

2023 年度 修士論文

LHC-ATLAS 実験 Run3 における消失飛跡用トリガーの性能評価
(Validation of disappearing-track trigger in LHC-ATLAS Run 3)

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
澤田研究室

修士課程 2 年
学籍番号 35-226081

南 朋輔

2024 年 1 月

概要

素粒子物理の領域において標準模型は様々な観測結果とよく一致する優れたモデルである一方、階層性問題や暗黒物質など説明できない現象も存在する。そういった未解決の問題の一部を説明できるモデルの一つとして、超対称性理論がある。超対称性理論の検証を行なっている実験の一つに、LHC-ALTA5 実験がある。

LHC-ALTA5 実験は標準模型の精密測定および新物理の探索を目的として行われている汎用実験で、40 MHz で陽子陽子衝突事象の測定をしている。この実験では多数の解析が同時進行で行われており、超対称性粒子の探索も多方面から試みられている。そのうちの 하나가消失飛跡探索である。

消失飛跡探索では超対称性粒子の一つであるチャージーノを探索している。チャージーノはニュートラリーノとの質量差によって観測される事象の特徴が異なる。AMSB 模型などで予想されるチャージーノとニュートラリーノの質量が縮退している領域における特徴として、チャージーノが長寿命となることが挙げられる。このとき、チャージーノは検出器の間を数 cm 飛んでから崩壊し、暗黒物質候補であるニュートラリーノと低運動量のパイオンに崩壊する。ニュートラリーノは検出されず、パイオンは磁場に曲げられてほとんどヒットを残さない。このことからチャージーノは数 cm 飛んだことが検出された後、消えたように見える。これが消失飛跡である。

現在までの消失飛跡の探索は E_T^{miss} トリガーが使用されている。しかし 2022 年から始まった ATLAS 実験 Run3 において、検出器やトリガーにおけるアップデートが行われ、高速な処理が求められるトリガーの段階でも、全領域における飛跡の再構成が可能となった。これにより、消失飛跡探索に特化した消失飛跡トリガーが Run3 より新たに導入された。本論文ではこの消失飛跡トリガーの性能評価として、実際に測定されたデータとモンテカルロシミュレーション (MC) の比較を行い、Run3 において想定通りに働いていることを確認した。また、ミューオンの飛跡を途中で切って消失飛跡に見立てるミューオンリトラッキングという新たな信号評価手法を導入し、データと MC での比較を行った。この比較から、検出器の dead 情報の違いによりデータの信号効率は MC の約 87% と見積もられた。

目次

第 1 章	準備	1
1.1	標準模型	1
1.2	超対称性	2
第 2 章	LHC-ATLAS 実験	4
2.1	概要	4
2.2	検出器	6
2.3	トリガーシステム	11
2.4	超対称性粒子の探索	11
2.5	消失飛跡の探索	11
第 3 章	消失飛跡トリガー	13
3.1	概要	13
3.2	短い飛跡の再構成	13
3.3	短い飛跡の選別	15
3.4	実装時の性能評価	18
第 4 章	消失飛跡トリガーの背景評価	20
4.1	概要	20
4.2	手法	20
4.3	結果	21
4.4	議論	23
第 5 章	消失飛跡トリガーの信号評価	25
5.1	概要	25
5.2	手法: ミューオンリトラッキング	25
5.3	結果	27
5.4	議論	31
第 6 章	まとめ	33
付録		34
A	背景事象の性能評価における BDT 入力変数	34
B	信号事象の性能評価における BDT 入力変数	34

謝辞

41

引用文献

42

目次

1.1	標準粒子と超対称性粒子 [1]	1
1.2	標準粒子と超対称性粒子 [2]	3
2.1	LHC 加速器の概略図	4
2.2	LHC のスケジュール	5
2.3	2022 年と 2023 年におけるパイルアップ分布	5
2.4	ATLAS 検出器の概略図 [3]	6
2.5	粒子の各検出器での反応 [4]	7
2.6	飛跡パラメータの d_0 , z_0 (a) 赤点はヒット、赤線は飛跡、バツ印は衝突点を表す。また衝突点は上 2 本の飛跡から計算されている。(b) 赤点は衝突点、赤線は飛跡を表す。また衝突点は左 2 本の飛跡から計算されている。	7
2.7	内部飛跡検出器バレル部の概観	8
2.8	内部飛跡検出器の構造	9
2.9	ピクセル検出器の構造 [5]	9
2.10	カロリメータの概要 [3]	10
2.11	電磁カロリメータの構造 [3]	10
2.12	消失飛跡の模式図 [6]	12
2.13	ATLAS 実験 Run2 における消失飛跡解析結果	12
3.1	短い飛跡再構成	14
3.2	BDT を構成する決定木の一例	18
3.3	チャージノ対生成事象	18
3.4	消失飛跡トリガーの信号効率と <code>pix4lsct1p</code> カテゴリにおける信号事象と背景事象に対する BDT スコア	19
4.1	背景効率評価に使用したデータと MC の Mean Number of Interactions per Crossing 分布	21
4.2	2022Run3 における消失飛跡トリガーのレート	22
4.3	背景事象のカテゴリ分布	22
4.4	背景事象の d_0 分布図	23
4.5	背景事象の BDT スコア分布図	24
5.1	ミューオンリトラッキングの概要図	25
5.2	信号効率評価に使用したデータと MC の Mean Number of Interactions per Crossing 分布	27
5.3	消失飛跡トリガーの信号効率	28

5.4	MATCH track における三層飛跡と四層飛跡の割合	29
5.5	ミュオンリトラッキングをした際の BDT 入力変数	29
5.6	MATCH track の三層飛跡 (pix3lsct0 カテゴリ) と四層飛跡 (pix4lsct0 カテゴリ) の BDT スコア	30
5.7	MATCH track の層数別の BDT 効率	30
5.8	ピクセル検出器の dead map	32
A.1	背景事象の pix4lsct0 カテゴリの BDT 入力変数分布	35
A.2	背景事象の pix4lsct1p カテゴリの BDT 入力変数分布	36
A.3	背景事象の pix3lsct0 カテゴリの BDT 入力変数分布	37
A.4	背景事象の pix3lsct1p カテゴリの BDT 入力変数分布	38
B.5	muon retracking をした際の pix4lsct0 カテゴリの BDT 入力変数分布	39
B.6	muon retracking をした際の pix3lsct0 カテゴリの BDT 入力変数分布	40

表目次

3.1	飛跡再構成でのセレクションの内容	15
3.2	BDT 入力変数の内容	16
3.3	カテゴリ分類方法	16
3.4	カテゴリ別の BDT に使用された変数	17
3.5	BDT の WP	17
4.1	背景事象の飛跡が BDT を通過した割合	24
5.1	消失飛跡トリガーの信号効率	28
5.2	MATCH track における三層飛跡と四層飛跡の割合	29
5.3	MATCH track の層数別の BDT 効率	30
5.4	質量 800 GeV のチャージーノ MC のトリガー効率と見積もられたチャージーノデータのトリガー効率	31

第 1 章

準備

1.1 標準模型

標準模型は現代の素粒子物理の大元となる模型で、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用を 17 種の素粒子で記述している。素粒子の内訳は図 1.1 にあるように、クォーク 6 種類、レプトン 6 種類、ゲージ粒子 4 種類、ヒッグス粒子 1 種類となっている。クォークは強い相互作用によって結びつき二つや三つが結合したハドロンの中で観測される。レプトンは 3 世代存在し、電子、ミューオン、タウ粒子と対応するニュートリノである。ゲージ粒子は力を媒介する素粒子で、グルーオンは強い相互作用、W ボソンと Z ボソンは弱い相互作用、光子は電磁相互作用を媒介する。ヒッグス粒子は 2012 年に CERN で発見された素粒子で、質量の起源に関わっている。

この模型は多くの観測結果とよく一致する一方、説明できない現象も存在する。その一例が階層性問題、暗黒物質の存在などである。

1.1.1 階層性問題

強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用と比べ、重力のスケールが大きく違うという問題である。これはヒッグス粒子の質量の記述によく現れている。ヒッグス粒子の質量 m_H は、裸の質量 m_{bare} と量子補正 Δm_H^2 、標準模

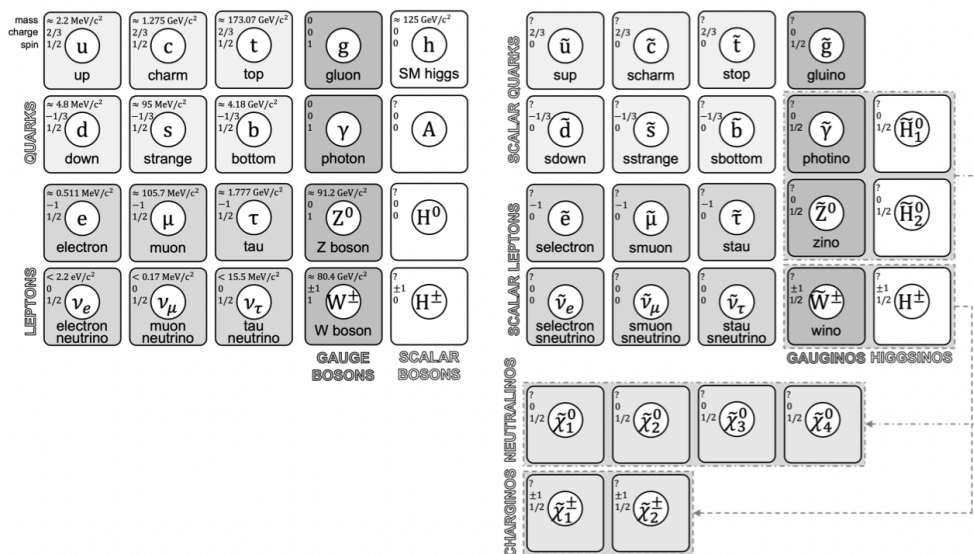


図 1.1: 標準粒子と超対称性粒子 [1]

型が有効となる上限 Λ を用いて以下のように表せる.

$$m_{\text{H}}^2 = m_{\text{bare}}^2 + \Delta m_{\text{H}}^2 \quad (1.1)$$

$$\Delta m_{\text{H}}^2 \propto \Lambda^2 \quad (1.2)$$

重力定数、プランク定数、光速で表されるプランクスケールを Λ として仮定すると、 $\Delta m_{\text{H}}^2 \sim O(10^{38} \text{ GeV}^2)$ となる. このとき、ヒッグス粒子の質量が観測値である $m_{\text{H}} = 125 \text{ GeV}$ 、 $m_{\text{H}}^2 \sim O(10^4)$ と一致するためには、 m_{bare}^2 が量子補正と 34 桁も一致している必要がある. これは偶然と考えるには桁数が大きく、量子補正を打ち消すような未解明の機構があると考えるのが自然である.

1.1.2 暗黒物質

さまざまな現象の観測から、我々には見えない未知の物質が存在することがわかっており、暗黒物質と呼ばれている. 特徴として、強い相互作用と電磁相互作用をしない、安定している、などが挙げられる. 観測結果の一例として、銀河の回転速度の観測がある. 銀河はその中心から回転しているが、その速度が現在見えている物質だけで計算される数値と大きく異なっている. これは何らかの質量を持った見えない物質、暗黒物質の影響と考えられており、宇宙のエネルギーの約 27% は暗黒物質で占められるとされている.

1.2 超対称性

超対称性はフェルミオンとボソンの対称性で、全ての標準模型の粒子に対してスピンの 1/2 だけずれたパートナー粒子が存在するというものである. この対称性を導入することで上記のヒッグス粒子の質量の問題や暗黒物質の存在など標準模型で説明できなかった一部の現象に説明を与えることができる. パートナー粒子は電荷などは標準模型粒子と同じである一方、同じ質量には見つかっていないことから超対称性の破れにより質量は異なっていると考えられており、2024 年 1 月現在未発見である.

超対称性粒子のうち、最も軽い粒子は LSP (Lightest Supersymmetric Particle) と呼ばれ、暗黒物質となるうる. LSP の候補の一つがニュートラリーノで、これは図 1.1 にあるように光子のパートナー粒子であるビーノ、Z ボソンのパートナー粒子である中性ウィーノ、ヒッグス粒子のパートナー粒子である中性ヒグシーノの混合した質量固有状態である. ニュートラリーノは混合しているものの、この三つの粒子のうちどれかが支配的である. 暗黒物質の残存密度から、それぞれの粒子のシナリオに制限がかかる. 図 1.2 には各シナリオにおける LSP の質量と暗黒物質の残存密度の関係が示されている. 他の種類の暗黒物質が存在する可能性も考慮し、LSP が観測されている暗黒物質の残存密度である $\Omega_{DM} h^2 = 0.12$ [7] を上回らないという制限から、LSP がウィーノの場合にはおおよそ $< 3 \text{ TeV}$ の、ヒグシーノの場合にはおおよそ $< 1 \text{ TeV}$ の制限がかかっている.

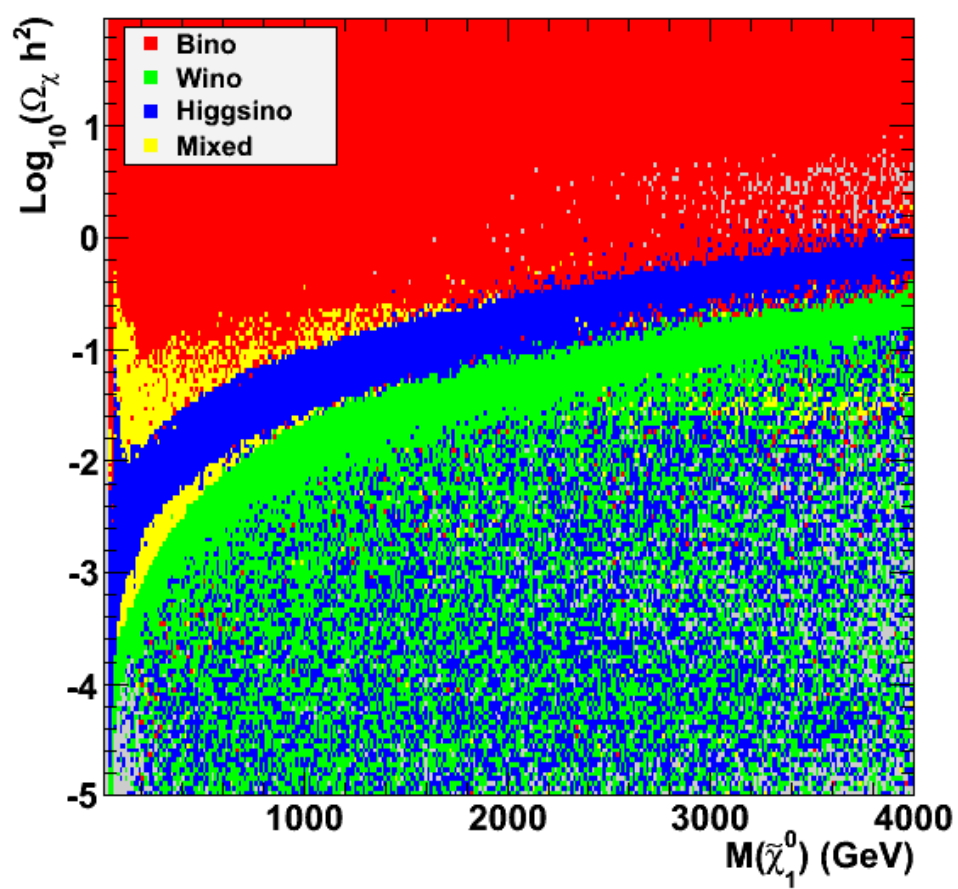


図 1.2: 標準粒子と超対称性粒子 [2]

第2章

LHC-ATLAS 実験

2.1 概要

LHC は周長 27 km の円形加速器で、スイスのジュネーブにある (図 2.1)。LHC は陽子などのハドロンを加速し周回運動させており、その周上には四箇所の衝突ポイントとそれに付随する四つの実験 (Alice、ATLAS、CMS、LHCb) が存在する。ATLAS 実験もそのうちの一つで、標準模型の精密測定および新物理の探索を目的として陽子陽子衝突の観測を行っている。2009 年に最初の陽子陽子衝突が行われ、2012 年にはヒッグス粒子が発見されている。スケジュールは図 2.2 のように進められており、2024 年 1 月現在は Run3 フェーズにて重心系エネルギー 13.6 TeV で 25 ns ごとに陽子バンチを交差させている。一回の陽子バンチ交差をイベントと呼ぶ。それぞれの陽子バンチは 10^{10} 個程度の陽子からなっており、図 2.3 のように一回のイベントで複数の陽子陽子衝突が発生している。

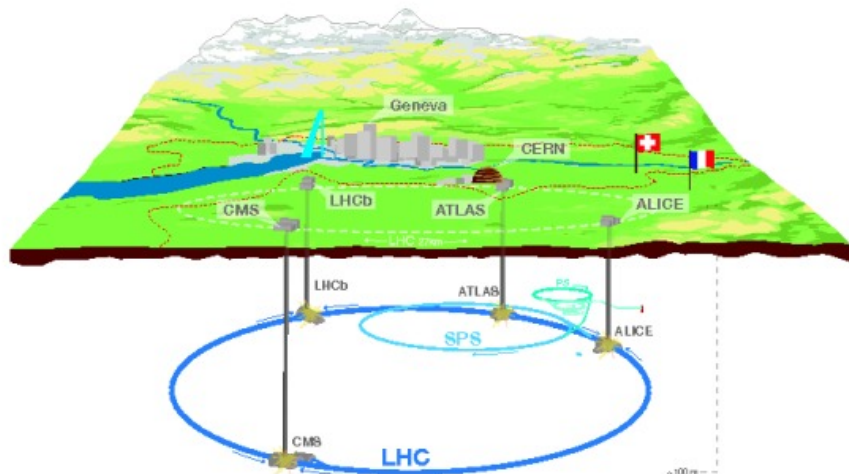


図 2.1: LHC 加速器の概略図 [8]

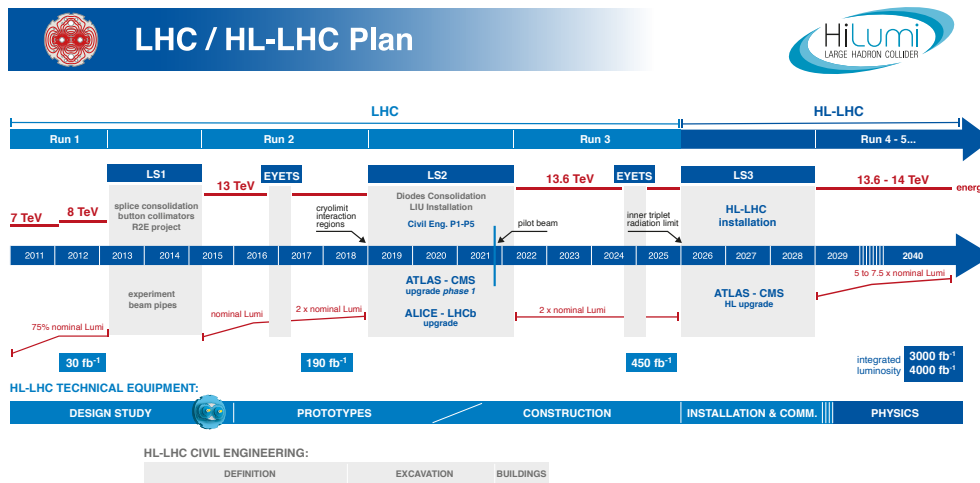


図 2.2: LHC のスケジュール [9]

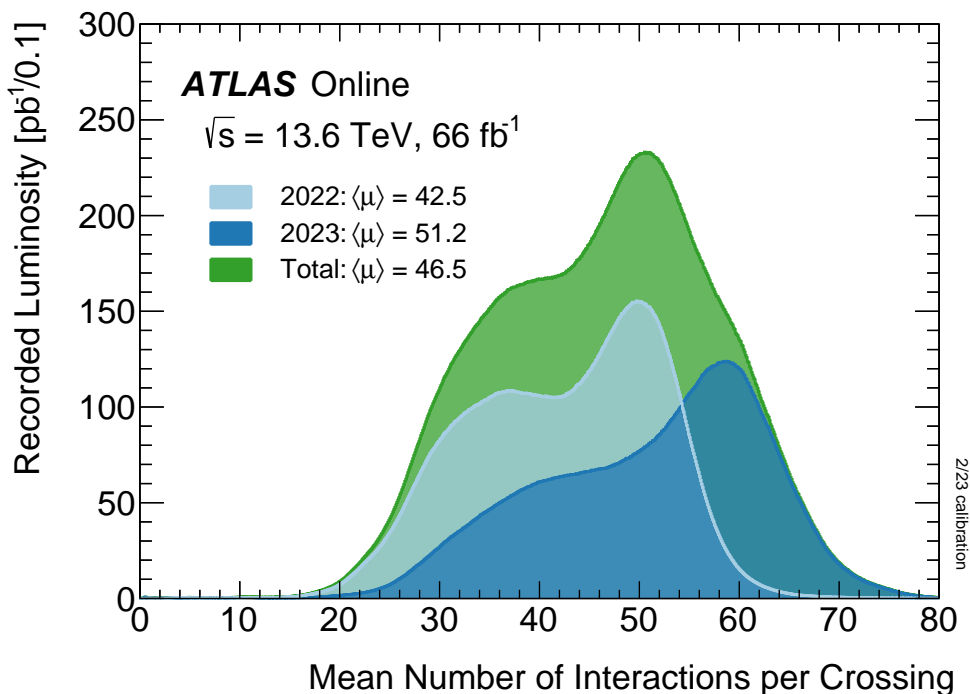


図 2.3: 2022 年と 2023 年におけるパイルアップ分布 [10] 一回の陽子陽子バンチ交差で何個の陽子衝突が発生しているかを表している。

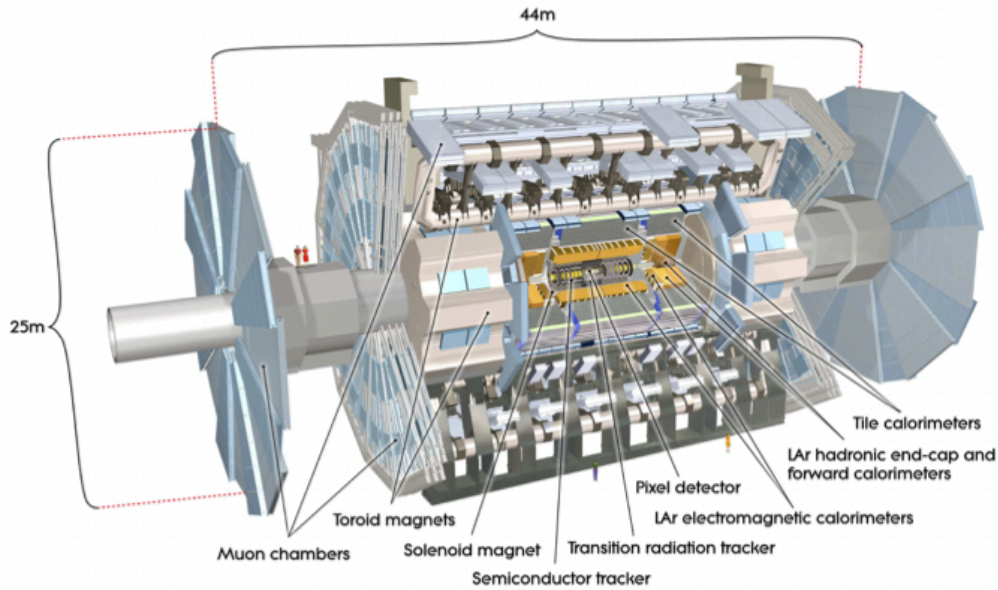


図 2.4: ATLAS 検出器の概略図 [3]

2.2 検出器

ATLAS 実験が汎用実験である性質上、さまざまな種類の検出器が使用されて事象の多面的な記録を行っている。検出器は図 2.4 のようにビーム軸を中心にして樽状に設置されており、内側から内部飛跡検出器、カロリメータ、ミューオン検出器の順で並べられている。いずれも側面（パレル部）とふた面（エンドキャップ部）に分かれている。これらの検出器はそれぞれ検出できる粒子の種類が異なるため、情報を組み合わせることで図 2.5 のように粒子の識別が可能となる。

2.2.1 座標系

ATLAS 実験における座標系は、陽子の通るビーム軸に対して垂直な平面を $x-y$ 平面にとり、加速器中心方向に x 軸、鉛直方向に y 軸、そしてビーム軸方向に z 軸をとった右手系となっている。 z が正の領域を A サイド、負の領域を C サイドと呼ぶ。方位角 ϕ は $x-y$ 平面での x 軸からの角度、極角 θ は z 軸からの角度として定義される。また、擬ラピディティ η は θ のかわりのよく使用される。 $\theta = \pi/2$ のとき $\eta = 0$ で、内部飛跡検出器を扱う場合、おおよそ $|\eta| < 1.9$ の領域に収まる。また、飛跡間の距離として ΔR が定義されており、二つの飛跡がどれくらい同じ向きを向いているかを表す。これらを (x, y, z) で表すと以下の通りである。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.1)$$

$$\theta = \arctan(z/r) \quad (2.2)$$

$$\phi = \arctan(y/x) \quad (2.3)$$

$$\eta = -\ln \tan(\theta/2) \quad (2.4)$$

$$\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2} \quad (2.5)$$

また、飛跡は $d_0, z_0, \eta, \theta, q/p$ の 5 つのパラメータで表される。飛跡は $x-y$ 平面内ではほぼ円形であり、 d_0 は衝突点と飛跡の xy 平面での距離に対応するもので、飛跡の向きと z 軸の関係から符号が付けられている [11]。 z_0

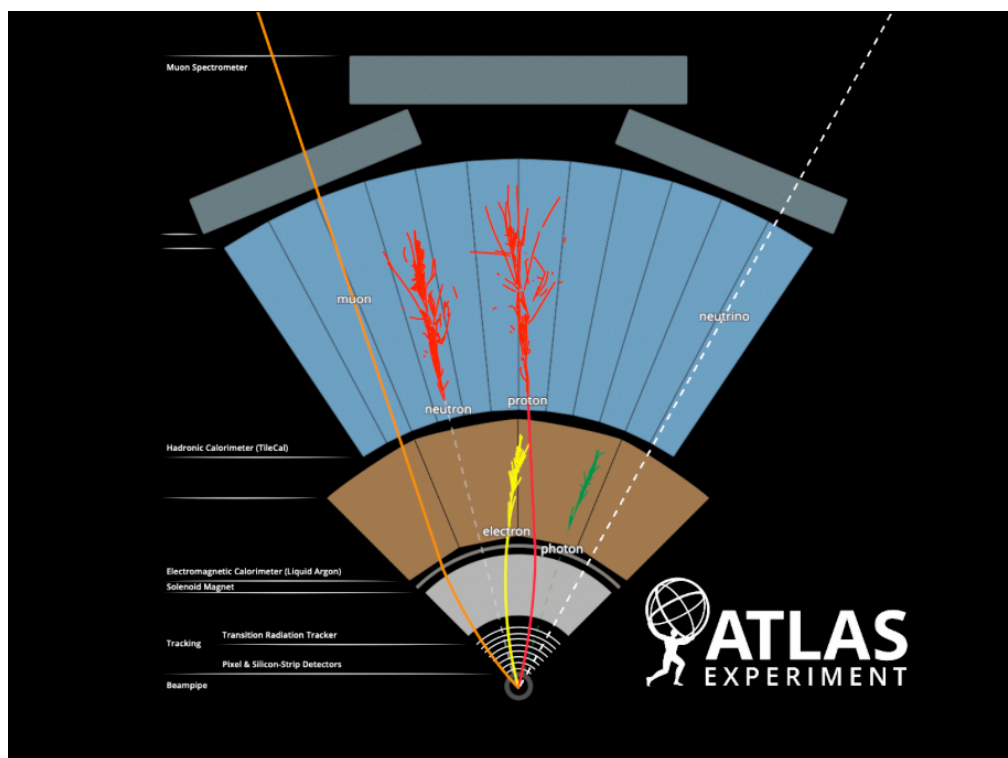


図 2.5: 粒子の各検出器での反応 [4]

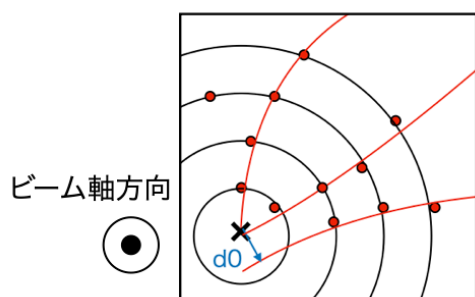
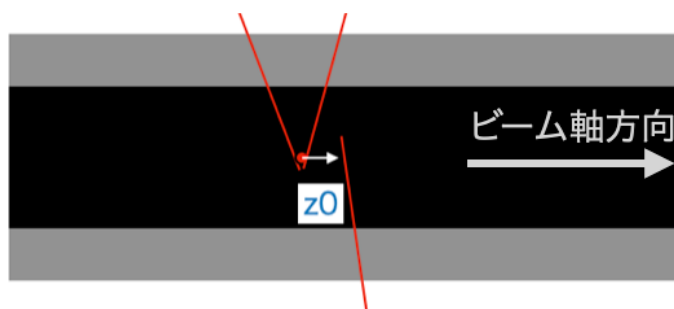
(a) $d0$ (b) $z0$ 

図 2.6: 飛跡パラメータの $d0$, $z0$ (a) 赤点はヒット、赤線は飛跡、バツ印は衝突点を表す。また衝突点は上 2 本の飛跡から計算されている。(b) 赤点は衝突点、赤線は飛跡を表す。また衝突点は左 2 本の飛跡から計算されている。

は衝突点から見た飛跡の z 軸方向の位置、 q は電荷、 p は運動量の大きさである。これらは図 2.6 ように表される。

このほか、 p_T は xy 平面での運動量またはその大きさ、 E_T^{miss} はイベント内で観測された全運動量の符号を反転したものであり、以下のように定義される。 xy 平面での運動量は衝突前 0 であるため、運動量保存から E_T^{miss} はニュートリノなどの観測されない粒子の運動量の和となる。

$$p_T = p \sin \theta \quad (2.6)$$

$$\vec{p}_T = (p_x, p_y, 0) \quad (2.7)$$

$$E_T^{\text{miss}} = - \sum_{\text{observed}} \vec{p}_T \quad (2.8)$$

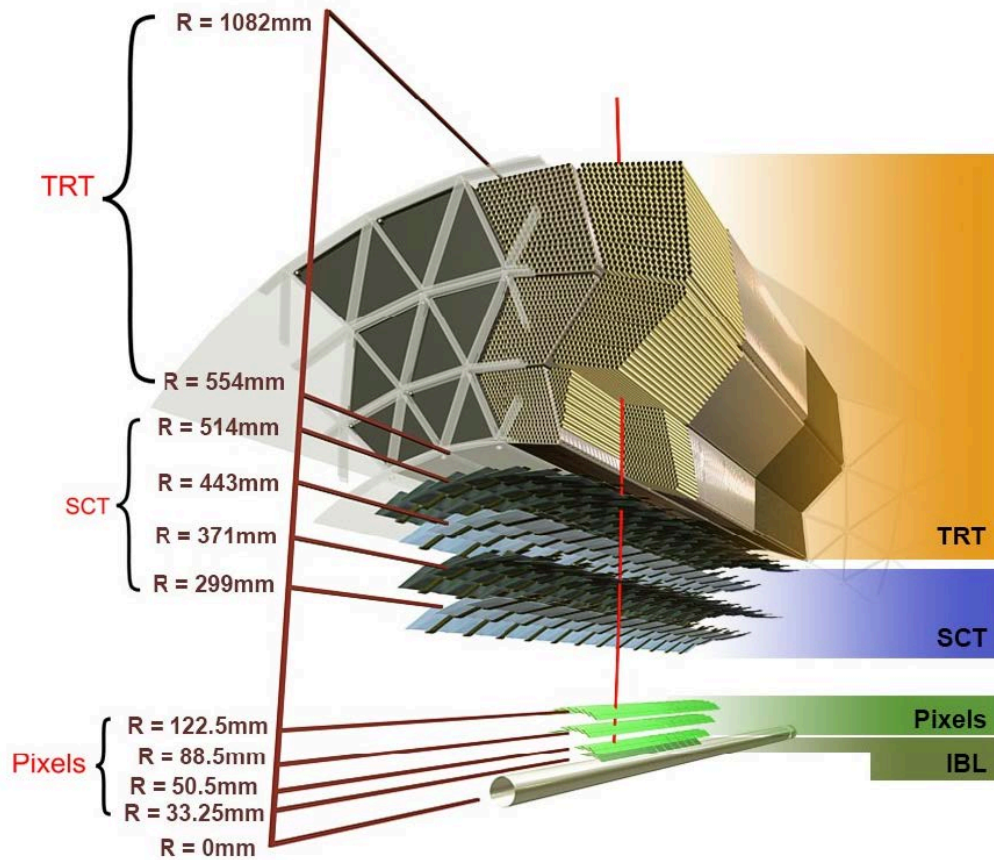


図 2.7: 内部飛跡検出器バレル部の概観 [12]

2.2.2 磁場

飛跡を曲げてその曲率から運動量を計算する目的で検出器領域には磁場がかけられている。内部飛跡検出器の領域にはソレノイド磁石によって z 軸方向におよそ 2 T の磁場がかけられており、外側のミュオン検出器の領域には ϕ 方向に最大 3.5 T の磁場がかけられている。

2.2.3 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は図 2.7 のようにピクセル検出器、SCT 検出器、TRT 検出器に分かれている。これらは全て荷電粒子の通った位置を検出する役割を果たしており、これらによって得られたヒット点をつなぎ合わせることで粒子の飛跡を再構成し、その曲率から運動量を計算するなどして利用される。

ピクセル検出器

ピクセル検出器は最も内側に位置する検出器で、バレル部 4 層とエンドキャップ部 3 層で構成されている。バレル部は図 2.8 のように半径 33.5 mm、50.5 mm、88.5 mm、122.5 mm の位置にあり、これらを四層とも通過する領域はおおよそ $|\eta| < 1.9$ となっている。また、それぞれの層に図 2.9 のように重なり合うようにモジュールが配置されており、不感領域が減らされている。各ピクセルのサイズは最内層の IBL で $50 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ 、それ以外で $50 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 程度であるが、重なる領域を加味すると位置分解能は $r - \phi$ 方向に $14 \mu\text{m}$ 、 z 方向に $115 \mu\text{m}$ と

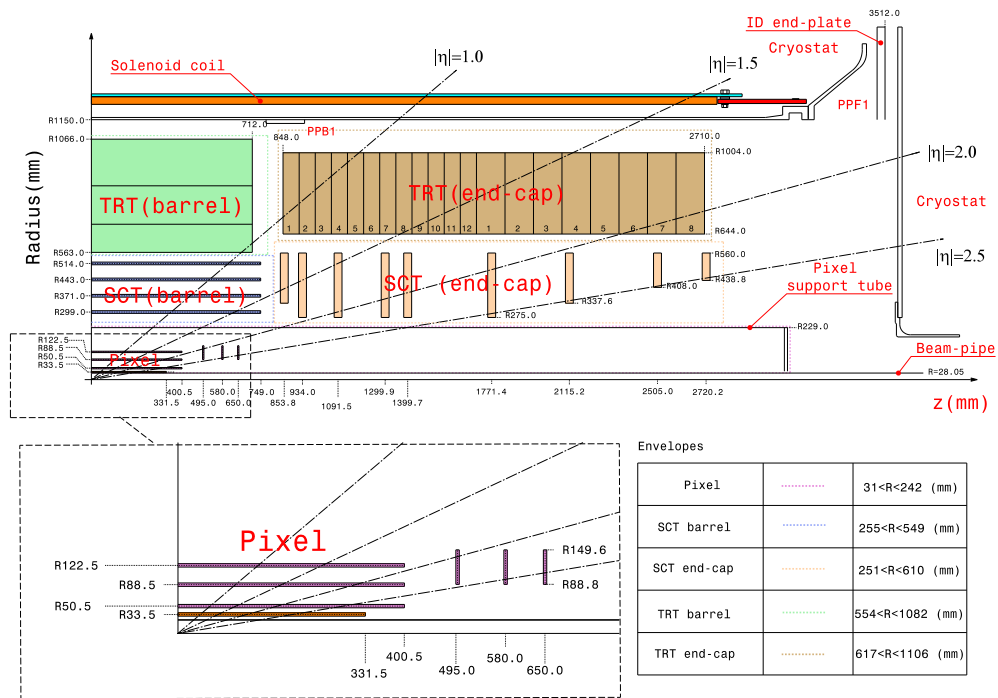


図 2.8: 内部飛跡検出器の構造 [13]

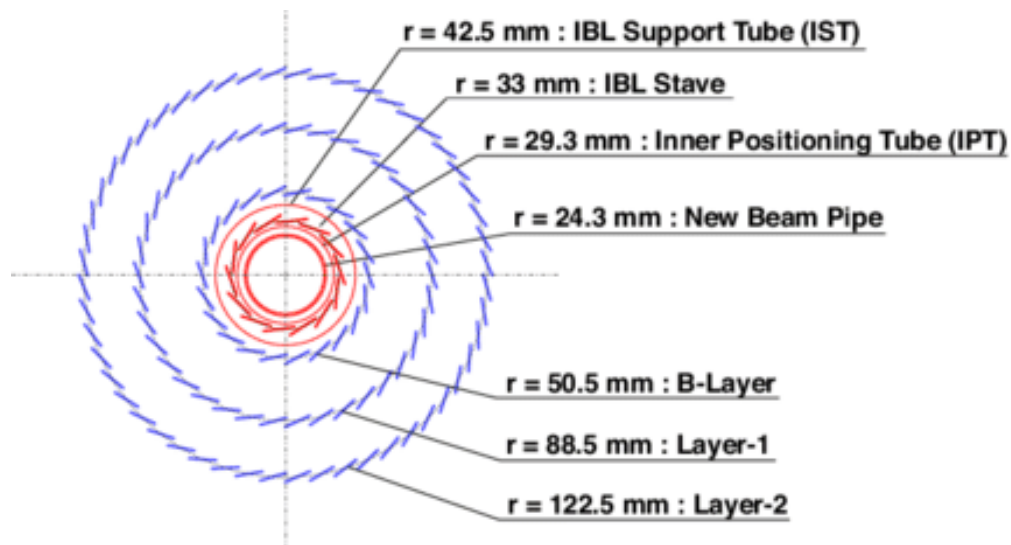


図 2.9: ピクセル検出器の構造 [5]

なっている。各ピクセルの信号はモジュールあたりに 16 程度あるフロントエンドチップ (FE) でまとめられる。

SCT 検出器

SCT 検出器はピクセル検出器の外側に存在する検出器で、こちらもバレル部は 4 層、エンドキャップ部は 9 層の構造になっている。バレル部の一番内側はビーム軸から 299 mm の位置にあり、4 層全て通過する領域はおよそ $|\eta| < 1.1$ である。各層はシリコンストリップが軸の角度をずらして 2 層並べられており、信号を検出したストリップ 2 層の交わっている領域がヒット点となる。位置分解能は $r - \phi$ 方向に $17 \mu\text{m}$ 、 z 方向に $580 \mu\text{m}$ となっている。

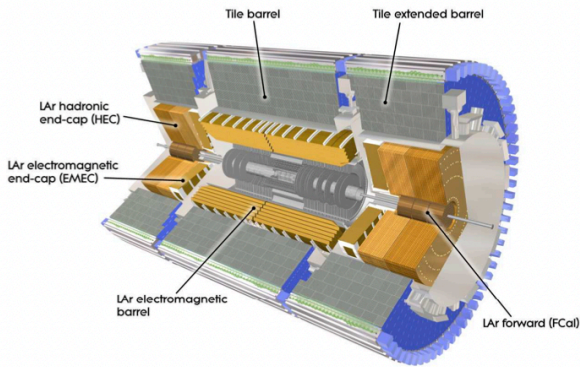


図 2.10: カロリメータの概要 [3]

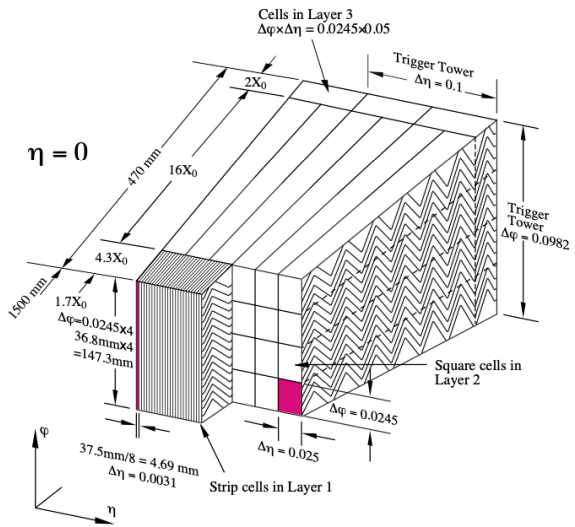


図 2.11: 電磁カロリメータの構造 [3]

TRT 検出器

TRT 検出器は SCT 検出器のさらに外側に設置されており、直径 4 mm のストローが積み重なった構造をしている。ストローの中心には高電圧のかかったワイヤーが通っており、ストロー壁との間に電場が作られる。荷電粒子がストロー内を通過するとストロー内に封入されたガスが電離し、電離電子がドリフトしてワイヤーから測定される。電離電子がドリフトした時間を見ることでヒット点のワイヤーからの距離がわかり、ドリフトサークルが描かれる。また、ストロー間にあるポリプロピレンの繊維の放射体表面を荷電粒子が通過した際の遷移放射から、粒子の質量の情報を得ることができる。

2.2.4 カロリメータ

カロリメータは粒子の持つエネルギーを測定する検出器で、電子と光子が対象の電磁カロリメータとハドロンが対象のハドロンカロリメータがある (図 2.10)。

電磁カロリメータ

電子の制動放射と光子の電子陽電子対生成による電磁シャワーの測定から粒子のエネルギーを計算する。吸収層に鉛、検出層に放射線耐性に優れエネルギーに対する線形性も良い液体アルゴン (LAr) が使用されている。全体がアコーディオンのような形状をしており、不感領域をなくしている (図 2.11)。

ハドロンカロリメータ

ハドロンカロリメータは強い相互作用によるハドロニックシャワーの測定からハドロンエネルギーを計算する。バレル部はタイルカロリメータが用いられており、吸収層の鉄と検出層のプラスチックシンチレータの構造になっている。エンドキャップ部はハドロンエンドキャップカロリメータ (HEC) と呼ばれ、吸収層に銅、検出層に液体アルゴンが用いられている。

2.2.5 ミューオン検出器

ミューオンはカロリメータで吸収されずにその外側まで到達する。ミューオン検出器は最も外側にある検出器で、飛跡検出器としての MDT と CSC、トリガー用の検出器としての TGC と RPC が存在する。

2.3 トリガーシステム

LHC ATLAS 実験 Run3 では 40 MHz で陽子バンチを交差させており、その衝突事象を全て記録すると一秒あたり 60 TB 以上の膨大な記録媒体が必要となる。しかし興味のある衝突事象はごく一部であるため、その興味のあるイベントだけ記録する。このときどの事象を記録するかを選択するのがトリガーの役割である。ATLAS 実験のトリガーは二段階構造となっており、Level-1 (L1) トリガーと HLT トリガーに分けられる。L1 トリガーはハードウェアレベルのトリガーで、大量のデータが高速に処理される。カロリメータとミューオン検出器の情報が使われており、L1 トリガーによって事象は 100 kHz 程度に落とされる。HLT トリガーは L1 トリガーを通過した事象をさらに選別するトリガーで、ソフトウェアレベルのトリガーである。こちらは単位時間あたりに処理する事象が少なくなったため、飛跡の再構成などのより複雑で時間がかかる処理を行うことができる。HLT トリガーによって事象はさらに 1.7 kHz 程度にまで落とされ、記録される。

トリガーは L1、HLT とともに多くの種類が存在する。これらのトリガーはチェーンと呼ばれるもので管理されている。チェーンは使用されるトリガーの列であり、例えば、'HLT_xe80_tcpuft_distrk20_medium_L1XE50' というチェーンの場合、L1 の $E_T^{\text{miss}} 50 \text{ GeV}$ トリガー、HLT の $E_T^{\text{miss}} 80 \text{ GeV}$ トリガー、消失飛跡トリガーの順でトリガーを通され、全て通過したものが記録される。このようなチェーンが一つの HLT トリガーあたりに一本以上設定されている。

2.4 超対称性粒子の探索

超対称性粒子探索は様々な手法で様々なモデルに対して行われている。強い相互作用で生じるグルイーノやスクォークの探索ではニュートラリーノによる E_T^{miss} とクォークによるジェットなどの特徴から、また、電弱相互作用で生成されるチャージーノなどの探索では、 E_T^{miss} とレプトンの飛跡などの特徴からイベントを絞り込んでいる。しかし、チャージーノ探索において、チャージーノとニュートラリーノの質量が縮退している領域では、運動量の低いパイオンしか生成されず、これは磁場に大きく曲げられるため、飛跡の再構成が困難で識別が難しい。そこでこの領域に特化した解析手法が、消失飛跡探索である。

2.5 消失飛跡の探索

チャージーノとニュートラリーノの質量が縮退している領域では、チャージーノが比較的長寿命となる。AMSB 模型などから示唆されるように純粋ウィーノが LSP だった場合、チャージーノの寿命は $\tau \sim 0.2 \text{ ns}$ となり、光速をかけると $c\tau \sim 6 \text{ cm}$ となる。純粋ヒグシーノが LSP だった場合、 $\tau \sim 0.03 \text{ ns}$ 、 $c\tau \sim 0.9 \text{ cm}$ となる。チャージーノは光速に近い速度で移動するため、崩壊するまでに飛ぶ距離はローレンツブーストによりさらに長くなる。つまり、チャージーノはピクセル検出器に複数ヒットを残してから崩壊することが期待される。図 2.12 にはチャージーノがピクセル検出器に 4 層ヒットを残したときのシミュレーション図を示している。

チャージーノは 95% 以上の確率 [14] でニュートラリーノとパイオンに崩壊する。生成されるパイオンは低運動量となり磁場により大きく曲げられ、チャージーノの飛跡の延長線上にはヒットをほとんど残さない。またニュー

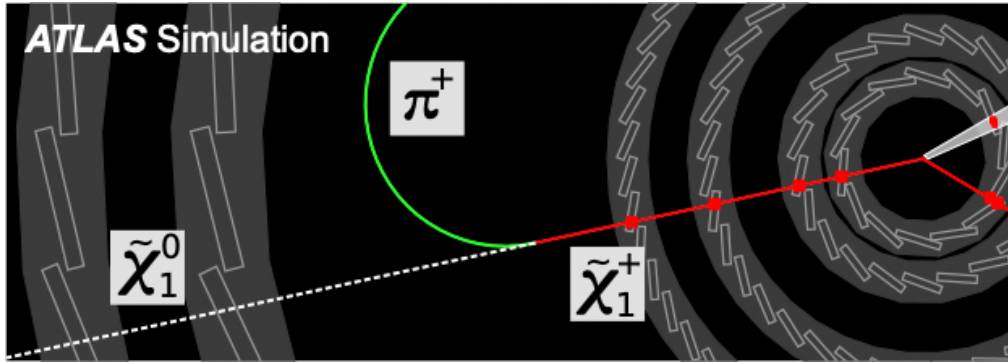
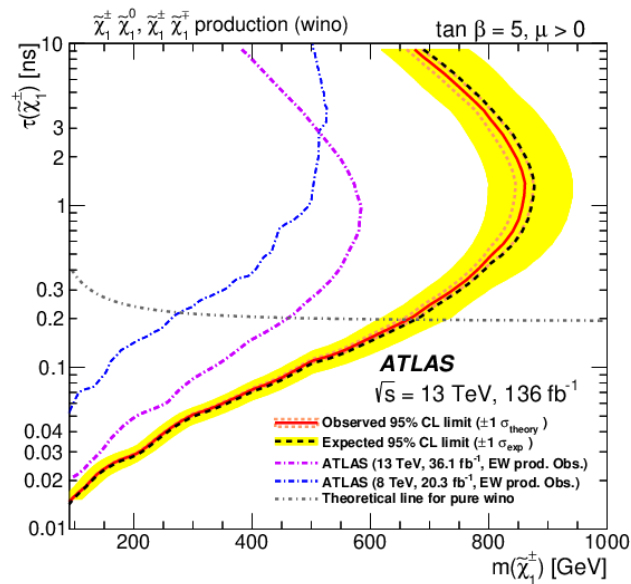


図 2.12: 消失飛跡の模式図 [6]

(a) ウィーノの棄却領域



(b) ヒグシーノの棄却領域

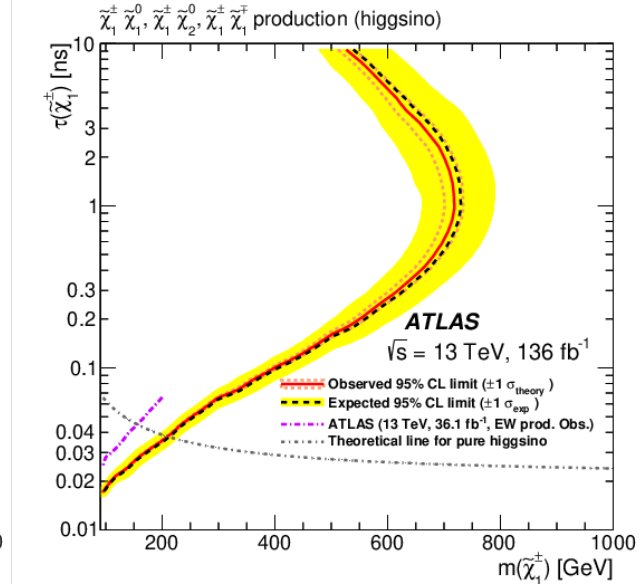


図 2.13: ATLAS 実験 Run2 における消失飛跡解析結果 [15]

トラリーノは検出器に観測されない。よってチャージノの飛跡は途中で消えたように見える。これが消失飛跡である (図 2.12)。消失飛跡探索では、 $E_{\text{T}}^{\text{miss}}$ などに加え、この消失飛跡からチャージノを探している。2015 年から 2018 年の Run2 では、純粋ウィーノが LSP だった場合には図 2.13(a) のように 660 GeV より小さい質量領域は棄却されており、純粋ヒグシーノが LSP だった場合には図 2.13(b) のように 210 GeV より小さい質量領域が棄却されている。

本論文が扱う消失飛跡トリガーは、消失飛跡探索で解析対象となる事象数を増やすことを目的としている。

第 3 章

消失飛跡トリガー

3.1 概要

現在までの消失飛跡の探索は E_T^{miss} トリガーが使用されている。しかし 2022 年から始まった ATLAS 実験 Run3 において、検出器やトリガーにおけるアップデートが行われ、高速な処理が求められるトリガーの段階でも、全領域における飛跡の再構成が可能となった。これにより、消失飛跡探索に特化した消失飛跡トリガーが Run3 より新たに導入された。このトリガーはピクセル検出器と SCT 検出器の間、ビーム軸からの距離を r とすると $13\text{ cm} < r < 30\text{ cm}$ で崩壊するチャージノを探索対象としている。この領域で崩壊するチャージノは通常の飛跡としては再構成されず、その p_T は E_T^{miss} に含まれる。そのため、基本的に $L1E_T^{miss}50\text{GeV}$ トリガー \rightarrow $HLTE_T^{miss}80\text{GeV}$ トリガー \rightarrow 消失飛跡トリガーというトリガーチェーンで処理される。このトリガーの割り当てられたレートは 10 Hz である。

この章では消失飛跡トリガーの構造を説明する。このトリガーの工程は大きく二段階に分けられ、一段階目が短い飛跡の再構成、二段階目が再構成された短い飛跡の選別である。

3.2 短い飛跡の再構成

消失飛跡トリガーの一段階目が短い飛跡の再構成である。図 3.1 に再構成の概略図を記した。消失飛跡トリガーではまず、ピクセル検出器と SCT 検出器から荷電粒子の通った空間点（ヒット）が集められる。次に、内側のピクセル検出器のヒット三つを結んだトリプレットが作られる。さらにそのトリプレットに他のヒットを加えて延長していくことで飛跡が作られる。延長に成功した飛跡は `tracks` として集められ、延長した先にヒットがないなどの理由で飛跡の作成に失敗したものが `tracksFail` として集められる。これらのうち、 p_T や飛跡の質などでカットをかけ、残ったものが `qualityDisCombTrks` および `qualityDisFailTrks` となる。次に同じヒットを共有している飛跡があれば品質の最も良いもののみ残し、フィッティングをし、さらに `qualityDisCombTrks` には d_0 と z_0 のカットがかけられ `fittedDisCombTracks`、`fittedDisFailTrks` となる。これらに対して、 z 軸への外挿を行い、衝突点候補のうち最もそれらしい点を飛跡に取り入れて `ptrk` とする。これに d_0 、 z_0 、ピクセル検出器の層数、ピクセル検出器での χ^2 をピクセル検出器のヒット数で割ったものでカットをかける。次に SCT 検出器のヒットを消去して飛跡をフィッティングし直し、さらに z 軸へ外挿し衝突点候補のうち最もそれらしい点を飛跡に取り入れて `refit_trk` とする。これに再び p_T 、 d_0 、 z_0 のカットをかけ、さらに飛跡数の多いピクセル検出器の層数が 3 で SCT 検出器の層数が 1 以上のものにはより高い p_T のカットをかける。また、それぞれのセレクションは以下の表 3.1 の通りである。ここまで残った短い飛跡は `distrkCand` として保存される。`distrkCand` の変数として保存されるもののうち、このあとの BDT で使用される変数とその内容は表 3.2 に示した。

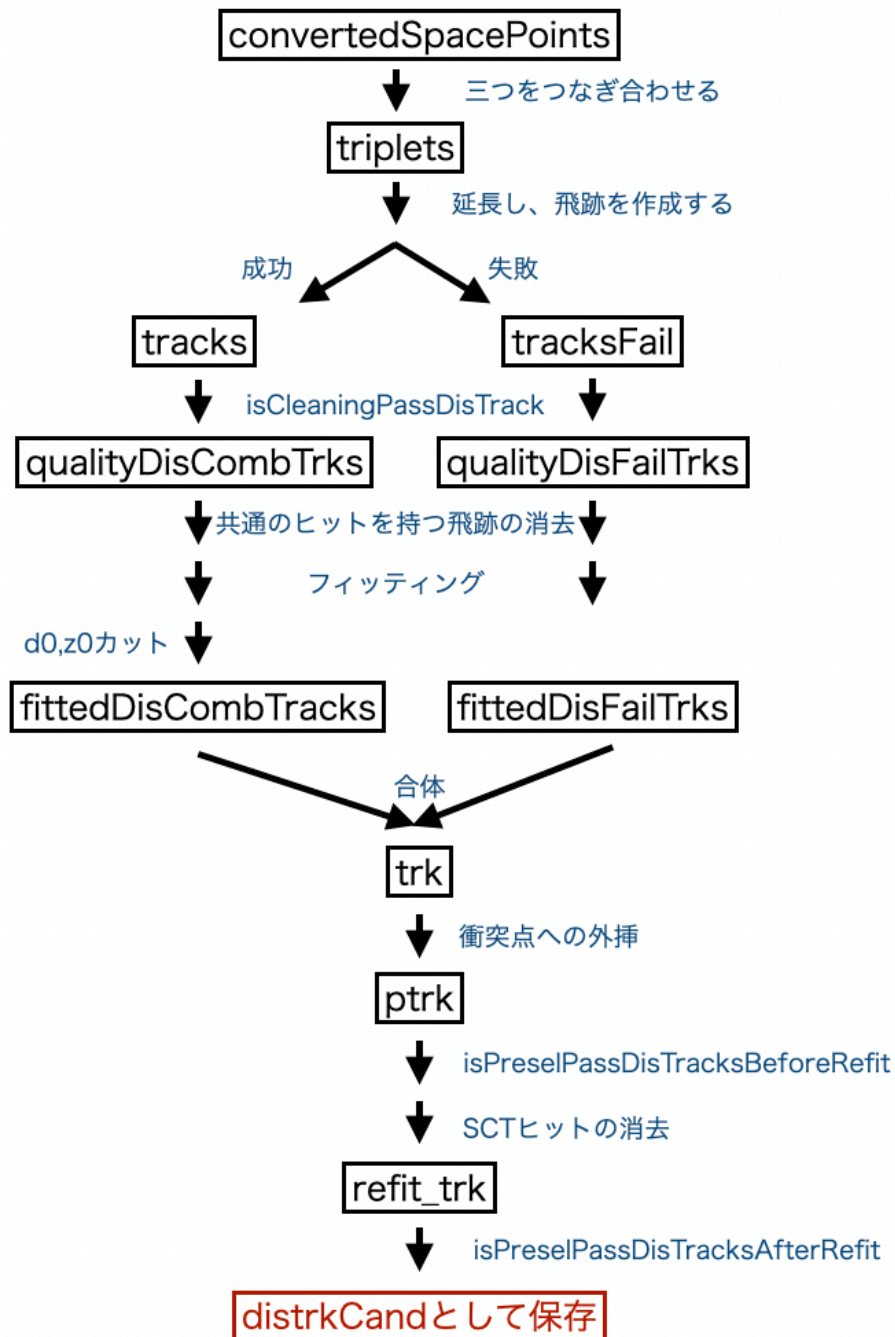


図 3.1: 短い飛跡再構成

セレクションの名前	対象	カット
isCleaningPassDisTrack	ALL	$p_T < 3 \text{ GeV}$
	tracksFail	$\text{chi2ndof} < 20$
	tracks	ピクセル最内層 (IBL) と 2 番目の層 (BL) でのヒット数 > 1 ピクセル検出器バレル部でのヒット数 > 3 $\text{chi2ndof_pix} < 3$ SCT 検出器での $\chi^2 > 3$ のヒット数 ≤ 2 SCT 検出器での $\chi^2 > 3$ のヒット数 > 2 となる層数 = 0
isPreselPassDisTrackBeforeRefit	ALL	$d_0 < 5 \text{ cm}$ $z_0 < 10 \text{ cm}$ ピクセル検出器バレル部の $\chi^2 > 3$ のヒットがある層数 > 3 $\text{chi2ndof_pix} < 5$
isPreselPassDisTrackAfterRefit	ALL	$p_T > 5 \text{ GeV}$
		$d_0 < 5 \text{ cm}$
		$z_0 < 50 \text{ cm}$
	pix3lsct1p	$p_T > 10 \text{ GeV}$

表 3.1: 飛跡再構成でのセレクションの内容

3.3 短い飛跡の選別

消失飛跡トリガーの二段階目が BDT を用いた短い飛跡の選別である。短い飛跡 (distrkCand) に対して、まず $p_T > 7.5 \text{ GeV}$ or $\text{refit_}p_T > 7.5 \text{ GeV}$ のカットがかけられる。その後短い飛跡はカテゴリ分けられ、それぞれ別の Boosted Decision Tree (BDT) によって選別される。イベント内に BDT を通過した飛跡が一本でもあればそのイベントはトリガーを通過することになる。

ここで短い飛跡は、ピクセル検出器のヒットが三層 or 四層、SCT 検出器のヒット数が 0 or 1 で表 3.3 にある 4 つのカテゴリに分類される。これは、信号事象は四層飛跡となるものが多く背景事象は三層飛跡となるものが多いことを考慮して保存するイベント数を調整するためである。BDT はカテゴリごとに別のものが用いられており、それぞれ異なる 12 個程度の変数 (表 3.4) と、異なるワーキングポイント (WP) (表 3.5) が設定されている。短い飛跡の BDT スコアがこの WP より大きいときその飛跡は BDT を通過する。また、WP は通過するイベント数を調整する目的で四種類 (VeryLoose, Loose, Medium, Tight) 存在し、基本は Medium が用いられている。

3.3.1 BDT

BDT は決定木を組み合わせた分類手法で、本トリガーでは Adaboost を用いた boosting が行われている。深さ 3 の決定木を 850 作り、それらを重み付けして組み合わせることで BDT スコアを計算している。この BDT スコアが定められたしきい値を超えていれば BDT を通過し信号と判断される。決定木の一つを図 3.2 に示す。作成された BDT は決定木の数が多いためその性質を内部構造から直接読み取るのは困難である。そのため、BDT の性質を見る際は、BDT に入力される飛跡の変数分布と BDT を通過した飛跡の変数分布を見る。

BDT variables	説明
p_T	運動量の xy 成分の大きさ
$ z_0 $	衝突点と飛跡の z 軸方向の距離
$ d_0 $	衝突点と飛跡の xy 平面での距離. 飛跡の曲がる向きに応じて正負が定められている.
χ^2/ndof	飛跡の χ^2 を飛跡の自由度 (ヒット数-飛跡のパラメータ数 (=5)) で割ったもの. この値が小さい方が飛跡の質は良い.
$\chi^2/\text{ndof pix}$	ピクセル検出器での χ^2 をピクセル検出器のヒット数で割ったもの.
p_T (refit w/o SCT)	ピクセル検出器のみで飛跡を再計算したときの p_T .
$ z_0 $ (refit w/o SCT)	ピクセル検出器のみで飛跡を再計算したときの $ z_0 $
$ d_0 $ (refit w/o SCT)	ピクセル検出器のみで飛跡を再計算したときの $ d_0 $
χ^2/ndof (refit w/o SCT)	ピクセル検出器のみで飛跡を再計算したときの χ^2/ndof
(refit p_T)/ p_T	ピクセル検出器のヒットはチャージーノのもの、SCT 検出器のヒットが無関係の飛跡からのヒットだった場合、SCT 検出器のヒットを取り除いたことにより refit p_T はチャージーノの飛跡の p_T に近づき大きくなる.
(refit χ^2/ndof)/(χ^2/ndof)	上と同様の場合に、refit χ^2/ndof は refit χ^2/ndof と比べ小さくなる.
number of pixel hits	ピクセル検出器のヒット数. それぞれの層で検出器が重なっている部分があるため、4 より多い場合もある.
number of SCT hits	SCT 検出器のヒット数.
number of innermost layer hits	ピクセル検出器最内層 (IBL) のヒット数.
isolation($\Delta R < 0.1$)	$dr < 0.1$ の範囲内にある他の飛跡の p_T の和. その領域に他の飛跡があるかの 0-1 でプロットすることもある.
isolation($0.1 < \Delta R < 0.2$)	$0.1 < dr < 0.2$ の範囲内にある他の飛跡の p_T の和.
Fail or Success	トリプレットから飛跡の延長に成功したか失敗したか.

表 3.2: BDT 入力変数の内容 短い飛跡として再構成された飛跡はこれらの変数が計算され、後の BDT のために保存される.

	pix4lsct0	pix4lsct1p	pix3lsct0	pix3lsct1p
ピクセル検出器のヒットがあった層の数	4	4	3	3
SCT 検出器のヒットがあった層の数	0	1 以上	0	1 以上

表 3.3: カテゴリ分類方法

3.3.2 データサンプル

BDT の学習には、信号事象として以下の条件を満たしたチャージーノのモンテカルロサンプル、背景事象としては Run2 の実データが用いられた.

信号事象

- チャージーノ対生成事象のモンテカルロ (図 3.3)
- 寿命: 1 ns

ピクセル検出器と SCT 検出器の間で崩壊する粒子の数を増やすため理論値の 0.2 ns ではなく 1 ns に設定さ

BDT variables	pix4lsct0	pix4lsct1p	pix3lsct0	pix3lsct1p
p_T	○	○	○	○
$ z_0 $	○		○	○
$ d_0 $	○		○	○
χ^2/ndof	○		○	○
$\chi^2/\text{ndof pix}$	○	○	○	
p_T (refit w/o SCT)	○	○	○	○
z_0 (refit w/o SCT)		○	○	○
d_0 (refit w/o SCT)		○	○	○
χ^2/ndof (refit w/o SCT)				○
(refit p_T)/ p_T	○	○		○
(refit χ^2/ndof)/(χ^2/ndof)	○	○		
number of pixel hits	○	○	○	○
number of SCT hits		○		○
number of barrel hits	○		○	○
isolation($\Delta R < 0.1$)	○	○	○	○
isolation($0.1 < \Delta R < 0.2$)	○	○	○	○
Fail or Success		○		○
# BDT variables	12	12	12	15

表 3.4: カテゴリ別の BDT に使用された変数 短い飛跡の選別では四カテゴリでそれぞれ別の BDT が用いられる.

BDT WP レベル	pix4lsct0	pix4lsct1p	pix3lsct0	pix3lsct1p
VeryLoose	-0.100	-0.180	0.010	0.040
Loose	-0.100	-0.800	0.010	0.110
Medium	-0.100	-0.080	0.040	0.145
Tight	-0.100	0.040	0.040	0.155

表 3.5: BDT の WP カテゴリごとに別の BDT が作成され、カテゴリごとに四種類の WP が設定されている.

れている.

- 質量: 91, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 GeV を各 30000 イベント
- 崩壊位置: ピクセル検出器と SCT 検出器の間 ($130 \text{ mm} < r < 300 \text{ mm}$)

背景事象

- 2018 年 Run2 の実データ
- $p_T > 20 \text{ GeV}$
- $E_T^{miss} > 50 \text{ GeV}$

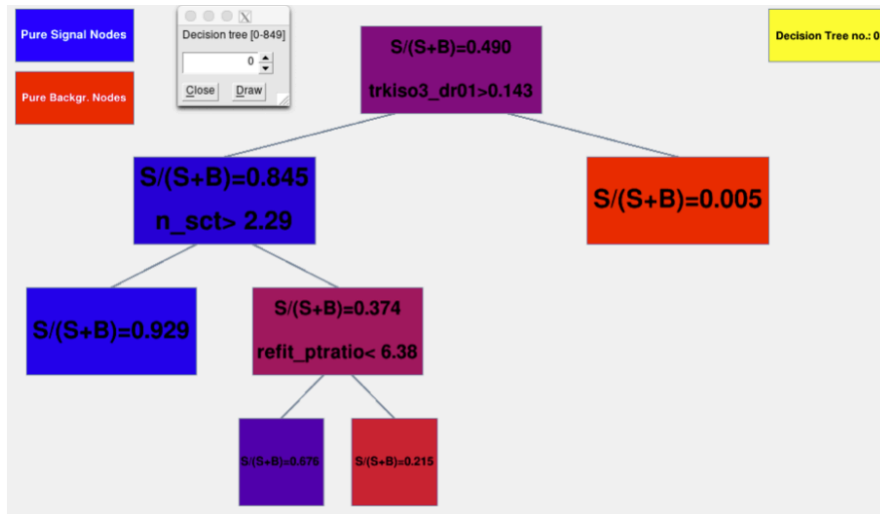


図 3.2: BDT を構成する決定木の一例. 上のカットから場合分けをしていき、一番下で信号または背景に分類する. このような決定木 850 個を積み付けして足し合わせることで最終的な BDT スコアが計算される.

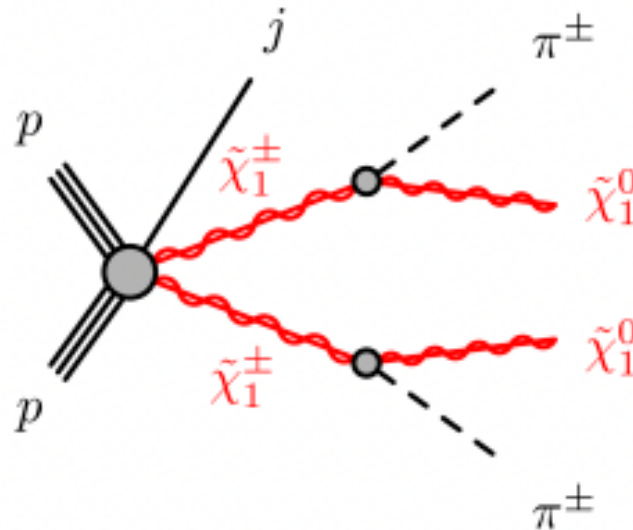
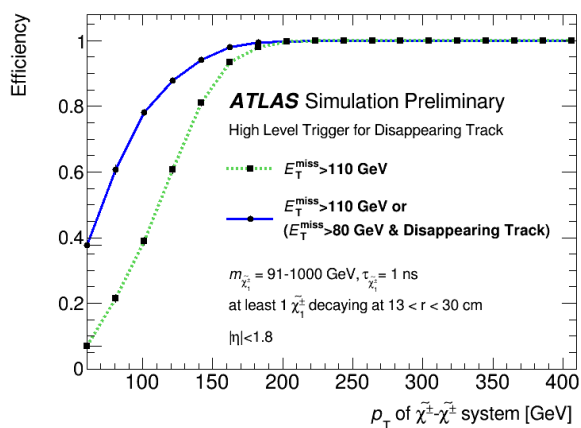


図 3.3: チャージノー対生成事象

3.4 実装時の性能評価

推定トリガーレートは 9.2 ± 1.2 Hz で、消失飛跡トリガーの信号効率と `pix4lsct1p` カテゴリにおける信号事象と背景事象に対する BDT スコア 3.4 のようになっていた. 図 3.4(a) の横軸は、 E_T^{miss} の近似値となっていて、これまでの消失飛跡解析で使用されてきた E_T^{miss} 110 GeV トリガーと併用することで、 E_T^{miss} が小さい領域での信号効率が高くなることがわかる.

(a) 消失飛跡トリガーの信号効率



(b) pix4lsct1p カテゴリにおける信号事象と背景事象に対する BDT スコア

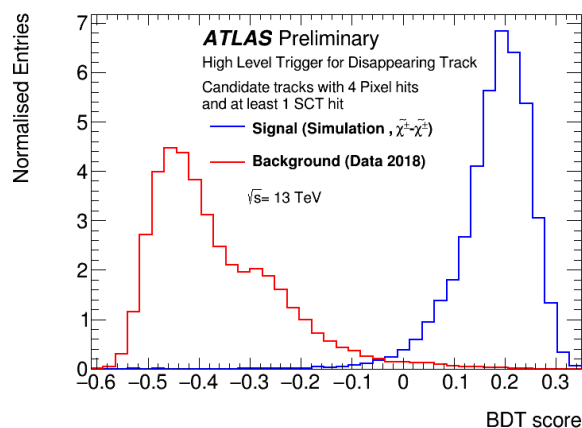


図 3.4: 消失飛跡トリガーの信号効率と pix4lsct1p カテゴリにおける信号事象と背景事象に対する BDT スコア [16]

第 4 章

消失飛跡トリガーの背景評価

4.1 概要

消失飛跡トリガーは ATLAS 実験 Run3 より新たに導入されたトリガーである。導入時は Run2 の実験データを用いて背景事象性能評価が行われた。ここでは 2022 年より始まった Run3 においてトリガーが想定通り動いているかの確認として、Run3 の実験データを使用した背景事象評価を行った。

ピクセル検出器に四層のヒットを残す飛跡について、標準模型で計算される量からの超過は 2023 年現在確認されていない [15]。そのため、実験で集められたデータはそのほとんどがチャージノを含んでおらず、チャージノが含まれていたとしても割合は極めて少ない。これを本トリガーの背景事象として用いて評価を行う。今回は 2022 年 11 月に作成されたデータを使用した。

また、比較としてモンテカルロシミュレーションデータ (MC) を使用した背景事象評価も行った。モデルはトップクォーク対生成事象を用いた。トップクォーク対生成事象は、その過程でニュートリノが生成されるため E_T^{miss} トリガーを通過しやすく、その変数分布はデータとよく似ていることが経験的に知られている。

4.1.1 使用したサンプル

データ

- RunNumber: 431493
- 重心系エネルギー：13.6 TeV
- イベント数：8063385
- データ取得日：2022/8/20

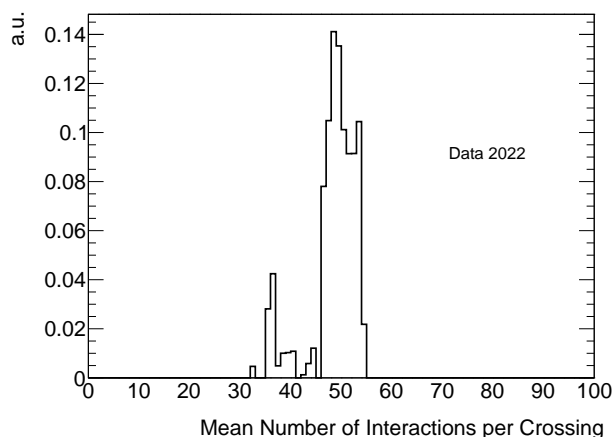
MC

- RunNumber: 601229
- トップクォーク対生成事象、全てハドロニックに崩壊
- イベント数：100000
- 作成日：2022/10/8

4.2 手法

消失飛跡トリガー内で再構成された飛跡について、以下のカットをかけた上で BDT 入力変数と BDT スコアの分布を描画した。また MC については、実データとパイルアップ分布が同じになるよう、全てのイベントに対して

(a) Data の Mean Number of Interactions per Crossing 分布



(b) MC の Mean Number of Interactions per Crossing 分布

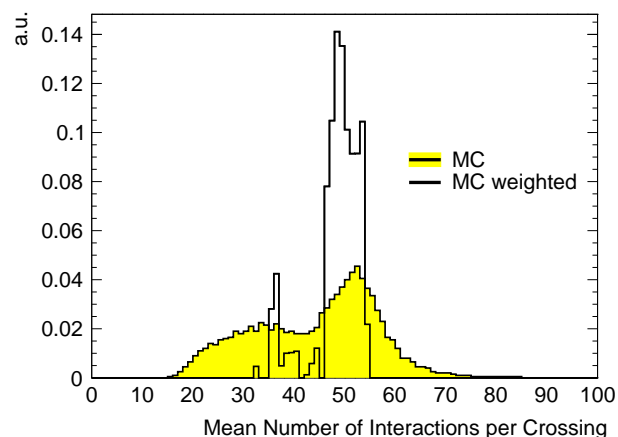


図 4.1: 背景効率評価に使用したデータと MC の Mean Number of Interactions per Crossing 分布. MC は実データと分布が同じになるよう重み付けがされている.

重み付けを行った (図 4.1).

4.2.1 カット

- HLT E_T^{miss} 80 GeV トリガーを通過
- $0.1 < |\eta| < 1.9$

ピクセル検出器が四層分設置されている η 領域に限定した. これは解析 [15] でのカットと同じ値を使用している.

4.3 結果

消失飛跡トリガーのレートは図 4.2 のように 10 Hz を下回っており、割り当てを超えない範囲で動作していた. 陽子衝突によってバンチ内の陽子数が時間とともに減っていくのに伴いルミノシティも小さくなっていくため、レートが減っている.

背景事象のデータと MC におけるカテゴリ分布は図 4.3 のようになった. データと MC は統計誤差の範囲内で一致はしないものの、どのカテゴリも誤差は 20% 以内に収まった.

再構成された短い飛跡に対する各カテゴリの BDT 入力変数のうち、 $d0$ 分布を図 4.4 に描画した. このうち、 pix4l の二つのカテゴリは 0 を中心にピークを持ち、衝突点で生じた実際の飛跡を再構成していると考えられる、一方、 pix3lsct0 カテゴリはピークを持たず平坦な分布になっており、衝突点から生じるとは限らない、異なる飛跡の点をつなぎ合わせたフェイク飛跡が多いと考えられる. pix3lsct1p カテゴリはピークの部分と平坦な部分が合わさった分布になっており、実際の飛跡とフェイク飛跡のどちらも含まれると考えられる. その他の各カテゴリの BDT 入力変数は付録の図 A.1 から図 A.4 に記載した.

また、各カテゴリの BDT スコアの分布は図 4.5 のようになっており、 pix4lsct1p 以外の 3 カテゴリでは 50% 以上の点でデータと MC の差が 2σ 以内に収まっており、データと MC で分布の概形が似ていることがわかった. カテゴリごとの背景事象の飛跡が BDT を通過した割合を表 4.1 に記した. データの方が pix3l カテゴリを通しやす

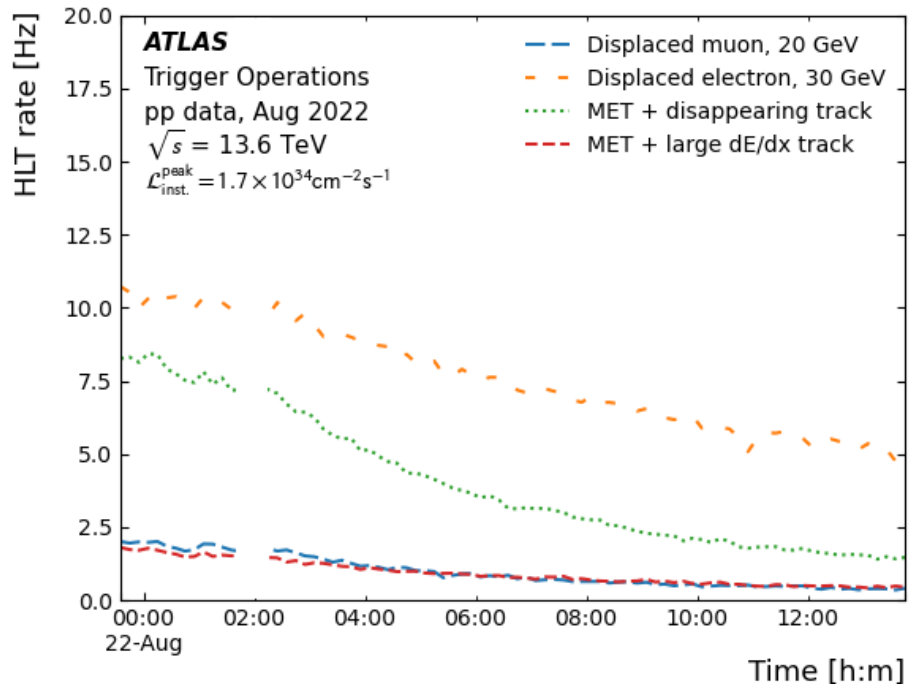


図 4.2: 2022Run3 における消失飛跡トリガーのレート (緑色) [17]

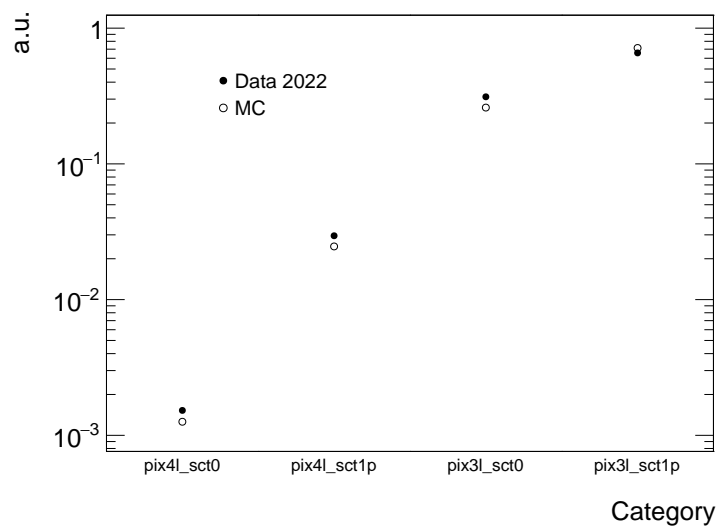
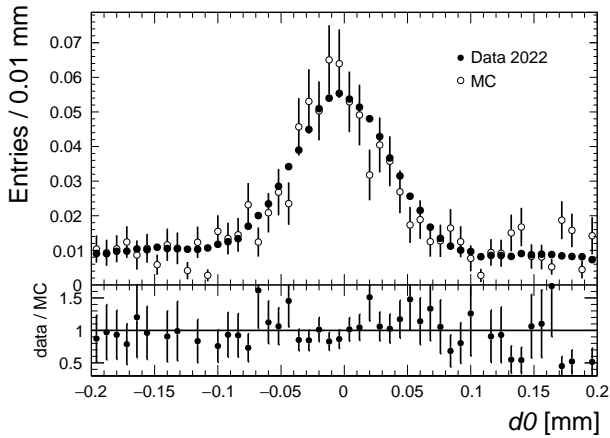
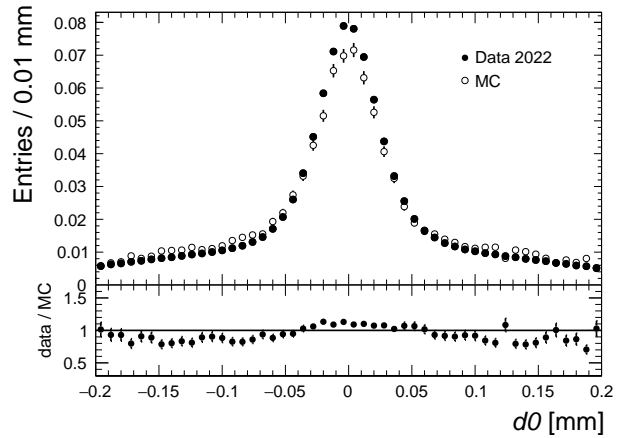
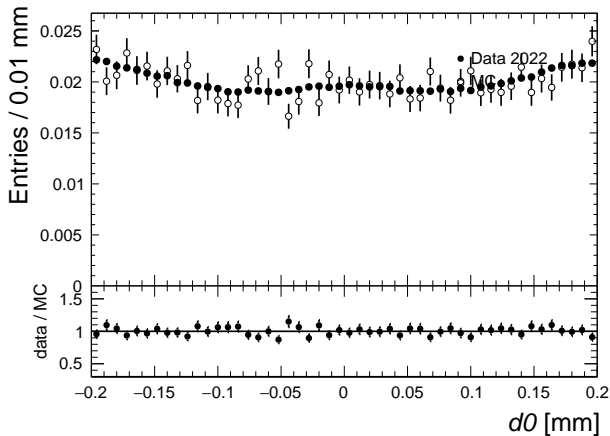
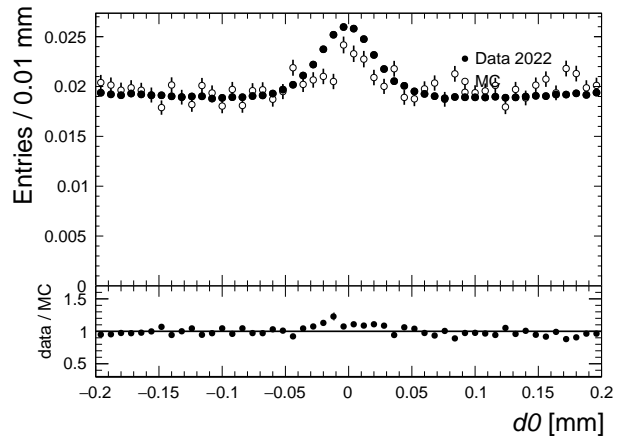


図 4.3: 背景事象のカテゴリ分布 各カテゴリの和が 1 になるように正規化されている。エラーバーは丸点より小さい

(a) pix4lsct0 カテゴリの d_0 分布(b) pix4lsct1p カテゴリの d_0 分布(c) pix3lsct0 カテゴリの d_0 分布(d) pix3lsct1p カテゴリの d_0 分布図 4.4: 背景事象の d_0 分布図 黒点は実データ、白点は MC を描画している。

く、MC の方が pix4l カテゴリを通しやすかった。これらからトップクォーク対生成事象は実データと誤差の範囲で一致はしないものの、背景事象をある程度再現できていることがわかった。

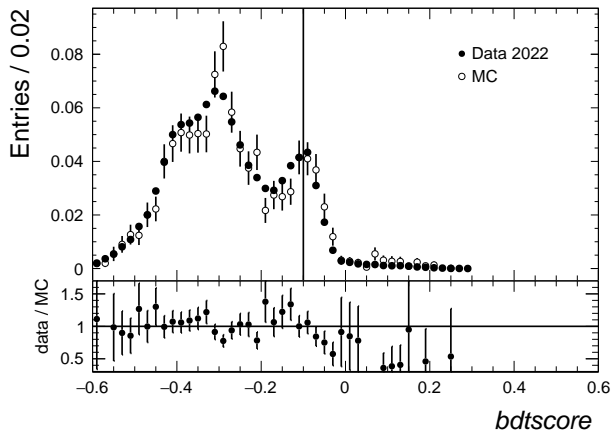
4.4 議論

トリガーレートは割り当てられた 10 Hz を超えない範囲で動作していた。

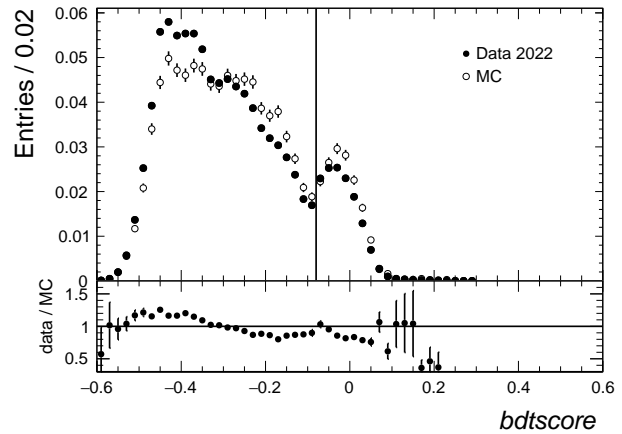
データと MC のカテゴリ分布および BDT スコア分布は近い分布をしており、トップクォーク対生成事象の MC は背景事象をある程度再現できており、Run2 までの経験則が確認できた。これらより、ALTAS 実験 Run3 において、消失飛跡トリガーは大きな問題なく動作していることがわかった。

本トリガーが対象としているチャージノは、 E_T^{miss} トリガーを使用しているためにおおよそ $pt > 50$ GeV の高運動量領域にあり、背景事象としてはフェイク飛跡が支配的である [15]。フェイク飛跡は実際の飛跡ではなくランダムな点の繋ぎ合わせであるため、検出器のアラインメントなどの影響によるデータと MC のずれを受けづらく、データと MC で似た分布が得られたと考えられる。

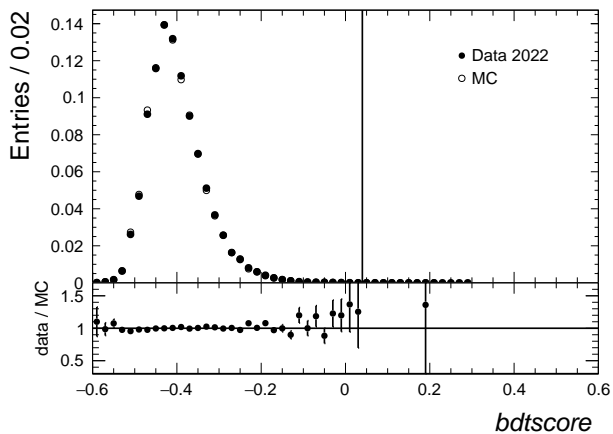
(a) pix4lsct0 カテゴリの BDT スコア分布



(b) pix4lsct1p カテゴリの BDT スコア分布



(c) pix3lsct0 カテゴリの BDT スコア分布



(d) pix3lsct1p カテゴリの BDT スコア分布

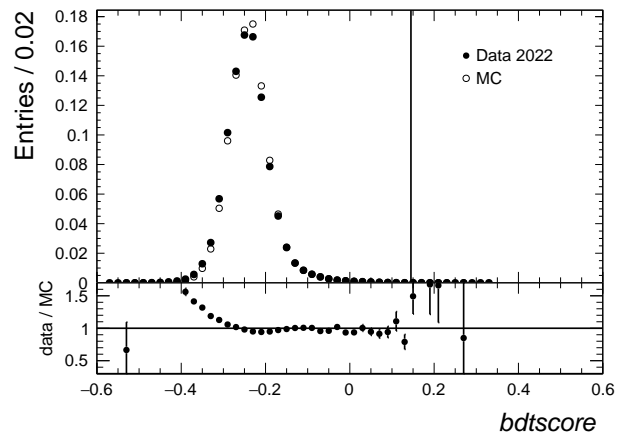


図 4.5: 背景事象の BDT スコア分布図 黒点は実データ、白点は MC を描画している。縦線は各カテゴリでのスレッシュホルドであり、これより大きい BDT スコアを持った飛跡が BDT を通過したとみなされる。

カテゴリ	背景事象の飛跡が BDT を通過した割合		$\frac{Data}{MC}$
	データ	MC	
pix4lsct0	0.113(2)	0.14(1)	0.80
pix4lsct1p	0.1405(4)	0.161(3)	0.87
pix3lsct0	$1.92(5) \times 10^{-4}$	$8(3) \times 10^{-5}$	2.4
pix3lsct1p	$2.54(4) \times 10^{-4}$	$1.2(2) \times 10^{-4}$	2.1

表 4.1: 背景事象の飛跡が BDT を通過した割合

第 5 章

消失飛跡トリガーの信号評価

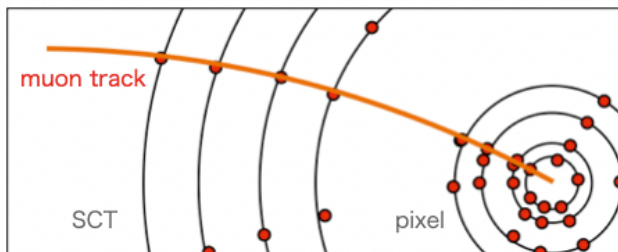
5.1 概要

チャージノは未発見の素粒子であり、チャージノの実験データは存在しない。そのため、消失飛跡トリガーの性能評価はこれまでチャージノのモンテカルロサンプルを使用したもののみ行われている。しかし、実際のデータと MC サンプルでは検出器のアラインメントなどによる差異があるため、実際のデータでも信号事象に対するトリガーの性能評価を行いたい。そこで新たに考案されたミュオンリトラッキングという手法を導入し評価する。トリガーを

5.2 手法: ミュオンリトラッキング

ミュオンリトラッキングとは、ミュオンの長い飛跡を短く切ることで、チャージノに見立てる手法である。ミュオンの飛跡が選ばれた理由として、二本のミュオンから Z ボソンの質量を組むことで識別が比較的容易であること、検出器との相互作用が少なくまっすぐな飛跡が得られることなどが挙げられる。ここでは消失飛跡トリガーの探索対象であるピクセル検出器と SCT 検出器の間で崩壊するチャージノに見立てるために、図 5.1 のようにピクセル検出器の四層のヒットのみを残し、それより外側の SCT 検出器のヒットが全て消された状態で飛跡を再構成する。ただし、この処理が行われるのは消失飛跡トリガー内のみであり、図 3.1 における triplets から tracks や tracksFail を作成する部分で処理される。その他のトリガーやオフライン処理での飛跡は SCT ヒットを消すことなく通常通り再構成される。また、消失飛跡トリガー内で再構成された短い飛跡の情報は BDT を通過しなかったものも含め全て保存されており、オフライントラッキング処理等を行なったあとでオフラインミュオンとのマッチングが取られる。ただし、チャージノとは p_T 分布が異なっている。

(a) retracking 無し



(b) retracking 有り

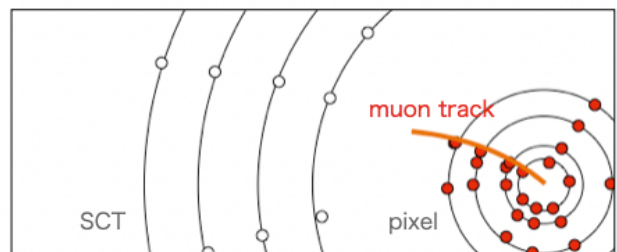


図 5.1: ミュオンリトラッキングの概略図 ピクセル検出器のヒットのみを用いて飛跡を再構成する

この性能評価では、消失飛跡トリガーで SCT 検出器のヒットを消して再構成された短い飛跡と、オフラインでヒット点を消すことなく再構成されたミュオン飛跡を使用する。まず最初にミュオンと識別された全てのオフラインミュオンの飛跡に対して、一番距離の近い ($dr = \sqrt{d\phi^2 + d\eta^2}$ の小さい) 短い飛跡とペアが組まれる。これらのペアについて、三段階で分析する。三段階は、ミュオンと識別された全てのペア (CUT PAIR)、オフラインミュオン飛跡と短い飛跡の距離が近いペア (MATCH PAIR)、短い飛跡が消失飛跡トリガーの選別を通過したペア (PASS PAIR) に分けられる。詳しい分け方は 5.2.1 に記した。

5.2.1 カット

CUT PAIR

- イベントがトリガーチェーン "HLT_mu24_ivarmedium_L1MU14FCH" を通過
このトリガーチェーンは L1 トリガーで p_T が 14 GeV 以上のミュオンが一本以上あること、HLT で p_T が 24 GeV 以上のミュオンが一本以上あることを要求している。
- イベント内のオフラインミュオン二本で不変質量 m を計算し、 $81 \text{ GeV} < m < 101 \text{ GeV}$ となった最初のペア
- muon selection tool を使用して MuQuality=1 を通過
- 他の飛跡から十分に距離が離れている。解析で使う PflowLoose_VarRad というワーキングポイントと近く、さらなるデータ処理を必要としない以下の指標を用いた。ptvarcone30 はミュオンとの距離が近い他の荷電粒子の運動量、neflowisol20 は中性粒子の運動量、 p_T はミュオンの p_T である。
 $(ptvarcone30 + 0.4 \times neflowisol20) / p_T < 0.16$
- オフラインミュオン飛跡のピクセルヒットのあった層数 ≥ 3
- $0.1 < |\eta| < 1.9$

MATCH PAIR

- $dr(\text{オフラインミュオン、短い飛跡}) < 0.015$

PASS PAIR

- BDT スコアがスレッシュホールド (medium) である以下の値より大きい

pix4lsct0	-0.100
pix4lsct1p	-0.080
pix3lsct0	0.040
pix3lsct1p	0.145

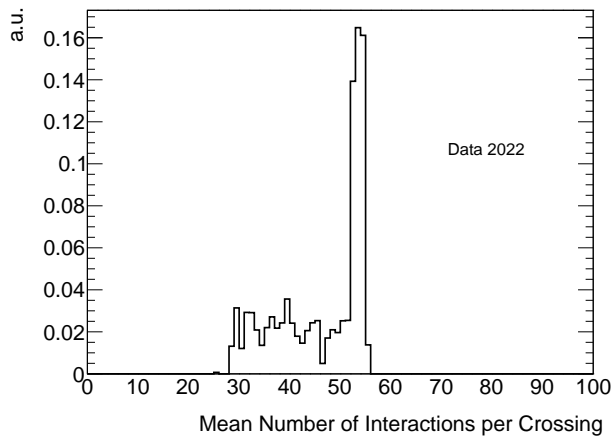
5.2.2 使用したサンプル

この性能評価は実データと MC の両方に対して行った。MC については、実データとパイルアップ分布が同じになるよう、図 5.2 のように全てのイベントに対して重み付けを行った。

データ

- DRAW_ZMUMU: データの中から ZMUMU 事象が含まれるイベントを抽出したもの
- runnumber: 438277

(a) Data の Mean Number of Interactions per Crossing 分布



(b) MC の Mean Number of Interactions per Crossing 分布

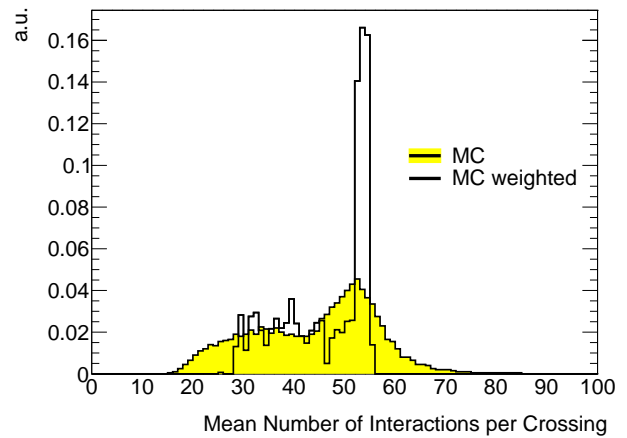


図 5.2: 信号効率評価に使用したデータと MC の Mean Number of Interactions per Crossing 分布

- パイルアップが図 5.2(a) のように比較的広範囲に分布

MC

- ZMUMU : Z ボソンが $\mu^+\mu^-$ に崩壊する事象
- runnumber: 601190

5.3 結果

5.3.1 トリガーの信号効率

消失飛跡を用いたチャージノ探索の解析は、カテゴリごと行われる。ミューオンリトラッキングでは SCT 検出器のヒットを使用しないため、使用されるカテゴリは pix4lsct0 と pix3lsct0 の二つである。まず、トリガーの総合的な信号効率を図 5.3 と表 5.1 に示した。分母にはオフライントラックがミューオンと識別されたペア (CUT pair) 数を取り、MATCH track は分子に距離が近くマッチングが取れたペア (MATCH pair) 数、PASS track は分子に BDT 選別を通過したペア (PASS pair) 数をとっている。つまり MATCH track は短い飛跡が再構成できた割合、PASS track は飛跡再構成ができ BDT を通過した割合に対応している。結果を見ると MATCH track では Data/MC が 0.99、PASS track では 0.86 となっており、短い飛跡を再構成できた割合はほぼ変わらないものの、BDT まで通過した割合はデータと MC で異なっていた。

5.3.2 マッチトラックの層数

上で見たようにオフライントラックのうち、短い飛跡とマッチングが取れた割合は、表 5.1 のようにデータと MC で差は 1% 未満だった。しかし飛跡の層数の内訳はデータと MC で異なっており、図 5.4 と表 5.2 にあるようにデータは三層飛跡の割合が MC に比べ 10% 以上多かった。ミューオンリトラッキングでは SCT 検出器のヒットは消されているため、三層飛跡は pix3lsct0 カテゴリ、四層飛跡は pix4lsct0 カテゴリに分類される。

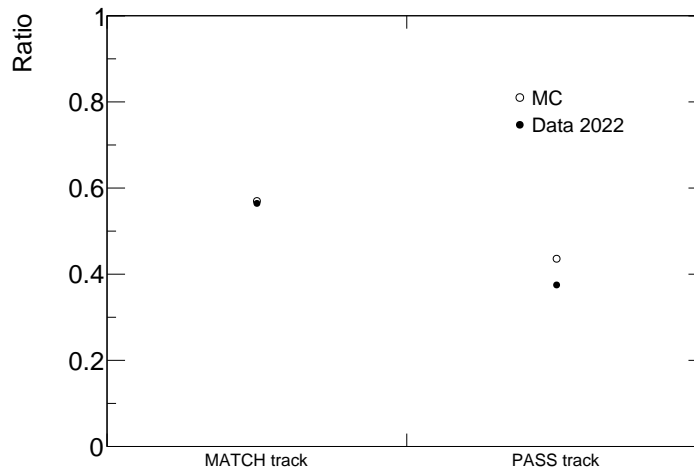


図 5.3: 消失飛跡トリガーの信号効率 分母にはオフライントラックがミュオンと識別されたペア (CUT pair) 数を取り、MATCH track は分子に距離が近くマッチングが取れたペア (MATCH pair) 数、PASS track は分子に BDT 選別を通過したペア (PASS pair) 数をとっている。MATCH track は短い飛跡が再構成できた割合、PASS track は消失飛跡トリガーを通過した割合に対応している。

type	Data	MC	$\frac{Data}{MC}$
MATCH	0.564(1)	0.569(2)	0.99
PASS	0.375(1)	0.436(2)	0.86

表 5.1: 消失飛跡トリガーの信号効率

5.3.3 マッチトラックの BDT 入力変数分布

ミュオンリトラッキングした際のトリガー内の飛跡の BDT 入力変数の分布の一部を図 5.5 に示した。これ以外の図は付録の図 B.5 と図 B.6 に載せた。これを見るとデータの方が d_0 分布の裾野が広がっていたり、飛跡の質 χ^2/ndof が悪く大きい領域にシフトしているのが見られた。データがアラインメントのずれなどの影響を受けていると考えられる。

5.3.4 マッチトラックの BDT スコアおよび BDT 効率

飛跡の層数別での BDT スコアを図 5.6 に示す。BDT スコアは 12 程度の BDT 入力変数から計算されるが、前節の変数分布よりデータと MC の差は小さいように見える。BDT スコアがスレッシュホールドを超えた飛跡の割合である BDT 効率 (図 5.7 および表 5.3) を見ると、三層飛跡、四層飛跡ともにデータと MC の差は 2% 以下に抑えられていた。この結果から、Run2 データを使用して学習した BDT を Run3 用に学習し直す必要はないと考えられる。三層飛跡と四層飛跡の違いを見ると、三層飛跡は背景事象が多くレートを抑える必要があるため四層飛跡より BDT 効率は低くなっていた。このことから、データの三層飛跡の多さが直接トリガー効率の低下に影響していることがわかった。

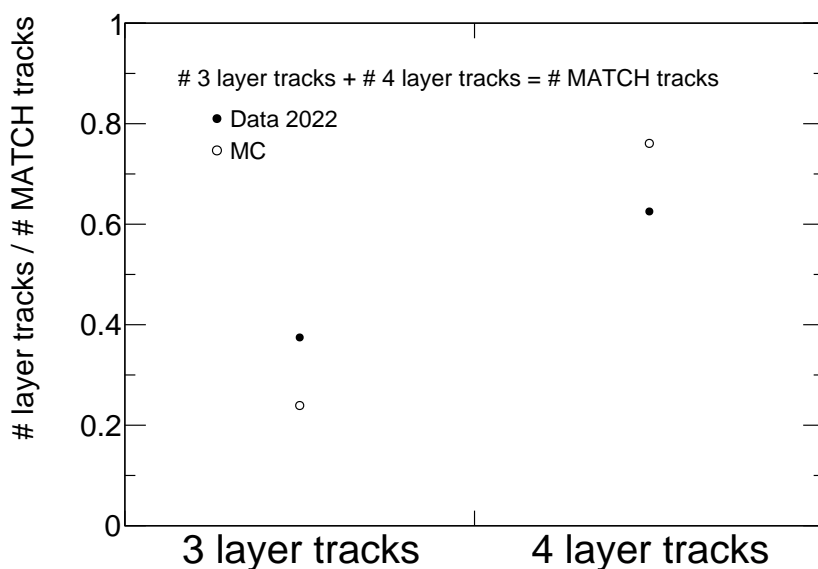
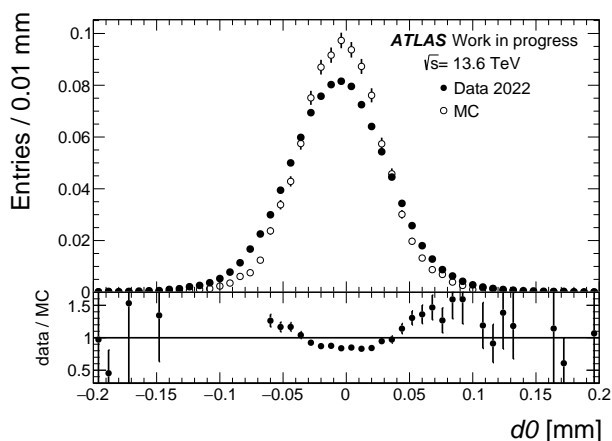


図 5.4: MATCH track における三層飛跡と四層飛跡の割合 オフラインミュオン飛跡とマッチしたトリガー内の飛跡のピクセル検出器に残したヒットの層数をプロットした。オフラインミュオン飛跡とトリガー内の飛跡はピクセルヒットの層数が異なる場合があるが、ここではトリガー内の層数を示している。また、層数は三層または四層のどちらかとなる。

type	Data	MC
三層飛跡	0.37	0.24
四層飛跡	0.63	0.76

表 5.2: MATCH track における三層飛跡と四層飛跡の割合

(a) pix4lsct0 カテゴリの $d0$ 分布



(b) pix4lsct0 カテゴリの χ^2_{ndof} pix 分布

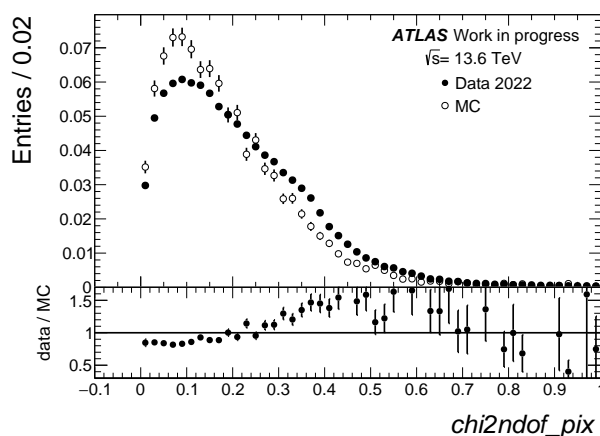


図 5.5: ミューオンリトラッキングをした際の BDT 入力変数

(a) MATCH track の三層飛跡 (pix3lsct0 カテゴリ) の BDT スコア (b) MATCH track の四層飛跡 (pix4lsct0 カテゴリ) の BDT スコア

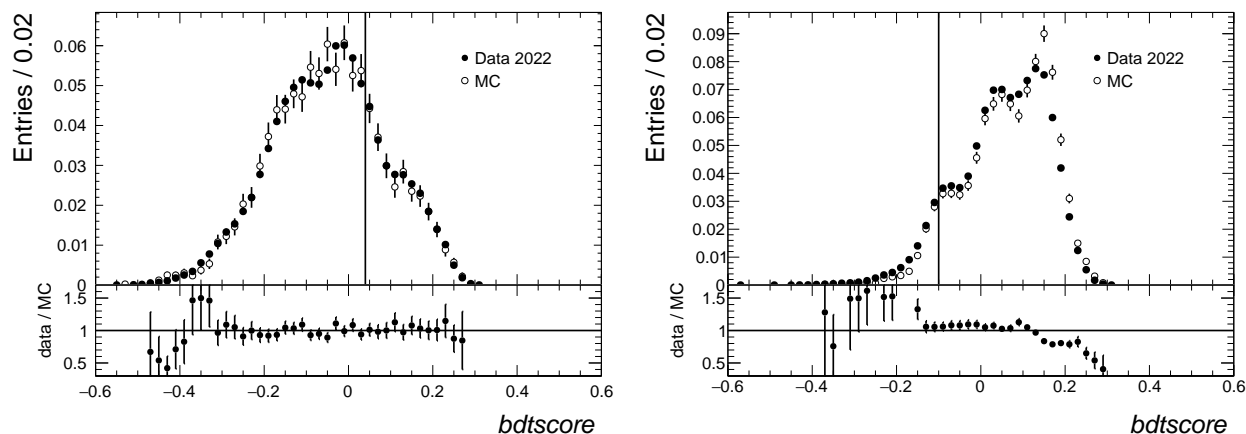


図 5.6: MATCH track の三層飛跡 (pix3lsct0 カテゴリ) と四層飛跡 (pix4lsct0 カテゴリ) の BDT スコア 縦線は WP レベルとして medium を使用した際のそれぞれのカテゴリの WP を示している. この線より右側にある飛跡は BDT を通過する.

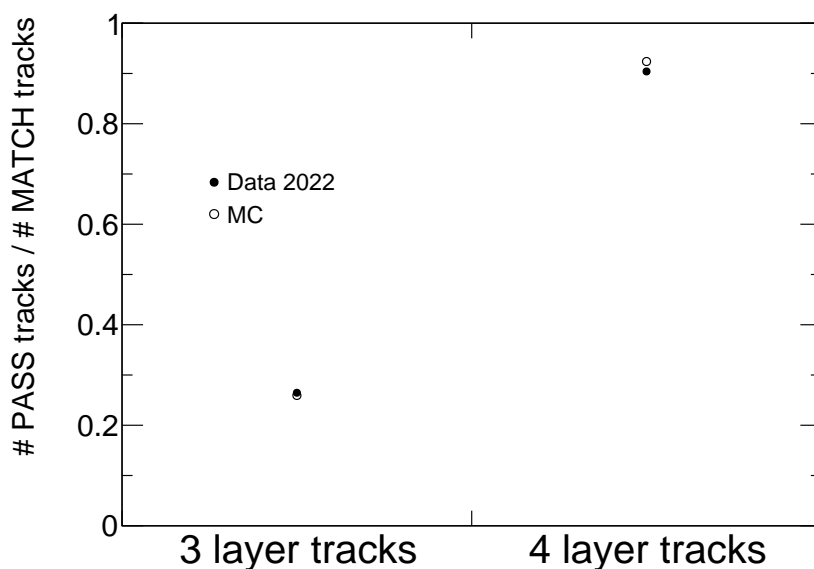


図 5.7: MATCH track の層数別の BDT 効率 MATCH track における三層飛跡と四層飛跡それぞれで BDT を通過した割合をプロットした. 図 5.6 における縦線より BDT スコアが右側の飛跡の割合に対応する.

type	Data	MC	$\frac{Data}{MC}$
三層飛跡	0.265(3)	0.259(4)	1.02
四層飛跡	0.904(1)	0.924(1)	0.98

表 5.3: MATCH track の層数別の BDT 効率

使用する基準	MC	estimated Data
BDT	0.71(2)	0.62(2)

表 5.4: 質量 800 GeV のチャージーノ MC のトリガー効率と見積もられたチャージーノデータのトリガー効率

5.3.5 chargino data の信号効率のみつもり

前節からもわかるように、データと MC では信号効率や飛跡の BDT 変数分布などに違いがあることがわかる。そこで最後に、上の結果とチャージーノ MC の信号効率から、チャージーノデータの信号効率を見積もる。データと MC とともに飛跡が ϕ について等方的に分布していると仮定して、 η 分布の違いのみ考慮する。 η は -2 から 2 までを等間隔に 20 ビンに分け、各ビンについて以下のように計算した。まず、 $\text{Eff} = \frac{\text{PASS}}{\text{CUT}}$ として、

$$\text{Eff}[\text{CharginoData}] : \text{Eff}[\text{CharginoMC}] = \text{Eff}[\text{MuonData}] : \text{Eff}[\text{MuonMC}] \quad (5.1)$$

と仮定する。このとき、 A を定数として、

$$\text{CUT}[\text{CharginoData}]_i = A * \text{CUT}[\text{CharginoMC}]_i \quad (5.2)$$

$$\text{PASS}[\text{CharginoData}]_i = A * \text{CUT}[\text{CharginoMC}]_i * \text{Eff}[\text{CharginoMC}]_i * \frac{\text{Eff}[\text{MuonData}]_i}{\text{Eff}[\text{MuonMC}]_i} \quad (5.3)$$

$$\text{Eff}[\text{CharginoData}] = \frac{\sum_i^{\text{etabins}} \text{PASS}[\text{CharginoData}]_i}{\sum_i^{\text{etabins}} \text{CUT}[\text{CharginoData}]_i} \quad (5.4)$$

$$(5.5)$$

この計算によってチャージーノ飛跡に対する信号効率は表 5.4 のように見積もられた。ただし、チャージーノ MC の飛跡としては以下のものを使用した。

イベントの条件

- チャージーノ対生成事象
- チャージーノの質量 800 GeV
- L1XE50 トリガーを通過
- HLT で計算した $E_T^{\text{miss}} > 80$ GeV

$E_T^{\text{miss}} 80$ GeV トリガーを通過したかの情報が残っていないため、これが擬似的に $E_T^{\text{miss}} 80$ GeV トリガーをかけることに相当している。

飛跡の条件

- 崩壊位置がピクセル検出器と SCT 検出器の間 ($130 \text{ mm} < r < 300 \text{ mm}$)
- $0.1 < |\eta| < 1.9$

5.4 議論

三層飛跡と四層飛跡を合わせた全体に対する信号効率はデータと MC で違いがあった。これは、データと MC で三層飛跡と四層飛跡の割合が違うことに起因する。データは三層飛跡の割合が比較的多く、MC は四層飛跡の割合が比較的多かった。この違いが見られる原因として、ピクセル検出器の dead map の違いが考えられる。dead

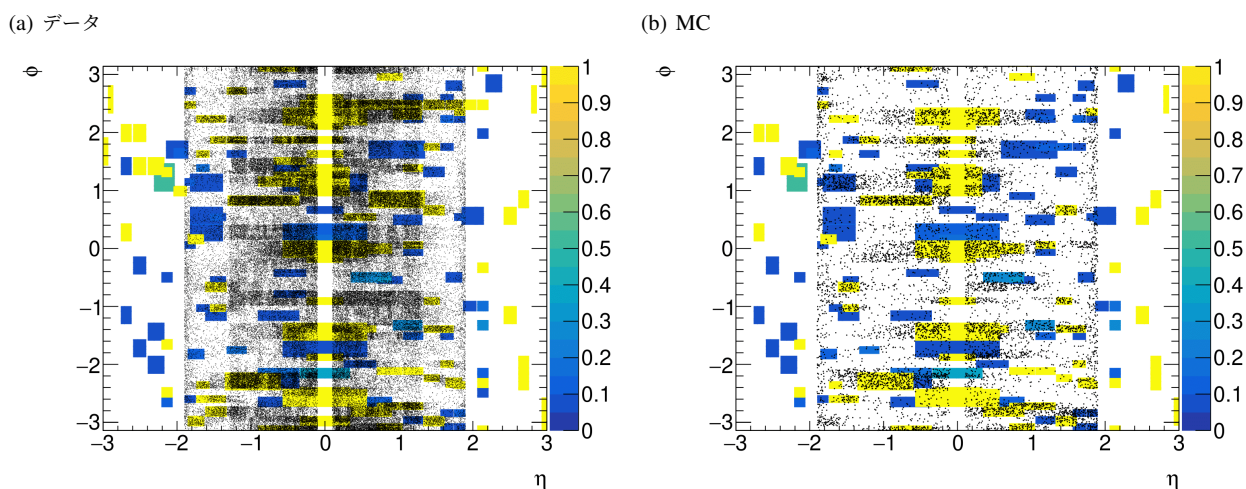


図 5.8: ピクセル検出器の dead map 背景のヒストグラムはピクセル検出器四層分の dead map をまとめたもので、モジュールが全て dead の場合には 1、モジュール内の FE のうち一部が dead の場合はその割合をプロットした。データの dead map は同じランでも lumiblock によっていくつかに分かれているが、ここではこのランの複数の dead map のうち、各ビンでの最大値をそれぞれプロットした。

module は何らかの影響で検出器として使えなくなっているモジュールを指すが、dead map はそれらの位置を $\eta-\phi$ に描画したものである。MC の dead map は年に一回変更される conditionDB が使用されている一方、データではこれに加え検出器の error や busy 信号によって使用できない場合なども含んだ、イベントごとに変わる dead map を使用している。データと MC について、ピクセル dead map と三層飛跡の分布を図 5.8 に示した。背景のヒストグラムはピクセル検出器四層分の dead map をまとめたもので、モジュールが全て dead の場合には 1、モジュール内の FE のうち一部が dead の場合はその割合をプロットした。データの dead map は同じランでも lumiblock によっていくつかに分かれているが、ここではこのランの複数の dead map のうち、各ビンでの最大値をそれぞれプロットした。この図から、dead module となっている色のついた領域に三層飛跡が多く分布していることがわかる。また図 5.8(a) には dead でない領域でも三層飛跡が長方形に集中している領域があることから、効率の落ちているモジュールがあると考えられる。データの方が MC より三層飛跡の割合が高かった理由としてこの dead channel 領域がデータの方が広いことが寄与していると考えられる。

また、前節の背景事象評価では MC とデータの変数分布に大きな違いは見られなかったが、この節の信号事象評価では d0 やピクセル検出器での飛跡の質などで違いが見られた。これは、背景事象はフェイク飛跡が支配的であるために検出器のアラインメント等の影響を受けにくい一方、信号事象は実際の飛跡を見ているためにアラインメントの影響を受けることを反映していると考えられる。

第 6 章

まとめ

本論文では ATLAS 実験 Run3 より新たに導入された消失飛跡トリガーに対して、データとモンテカルロシミュレーション (MC) を用いた背景評価と信号評価を行った。背景評価では Run3 で実際に収集されたデータと MC を比べることで消失飛跡トリガーが正常に動作しているかの確認を行った。データと MC の変数分布はおおむね一致しており、トリガーは問題なく動作していることが確認された。信号評価ではミュオンの飛跡を加工してチャージーノに見立てるミュオンリトラッキングという新たな手法を導入し、信号に対するトリガー効率を見積もった。その結果、データは MC に比べて三層飛跡の割合が多く、信号効率が小さかった。この結果をチャージーノに適用すると、質量 800 GeV のチャージーノに対するトリガー効率は MC では 71% だったものがデータでは 62% と見積もられた。データにおける三層飛跡の割合が多い理由としては検出器の状態による影響が大きいと考えられる。BDT による選別は想定通りに動いており、Run2 データを使用して学習した BDT を Run3 用に学習し直す必要性は見当たらなかった。消失飛跡トリガーの導入によって探索における信号効率の向上が見込まれる。

付録

- A 背景事象の性能評価における BDT 入力変数
- B 信号事象の性能評価における BDT 入力変数

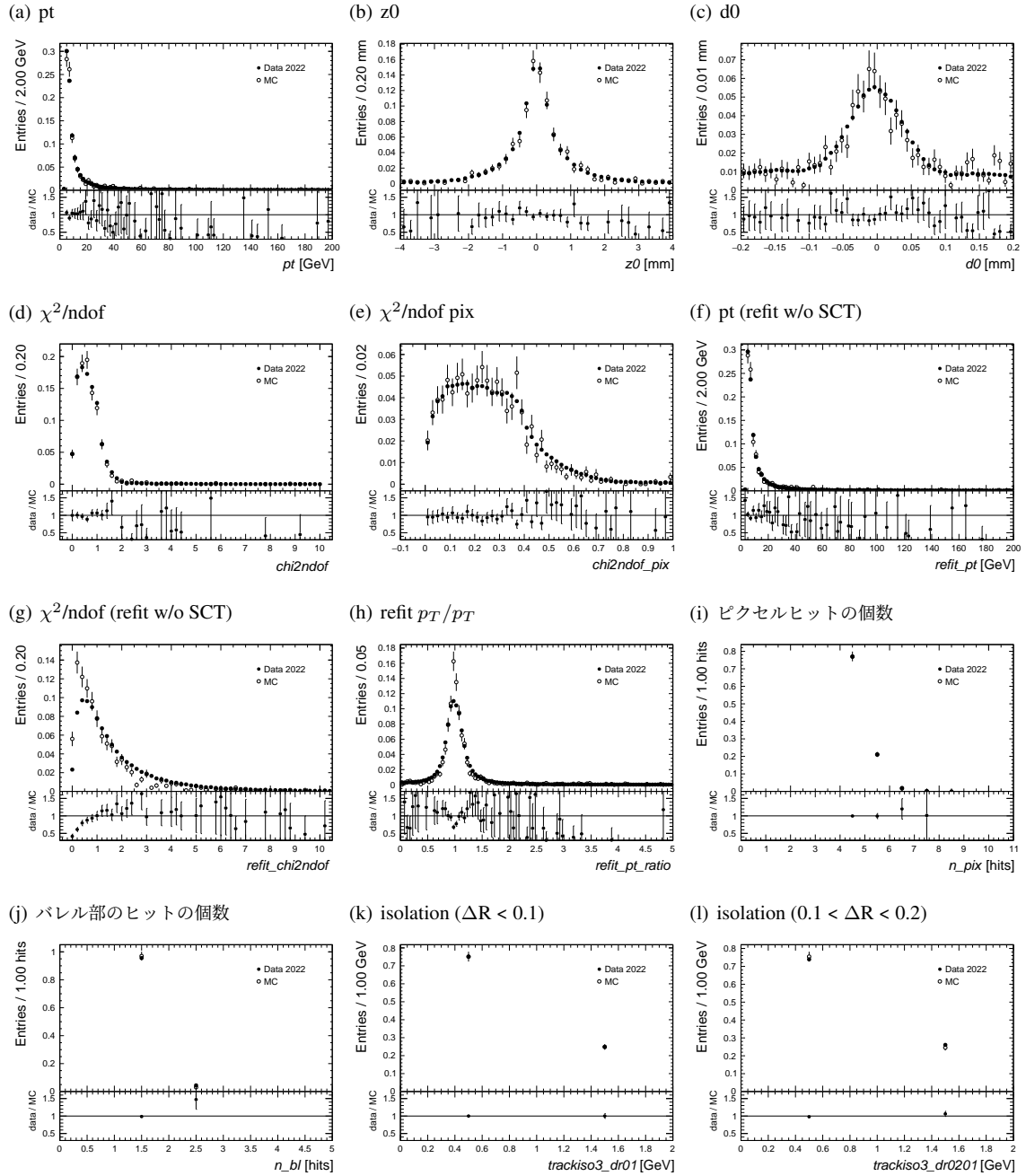


図 A.1: 背景事象の pix4lsct0 カテゴリの BDT 入力変数分布

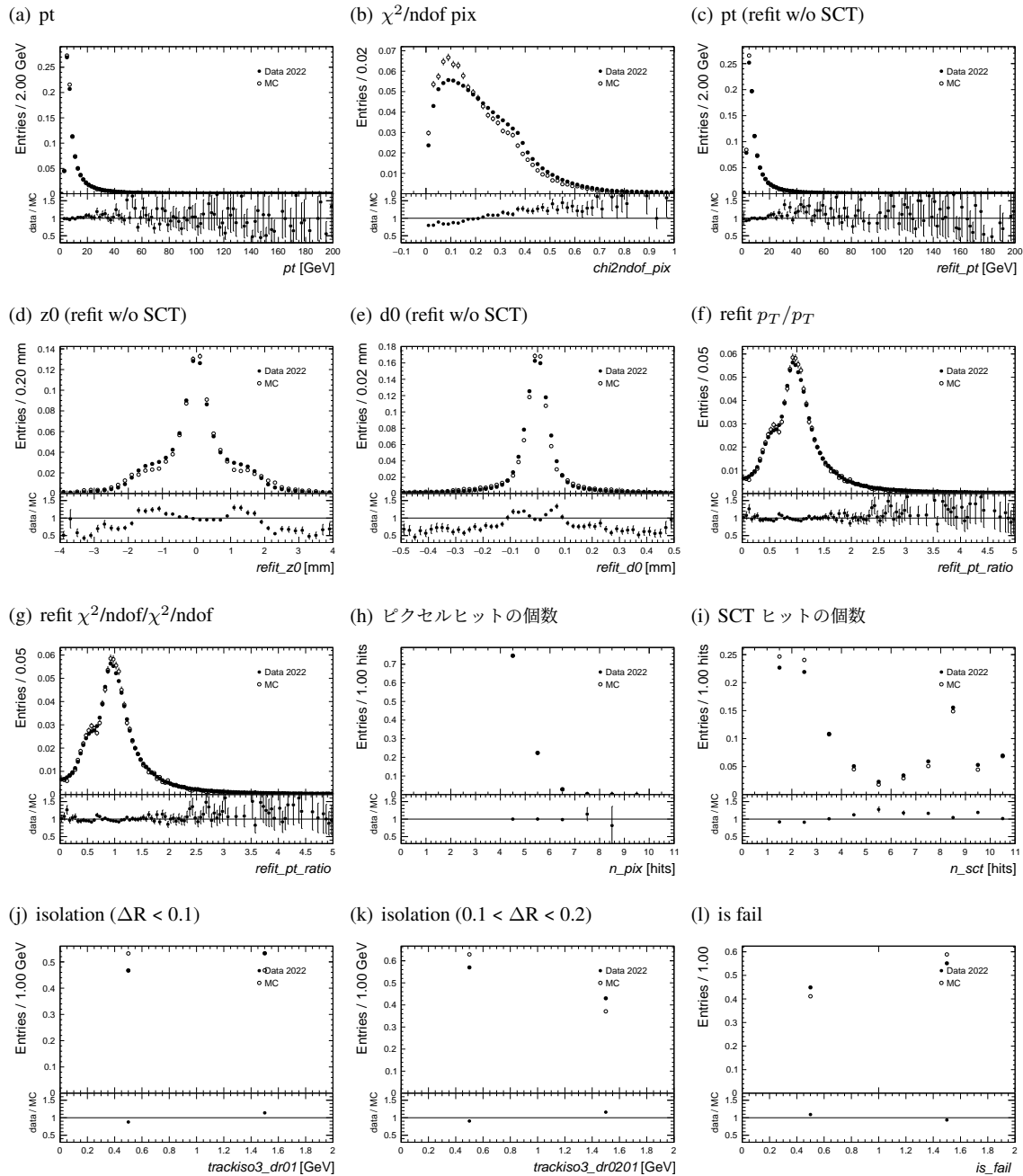


図 A.2: 背景事象の pix4lsct1p カテゴリの BDT 入力変数分布

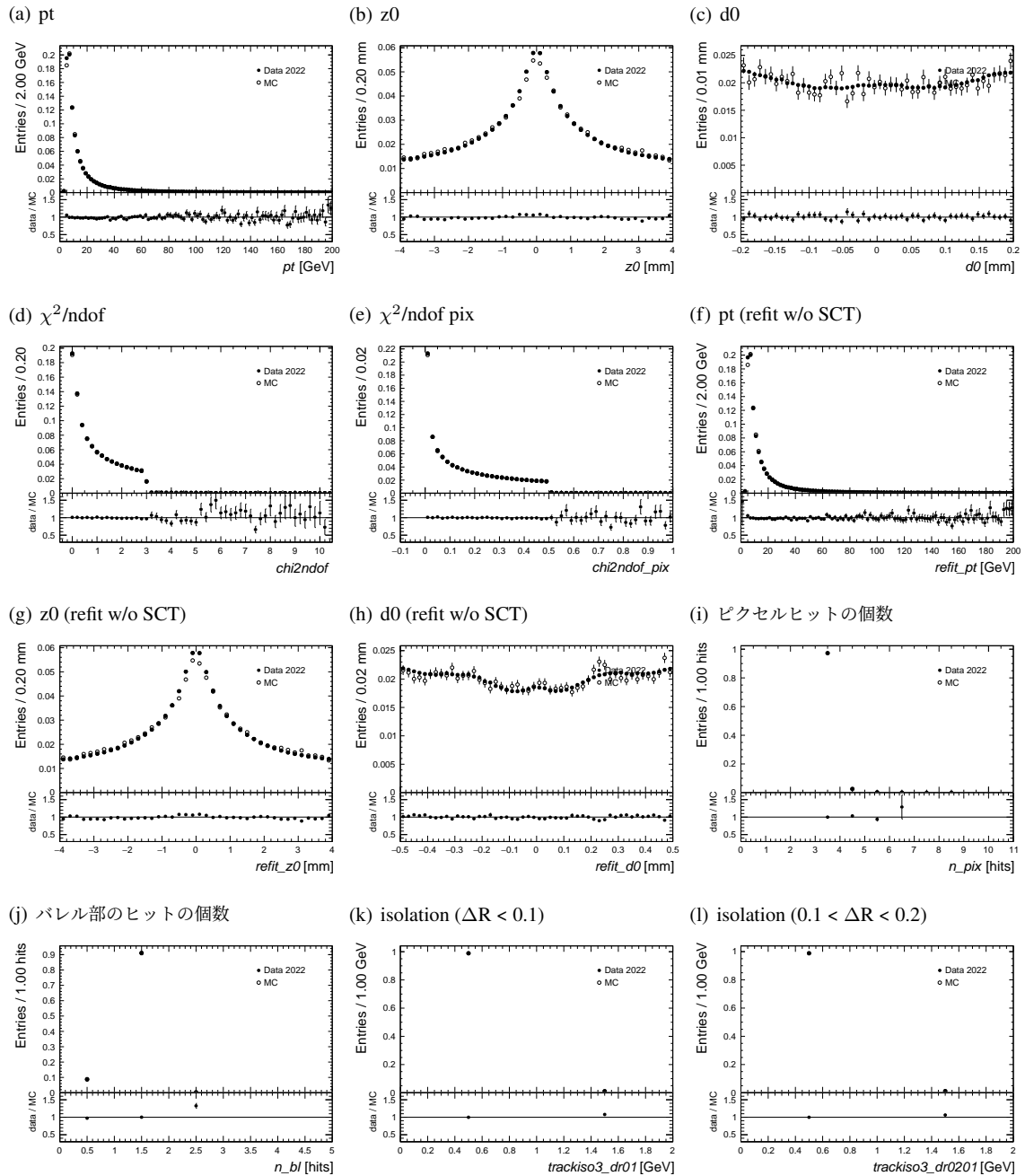


図 A.3: 背景事象の pix3lsct0 カテゴリの BDT 入力変数分布

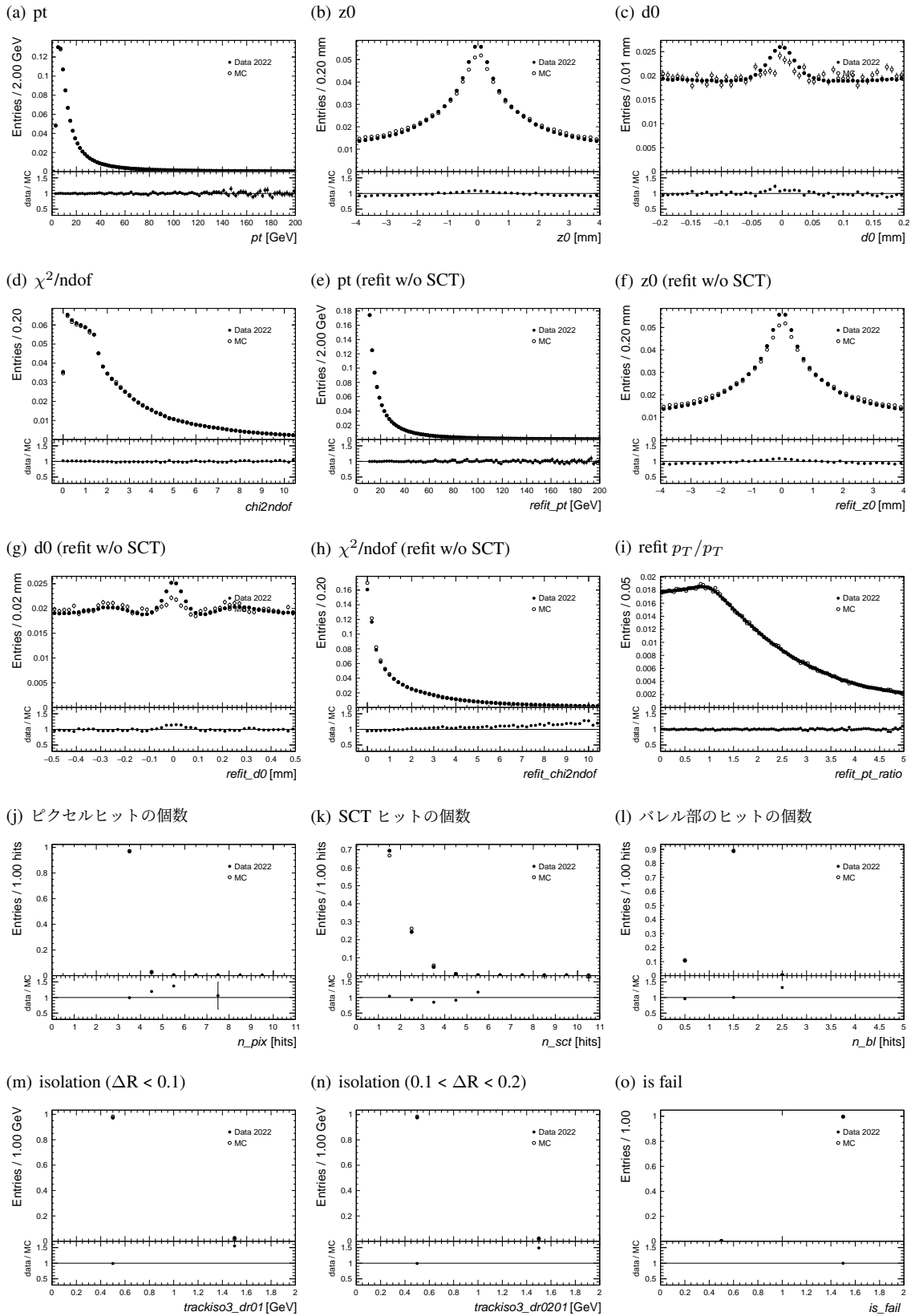


図 A.4: 背景事象の pix3lsct1p カテゴリの BDT 入力変数分布

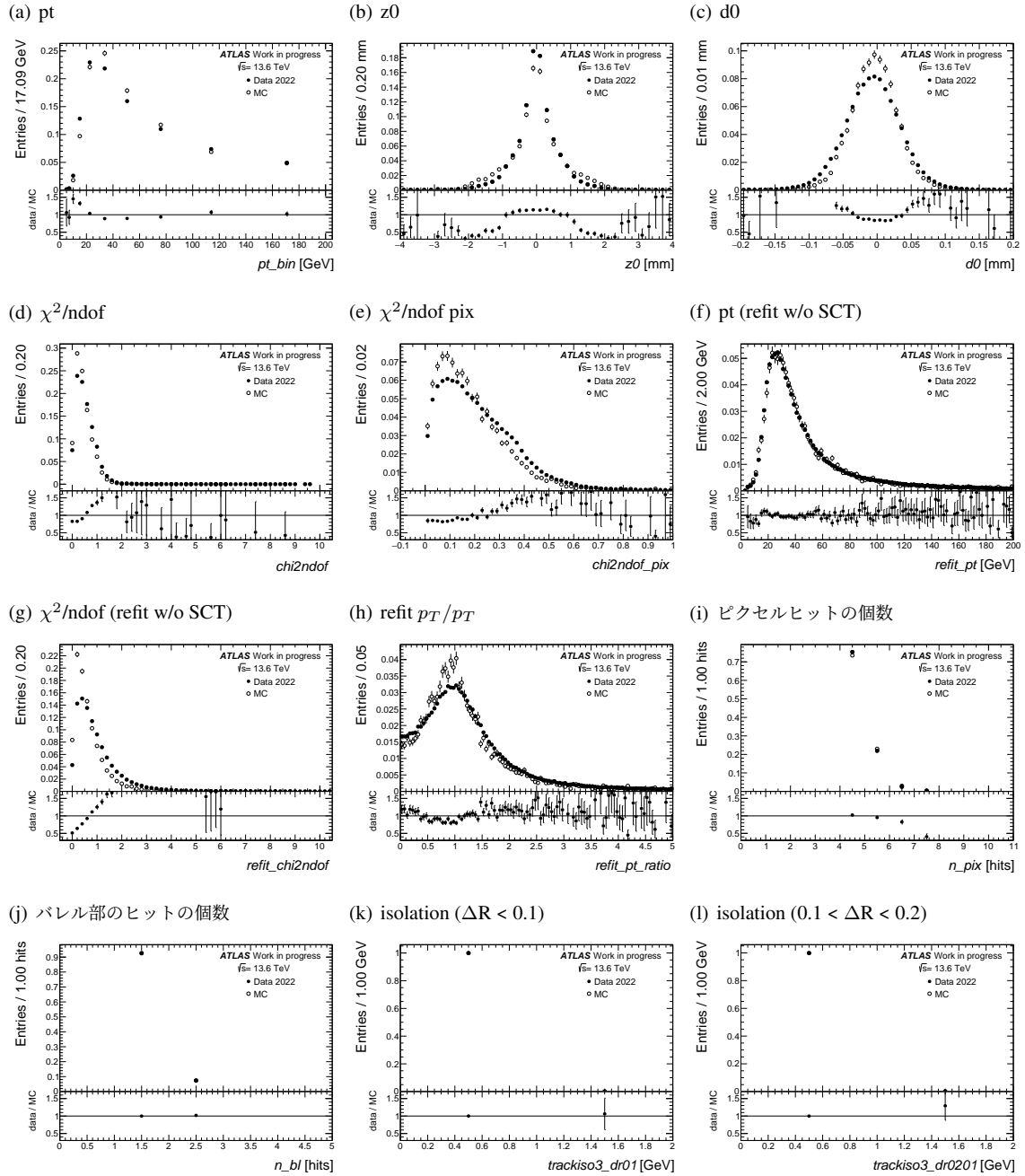


図 B.5: muon retracking をした際の pix4lsct0 カテゴリの BDT 入力変数分布

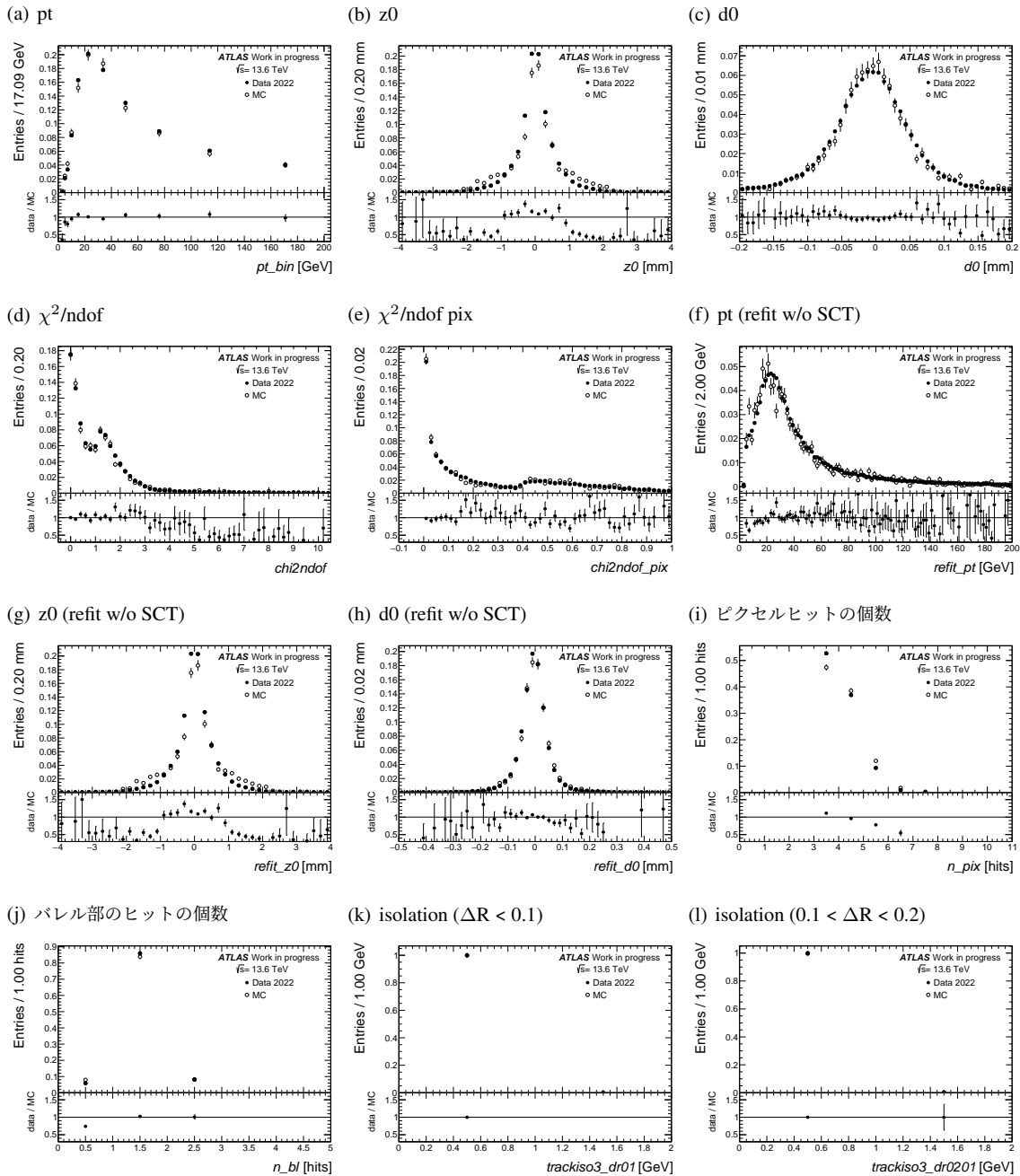


図 B.6: muon retracking をした際の pix3lsct0 カテゴリの BDT 入力変数分布

謝辞

修士課程における研究活動を行うにあたって多くの方々から助力をいただきました。感謝申し上げます。

指導教官である澤田龍准教授には研究方針から資料作成のアドバイス、細かいバグのデバッグ作法などを丁寧に指導していただき大変お世話になりました。また長野邦浩准教授にも研究の方向を示していただき、実際のコードの書き方についても助けていただきました。山口洋平助教には毎週の HLT ミーティングでの議論を通じて理解を深めるとともに、コードのわからない部分について親身に教えていただきました。

ICEPP の先生方にも講義やミーティングで多くの指導をいただきました。加地俊瑛特任研究員には消失飛跡解析について理解していない部分を教えていただきました。また、出張などの手続きで事務室の方々には大変お世話になりました。同期の皆様、研究室がとても過ごしやすく、よい環境だったなと振り返って思います。

皆様の支えがあり、研究活動ができました。本当にありがとうございました。

引用文献

- [1] 秋山 大也. Lhc-atlas 実験における長寿命チャージノ探索のための新しい消失飛跡再構成法の開発, 2022.
- [2] Alexandre Arbey, Marco Battaglia, and Farvah Mahmoudi. The Higgs boson, Supersymmetry and Dark Matter: Relations and Perspectives. *Annalen Phys.*, 528:179–186, 2016. 7 pages, 5 figures.
- [3] The ATLAS Collaboration et al. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. *JINST*, 3:S08003, 2008. Also published by CERN Geneva in 2010.
- [4] Sascha Mehlhase. ATLAS detector slice (and particle visualisations). 2021.
- [5] H. Pernegger. The pixel detector of the atlas experiment for lhc run-2. *Journal of Instrumentation*, 10(06):C06012, jun 2015.
- [6] ATLAS Collaboration. Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ tev with the atlas detector. *Journal of High Energy Physics*, 2018(6), June 2018.
- [7] Planck2013 results. xvi. cosmological parameters.
- [8] CERN Service graphique. Overall view of the LHC. Vue d’ensemble du LHC. 2014. General Photo.
- [9] ATLAS Collaboration. Ls3 schedule change. <https://hilumilhc.web.cern.ch/article/l3-schedule-change>.
- [10] ATLAS collaboration. Luminosity results for run-3 of the lhc.
- [11] P F Åkesson, T Atkinson, M J Costa, M Elsing, S Fleischmann, A N Gaponenko, W Liebig, E Moyses, A Salzburger, and M Siebel. ATLAS Tracking Event Data Model. Technical report, CERN, Geneva, 2006. All figures including auxiliary figures are available at <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PUBNOTES/ATL-SOFT-PUB-2006-004>.
- [12] ATLAS Collaboration. Technical report.
- [13] The ATLAS Collaboration et al. Study of the material of the atlas inner detector for run 2 of the lhc. *Journal of Instrumentation*, 12(12):P12009–P12009, December 2017.
- [14] Alan J Barr, Christopher G Lester, M. Andy Parker, Ben C Allanach, and Peter Richardson. Discovering anomaly-mediated supersymmetry at the lhc. *Journal of High Energy Physics*, 2003(03):045–045, March 2003.
- [15] ATLAS Collaboration. Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature using 136 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ tev with the atlas detector, 2022.
- [16] ATLAS collaboration. High level trigger run-3 disappearing track trigger performance.
- [17] ATLAS Collaboration. Trigger rates and bandwidth.