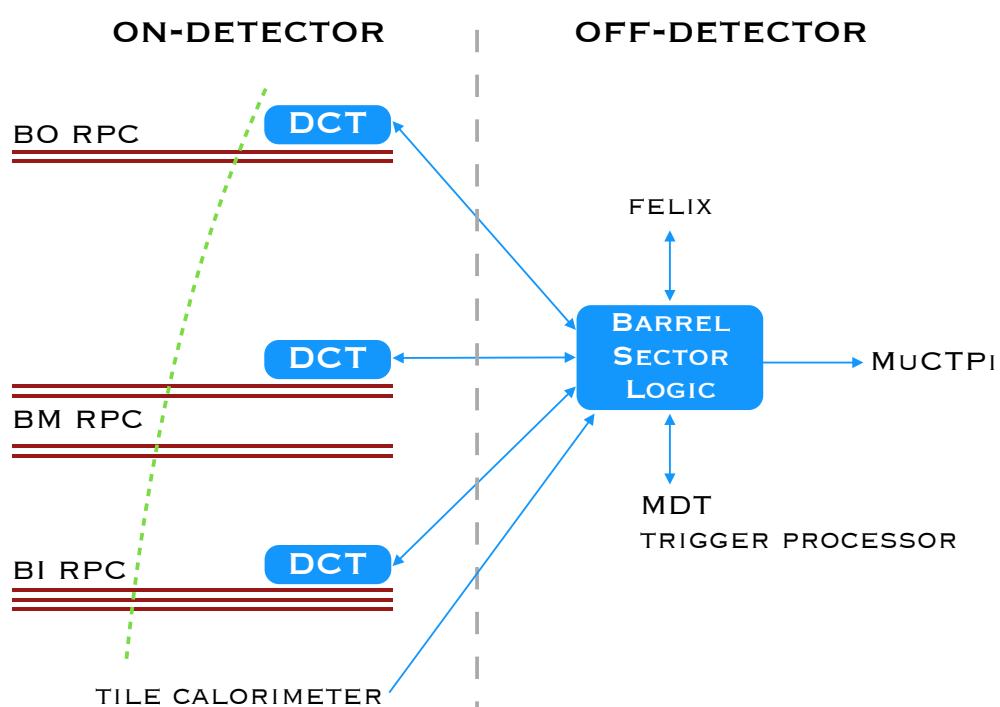


図 4.5 バレル部 Level-0 トリガーのトリガー・読み出し回路の全体像 [4]。RPC の全ヒット情報は DCT ボードを通して高速で SL ボードに送られ、トリガー判定は SL ボード上で行われる。

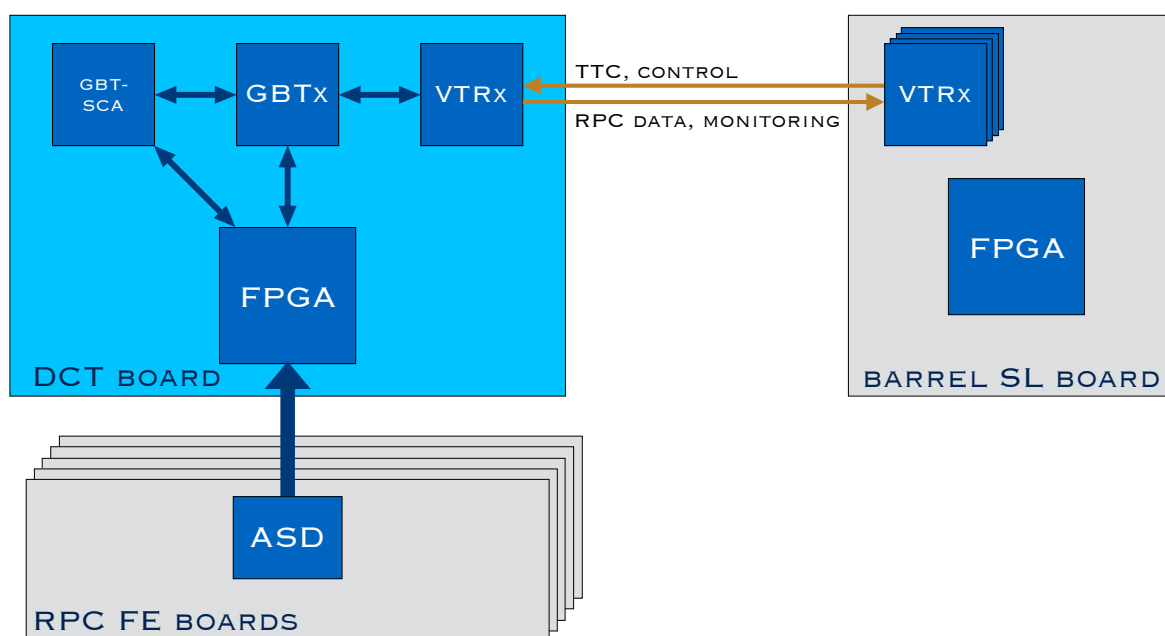


図 4.6 DCT ボードの全体図 [4]。

第5章 バレル部 Level-0 ミューオントリガーアルゴリズムの開発

5.1 高輝度 LHC のためのバレル部ミューオントリガーの概要

4章で説明したように、高輝度 LHC-ATLAS 実験ではトリガーレートを削減するためにバレル部ミューオントリガーに p_T 分解能の良いトリガーアルゴリズムを導入する必要がある。また高輝度 LHC-ATLAS 実験ではバレル部ミューオントリガーとしてヒットファインダーと呼ばれるトリガーアルゴリズムが導入される予定である。ヒットファインダーはミューオンの η 方向の曲がり具合をステーション間のヒット位置の差から計算しており p_T 測定の分解能が悪い。そこでヒットファインダーで探し出したヒットに対して、ミューオンの η 方向の曲がり具合をより精密に評価できるトリガーアルゴリズムを実行することによりミューオントリガーの性能を良くすることができると考えた。 η 方向の曲がり具合を精密に評価する方法として、ミューオンの磁場中の軌道を円でフィッティングすることでミューオンの p_T を測定する方法(「円フィッティング」と呼ぶ)を開発した。また高輝度 LHC-ATLAS 実験では、FPGA を用いてトリガーアルゴリズムを実装する予定であるため、円フィッティングをパターンマッチングという方法を用いてハードウェアに実装する手法を考案し性能評価を行った。

Run-2 において Level-1 トリガーで p_T 閾値 20 GeV で取得した事象について、データ取得後にオフラインで解析を行った後のミューオンの p_T 分布を図 5.1 に示す。Level-1 トリガーで $p_T \geq 20$ GeV と判定されたミューオンを含む事象のうち、オフライン解析で $p_T \geq 20$ GeV と判定されたミューオンを含む事象は約 15%で、残りの 85%の事象は $p_T < 20$ GeV のミューオンを含む事象である。ここからトリガーレートの大半は p_T 閾値以下の p_T をもつミューオンを含む事象であることがわかり、 $p_T < 20$ GeV のミューオンの検出効率を下げることで、大きくトリガーレートを削減できることがわかる。そこで $p_T \geq 20$ GeV のミューオンの検出効率を保ちながら、 $p_T < 20$ GeV のミューオンをなるべく落とすことを目標としてミューオントリガーアルゴリズムの開発を行った。この章ではアルゴリズムの詳細について述べ、得られた性能の結果については次章で示す。

5.2 ヒットファインダー

高輝度 LHC-ATLAS 実験ではバレル部ミューオントリガーとしてヒットファインダーと呼ばれるトリガーアルゴリズムが導入される予定である。ヒットファインダーでは、トリガーセクター内の隣合った2つのトリガータワー内のヒットから p_T が閾値以上のミューオンが残すヒットを探し出す。この章以降では用いられるトリガータワーの定義は 4.1.2 で述べたものとは異なり、 $|\eta| < 1.05$ の領域を 21 分割し

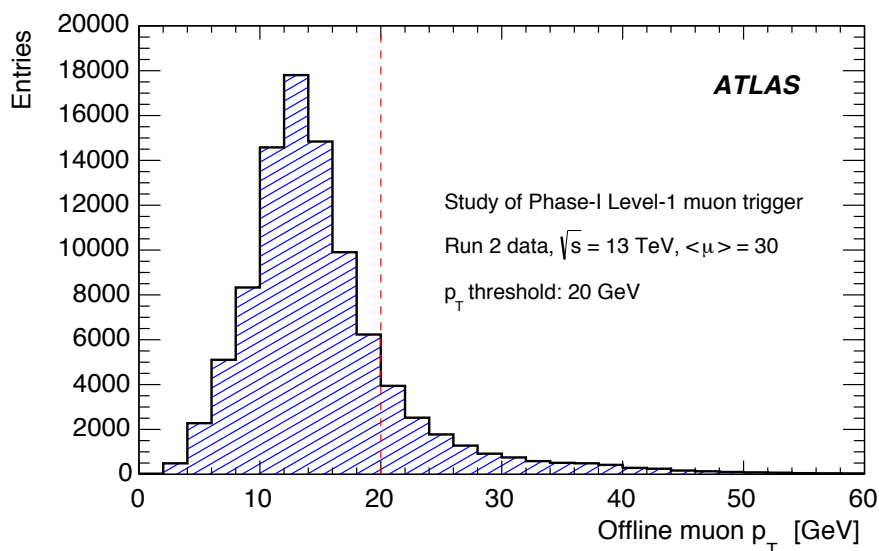


図 5.1 Run-2 における Level-1 トリガーで p_T 閾値 20 GeV で取得した事象について、データ取得後にオフラインで解析を行った後のミューオンの p_T 分布 [5]。

たものとして定義される。RPC には η を測定するストリップ (η ストリップ) と ϕ を測定するストリップ (ϕ ストリップ) があり、それぞれのストリップで独立にミューオンの残すヒットを探す。ヒットファインダーには 5、10、15、20 GeV の 4 つの p_T 閾値がある。図 5.2 にヒットファインダーの流れを示す。

ヒットファインダーは以下の 3 つの過程に分けることができる。

過程① p_T 閾値ごとに η ストリップと ϕ ストリップで独立にミューオンの残すヒットを探す。

過程② η ストリップと ϕ ストリップそれぞれから得られたヒットリストから Quality を決定する。

過程③ p_T 閾値ごとに探した 4 つのヒットリスト候補の中から適切なヒットリストを 1 つ選ぶ。

過程①

過程①では隣接した 2 つのトリガータワーの中にあるヒットから η ストリップと ϕ ストリップそれぞれで独立にミューオンの残すヒットを探す。図 5.3 に、内側の層からヒットを見つけていく手法のイメージ図を示す。まず内側の層からヒットパターンの起点となるヒットを探す。次に 1 つ外側の層に対してある範囲内 (「ウィンドウ」と呼ぶ) にあるヒットの中から、図 5.4 と図 5.5 に示すように RPC の 1 セクター上の平面を基準とした local な座標系での z/x (η ストリップの場合) と y/x (ϕ ストリップの場合) を用いて、それらの差が最も小さいヒットを探す。ウィンドウの大きさは η ストリップ (ϕ ストリップ) では z/x (y/x) を用いて、表 5.1 に示す起点となる層とヒットを探しに行く層の組み合わせで p_T 閾値ごとに決まっている。例えば BI から BM(RPC0) にヒットを探しに行くときは IM1 というウィンドウを使用する。ウィンドウの大きさの決め方と実際の数値については付録 A で述べる。次の層にヒットがな

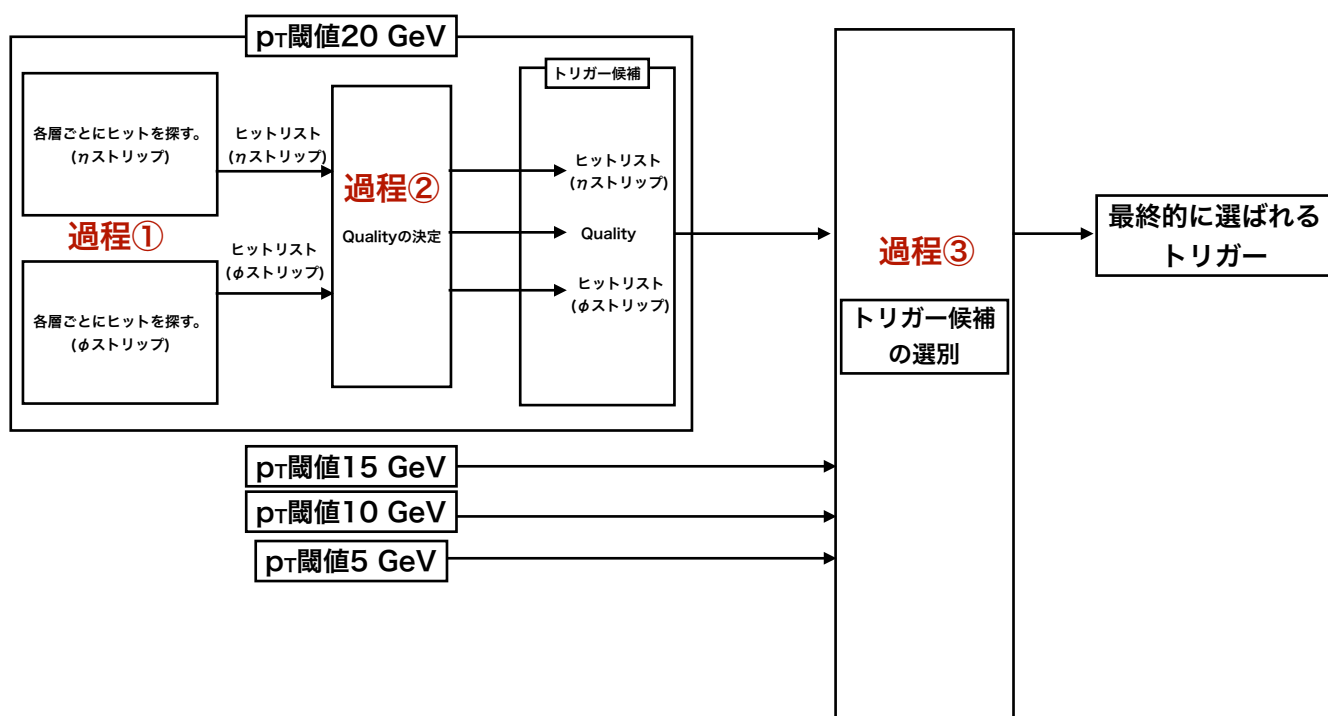


図 5.2 ヒットファインダーのアルゴリズム。過程①から過程③に分けられる。過程①では η ストリップと ϕ ストリップで独立にミューオンの残すヒットを探す。過程②では η ストリップと ϕ ストリップから得られたヒットリストから Quality を決定する。過程③では p_T 閾値ごとに探したヒットリストの中から適切なヒットリストを選択する。

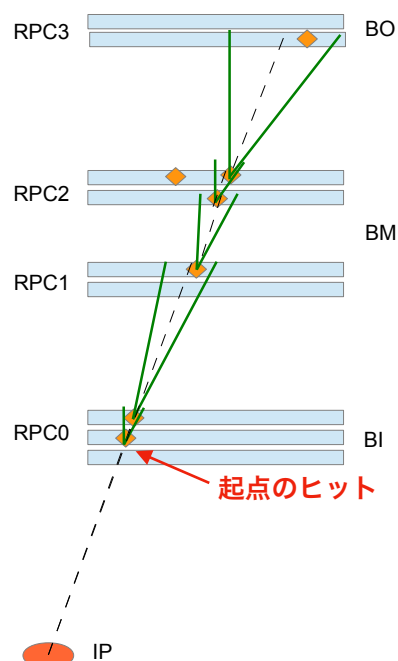


図 5.3 ヒットファインダーのイメージ図 [5]。内側の層からあるヒットに対して、次の層へのウィンドウ内にあるヒットを探していく。

い場合、さらに次の層にヒットを探しに行く。これを最外層まで繰り返してミューオンの残すヒットを探す。起点となる層に複数ヒットがあり複数のヒットリストが見つかる場合は以下のように優先度を付けてヒットパターンを選別する。

1. ヒットリストに含まれるヒット数が多いパターンを選択する。
2. dMM が小さいヒットリストを選択する。
3. dMO が小さいヒットリストを選択する。

ここで dMM は dMO は図 5.6 に示すように、BM と BM の間の $z/x(y/x)$ の差、BM と BO の間の $z/x(y/x)$ の差として定義される。 dMM と dMO が小さいヒットリストほど磁場中でのミューオンの曲がり具合が小さく、 p_T の高いミューオンが残すヒットリストである。

過程②

過程②では過程①で得られたヒットリストからトリガーの位置 η 、 ϕ と "Quality" を決定する。 η ストリップのヒットの中で最も内側の層にあるヒットの η をトリガーの η とし、 ϕ ストリップのヒットの中で最も内側の層にあるヒットの ϕ をトリガーの ϕ とする。Quality はヒットリストに含まれるヒットがどのステーションにあるかで決まり、Quality が大きいほどヒットリストに含まれるヒットの数が多く

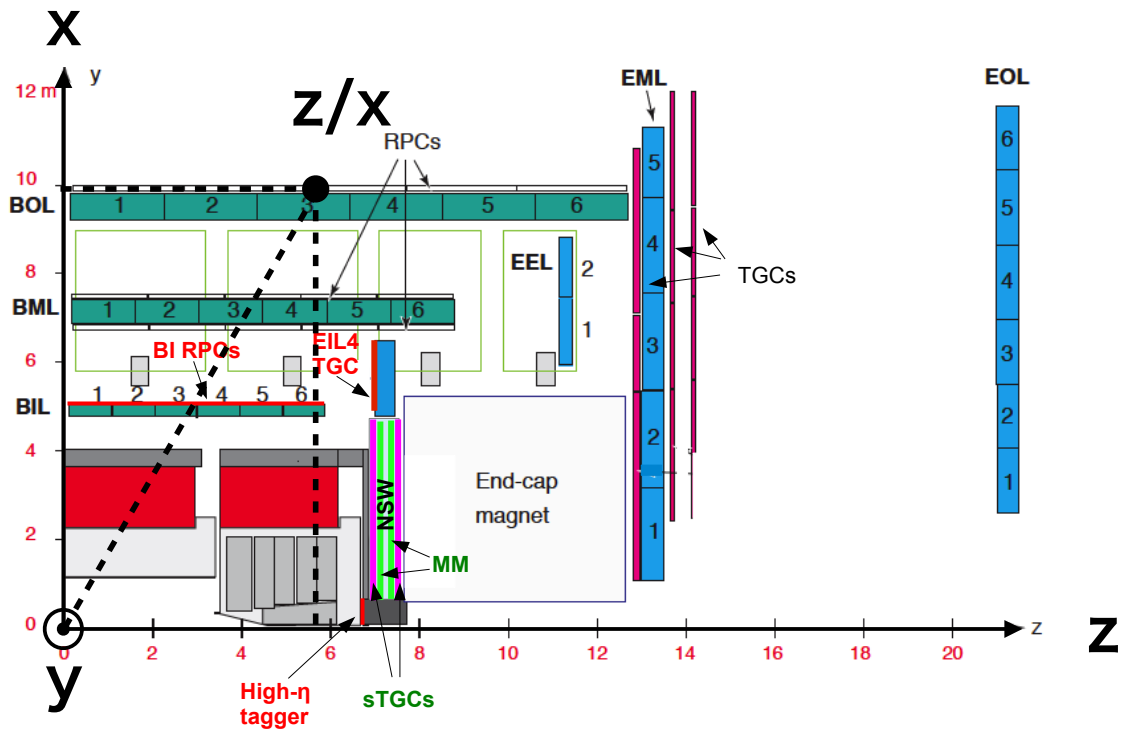


図 5.4 η ストリップのヒットを探す際には local な座標系での z/x を用いる。

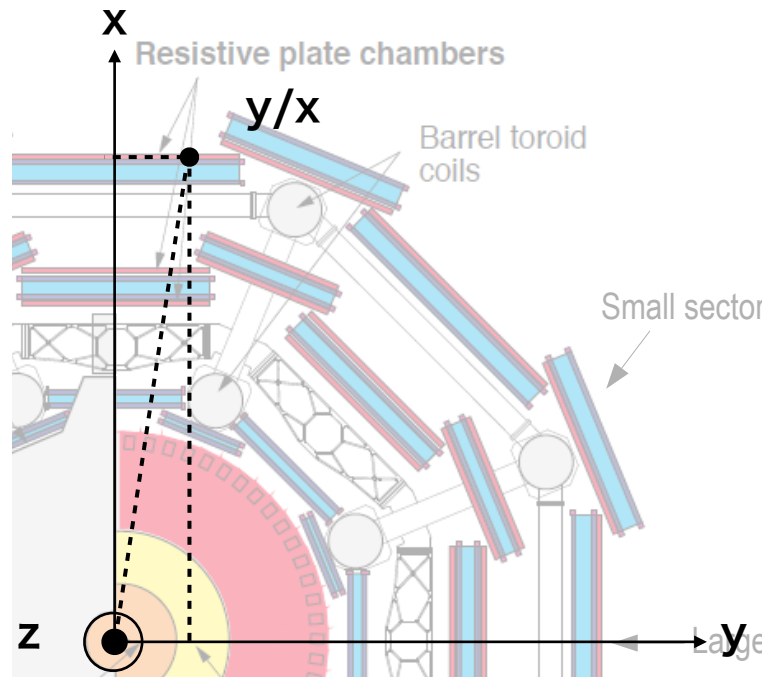


図 5.5 ϕ ストリップのヒットを探す際には local な座標系での y/x を用いる。

表 5.1 ウィンドウの種類。起点の層とヒットを探しに行く層の組み合わせで決まる。

種類	起点の層	ヒットを探しに行く層
IM1	BI	BM(RPC1)
IM2	BI	BM(RPC2)
IO	BI	BO
MM	BM(RPC1)	BM(RPC2)
M1O	BM(RPC1)	BO
M2O	BM(RPC2)	BO
ggBI	BI	BI
ggBM	BM(RPC1, RPC2)	BM(RPC1, RPC2)
ggBO	BO	BO

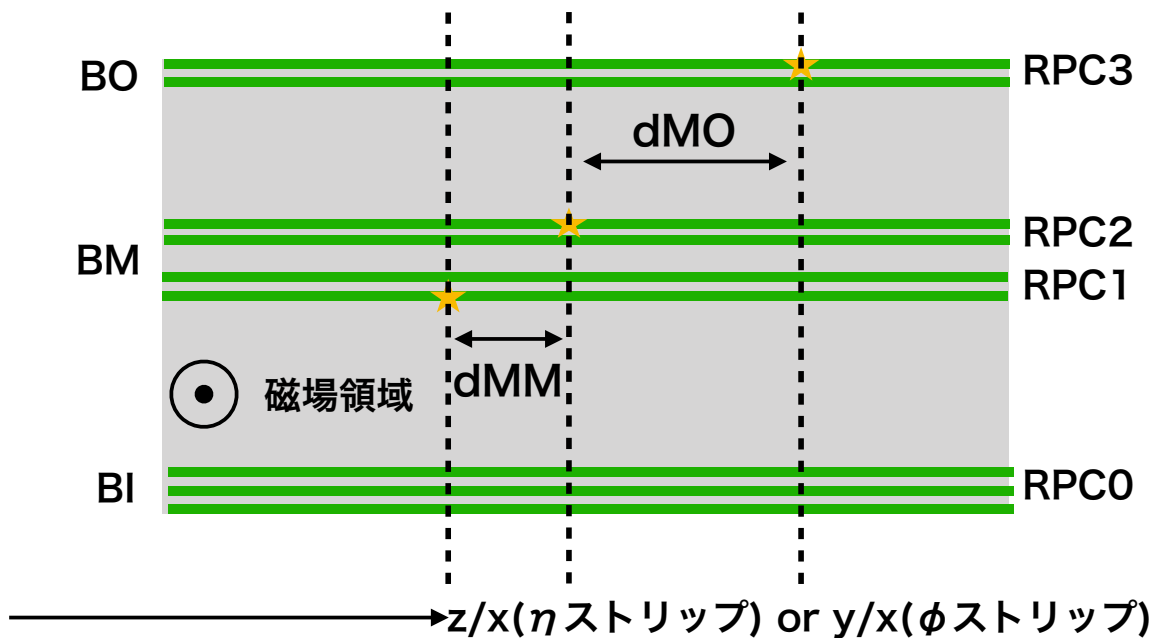


図 5.6 dMM と dMO の定義。 dMM は BM と BM の間の $z/x(y/x)$ の差、 dMO は BM と BO の間の $z/x(y/x)$ の差として定義される。

なり、より精密に p_T を測定することができる。表 5.2 に Quality の定義を示す。図 5.7 に示すように、 η ストリップと ϕ ストリップの各層でヒットのコインシデンスを取り、その結果を表 5.2 に示す Quality の定義と照らし合わせることで Quality を決定する。Quality 1 は BM にヒットがないヒットパターンであり、このパターンを許容することで Run-3 まででは BM がなくトリガーを出すことのできなかつた領域でトリガーを出すことが可能になる。

表 5.2 Quality の定義。ヒット数が多いほど Quality が大きくなり、より精密に p_T を測定することができる。

Quality	ヒットのあるステーション	ヒットの組み合わせ
5	I-M-M-O	$2/3(\text{RPC0}) \wedge 1/2(\text{RPC1}) \wedge 1/2(\text{RPC2}) \wedge 1/2(\text{RPC3})$
4	I-M-O	$2/3(\text{RPC0}) \wedge 3/6(\text{RPC1}+\text{RPC2}+\text{RPC3})$
3	M-O	$3/4(\text{RPC1}+\text{RPC2}) \wedge 1/2(\text{RPC3})$
2	I-M	$2/3(\text{RPC0}) \wedge 3/4(\text{RPC1}+\text{RPC2})$
1	I-O	$2/3(\text{RPC0}) \wedge 1/2(\text{RPC3})$

過程③

過程③では、4つの p_T 閾値を通過したヒットリストから最も p_T が高くなるようなものを選ぶ。基本的には p_T 閾値が大きいヒットリストを選ぶ。例外として比べるヒットリストの片方の Quality が 2 の場合は Quality が最大のヒットリストを選ぶ。これはミューオンがウィンドウ内を通過したが BO にヒット残さなかつた場合にもトリガーを発行できるようにするためである。

5.3 円フィッティング

ヒットファインダーではミューオンの η 方向の曲がり具合を簡単に測定しているだけである。また ϕ 方向の情報をうまく使っていない。ミューオンは理想的な磁場中で円軌道を描くということを利用して、ミューオンの飛跡を円でフィッティングすることでヒットファインダーより精密な p_T の測定を行うことができると考えた。そこで円筒座標系の r - z 平面でヒットファインダーで得られたヒットに対して円フィッティングを行うことにより半径 R を求め p_T を計算する方法を開発した。

5.3.1 円フィッティングの概要

図 5.8 に示すように、衝突点で生成されたミューオンはトロイド磁場よりも内側では直線的に移動しトロイド磁場に入射する。トロイド磁場は r - z 平面に対して垂直にかかっているため、トロイド磁場が理想的であればミューオンは r - z 平面上で円軌道を描きながら RPC にヒットを残す。 θ をミューオンの入射方向の天頂角、 B を磁束密度とすると式 5.1 で示すように p_T と $R \sin \theta$ は比例関係になり、 $R \sin \theta$ を測定することで p_T を求めることができる。 p_T と $R \sin \theta$ の関係を図 5.9 に示す。

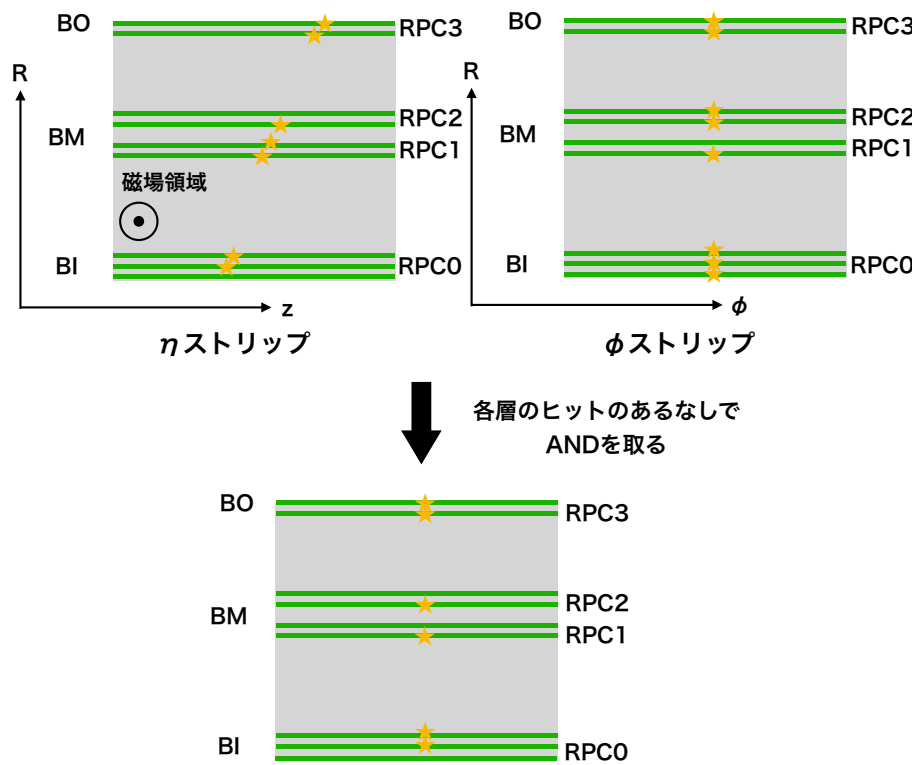


図 5.7 Quality 決定の例。 η ストリップと ϕ ストリップのヒットパターンの各層のヒットで AND を取り Quality を決定する。

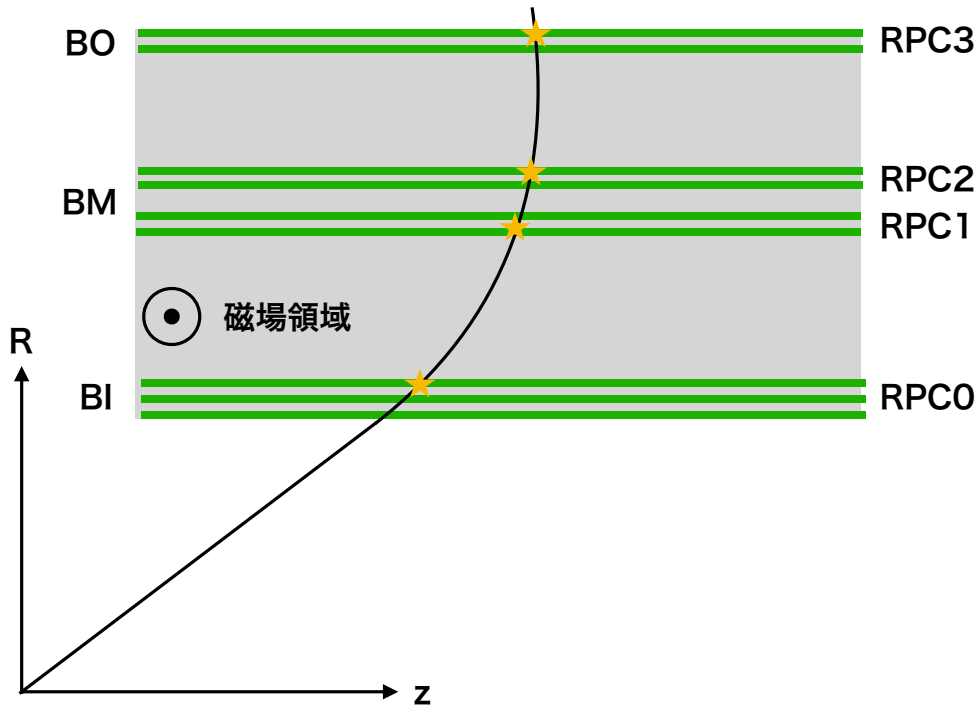


図 5.8 バレル部でのミューオンの軌道。ミューオンはトロイド磁場の領域までは直線の軌道を描き、トロイド磁場中では円軌道を描く。

$$p_T = 0.3BR \sin \theta \quad (5.1)$$

5.3.2 円 フィットtingの方法

図 5.10 に示すようにある半径の円の中心からヒットの点まで引いた直線と円の交点からヒットまでの距離をそれぞれ $dBI_i (i = 1, 2, 3)$ 、 $dB M_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 、 $dBO_k (k = 1, 2)$ としてそれぞれを 2 乗して足し上げる。

$$f = \sum_{i=1}^3 dBI_i^2 + \sum_{j=1}^4 dB M_j^2 + \sum_{k=1}^2 dBO_k^2 \quad (5.2)$$

式 5.2 の関数が最小になるようにフィッティングを行った。

5.3.3 初期値の決定方法

フィッティングを行う場合、初期値を準備する必要がある。図 5.11 に示すようにヒットリストの中から 4 つのヒットを選び、以下の方法で円の半径と中心点の初期値を決めた。

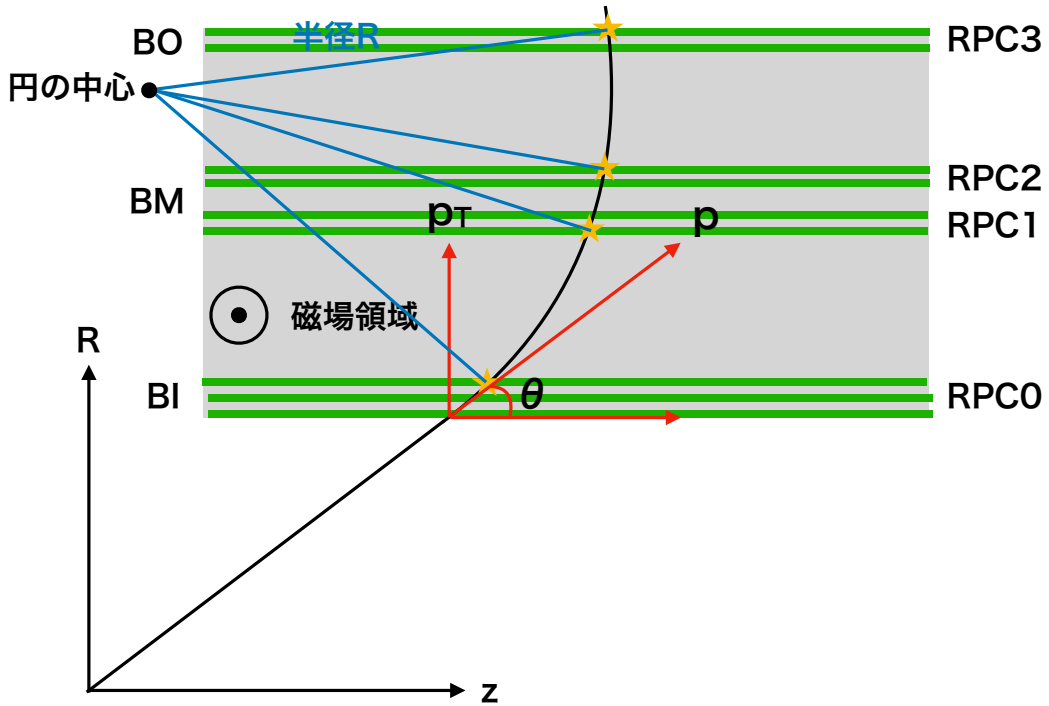


図 5.9 p_T と $R \sin \theta$ の関係。 p_T は p の z 軸に垂直な成分で $p_T = p \sin \theta$ の関係がある。

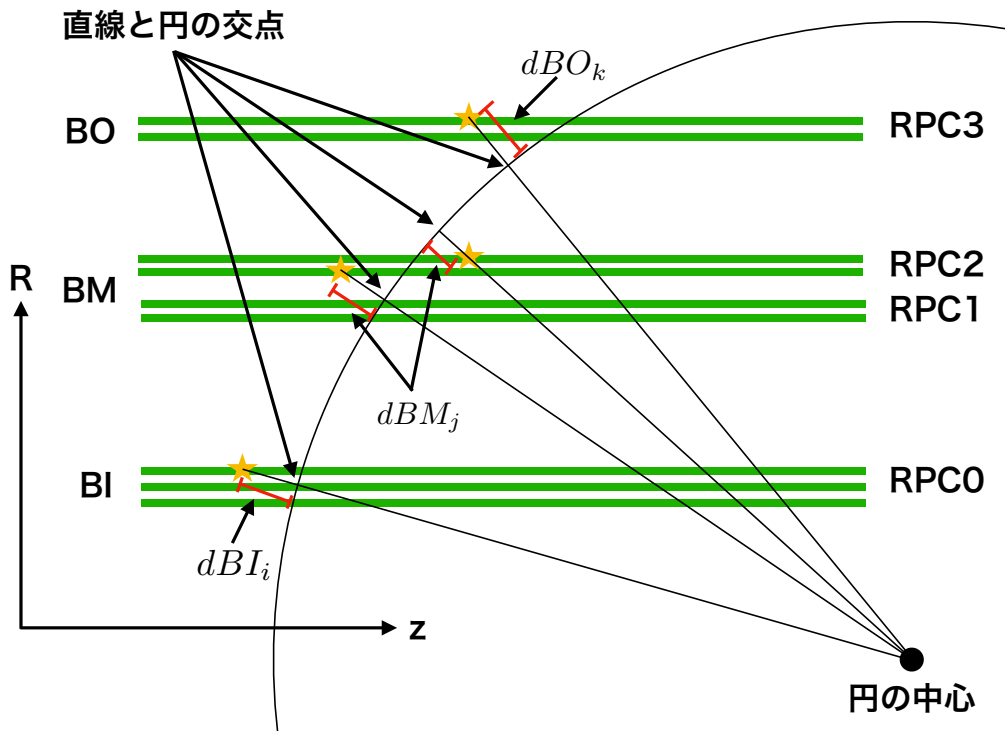


図 5.10 円フィッティングの方法。

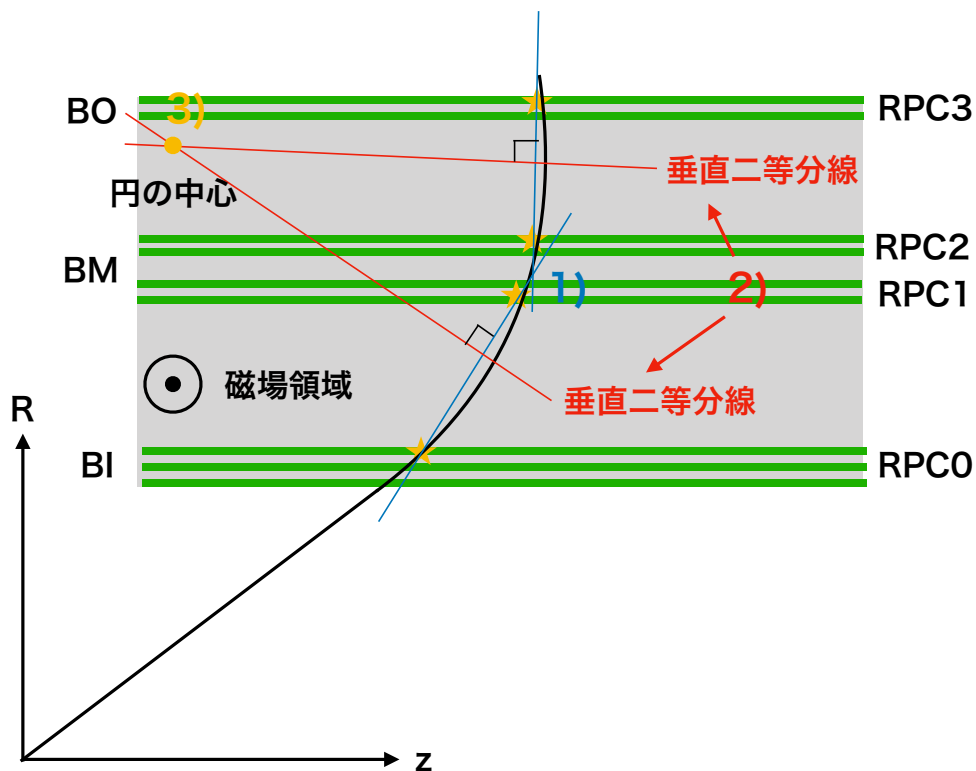


図 5.11 フィッティングを行う際の初期値の決め方。RPC0、RPC1、RPC2、RPC3 それぞれから1つずつヒットを選び、4つのヒットを用いて解析的に円を計算する。

1. ヒットの間直線を引く。
2. その直線の垂直二等分線を引く。
3. 垂直二等分線の交点を計算し、円の半径と中心点を求める。

5.3.4 RPC0にヒットがない場合

図 5.12 に示すように RPC0 にヒットが無く RPC1 と RPC2 と RPC3 にヒットがある場合 (Quality が 3 の場合)、RPC1 と RPC2 の距離が近いため円を求めるときの精度が悪くなってしまいます。そこで以下のように衝突点の情報を利用しミューオンがトロイド磁場の境界上を通る点を求める。

1. トロイド磁場の境界上のミューオンの通過位置を未知数 x とする。
2. 衝突点から 1) で決めた点へ直線を引く。
3. BM と BO のヒットと 1) で決めた点を通る円を作る。

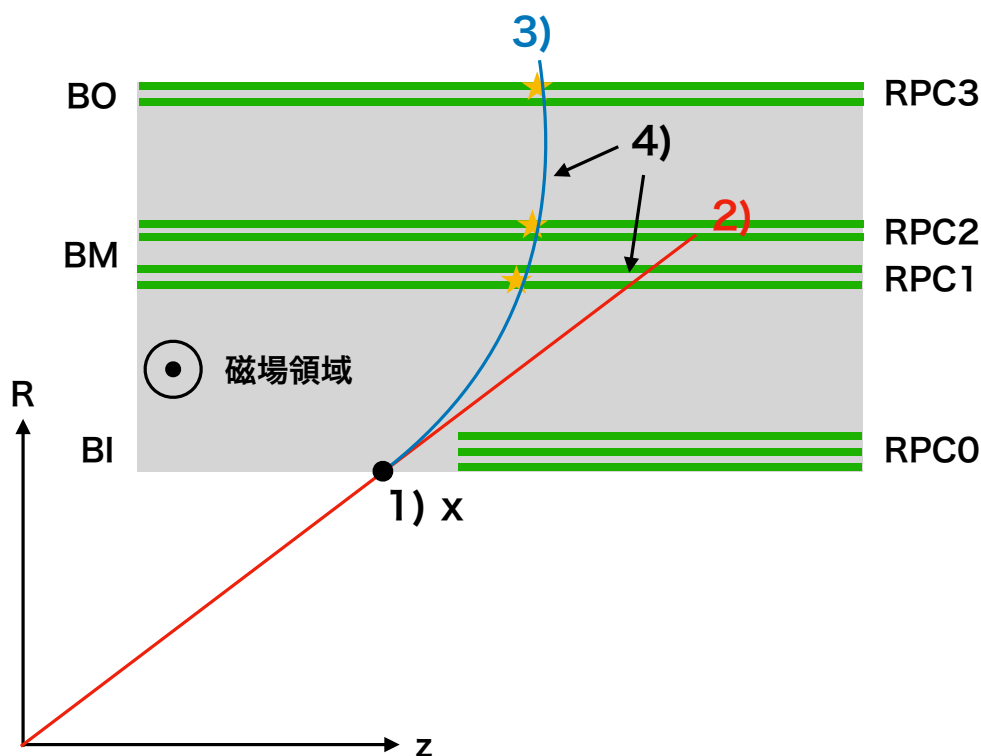


図 5.12 RPC0 にヒットがない場合の磁場の境界上の点の求め方。

4. 直線が円の接線となっていることを仮定して、2) と 3) の連立方程式を解き磁場の境界上の点を求める。

以上の方法で求めた磁場の境界上の点と RPC1 と RPC2 と RPC3 の点を用いて初期値を計算し、フィッティングを行うことで精度良く半径 R を計算することができる。

5.3.5 磁場の考慮

ATLAS 検出器のトロイド磁場は x-y 平面上で ϕ 方向に対称に置かれた 8 つの磁石で作られている。図 5.13 に示すように、磁石や ATLAS 検出器の構造上の問題でトロイド磁場の強さや向きは場所ごとに少し異なる。そこで図 5.14 と図 5.15 に示すように η と ϕ それぞれで 5 つに領域を分割し領域ごとに円フィッティングを行った。 η 方向では $0 \leq |\eta| < 0.20$, $0.20 \leq |\eta| < 0.40$, $0.40 \leq |\eta| < 0.60$, $0.60 \leq |\eta| < 0.80$, $0.80 \leq |\eta| < 1.05$ の 5 つの領域 (η 領域①～⑤) に分割した。 ϕ 方向ではトロイド磁場の 8 回対称性より $\pi/40$ の角度で 5 つの領域 (ϕ 領域①～⑤) に分割した。

5.3.6 閾値の決定方法

p_T と $R \sin \theta$ の相関を確認し閾値を決定するために、1700 万イベントのモンテカルロシミュレーションサンプルを用いた。このサンプルは p_T 1-100 GeV まで η と ϕ に対して一様に 1 事象あたり 1 つのミュー

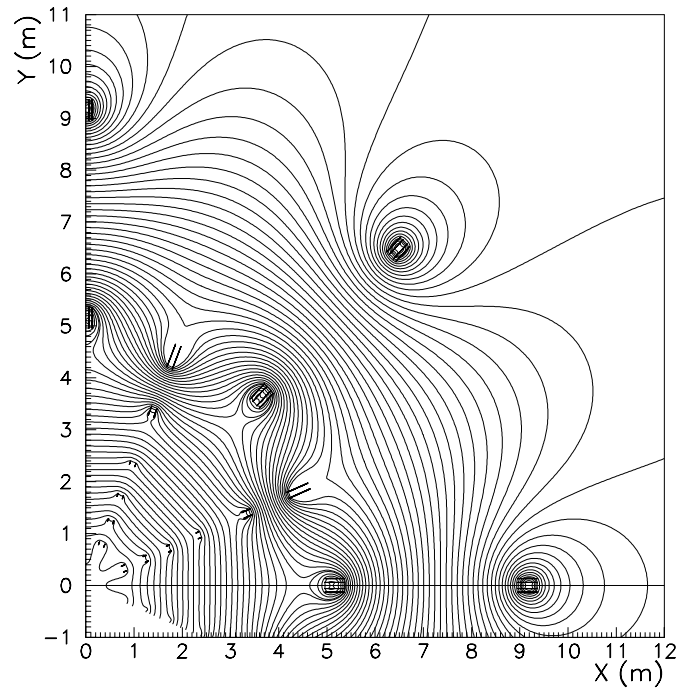


図 5.13 x-y 平面における磁場の方向と大きさ。

オンを発生させたものである。ヒットファインダーで p_T が 20 GeV 以上と判定されたヒットパターンに円フィッティングを行った結果、 p_T と $R \sin \theta$ の間の相関を確認することができた。図 5.16 に η 領域⑤と ϕ 領域⑤の p_T と $R \sin \theta$ の相関を示す。図中でしたように、ある $R \sin \theta$ で閾値以上のミューオンだけを選べば低い p_T のミューオンを落とすことができる。以下に示す方法でこの相関から磁場領域ごとに閾値を決定した。

1. $20 \leq p_T < 21$ GeV のイベントを取り出して図 5.17 のように $R \sin \theta$ 分布を作りガウス関数でフィットした。
2. 1) のガウス関数でのフィットの結果から閾値以上の $20 \leq p_T < 21$ GeV のミューオンに対する効率が 92.5 % になるように閾値となる $R \sin \theta$ の値を決定した。

5.4 パターンマッチング

Level-0 トリガーでは各イベントに対して $10 \mu\text{s}$ の間に高速で処理をするためにアルゴリズムをハードウェアで実装する予定である。そのためオンラインで RPC の飛跡を再構成するためにハードウェアで実現可能なアルゴリズムを開発する必要がある。そこで RPC のヒット位置とミューオンの p_T を対応付けるパターンリストを事前に準備し、RPC のヒット情報と導入したパターンリストを比較するこ

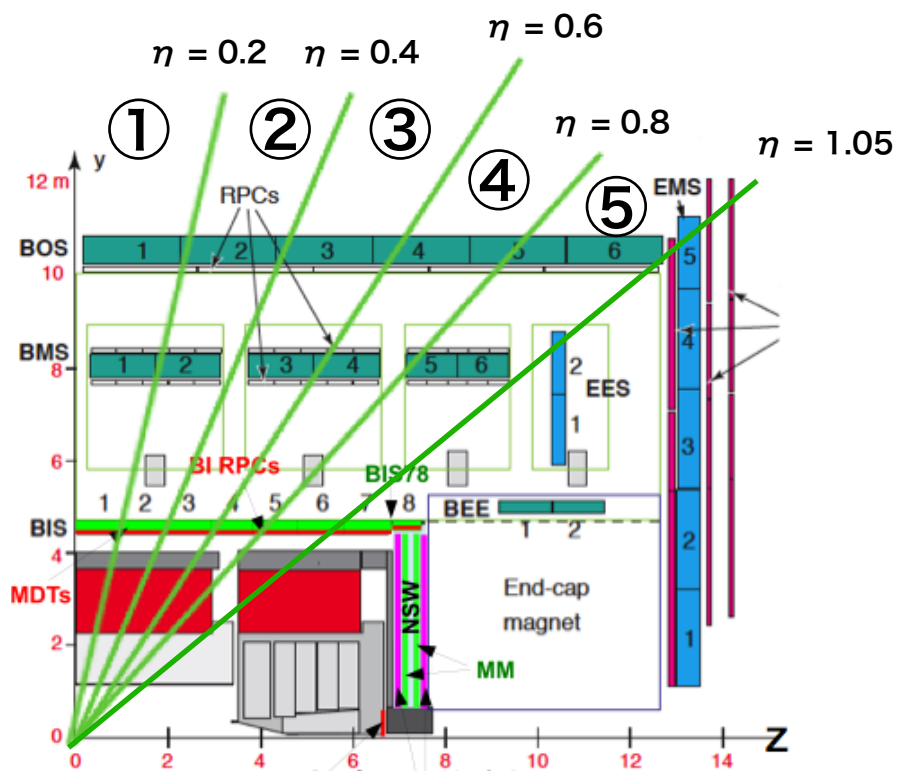


図 5.14 η 方向の領域の分割。5つの領域 (η 領域①～⑤) に分割した。

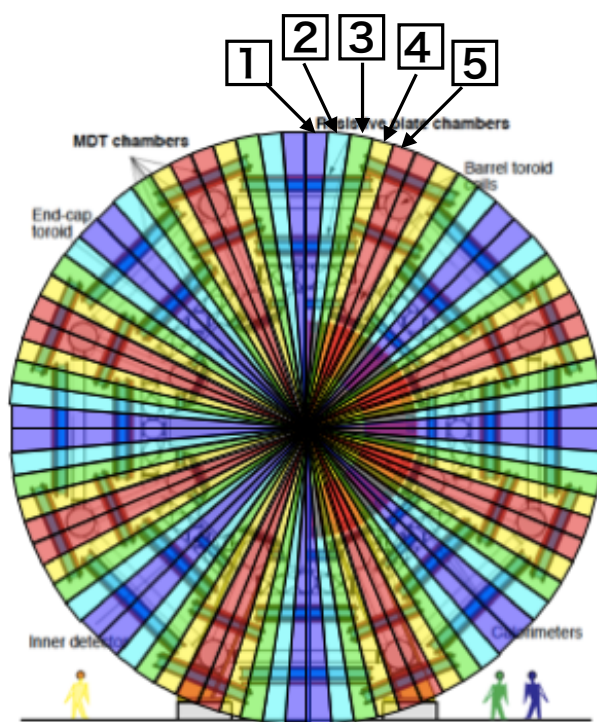


図 5.15 ϕ 方向の領域の分割。 $\pi/40$ の角度で 5 つの領域 (ϕ 領域 $\boxed{1} \sim \boxed{5}$) に分割した。

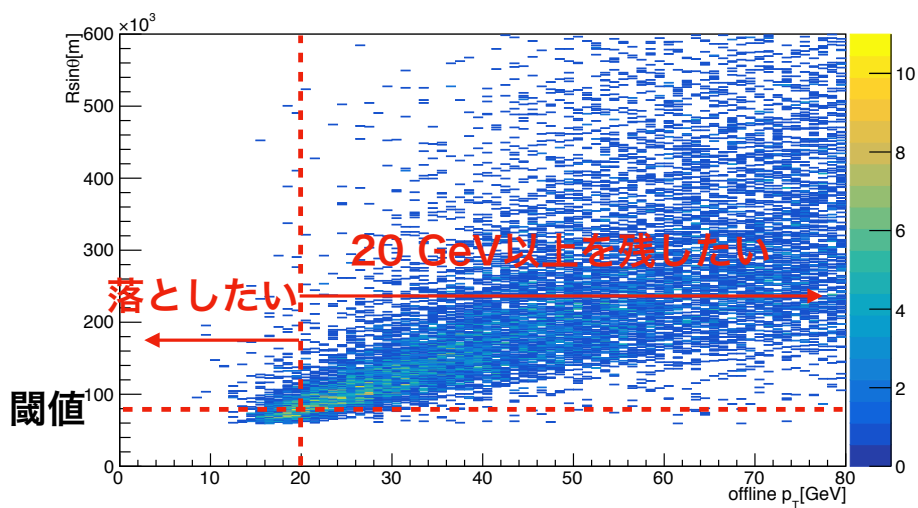


図 5.16 閾値の決定方法 (η 領域 5 と ϕ 領域 $\boxed{5}$)。

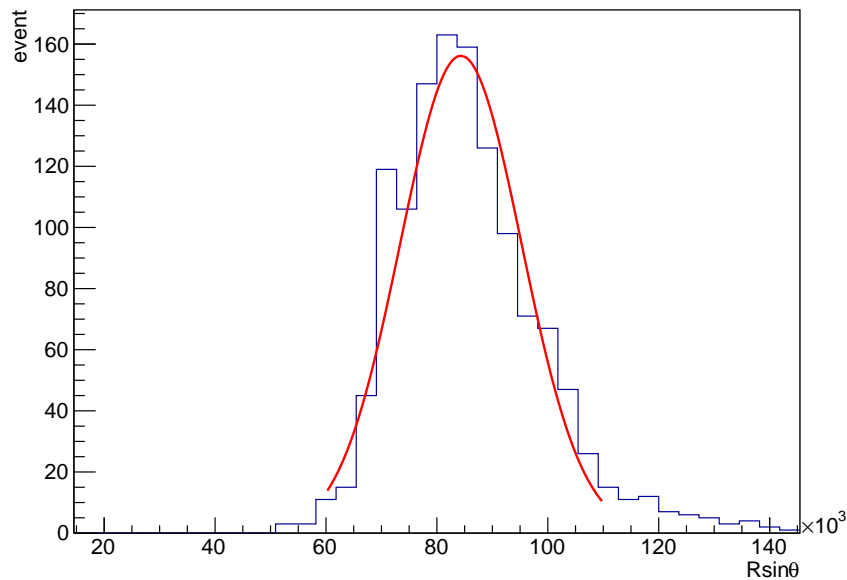


図 5.17 $20 \leq p_T < 21$ GeV での $R \sin \theta$ の分布のガウス関数でのフィット結果 (η 領域⑤と ϕ 領域⑤)。

とでハードウェアでのミューオンの飛跡再構成を行う。これによりフィッティングなどの複雑な手法を使用することなく、ハードウェアでのミューオンの飛跡再構成を行うことができる。そこで前述した円フィッティングの性能をパターンマッチングという手法で再現できないかを確認した。まずヒットファインダーのアルゴリズムをもとにヒットパターンのリストを作成し、パターンリスト中のパターンに対して円フィッティングを行うことで低い p_T のパターンをパターンリストから削減する。これによって低い p_T のミューオンによるトリガーの削減を図る。

5.4.1 パターンマッチングの概要

この節では RPC のヒットとパターンリストを照合しトリガーを発行するパターンマッチングの流れについて説明する。以下にパターンマッチングの手順を示す。

1. η ストリップのヒット情報とパターンリストとの比較を行い、9 層中 3 層以上で一致したパターンをパターン候補とする。
2. パターン候補が複数ある場合、パターンとマッチしたヒット数が多いパターンを選ぶ。
3. パターンとマッチしたヒット数が同じ場合、 p_T 閾値が大きいパターンを選ぶ。
4. パターンの p_T 閾値が等しい場合、最内層のチャンネルから次の層のチャンネルとの local な座標系での z/x の差を比べていき、先に z/x の差が小さくなるパターンを選ぶ。

5.4.2 パターンリスト

各パターンはRPC各層(全9層)のヒットチャンネルのリストで定義され、出力としてそれぞれのパターンに対応する飛跡の p_T 閾値をもつ。パターンマッチングはこのパターンリストによって行われるため、パターンリストには、大きな欠けがないことと、パターンと p_T の対応付けが正確であることが要求される。RPCではトリガーセクター中の隣り合う2つのトリガータワー内のヒットに対してトリガー判定を行っているため、パターンリストは2つのトリガータワーごとに作成した。またミューオンはトロイド磁場により η 方向に曲げられるため、 η 方向の情報を持つストリップのパターンリストのみを作成した。今回はAサイドのトリガーセクターが0と31の領域のパターンリストのみを作成しパターンマッチングの性能を評価した。

5.4.3 パターンリストの作成方法

ヒットファインダーアルゴリズムをもとに以下の手順でパターンリストを作成した。図5.18にパターンリスト作成の概念図を示す。

1. RPC0の1層目のチャンネルを1つ選ぶ。
2. 次の層にウィンドウを開き、ウィンドウ内に入っているチャンネルを記録する。
3. 2を9層目まで繰り返し見つかった全てのヒットパターンを記録する。

基本的にはパターンリストを作成する方法はヒットファインダーがヒットを探すときのアルゴリズムと同じだが以下の2点が異なる。

1. ヒットファインダーでは最も内側の層のヒットを起点としてヒットを探す。パターンリストを作成する際には必ずRPC0の1層目のチャンネルを起点としてチャンネルパターンを作成する。
2. ヒットファインダーでは1つ外側の層にヒットがなければさらに外側の層にヒットを探しに行くが、パターンリストを作る際には全層のヒットリストを作成する。パターンリストを作る際には、表5.1に示したIOやM10のようなステーションを飛ばしてヒットを探しに行くようなウィンドウは使用しない。

以上のことからRPC0のチャンネルを起点としてパターンリストを作成した場合、図5.19に示すように検出器の端でRPC0を通らずにRPC1、RPC2、RPC3を通るミューオンが残すヒットパターンを作成することができない。そこで作成したパターンリスト中のパターンに含まれないRPC1のチャンネルを取り出し、そのチャンネルを起点としてパターンを作成しパターンリストに追加した。

5.4.4 円フィッティングによるlow p_T パターンの削減

前述した方法を用いて p_T 閾値20 GeVのパターンリストを作成したところ、ヒットファインダーの p_T 閾値20 GeVを通過した事象の99.9%以上に対していずれかのパターンがマッチした。さらに p_T 閾

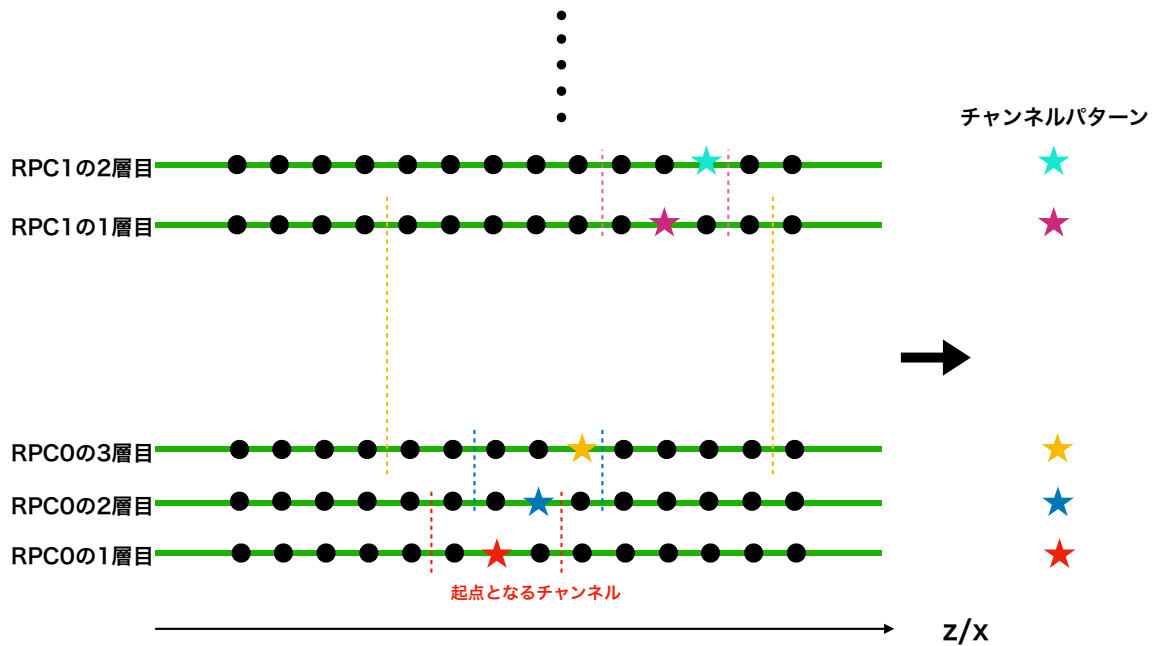


図 5.18 パターンリストの作成方法の概念図。RPC0 の 1 層目のチャンネルを起点として 1 層ずつチャンネルを探していく。横軸は local な座標系での z/x としている。

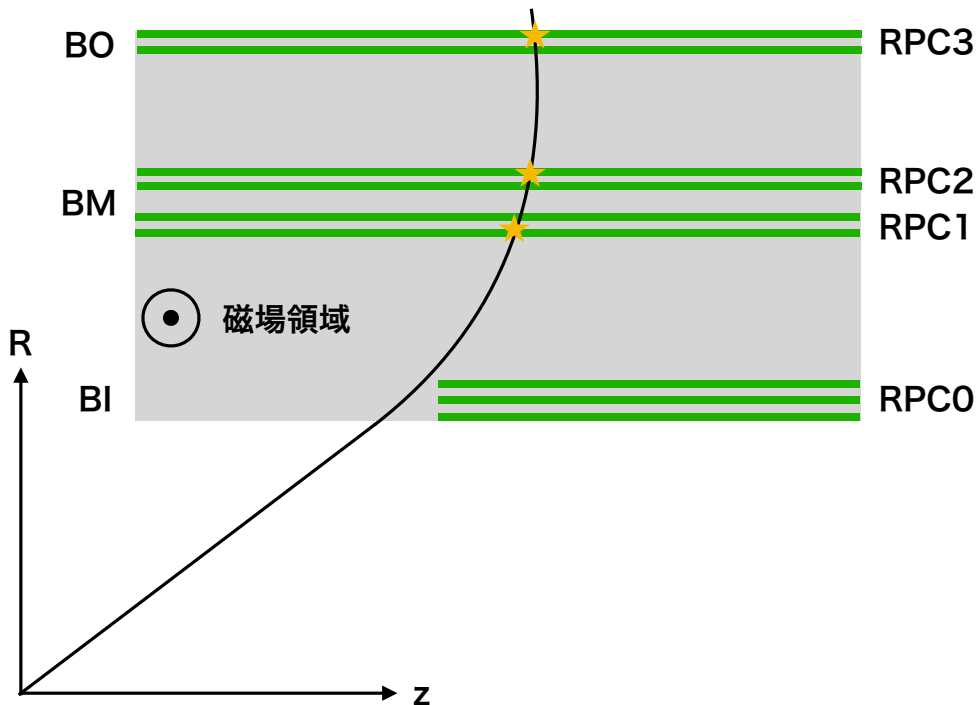


図 5.19 RPC0 を通らないミューオンの飛跡。RPC 検出器の端では検出器の位置関係により RPC0 を通らないミューオンがある。

値 20 GeV のパターンリストのチャンネルパターンに対して円フィッティングを行い、円フィッティングで定めた 20 GeV の閾値以下と判定されたパターンの p_T 出力を 20 GeV から 15 GeV に変更した。 η ストリップのパターンリストに対する円フィッティングを行う際、 ϕ の値は検出器の中心のものを使用した。この方法で修正したパターンリストを用いてトリガーを発行し、パターンマッチングの性能を確認する。

第6章 バレル部ミュオントリガーアルゴリズムの性能評価

6.1 トリガー効率

RPCのミュオントリガーには p_T 閾値以上の p_T を持つミュオンに対して高い効率でトリガーを発行しつつ、低い p_T のミュオンは排除することが要求される。開発したトリガーアルゴリズムの性能評価にはモンテカルロシミュレーションサンプルを用いた。このサンプルは $p_T 1 \sim 100$ GeV まで η と ϕ に対して一様に1事象あたり1つのミュオンを発生させたもの(「シングルミュオンMC」と呼ぶ)である。この章では、シングルミュオンのオフライン解析によってバレル領域 ($|\eta| < 1.05$) で再構成された飛跡(「オフライン飛跡」と呼ぶ)に対して、RPCトリガーでトリガー判定できた効率(「トリガー効率」と呼ぶ)の評価方法および結果を報告する。

オフライン飛跡の総数を N_{total} 、それぞれのミュオンの位置を η_{offline} 、 ϕ_{offline} とする。このオフライン飛跡のうち、開発したRPCトリガーを通過し、かつ式 6.1 を満たすようなオフライン飛跡の数を N_{RPC} とする。

$$dR = \sqrt{(\eta_{\text{offline}} - \eta_{\text{RPC}})^2 + (\phi_{\text{offline}} - \phi_{\text{RPC}})^2} < 0.4 \quad (6.1)$$

式 6.1 における η_{RPC} 、 ϕ_{RPC} はRPCトリガーによって得られた飛跡の位置を示す。また N_{total} と N_{RPC} を用いてパターンマッチングによるトリガー効率 $\varepsilon_{\text{trigger}}$ を式 6.2 のように定義する。

$$\varepsilon_{\text{trigger}} = \frac{N_{\text{RPC}}}{N_{\text{total}}} \quad (6.2)$$

またRPCトリガーとしてヒットファインダーを用いたときのトリガー効率 $\varepsilon_{\text{hitfinder}}$ を用いて、相対効率 $\varepsilon_{\text{relative}}$ を式 6.3 のように定義する。

$$\varepsilon_{\text{relative}} = \frac{\varepsilon_{\text{trigger}}}{\varepsilon_{\text{hitfinder}}} \quad (6.3)$$

本来はトリガーレートを計算し、高輝度LHC-ATLAS実験でのトリガーレートの許容値と比較することでトリガーアルゴリズムの性能を評価する必要がある。今回の研究ではトリガーレートの計算まで行うことができなかったため、トリガー効率によってトリガーアルゴリズムの性能を評価する。 $p_T \geq 20$ GeVの検出効率と $p_T < 20$ GeVの検出効率によりトリガーアルゴリズムの性能評価を行った。また $p_T < 20$ GeVのミュオンの検出効率を下げることもできて、 p_T が20 GeV付近のミュオンが大きく落ちてしまうと物理的に重要な事象を失ってしまうので、 $20 \leq p_T < 30$ GeVの検出効率が大きく落ちないことを確認した。

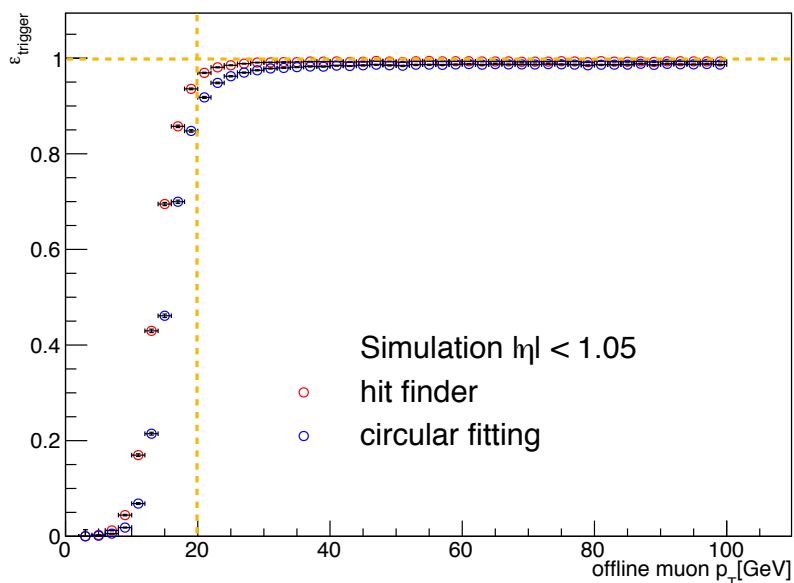


図 6.1 p_T 閾値 20 GeV の円フィッティングによるトリガー効率 $\epsilon_{\text{trigger}}$ とヒットファインダーのトリガー効率 $\epsilon_{\text{hitfinder}}$ の p_T 依存性の比較。

6.2 円フィッティングの性能評価

円フィッティングの閾値を決定するのに用いたものとは別の 300 万イベントのシングルミュオン MC を用いて円フィッティングの性能評価を行った。図 6.1 に円フィッティングのトリガー効率、図 6.2 に円フィッティングの相対効率を示す。表 6.1 に円フィッティングでの各 p_T 領域でのトリガー効率、表 6.2 に円フィッティングでの各 p_T 領域での相対効率を示す。ヒットファインダーの結果に対して円フィッティングを行うことで、 $20 \leq p_T \leq 100$ GeV での相対効率を 99% 以上に保ちながら、 $p_T < 20$ GeV の相対効率を 73.8 % に削減できることを示した。

表 6.1 p_T 閾値 20 GeV での円フィッティングによる各 p_T 領域のトリガー効率 $\epsilon_{\text{trigger}}$

$\epsilon_{\text{trigger}} \times 100$ [%] ($p_T < 20$ GeV)	32.0
$\epsilon_{\text{trigger}} \times 100$ [%] ($20 \leq p_T \leq 100$ GeV)	98.2
$\epsilon_{\text{trigger}} \times 100$ [%] ($20 \leq p_T < 30$ GeV)	95.5

表 6.2 p_T 閾値 20 GeV での円フィッティングによる各 p_T 領域の相対効率 $\epsilon_{\text{relative}}$

$\epsilon_{\text{relative}} \times 100$ [%] ($p_T < 20$ GeV)	73.8
$\epsilon_{\text{relative}} \times 100$ [%] ($20 \leq p_T \leq 100$ GeV)	99.0
$\epsilon_{\text{relative}} \times 100$ [%] ($20 \leq p_T < 30$ GeV)	97.1

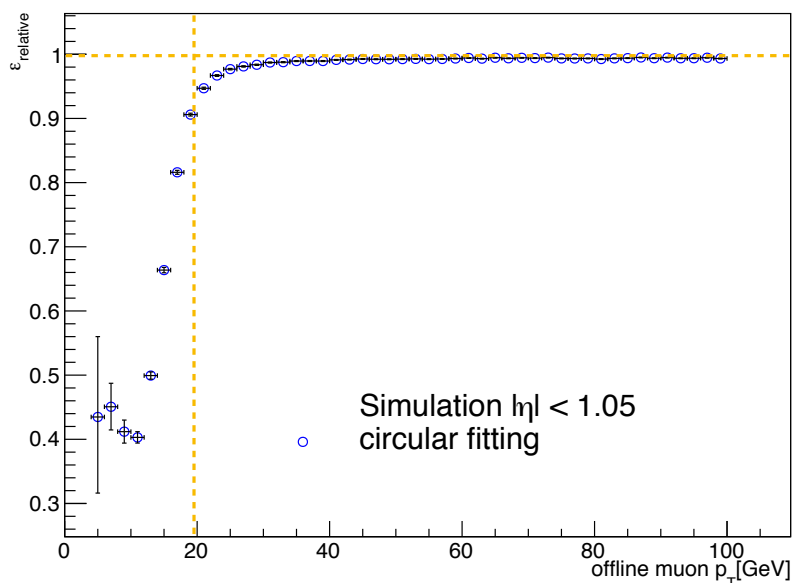


図 6.2 p_T 閾値 20 GeV の円フィッティングの相対効率 $\varepsilon_{\text{relative}}$ の p_T 依存性。

6.3 パターンマッチングの性能評価

上と同様に 300 万イベントのシングルミュオン MC を用いてパターンマッチングの性能評価を行った。パターンマッチングについては、トリガーセクター 0 と 31 の A サイドの領域のみで性能評価を行った。図 6.3 にパターンマッチングのトリガー効率、図 6.4 にパターンマッチングのヒットファインダーに対する相対効率を示す。表 6.3 にパターンマッチングでの各 p_T 領域でのトリガー効率、表 6.4 にパターンマッチングの各 p_T 領域での相対効率を示す。ヒットファインダーの結果に対してパターンマッチングを行うことで、 $20 \leq p_T \leq 100$ GeV での相対効率を 99% 以上に保ちながら、 $p_T < 20$ GeV の相対効率を 83.9% に削減することができた。ソフトウェアで行った円フィッティングに比べて、low p_T の相対的な削減率は少し悪くなったがハードウェアを用いたトリガーで大きく low p_T のミュオンを削減できることを示した。

表 6.3 p_T 閾値 20 GeV でのパターンマッチングによる各 p_T 領域のトリガー効率 $\varepsilon_{\text{trigger}}$

$\varepsilon_{\text{trigger}} \times 100$ [%] ($p_T < 20$ GeV)	35.8
$\varepsilon_{\text{trigger}} \times 100$ [%] ($20 \leq p_T \leq 100$ GeV)	97.9
$\varepsilon_{\text{trigger}} \times 100$ [%] ($20 \leq p_T < 30$ GeV)	95.7

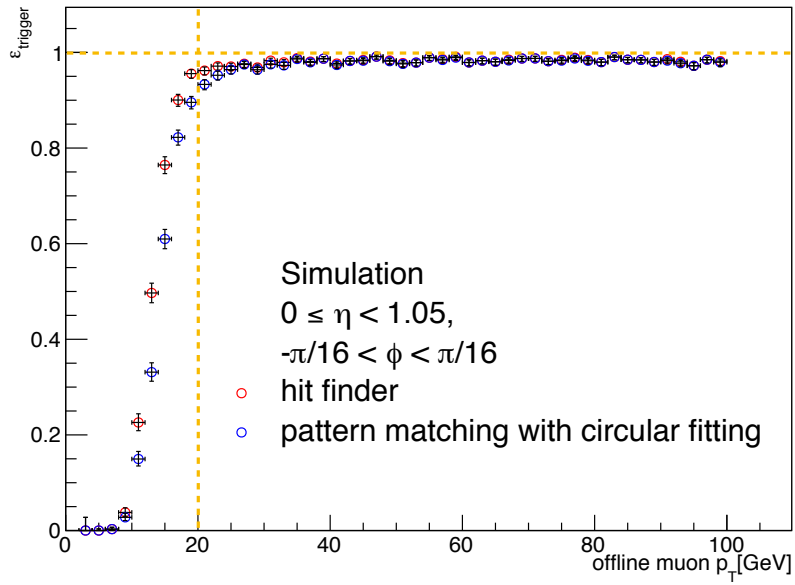


図 6.3 p_T 閾値 20 GeV のパターンマッチングによるトリガー効率 $\epsilon_{\text{trigger}}$ とヒットファインダーのトリガー効率 $\epsilon_{\text{hitfinder}}$ の p_T 依存性の比較。

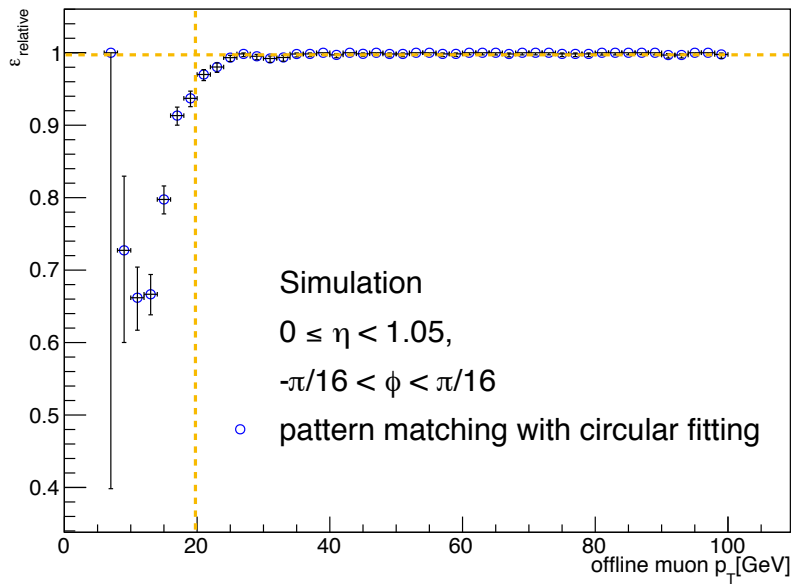


図 6.4 p_T 閾値 20 GeV のパターンマッチングの相対効率 $\epsilon_{\text{relative}}$ の p_T 依存性。

表 6.4 p_T 閾値でのパターンマッチングによる各 p_T 領域の相対効率 $\epsilon_{\text{relative}}$

$\epsilon_{\text{relative}} \times 100$ [%] ($p_T < 20$ GeV)	83.9
$\epsilon_{\text{relative}} \times 100$ [%] ($20 \leq p_T \leq 100$ GeV)	99.7
$\epsilon_{\text{relative}} \times 100$ [%] ($20 \leq p_T < 30$ GeV)	98.7

第7章 結論と今後の展望

2027年から開始される高輝度 LHC-ATLAS 実験では、LHC は重心系エネルギー 14 TeV、ルミノシティは現在の約 5 倍の $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転する予定である。ルミノシティの増加に伴いイベントレートが増加するため、ATLAS 実験のトリガーシステムのアップグレードが必要となる。本研究では高輝度 LHC-ATLAS 実験で新たに導入される RPC 検出器の情報を用いたトリガーアルゴリズムの開発を行った。

高輝度 LHC-ATLAS 実験のバレル部ミュオントリガーとしてヒットファインダーと呼ばれるトリガーアルゴリズムが導入される予定である。ヒットファインダーはミュオンの η 方向の曲がり具合をステーション間のヒット位置の差から計算しており p_T 測定の分解能が悪いため、ヒットファインダーで探しだしたヒットに対して、ミュオンの η 方向の曲がり具合をより精密に評価できるトリガーアルゴリズムの開発を行った。円筒座標系の r - z 平面でヒットファインダーで探しだしたヒットに対して円でフィッティングを行うことにより、ミュオンの飛跡の半径 R を求め p_T を計算する円フィッティングというトリガーアルゴリズムを開発した。ヒットファインダーで探し出したヒットに対して円フィッティングを行うことで、ヒットファインダーに対して p_T が 20 GeV 以上の領域で相対効率を 99 %以上に保ちながら、 p_T が 20 GeV より低い領域で相対効率を約 74 %に削減できることを示した。

また事前に RPC の位置情報と p_T を対応付けるパターンリストを作成しておき実際のヒットとパターンリストを照らし合わせることでトリガー判定を行うパターンマッチングという手法を用いて、円フィッティングをハードウェアに実装する方法を考案し、性能評価を行った。パターンリストはヒットファインダーアルゴリズムをもとに作成し、円フィッティングを用いてパターンリスト中の低い p_T のパターンを削減した。パターンマッチングによりヒットファインダーに対して p_T が 20 GeV 以上の領域で相対効率を 99 %以上に保ちながら、 p_T が 20 GeV より低い領域で相対効率を約 84 %に削減できることを示した。パターンマッチングにより円フィッティングの性能を完全に再現することはできなかったが、ハードウェアで低い p_T のミュオンを大きく落とすことができることを示した。本研究で開発したトリガーアルゴリズムを導入することによって、高輝度 LHC-ATLAS 実験において導入されるヒットファインダーアルゴリズムより高性能なトリガー判定を行うことができることを示した。

今回の研究では、A サイドのトリガーセクター 0 と 31 の領域の η ストリップの p_T 閾値 20 GeV のパターンリストのみを作成しパターンマッチングの性能評価を行った。今後は p_T 閾値 5,10,15,20 GeV ごとに全領域をカバーする η ストリップと ϕ ストリップ両方のパターンリストを作成しパターンマッチングの性能を評価する必要がある。 ϕ ストリップのパターンリストを導入することで η ストリップのパターンリストのみを用いる場合より、 p_T 分解能の高いパターンマッチングを行うことができる。またパターンマッチングは回路設計の変更が可能な集積回路 FPGA を用いて実装する予定であり、パターンリスト

の容量がFPGAのメモリに収まるか等の問題を考慮しなければならない。最終的には、パターンマッチングによるトリガー効率をもとにトリガーレートがどの程度削減できるかを調べ、高輝度LHC-ATLAS実験におけるトリガーレートの許容値内に抑えることができるかを調べるのが今後の課題である。

謝辞

本研究では、多くの方々にお世話になりました。

日々の研究のアドバイスや論文の執筆などにあって助言をくださった隅田土詞助教に心から感謝いたします。

また ATLAS 実験の先輩の田代拓也氏、救仁郷拓人氏、赤塚駿一氏、野口陽一氏、岡崎佑太氏には様々な面で大変お世話になりました。

最後に不自由なく大学生活を送らせてくれた両親に感謝します。

参考文献

- [1] The ATLAS Collaboration, Combined measurements of Higgs boson production and decay in the $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels using $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data collected with the ATLAS experiment, ATLAS-CONF-2017-047, 2017 [Web](#)
- [2] N.Sakai, Naturalness in Supersymmetric GUTS, Z.Phys. C11(1981)153.
- [3] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST 3 S08003, 2008 [Web](#)
- [4] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Muon Spectrometer, 2017 [Web](#)
- [5] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS TDAQ System, 2017 [Web](#)
- [6] Valerio D'Amico, Studio delle prestazioni del trigger per muoni nella zona centrale del rivelatore ATLAS per la fase ad alta luminosità di LHC, 修士論文.

付録A ヒットファインダーのウィンドウの大きさの決定方法

A.1 ウィンドウの大きさの決定方法

ウィンドウの大きさを決めるのにモンテカルロシミュレーションサンプルを用いた。このサンプルは η と ϕ に対して一様に 1 事象あたり 1 つの p_T が 20 GeV のミューオンを発生させたものである。

A.1.1 η ストリップに対応するウィンドウ

ここでは、 η ストリップに対応するウィンドウの大きさの決め方について説明する。

異なるステーション間のウィンドウ

IM1 や M10 のように異なるステーションの層の間に対応するウィンドウの大きさを決める方法を説明する。各トリガータワーごとのその 2 層にミューオンが残すヒットの z/x の差の分布から、90%以上のミューオンが残るように z/x の差の正負に対して対称的なカットの値を決めた。図 A.1 に η ストリップの M10 での 2 層間での z/x の差のプロットを示す。

ステーション内のウィンドウ

ggBI のように同じステーション中の層の間に対応するウィンドウの大きさを決める方法を説明する。各トリガータワーごとのその 2 層にミューオンが残すヒットの z/x の差の分布から、99%以上のミューオンが残るように z/x の差の正負に対して対称的なカットの値を決めた。ステーション内ではミューオンはほとんど η 方向にも ϕ 方向にも曲がらないため、カットの基準を 99%に設定している。

A.1.2 ϕ ストリップに対応するウィンドウ

ここでは、 ϕ ストリップに対応するウィンドウの大きさの決め方について説明する。

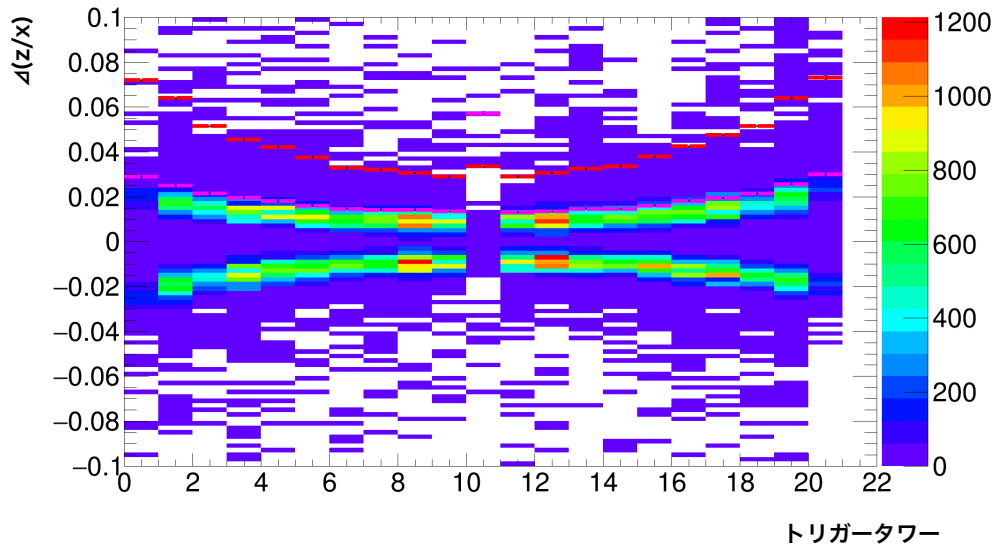


図 A.1 トリガータワーごとの $p_T > 20$ GeV のミュオンが BM(RPC1) と BO に残すヒットの z/x の差の分布 [6]。赤線が p_T 閾値 20 GeV、ピンク色の線が p_T 閾値 10 GeV を示す。

異なるステーション間のウィンドウ

IM1 や M10 のように異なるステーションの層の間に対応するウィンドウの大きさを決める方法を説明する。各トリガータワーごとのその 2 層にミュオンが残すヒットの y/x の差の分布から、98%以上のミュオンが残るように y/x の差の正負に対して対称的なカットの値を決めた。ミュオンはトロイド磁場によって η 方向に曲げられるが ϕ 方向には曲げられないのでカットの基準を 98%にしている。図 A.2 に η ストリップの IM1 での 2 層間での y/x の差のプロットを示す。

ステーション内のウィンドウ

ggBI のように同じステーション中の層の間に対応するウィンドウの大きさを決める方法を説明する。各トリガータワーごとのその 2 層にミュオンが残すヒットの y/x の差の分布から、99%以上のミュオンが残るように y/x の差の正負に対して対称的なカットの値を決めた。ステーション内ではミュオンはほとんど η 方向にも ϕ 方向にも曲がらないため、カットの基準を 99%に設定している。

A.2 ウィンドウの大きさ

この節では前節の方法で決めたウィンドウの数値を示す。 p_T 閾値 20 GeV の Large Sector での η ストリップのウィンドウの大きさを表 A.1 に示す。 p_T 閾値 20 GeV の Large Sector での ϕ ストリップのウィンドウの大きさを表 A.2 に示す。

表 A.1 p_T 閾値 20 GeV の Large Sector での η ストリップに対するウィンドウの大きさ。

トリガータワー	IM1	IM2	IO	MM	M1O	M2O	ggBI	ggBM	ggBO
0	0.014	0.0165	0.036	0.0085	0.026	0.0205	0.00425	0.0089	0.0074
1	0.011	0.015	0.033	0.0075	0.024	0.019	0.0038	0.007	0.00805
2	0.0105	0.014	0.0305	0.0075	0.0225	0.018	0.0036	0.007	0.0082
3	0.0095	0.013	0.027	0.007	0.0195	0.0155	0.0041	0.0069	0.00815
4	0.009	0.012	0.0255	0.0065	0.0185	0.0155	0.0037	0.0061	0.008
5	0.0085	0.0115	0.0235	0.0065	0.017	0.0135	0.00345	0.00605	0.00595
6	0.007	0.0105	0.0215	0.006	0.0155	0.012	0.00305	0.00645	0.00605
7	0.007	0.01	0.0205	0.0055	0.0145	0.012	0.00325	0.00665	0.0062
8	0.0065	0.0095	0.019	0.005	0.0135	0.011	0.00375	0.00635	0.0063
9	0.0075	0.0095	0.019	0.0055	0.0135	0.011	0.0042	0.00495	0.0064
10	0.0075	0.0095	0.019	0.0055	0.0135	0.011	0.0042	0.00495	0.0064
11	0.0075	0.0095	0.019	0.005	0.013	0.011	0.0042	0.0065	0.0039
12	0.007	0.0095	0.019	0.005	0.014	0.011	0.00375	0.00475	0.00625
13	0.007	0.0105	0.021	0.0055	0.0145	0.012	0.00325	0.0053	0.00615
14	0.007	0.0105	0.021	0.006	0.0155	0.012	0.003	0.006	0.00575
15	0.0085	0.0115	0.024	0.0065	0.0175	0.0135	0.00345	0.006	0.00695
16	0.009	0.012	0.0255	0.0065	0.019	0.0155	0.0037	0.006	0.00585
17	0.0095	0.013	0.027	0.007	0.019	0.0155	0.00405	0.0069	0.0056
18	0.0105	0.014	0.03	0.0075	0.022	0.0175	0.0035	0.00655	0.0083
19	0.011	0.0155	0.033	0.008	0.024	0.0185	0.0038	0.007	0.0082
20	0.014	0.0165	0.036	0.0085	0.026	0.021	0.00425	0.00835	0.0076

表 A.2 p_T 閾値 20 GeV の Large Sector での ϕ ストリップに対するウィンドウの大きさ。

トリガータワー	IM1	IM2	IO	MM	M1O	M2O	ggBI	ggBM	ggBO
0	0.0075	0.008	0.013	0.004	0.009	0.0065	0.004	0.0071	0.0036
1	0.007	0.008	0.012	0.0035	0.008	0.006	0.00405	0.0045	0.00335
2	0.007	0.008	0.0115	0.004	0.008	0.006	0.00385	0.00465	0.00335
3	0.0065	0.0075	0.0105	0.0035	0.0075	0.006	0.00405	0.0044	0.00335
4	0.006	0.007	0.0095	0.0035	0.0065	0.005	0.00405	0.00425	0.00305
5	0.0055	0.0065	0.009	0.0035	0.006	0.005	0.004	0.0042	0.00305
6	0.0055	0.006	0.0085	0.003	0.0055	0.0045	0.00405	0.00415	0.00315
7	0.005	0.006	0.008	0.003	0.0055	0.0045	0.004	0.0042	0.00305
8	0.005	0.0055	0.0075	0.003	0.005	0.0045	0.0041	0.00415	0.00305
9	0.005	0.0055	0.0075	0.003	0.0055	0.0045	0.00415	0.00415	0.003
10	0.005	0.0055	0.0075	0.003	0.0055	0.0045	0.00415	0.00415	0.003
11	0.005	0.0055	0.007	0.003	0.005	0.0045	0.00415	0.00405	0.00295
12	0.005	0.0055	0.0075	0.003	0.005	0.0045	0.00405	0.00415	0.003
13	0.005	0.006	0.008	0.0035	0.0055	0.0045	0.00405	0.004	0.003
14	0.005	0.006	0.0085	0.003	0.0055	0.0045	0.00405	0.00405	0.00305
15	0.0055	0.0065	0.009	0.0035	0.006	0.0045	0.004	0.0042	0.003
16	0.006	0.007	0.01	0.0035	0.0065	0.0055	0.0041	0.00425	0.00305
17	0.0065	0.0075	0.011	0.0035	0.0075	0.0055	0.00405	0.00435	0.00335
18	0.0065	0.008	0.0115	0.004	0.0075	0.006	0.00385	0.00465	0.00345
19	0.007	0.0085	0.0125	0.0035	0.008	0.006	0.004	0.00445	0.00335
20	0.008	0.0085	0.0135	0.004	0.01	0.0065	0.00405	0.0071	0.00365

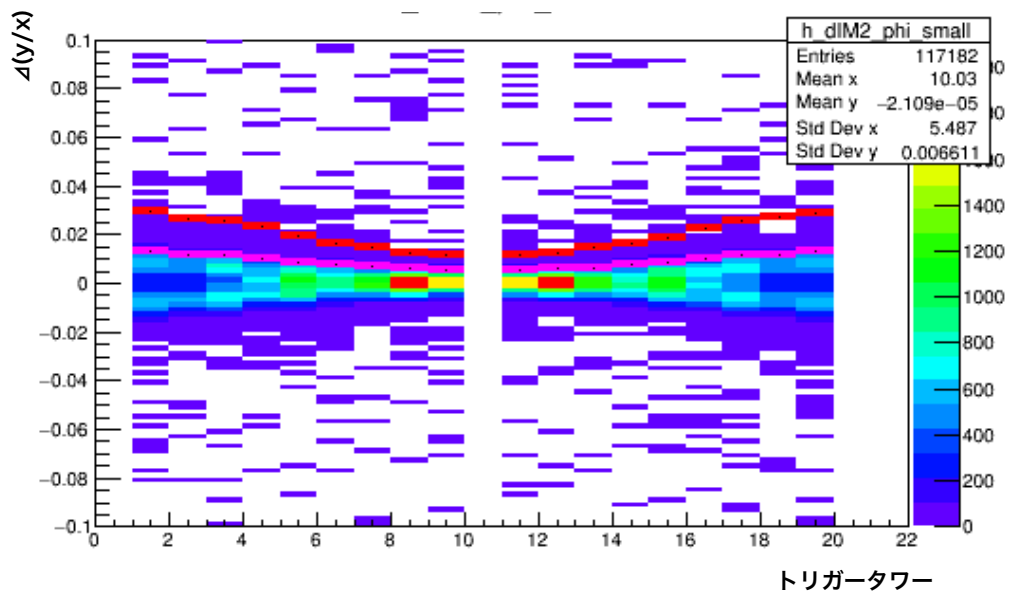


図 A.2 トリガータワーごとの $p_T > 20$ GeV のミュオンが BI と BM(RPC1) に残すヒットの y/x の差の分布 [6]。赤線が p_T 閾値 20 GeV、ピンク色の線が p_T 閾値 10 GeV を示す。