

2025 年 修士論文

**RHIC-sPHENIX 実験での
宇宙線を用いた中間飛跡検出器
INTT の検出効率の測定**

奈良女子大学大学院 人間文化総合科学研究科
数物科学専攻 物理コース
高エネルギー物理学研究室

博士前期課程 2 年
学籍番号 24810172
森本 菜央

2026/02/10

概要

米国ブルックヘブン国立研究所の Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) において行われている sPHENIX 実験は、重イオン衝突によって生成されるクォーク・グルオンプラズマ (QGP) の性質解明を目的としている。QGP の性質を精密に測定するためには、生成される荷電粒子の飛跡を高精度に再構成することが不可欠であり、そのために sPHENIX の飛跡検出器群の一部である Intermediate Tracker (INTT) には高い検出効率が要求される。本研究では、sPHENIX 検出器で測定された磁場を印加していない宇宙線データを用いて INTT の検出効率を測定した。INTT は 2 層のバレル構造のシリコンストリップ検出器で、内層 48 本、外層 64 本、合計 112 本のハーフラダーで構成されている。ハーフラダーには、 $16 \text{ mm} \times 9.984 \text{ mm}$ のセンサーセルが 2×8 個、 $20 \text{ mm} \times 9.984 \text{ mm}$ のセンサーセルが 2×5 個配置されており、1 個のセンサーセルは、ストリップ幅 0.078 mm ($=9.984/128$) のストリップ 128 チャンネルからできている。先行研究として行われたラダー単体でのビームテストでは、検出効率は、 $99.53 \pm 0.05\%$ であった。本研究では、INTT の全ラダーを組み上げて sPHENIX 検出器にインストールした状態で、電磁カロリメータによる宇宙線トリガーを用いて宇宙線イベントを収集した。宇宙線は磁場を印加しない条件下では直線的な飛跡を形成するため、INTT を 4 層分貫通するイベントを選定し解析を行った。隣り合ったチャンネルに閾値以上の信号があった場合、それらを合わせて 1 つのクラスタとし、複数のクラスタに対して、直線によるフィットを行って宇宙線のトラックを再構成した。さらに、様々な条件でのイベント・トラック選定を行い、検出効率測定に利用できる宇宙線トラックを選定した。それらの再構成トラックから求まる検出器上の粒子通過予測位置にクラスタが存在するかを検証し、INTT の 4 層バレル別における位置別検出効率を算出した。また、ミューオンを INTT 4 層を通るような一定の角度で入射し、検出器応答を出力するモンテカルロシミュレーションを行い、実データと同様の解析をして検出効率を算出した。その結果、モンテカルロシミュレーションでは全領域において約 95% 以上の高い検出効率が得られた一方で、実データでは位置依存性が顕著に現れ、平均して約 58–72% 程度の検出効率となり、シミュレーションと比較して低い値を示した。位置依存性を詳細に調べた結果、INTT バレル内において一部の位置では最大 100% の高い検出効率が見つかった一方でラダーとラダーの間に対応する領域で検出効率が低下する傾向が確認された。そこで、クラスターが検出されなかったイベントに対してトラックの予想通過位置を確認したら、ラダーとラダーの間の検出器がない隙間を通過している可能性が高いことがわかった。一方、本研究で用いたモンテカルロシミュレーションでは、あらかじめ制限された入射角を持つトラックのみが生成されているため、そのような場所を粒子が通らないため、理想的な検出効率を得られたと考えられる。この検出効率が低下する原因については、今後さらに多くのデータを解析することにより統計精度が向上し、ラダー間ギャップの影響をより定量的に評価できると考えられる。また、本解析の計算方法では、宇宙線の検出器への入射角度が水平に近い事象において、クラスターとトラックとの距離が大きくなる傾向が確認されている。今後、より現実に則した計算方法の採用により、検出効率の改善が期待される。[4]

目次

第 1 章	序論	5
1.1	素粒子学	5
1.1.1	素粒子	5
1.1.2	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)	5
1.2	重イオン衝突実験	5
1.2.1	Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)	5
1.3	宇宙線を用いた検出器性能評価	6
1.4	研究目的	6
第 2 章	sPHENIX 検出器	8
2.1	Monolithic-Active-Pixel-Sensor-based Vertex Detector (MVTX)	8
2.2	INtermediate Tracking detector (INTT)	8
2.2.1	シリコンセンサーラダー	9
2.2.2	シリコンセンサー	9
2.3	Minimum Bias Detector (MBD)	10
2.4	Time Projection Chamber (TPC)	11
2.5	ElectroMagnetic Calorimeter (EMCal)	11
2.6	Hadronic calorimeter (Hcal)	11
第 3 章	宇宙線解析	13
3.1	宇宙線測定	13
3.2	宇宙線データセット	13
3.2.1	シミュレーションデータ (MC)	13
3.2.2	実データと run trigger	13
3.2.3	データ選定	14
3.2.4	クラスタリング	15
3.3	ヒット選定	15
3.3.1	宇宙線データの傾向	15
3.3.2	ホットチャンネルの定義	16
3.3.3	ノイズチャンネルの除去	16
3.4	イベント選定	18

3.5	トラック選定	21
3.6	検出効率算出方法	24
3.7	解析手法	26
第 4 章	宇宙線測定データの解析結果と考察	28
4.1	検出効率算出方法	28
4.2	検出効率解析結果	29
4.3	位置別の検出効率解析結果	29
4.4	最終結果と考察	29
4.5	クラスター非検出イベントによる影響	31
4.6	傾きカットを用いた結果	32
第 5 章	まとめ	34
	参考文献	35
	謝辞	37

式目次

3.3 トリガーの方位角範囲 (ϕ)	14
3.4 ヒットレート	16
3.5 ホットチャンネルの定義	16
3.6 宇宙線のヒットレート	16
3.7 フィットの式	17
3.8 位置の予測範囲	19
3.9 NDF の式	22
3.10 フィット線上の予測点	22
3.11 フィット判定の式	22
3.12 最短距離を求める式	24

図目次

1.1 RHIC.	6
2.1 sPHENIX 実験の検出器.	8
2.2 INTT 検出器を半分に割った時の図.	9
2.3 INTT ラダーの写真	9
2.4 シリコンセンサーおよび FPHX チップの模式図	10
2.5 MBD の写真	11
2.6 EMCal の 1 セクターを示した図	11
2.7 sPHENIX 検出器カロリメーターサブシステムの断面図.	12
3.1 oHcal トリガーの図解。① oHcal coincidence 設定は oHcal 上下でヒットがあった時トリガーがでる。② Hcal vertical coincidence では oHcal 上下の限られた領域にヒットがある場合、トリガーが出る	14
3.2 テストバレル番号の定義 1. は INTT の内層バレルの下半分 2. 外層バレルの下半分 3. は内層の上半分 4. は外層の上半分 を示す.	14
3.3 テストバレルを 4 とした場合のトラックとクラスターの最短距離 D の模式図.	15

3.4	ノイズヒットを含む宇宙線イベントディスプレイ. 左は xy 平面からみたクラスターの分布図. 右は rz 平面からみたクラスターの分布図である. ただし r は x と y の半径である. クラスターは黒点. INTT の位置は灰色で示されている. 赤線は実際のトラック線である. 緑の線は理想的なトラック線. ピンクの枠は理想的なトラックから外れたクラスターを示す.	16
3.5	ノイズチャンネル判定閾値の決定. 縦軸はチャンネル数, 横軸は 1 イベントでのチャンネル単位のヒット数である. 緑は 0.00035. 青は 0.00041. 赤は 0.0005 の位置を示す.	17
3.6	INTT を x-y, y-z 方向から見たイベントディスプレイ.	17
3.7	x-y 平面, z-y 平面, 3次元でみたイベントディスプレイ.	18
3.8	左図: 2つのクラスター間の距離差の分布. 右図: 左図の拡大図.	19
3.9	クラスター非検出イベント: テストバレルの上にクラスターがないイベント.	20
3.10	多重テストクラスターイベント: テストバレルに 2 個クラスターがあるイベント.	20
3.11	全ラダー通過イベント.	21
3.12	全バレルを突き抜けないイベント	21
3.13	内層を突き抜けないイベント	21
3.14	トラックごとの χ^2 値の分布図.	22
3.15	フィット閾値を適用する前のトラックごとのパラメータ分布.	23
3.16	フィット閾値を適用した後のトラックごとのパラメータ分布.	24
3.17	最短距離 D の定義	25
3.18	左図: ラスターごとの最短距離 D の分布図. 右図: 左図の log 表記	25
3.19	左図: クラスターごとの最短距離 D_z の分布図. 右図: 左図の log 表記	25
3.20	テストバレルごとの各クラスターの D_z および D_{xy} 分布	26
3.21	図 3.20(c) の log 表記	26
4.1	左図: xy 平面からみた位置別の検出効率の分布 右図: 左図の検出効率が 90% を超える位置を赤星で表した	29
4.2	左図: xy 平面からみた位置別の検出効率の分布 (非検出クラスターイベントを含む最終結果) 右図: 左図の検出効率が 90% を超える位置を赤星で表した	30
4.3	傾き a と D_{xy} の分布	31
4.4	傾き c と D_z の分布	31
4.5	左図: クラスター予測位置の算出方法 (INTT の半径が約 10cm と考えて, フィット式 $y=ax+b$ との交点を求めた) 右図: 左図の方法を使って算出したクラスター非検出イベント予測位置分布	32
4.6	左図: xy 平面における位置別の検出効率分布. (傾き条件 $\frac{\pi}{4} \leq \phi \leq \frac{3\pi}{4}$, および $-\frac{3\pi}{4} \leq \phi \leq -\frac{\pi}{4}$ を満たすトラックを除外した結果.) 右図: 左図の検出効率が 90% を超える位置を赤い星印で示した.	33

表目次

3.1	run 58915 における閾値とトラッキング成功率の比較	18
-----	---	----

4.1 MC および実データにおけるバレル別の検出効率	29
4.2 MC および実データにおけるバレル別の検出効率	30
4.3 MC および実データにおけるバレル別の検出効率	33

第 1 章 序論

1.1 素粒子学

1.1.1 素粒子

素粒子とは、物質を構成する基本的な粒子であり、現在の標準模型においては、それ以上分解できないと考えられている。素粒子は、スピンの統計性に基づいてフェルミ粒子とボーズ粒子に分類される。

フェルミ粒子は物質を構成する粒子であり、レプトンとクォークに分けられる。レプトンには電子、ミュー粒子、タウ粒子の 3 種類が存在し、クォークにはアップ、ダウン、チャーム、ストレンジ、トップ、ボトムのカウント 6 種類が存在する。

一方、ハドロンはクォークから構成される複合粒子であり、強い相互作用によって束縛されている。ハドロンは、3 個のクォークからなるバリオンと、クォークと反クォークの対からなるメソンに分類される。

一次宇宙線として地球に到達する粒子の多くは、陽子や原子核といったハドロンである。これらの粒子が地球大気中の原子核と相互作用することで、多数の二次粒子が生成される。この二次粒子には、ミュー粒子や電子、および光子などが含まれる。

特にミュー粒子は比較的長い寿命を持ち、大気中で生成された後も地表まで到達するため、地表付近で観測される宇宙線の主要成分となっている。[4] [12]

1.1.2 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

通常、クォークとグルーオンは強い相互作用により核子内に閉じ込められているハドロン相の状態にあり、これら単独で取り出すことは不可能であると考えられる。一方、相転移温度 T_C を超えると、クォークとグルーオンが閉じ込めから解放されたクォーク・グルーオン・プラズマ (Quark-Gluon Plasma: QGP) 相に相転移が起こる。ビッグバンから数 $10 \mu\text{s}$ 後の初期宇宙では高温・高密度下の QGP 状態であったが、その後、宇宙が膨張したことによる急激な冷却によって QGP 相からハドロン相に相転移が起こったと考えられている。[7] [14]

1.2 重イオン衝突実験

QGP 状態は、バリオン密度がほぼゼロの高温状態、あるいはバリオン密度が高い状態において実現すると考えられている。高温かつ高密度な QGP を生成する方法として提案されたのが、重い原子核を高エネルギーまで加速し衝突させる重イオン衝突実験である。これまでの QGP 研究では、QGP 中での高運動量粒子の生成抑制とパートンエネルギー損失の発見や、楕円フローの発見による QGP の流体力学的膨張の理解、直接光子を用いた QGP 温度の測定がこれまで行われてきた。今後もさらなる研究によって、現象の理解が進むことが期待される。[13]

1.2.1 Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)

RHIC とは米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) にある重イオン衝突型加速器のことで、2000 年より稼働しており、QGP の生成および研究が行われている。周長約 3.8 km の 2 つの超電導リングからなり 2 つの

リングが交差する 6 箇所の衝突点において、106 ns (9.4 MHz) の間隔で粒子ビームが交差する。図 1.1 に、RHIC 全体を撮影した写真を示す。金原子核または陽子同士を衝突させた場合、核子対あたりの最大重心系エネルギーはそれぞれ 200 GeV と 510 GeV である。[12]

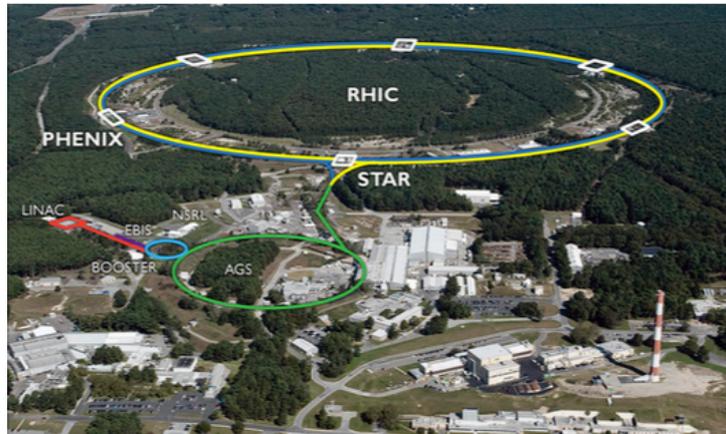


図 1.1: RHIC.

1.3 宇宙線を用いた検出器性能評価

ミュー粒子は電荷を持ち、物質中をほぼ直線的に透過する性質を持つため、位置検出器におけるトラック測定に適した粒子である。地表における宇宙線ミュー粒子のフラックスは、およそ $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 程度と比較的高く、加速器ビームを用いなくても安定した統計量を得ることができる。このため宇宙線は、シリコン検出器やガス検出器を用いた実験において、検出効率評価、位置分解能測定、およびアライメント確認などに広く利用されてきた。特に、加速器の運転前後やビーム供給が制限される状況において、宇宙線を用いた測定は一般的かつ有効な手法として知られており、検出器の基本性能を評価する標準的な方法の一つである。[28]

1.4 研究目的

強い相互作用に支配される高温・高密度状態であるクォーク・グルオンプラズマ (Quark-Gluon Plasma, QGP) の性質を解明することは、量子色力学 (QCD) の理解を深める上で重要な課題である。米国ブルックヘブン国立研究所の Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) において行われている sPHENIX 実験は、重イオン衝突によって生成される QGP を精密に測定することを目的としている。QGP の性質を明らかにするためには、生成された多数の荷電粒子の飛跡を高精度に再構成し、運動量や生成位置を正確に測定することが不可欠である。特に、低運動量粒子や衝突初期に生成された粒子の情報は、QGP の初期状態や輸送特性を理解する上で重要であり、その測定には高い位置分解能と検出効率を有する内部飛跡検出器が求められる。sPHENIX 実験において用いられる中間飛跡検出器 INTT (Intermediate Tracker) は、MVTX (MAPS based VerTeX Detector) と TPC (Time Projection Chamber) の間に配置されたシリコンストリップ検出器であり、高精度な位置情報および時間情報を提供することで、飛跡再構成性能の向上に寄与している。INTT の性能は、最終的な物理解析の信頼性に直接影響するため、その検出効率を正しく評価することが重要である。INTT ラダー単体については、これまでにテストビーム実験により高い検出効率が確認されている。しかし、実際の運用環境においては、読み出し回路、トリガー条件、ノイズの影響などが加わるため、パレル全体としての検出効率を実データに基づいて評価する必要がある。そこで本研究では、加速器ビームを用いない条件下で取得された

宇宙線データを用いて INTT の検出効率評価を行う。宇宙線データを用いて INTT バレルにおけるヒット検出効率を位置別に定量評価する。

第 2 章 sPHENIX 検出器

図 1.2 は sPHENIX 実験検出器の全体像である。sPHENIX 実験は、方位角方向に対して 2π の範囲を覆っている。構成は内側から、飛跡検出器群、電磁カロリメータ (EMCal)、内層ハドロンカロリメータ (iHCal)、ソレノイド磁石 (磁束密度 $B=1.4$ T)、外層ハドロンカロリメータ (oHCal) である。前方には、MBD (Minimum Bias Detector)、ZDC (Zero Degree Calorimeter)、sEPD (sPHENIX Event Plane Detector) が配置されている。衝突から発生した荷電粒子の飛跡を検出する飛跡検出器は、内側から MVTX (MAPS based VerTeX Detector)、INTT (INtermediate Tracking detector)、TPC (Time Projection Chamber)、TPOT (TPC Outer Tracker) の 4 つで構成されている。[13] [14]

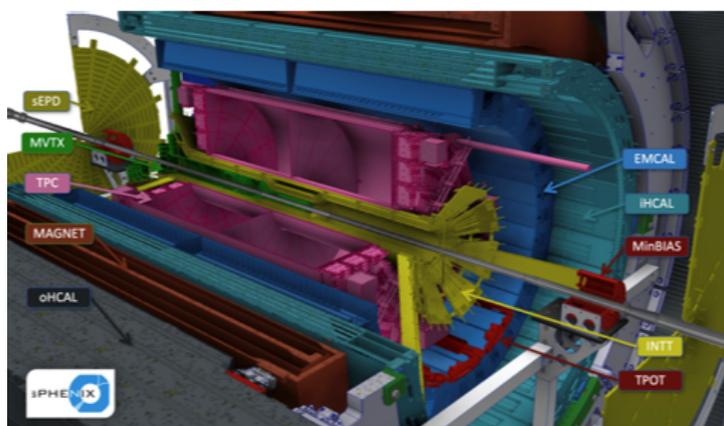


図 2.1: sPHENIX 実験の検出器.

2.1 Monolithic-Active-Pixel-Sensor-based Vertex Detector (MVTX)

MVTX は、3 つの飛跡検出器群のうち最内層で、ビーム軸から 2–6 cm に位置するピクセル型シリコン検出器である。衝突中心からビーム軸方向に ± 10 cm、方位角方向に対して 2π の範囲を覆っている。CERN の ALICE 実験で Monolithic Active Pixel Sensor (MAPS) 技術用に開発されたセンサー (ITS) に基づいている。ピクセルサイズは、 ϕ 方向に $29.24 \mu\text{m}$ 、 z 方向に $26.88 \mu\text{m}$ であり、3 層構造のバレル型検出器である。MVTX は衝突再構成が可能であり、衝突点と生成粒子の最近接距離を測定することで、ボトムクォーク由来のハドロン等を測定する役割を担う。[1] [14]

2.2 INtermediate Tracking detector (INTT)

INTT は、飛跡検出器群のうち MVTX と TPC の間に位置し、2 層のバレル状のシリコンストリップ検出器である。衝突中心からビーム軸方向に ± 23 cm、7–10 cm に位置し、方位角方向に対して 2π 、擬ラピディティ $|\eta| < 1.4$ の範囲を覆っている。図 1.3 は INTT をビーム軸に沿って半分にした断面図を表している。

INTT は位置分解能と時間分解能が高く、飛跡再構築において重要な役割を果たす。INTT は、56 本のラダーで構成されており、ラダーは電氣的に独立な 2 個のハーフラダーに分割できる。[1] [5]

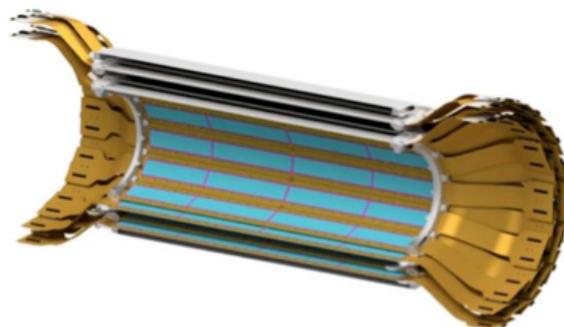


図 2.2: INTT 検出器を半分に分けた時の図。

2.2.1 シリコンセンサーラダー

INTT は全体で 56 本のラダーから構成されており、内層に 24 本、外層に 32 本のラダーが配置されている。各ラダーにはシリコンセンサーと読み出し電子回路が一体として搭載されており、電氣的に独立な 2 個のハーフラダーに分割されている。

図 2.3 に INTT ラダーの写真を示す。

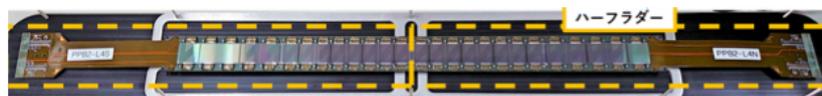


図 2.3: INTT ラダーの写真

2.2.2 シリコンセンサー

INTT には、ストリップ長の異なる 2 種類のシリコンセンサー (Type-A, Type-B) が採用されている。図 2.4 に、ハーフラダーに搭載されるシリコンセンサーの模式図を示す。シリコンセンサーの厚みは $320 \mu\text{m}$ である。

1 枚のシリコンセンサーは、複数の読み出しセル (cell) から構成されている。Type-A センサーでは $16 \text{ mm} \times 9.984 \text{ mm}$ のセルが 2×8 個、Type-B センサーでは $20 \text{ mm} \times 9.984 \text{ mm}$ のセルが 2×5 個配置されている。各読み出しセルは、シリコンストリップが並んだ構造を持ち、 ϕ 方向に 128 本のストリップに分割されているため、1 本あたりのストリップ幅は $\frac{9.984}{128} = 0.078 \text{ mm}$ である。Type-A と Type-B でセルの大きさおよび分割数が異なるのは、衝突点とセンサーとの距離の違いに起因するアクセプタンス差を補正し、空間的なカバレッジの偏りを緩和することを目的とした設計によるものである。[5]

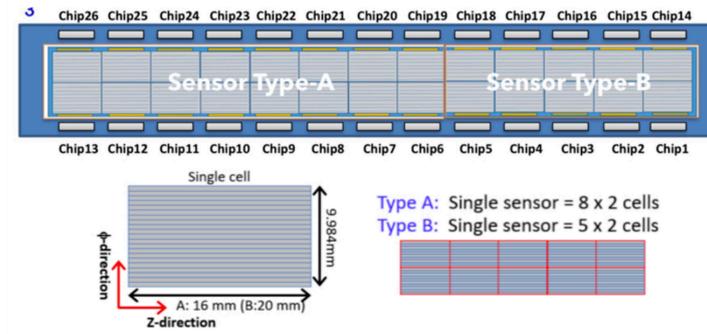


図 2.4: シリコンセンサーおよび FPHX チップの模式図

■cell・chip・channel の定義

各セルには 1 個の FPHX 読み出しチップが接続されており、FPHX チップ 1 個が 128 個の読み出しチャンネルを有する。

本研究では、

- 読み出しセルに接続された FPHX を *chip*
- 各ストリップに対応する読み出し単位を *channel*

と呼ぶ。

以上より、INTT における読み出し構造は、

ladder → half-ladder → cell → chip → channel

という階層構造を持つ。

2.3 Minimum Bias Detector (MBD)

MBD は、2000 年から 2016 年まで行われた PHENIX 実験において使用されていた Beam-Beam Counter (BBC) を再利用したものであり、sPHENIX 実験における主要な minimum bias トリガーをトリガー統括回路に提供する。図 2.1 に MBD の写真を示す。

重イオン衝突における高効率なトリガーおよび $|z| < 10$ cm 以内の衝突を選択するためには、vertex z 座標に対する分解能が求められる。MBD では、相互作用点の前後（北・南）に配置された検出器における信号到達時間差を用いて、トリガー用途の Z-vertex を推定する。

なお、MBD には BBC を読み出す電子回路をアップグレードしたものが用いられている。[14]



図 2.5: MBD の写真

2.4 Time Projection Chamber (TPC)

TPC は、飛跡検出器群のうち最外層でビーム軸から 20–78 cm に位置する Ne-CF₄ 混合ガスで満たされた検出器で、衝突中心からビーム軸方向に方位角 η 方向に対して 2π の範囲を覆っている。ゲートレス方式のストリーミング読み出し回路を持ち、36 枚の読み出しパッドで構成される。TPC は高い位置分解能を有し、荷電粒子の運動量測定において中心的な役割を担う。[1] [14] [15]

2.5 ElectroMagnetic Calorimeter (EMCal)

EMCal は、ソレノイド磁石の内側に位置する電磁カロリメータであり、方位角 η 方向に対して 2π の範囲を覆っている。シンチレーションファイバーが埋め込まれたタングステン粉末で作られた 64 セクターで構成される。図 2.2 に示すように、1 セクターあたり 96 個のモジュールが含まれる。EMCal の最小の厚さは、放射長 X_0 を用いて 18 であり、通過粒子とタングステン粉末の相互作用により電磁シャワーを起こし、シンチレーションファイバーで検出した光を信号として読み出すことで、電子光子のエネルギーを測定する役割を果たす。[14]



図 2.6: EMCal の 1 セクターを示した図

2.6 Hadronic calorimeter (Hcal)

HCal は、図 1.4 に示すように、ソレノイド磁石と EMCal の間に位置する iHCal (inner Hadronic Calorimeter) と、ソレノイド磁石の外側の oHCal (outer Hadronic Calorimeter) の 2 つの検出器で構成され、方位角 η 方向に対して 2π の範囲を覆っている。oHCal の半径は 270cm。iHCal の半径は 182cm である。また、銅板

(吸収体) とシンチレータータイル (活性媒質) の交互に積層されて構成されている。EMCal に比べて iHCal、oHCal の厚みはそれぞれ相互作用長は $1.0 \lambda_I$, $3.5 \lambda_I$ と長い。Hcal は電磁カロリメーターで測定が難しいハドロン (電氣的に) 中性な粒子のエネルギー測定に用いられる。今回の宇宙線検出ではトリガーの役割を果たしている。[14]

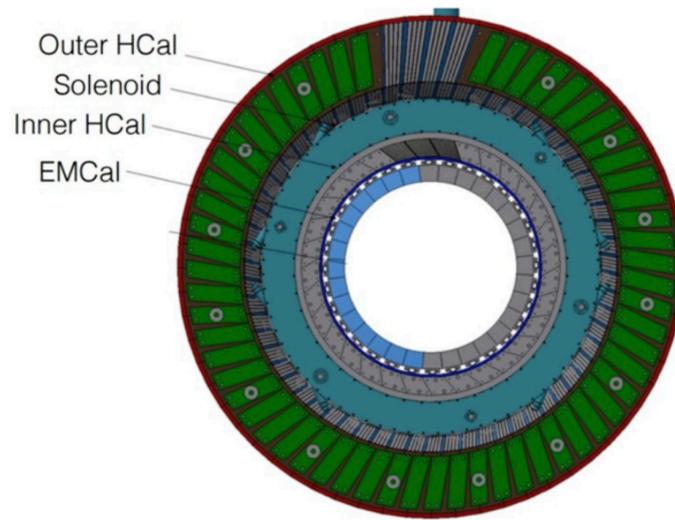


図 2.7: sPHENIX 検出器カロリメーターサブシステムの断面図.

第 3 章 宇宙線解析

3.1 宇宙線測定

本研究では、宇宙線ミュー粒子によるトラックを用いて中間飛跡検出器 INTT の検出効率を評価する。また宇宙線データ取得においては、主として oHCal を用いたトリガー情報を利用する。本章では、sPHENIX を構成する主要な検出器の概要と、本研究で特に用いる INTT の構造および読み出し単位について述べる。

3.2 宇宙線データセット

本解析では、モンテカルロシミュレーションデータと、run 39493 から run 58915 までのうち 171 run の実データを用い、両者の比較を行った。どちらも磁場なしデータである。

3.2.1 シミュレーションデータ (MC)

宇宙線シミュレーションデータでは、ミュー粒子を検出器上方の位置から打ち込み、ほぼ斜め下方向へ進むように設定している。生成点（発生点） \vec{r} と運動量 \vec{p} は、

$$\vec{r} = (-20, 20, 10) \text{ cm}, \quad (3.1)$$

$$\vec{p} = (1, -1, 0.5) \text{ GeV}/c \quad (3.2)$$

で与えられる。これは、 $y = 20 \text{ cm}$ 付近の上方から、 x 方向にも z 方向にも成分を持つ斜めの方向へミュー粒子が通過する状況を模擬している（したがって、垂直入射だけでなく、斜めに入射するトラックに対する検出器応答も評価できる）。

3.2.2 実データと run trigger

本解析では、run およびトリガー情報を用いてデータを選別した。

宇宙線イベントはビーム衝突イベントと粒子分布が大きく異なるため、専用のトリガーで効率よく測定を行う必要がある。oHCal を用いた宇宙線トリガーモードは、大きく 3 種類に分けられる。1 つ目は oHcal single hit である。このモードでは OHcal に 1 つでも hit があればトリガーが発行され、そのイベントが記録される。2 つ目は oHcal vertical/horizontal coincidence である。このモードでは OHcal の上下、もしくは左右に同時に hit が検出されたイベントのみが記録される。3 つ目は oHCal vertical/horizontall narrow coincidence である。このモードでは決まった 2 つの領域に同時に hit が検出されたイベントのみが記録される。

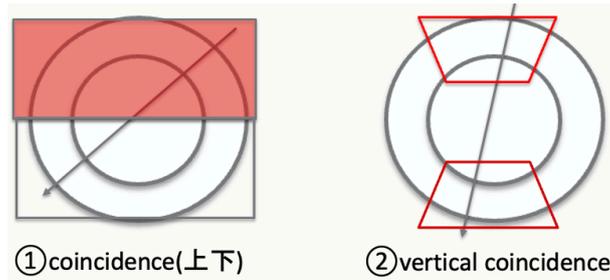


図 3.1: oHcal トリガーの図解。① oHcal coincidence 設定は oHcal 上下でヒットがあった時トリガーがでる。②Hcal vertical coincidence では oHcal 上下の限られた領域にヒットがある場合、トリガーが出る

トリガーとしては、OHcal vertical coincidence トリガーのみを使用した。このトリガーには、wide および narrow の 2 種類が存在する。

vertical coincidence トリガーは、HCal の xy 平面において、

$$\frac{\pi}{4} \leq \phi \leq \frac{3\pi}{4}, \quad -\frac{3\pi}{4} \leq \phi \leq -\frac{\pi}{4} \quad (3.3)$$

の角度範囲で同時にヒットが検出された場合に発生する。さらに、 z 方向の条件として、narrow トリガーでは -17-17 tiles の範囲、wide トリガーでは -24-24 tiles の範囲内でヒットが存在する場合に、トリガーが発行される。wide と narrow の違いは、 z 方向のヒット許容範囲のみである。

3.2.3 データ選定

本解析は 2 つのステップから構成される。最初のステップでは INTT のすべてのクラスターを使ったフィッティング解析結果を求めた。出力する解析量は、各クラスタとフィット線の最短距離 D (xy 成分および z 成分)、再構成したトラック、検出位置座標、評価対象バレルの番号 (以降、テストバレル番号) などである。テストバレル番号は INTT の内外のバレルごとに $y > 0$, $y < 0$ の上下の 4 つに分け、クラスターが位置する領域で図 3.2 のように番号を割り振った。本研究ではイベントディスプレイを目視でも確認し、イベント選定を行った。

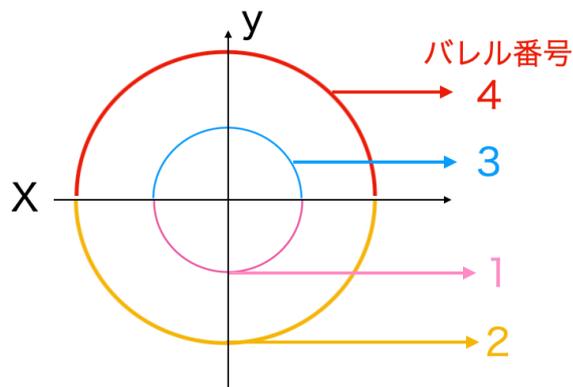


図 3.2: テストバレル番号の定義 1. は INTT の内層バレルの下半分 2. 外層バレルの下半分 3. は内層の上半分 4. は外層の上半分 を示す。

次のステップでは、図 3.2 に示すように、INTT の特定の領域を使用しない解析を行った (以降、この操作を「あるバレルをマスクする」と表現する)。評価対象となる領域をテストバレルと呼び、テストバレル番号 1

～4 のすべてについて解析を行った。図 3.2 に示す通り、各バレルと番号は色分けして対応させている。3.3 はテストバレルが 4 の模式図である。このステップでは、テストバレル 4 以外に位置するクラスター（黒点）を用いてフィット線（黒線）を再構成した。そのフィット線とクラスターとの距離差を、最短距離 D として求めた。

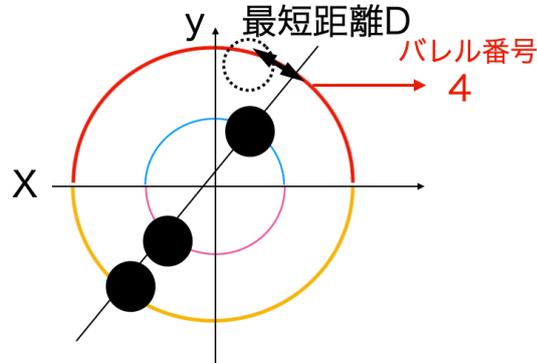


図 3.3: テストバレルを 4 とした場合のトラックとクラスターの最短距離 D の模式図。

3.2.4 クラスタリング

検出器に宇宙線が通った場合、複数の channel にわたって通過する。この時、ヒットが各 channel に分かれてデータとして記録されるため、別々に記録されたヒットを 1 つの飛跡としてまとめる必要がある。隣接したチャンネルでヒットがあった場合には、複数チャンネルの位置平均をクラスター位置を算出する。本解析ではヒット選定の後、再度クラスタリングを行った。[5]

3.3 ヒット選定

本章では、本研究における解析の信頼性を確保するために実施したノイズ除去手法について述べる。宇宙線データには、検出器固有のノイズや読み出し系に起因する不要な信号が含まれており、これらを適切に除去しなければ、後続の解析結果に系統的な影響を与える可能性がある。

本研究では、チャンネルごとのヒットレートに基づく選別を行い、異常に高いヒット率を示すチャンネルをノイズチャンネルとして除去した。この処理により、物理的に意味のあるクラスターのみを用いた解析が可能となり、以降のイベント選定およびトラック再構成の基盤となるデータ品質を確保した。

3.3.1 宇宙線データの傾向

複数のプロットにおいて、同一位置にヒットが繰り返し現れることを目視で確認した。このことから、当該チャンネルをノイズ起因と仮定した。

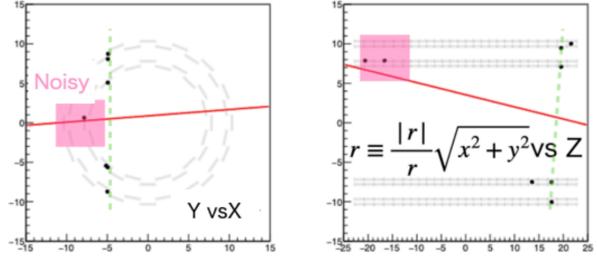


図 3.4: ノイズヒットを含む宇宙線イベントディスプレイ. 左は xy 平面からみたクラスターの分布図. 右は rz 平面からみたクラスターの分布図である. ただし r は x と y の半径である. クラスターは黒点. INTT の位置は灰色で示されている. 赤線は実際のトラック線である. 緑の線は理想的なトラック線. ピンクの枠は理想的なトラックから外れたクラスターを示す.

3.3.2 ホットチャンネルの定義

INTT は多数のシリコンストリップ (channel) から構成されており, 宇宙線測定のような低多重度環境では, ごく少数の異常チャンネル (ホットチャンネル) が解析結果に与える影響が大きい. そこで本研究では, チャンネルごとのヒットレートをを用いてホットチャンネルを定義し, 解析から除外した.

解析対象ラン集合を \mathcal{R} , ラン $r \in \mathcal{R}$ に含まれるイベント数を $N_{\text{evt}}^{(r)}$ とする. チャンネルにおいて, ラン r で観測されたヒット数を $N_{\text{hit}}^{(r)}(i)$ とすると, チャンネルのヒットレートを

$$h(i) = \frac{\sum_{r \in \mathcal{R}} N_{\text{hit}}^{(r)}(i)}{\sum_{r \in \mathcal{R}} N_{\text{evt}}^{(r)}} \quad (3.4)$$

で定義する.

このとき, 閾値 h_{th} を導入し,

$$h(i) \geq h_{\text{th}} \quad (3.5)$$

を満たすチャンネルをホットチャンネルと定義する. [5]

3.3.3 ノイズチャンネルの除去

INTT はシリコンセンサー内の熱的なノイズが非常に少ないことが知られている (杉山さん論文). 金・金衝突のようにイベントあたりの粒子多重度の高い測定では, 多少のノイズはデータ解析に大きな影響を与えない. 一方, 宇宙線測定では粒子多重度が低いため, ノイズの混入が致命的になりうる. そのため本研究では宇宙線イベントに最適化したノイズ判定アルゴリズムを開発し, ノイズを可能な限り除去した. チャンネルごとにイベントあたりのクラスタ数を集計し, ヒットレートとしてノイズ判定に用いた.

宇宙線が 4 つの INTT を貫いたとすると, 典型的には 4 つのクラスターが生成される. 各クラスターが 1~2 のヒットで構成されるなら, 1 イベントあたり 4~8 のヒットが期待される.

一方, INTT は多数のシリコンストリップから構成されており, 全チャンネル数は約 4×10^5 (387,072) である. そのため, 1 イベントあたりに生成される 4~8 個程度のヒットは全チャンネルに対して非常に疎であり, チャンネルあたりのヒット数期待値は,

$$\frac{4-8}{4 \times 10^5} \sim (1-2) \times 10^{-5} \quad (3.6)$$

となる. 図 3.5 では run58915 のチャンネルあたりのヒット数分布を示す. 図中の赤・青・緑の線は, それぞ

れヒットレート 0.0005、0.00041、0.00035 を表す。この分布を基に、0 付近のピークを保持しつつノイズを除去できる閾値として 0.0005、0.00041、0.00035 を設定し、結果を比較した。

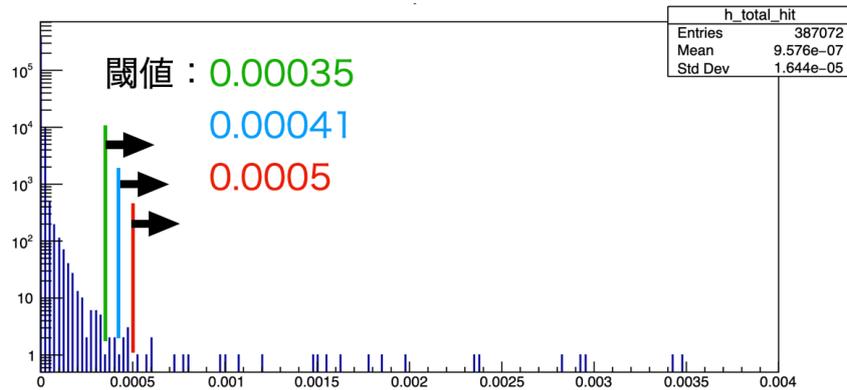


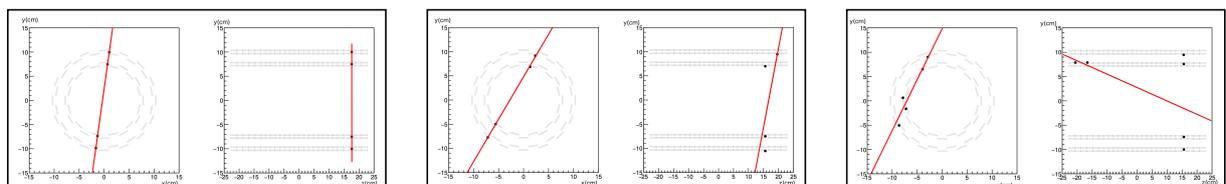
図 3.5: ノイズチャンネル判定閾値の決定. 縦軸はチャンネル数、横軸は 1 イベントでのチャンネル単位のヒット数である. 緑は 0.00035. 青は 0.00041. 赤は 0.0005 の位置を示す.

ノイズカット閾値を適用したイベントディスプレイ (図 3.6) には黒点がクラスター、赤線が再構成した宇宙線のトラックである。トラックは、 x, y, z 座標を用い、

$$y = ax + b, \quad z = cx + d \quad (3.7)$$

で表される直線として定義した。トラッキングでは、イベント内のすべてのクラスターを同一の直線で結び、そのときのフィットにより得られる傾きおよび切片に対して χ^2 が最小となる直線をフィット線として採用した。

INTT のバレルの設計図での位置を灰色で示し、 x - y, z - y のイベントディスプレイをそれぞれ示す。イベントディスプレイに 3 パターンの傾向が見られた。図 3.6 (a) トラッキングに成功したイベント、(b) はフィット線から外れた 1 点が存在するためトラッキングに失敗したイベント、(c) はクラスター数が多くトラッキングに失敗したイベントである。以降の解析では、トラッキングに成功したイベントのみを用いる。



(a) トラッキング構成に成功したイベント.

(b) トラッキング構成に失敗したイベント.

(c) 宇宙線由来以外のクラスターを含み、構成されたイベント.

図 3.6: INTT を x - y, y - z 方向から見たイベントディスプレイ.

図 3.1 は 3 種類のノイズカット閾値のデータでの解析結果を比較したものだ。これらの結果から、トラッキング成功率が最も高い 0.00041 がノイズカット閾値として妥当である。

ホットチャンネル判定の閾値 (ヒットレート)	1.0	0.0005	0.00041	0.00035
イベント数	40,106			
ノイズカット後のイベント数	1620	582	582	581
ホットチャンネル数	4	62	68	73
トラッキング成功率	2%	48%	63%	55%

表 3.1: run 58915 における閾値とトラッキング成功率の比較

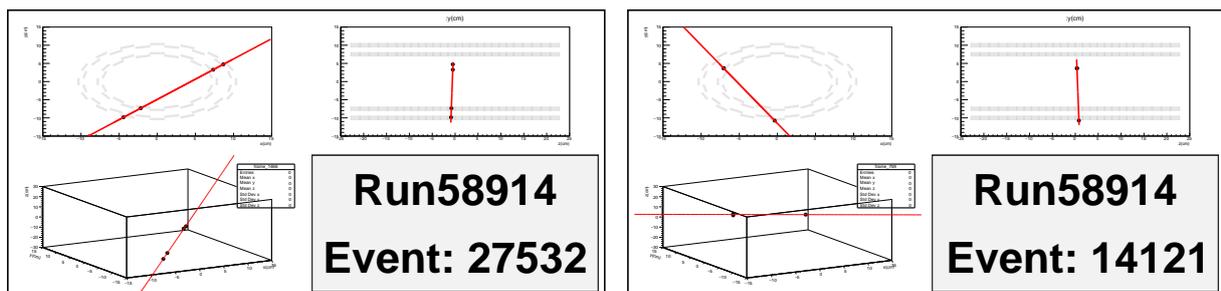
3.4 イベント選定

本章では、宇宙線実データを用いたイベント選定について述べる。自動的な条件選定のみでは、幾何学的に不整合なイベントや再構成が不安定なイベントが解析に含まれる可能性がある。

そこで本研究では、イベントディスプレイを用いた目視確認を行い、おかしなイベントの特徴を分類・整理した。さらに、その特徴を定量的な条件として解析コードに反映することで、異常イベントを系統的に除去した。

● 重複クラスター

条件 1~6 を満たしたイベントはすべてフィットに成功したが、イベントディスプレイには 2 種類の傾向が見られた。(x,y,z) の 3 次元フィット線を赤で示し、実測点を黒点、INTT のバレルの設計図での位置を灰色で示す。ただし、z-y 図ではバレルの頂点と底面にあるラダーのみを書いてある。x-y,z-y のイベントディスプレイを図の上部の左右にそれぞれ示した。また、図の下部には左は 3 次元のイベントディスプレイ、右にはランとイベント ID を示した。図 3.7(a) のように多くのイベントでは、3 点以上のクラスターが存在することを目視で確認した。しかし、図 3.7(b) のようなごく一部のイベントは目視では 2 点しかクラスターが確認できなかった。



(a) 3 点以上クラスターを持つイベント

(b) 重複クラスターを持つイベント

図 3.7: x-y 平面,z-y 平面,3 次元でみたイベントディスプレイ.

2 点あるが、重複して 1 点のように見えるため、本研究では後者を重複クラスターと呼ぶ。各クラスターの距離差をそれぞれの x,y,z 座標を使って $\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$ を求めた。図 3.8 に距離差の分布を縦軸対数で示す。

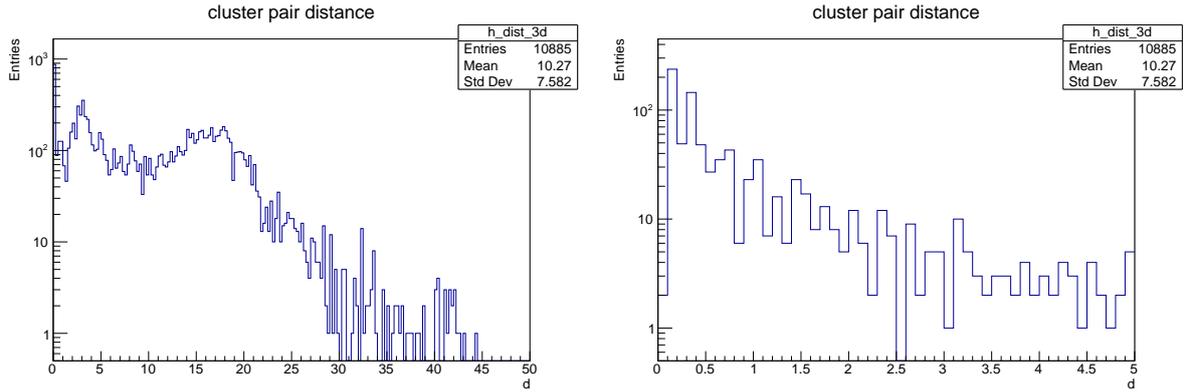


図 3.8: 左図: 2つのクラスター間の距離差の分布. 右図: 左図の拡大図.

INTT はビーム軸 (z 軸) に沿った円筒状構造を持つパレル型検出器である。その幾何学的形状から、測定可能な範囲は xy 平面において直径約 20 cm, z 方向において全長約 40 cm に制限される。このため、INTT によって再構成されるヒット位置および予測点の座標は、

$$\sqrt{(20 \text{ cm})^2 + (40 \text{ cm})^2} = 44.7 \text{ cm} \quad (3.8)$$

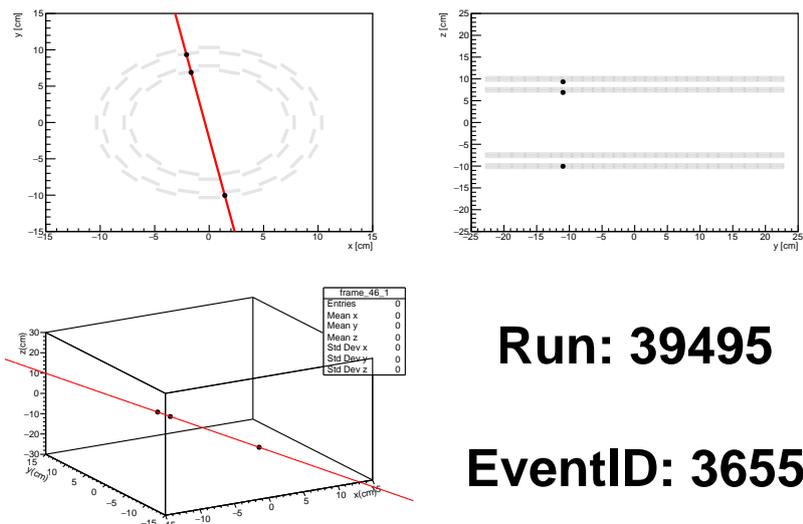
の範囲内に分布することが期待される。

実際に得られたヒストグラムでは、 z 方向の値は最大で約 45 cm までしか存在しておらず、これは INTT における測定可能な z 方向の最大長を、小数点以下を四捨五入した値 45 cm と一致している。このことは、解析に用いた座標計算およびヒストグラム作成の処理が、INTT の幾何学的な制約を正しく反映していることを示しており、コードが意図したとおりに動作していることを示す証拠の一つである。また、パレルの直径である 20 cm あたりで分布が急速に落ち込む。

図 3.8 の右図はでピークを細かく見るために 0–5.0cm を表示範囲としたものである。重複クラスターは非常に近い場所に複数クラスターが集中する現象である。このことから、図 3.8 からは 0–0.1cm の間に見られた小さなピークを除去した。このように距離差の 0.1cm 以下のクラスターを持つイベントを除外することで重複クラスターを取り除いた。

● クラスター非検出イベント

図 3.9 のように、3 点のみクラスターを持つイベントが存在した。本研究ではこれをクラスター非検出イベントと呼ぶ。宇宙線がラダー間やシリコンセンサーの不感領域を通過するとヒット非検出イベントになりうる。ヒットが無いことの計数はヒットがあるときとは異なるアルゴリズムを用いて行う。

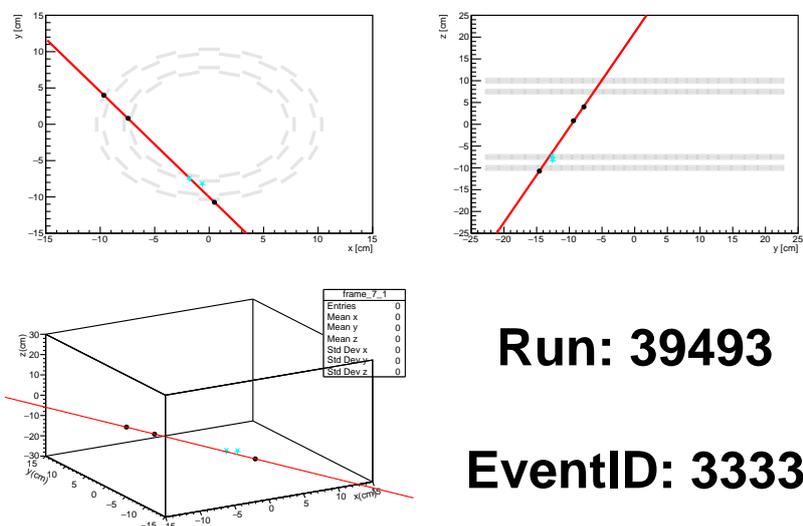


Run: 39495
EventID: 3655

図 3.9: クラスター非検出イベント：テストバレルの上にクラスターがないイベント。

● 多重テストクラスターイベント

図 3.10 のようにテストバレル上に複数のクラスターを持つイベントが見受けられた。このイベントを多重テストクラスターイベントと呼ぶ。テストバレル上の点は水色の星、それ以外のクラスターは以前と同様に黒点で表している。テストバレルに 2 点のクラスターが存在する場合、1 つのトラックに対して 2 回の評価が行われる。すると、検出効率の計算アルゴリズムが煩雑になるため、本研究では解析から除外した。



Run: 39493
EventID: 3333

図 3.10: 多重テストクラスターイベント：テストバレルに 2 個クラスターがあるイベント。

● 全ラダー通過イベント

図 3.11 のような 4 つのバレルを貫通するイベントのみを解析に用いる。そのため、以下のような様々な条件を課した。

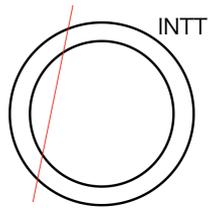


図 3.11: 全ラダー通過イベント.

- イベント内のクラスター数が3つ以上であること
 全てのバレルを通るトラックを持つイベントを対象に解析を行うため、3つ以上のクラスターを持つイベントのみを残す条件を課した。
- INTT を上下に貫くトラックの要求
 図 3.12 のようなイベントは1部のバレルしか通らないため、除去した。y 座標が正負のクラスターを両方持つことを条件として課した。

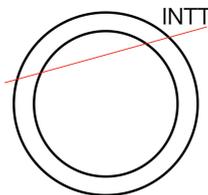


図 3.12: 全バレルを突き抜けないイベント

- 内層バレルと外層バレルを貫くトラックの要求
 図 3.13 のような外層のバレルしか通らないイベントを除去した。具体的には内層と外層の両方にクラスターを持つイベントだけを残した。

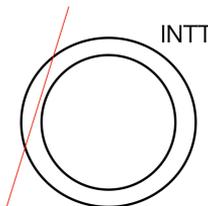


図 3.13: 内層を突き抜けないイベント

このようなイベントカットを行うことで全てのバレルを通るイベントを厳選した。物理的に妥当なトラックのみを用いた検出効率評価を可能にした。

3.5 トラック選定

検出効率評価では、テストバレル上のクラスターを除いて宇宙線トラック再構成を行った。 $\frac{\chi^2}{\text{NDF}}=1$ でフィットが出来ていると一般的に言われている。また、 χ^2 が小さくなるにつれてフィット線と複数のフィット対象の総距離差が小さくなる。そこで、本研究では χ^2 の用いて、宇宙線トラックの厳選を行った。自由度 (NDF) は、

$$\text{NDF} = (\text{クラスタ数}) - (\text{パラメータ数})$$

で定義される。本解析では、 y 成分および z 成分のフィットにおいてそれぞれ 2 つのパラメータを用いているため、

$$\text{NDF}_y = \text{NDF}_z = \text{NDF} = (\text{クラスタ数}) - 2 \quad (3.9)$$

となる。しかし、今回はクラスタ数=3~4、パラメータ数=2 (図 3.5 より) であることから NDF が 1 または 2 となるため、本研究では χ^2/NDF は用いず、 χ^2 のみで評価した。また、フィットに用いた関数は以下の通りである。

$$\begin{aligned} f_1(x_i) &= y'_i = ax_i + b, \\ f_2(x_i) &= z'_i = cx_i + d \end{aligned} \quad (3.10)$$

ここで、式中のパラメータの意味は以下の通りである。

- δ : 位置の測定誤差
- i : クラスタ番号
- (x_i, y_i, z_i) : クラスタの測定位置
- (x_i, y'_i, z'_i) : トラック上の予測位置
- $\delta y_i = 0.032 \text{ cm}$
- $\delta z_i = 1.6 \text{ cm}$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - y'_i)^2}{(\delta y_i)^2} + \sum_{i=1}^N \frac{(z_i - z'_i)^2}{(\delta z_i)^2} \quad (3.11)$$

を活用した。 χ^2 は、各クラスタに対して、実測点とフィット関数から得られる予測点との差を評価し、その二乗和を測定誤差で重み付けした量として定義される。したがって、 χ^2 の値が小さいほど、フィット関数が実測データを良く再現している。すなわちフィットが良好であると判断できる。

図 3.14 は χ^2 をクラスタ数で割った値のヒストグラムである。縦軸は log 表記にしている。全体の傾向見たいため、この解析では 171 run を使用した。

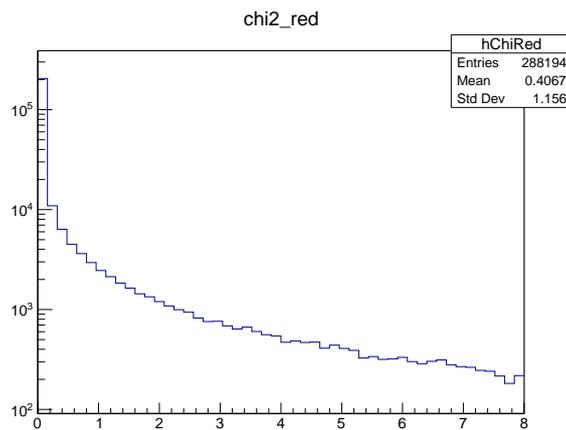


図 3.14: トラックごとの χ^2 値の分布図.

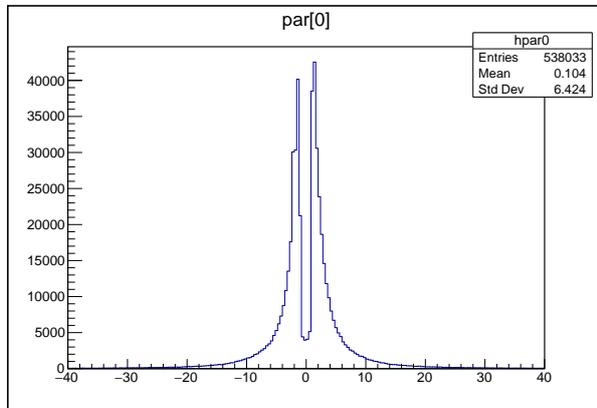
図 4.9 に示す χ^2 分布では、 $\chi^2 \simeq 0.2$ 付近にピークが確認された。ここでピークとは、ヒストグラムにおいて事象数が最も多い領域を指す。

このピーク構造を十分に保持しつつ、明らかに外れた事象を除去するため、本解析では

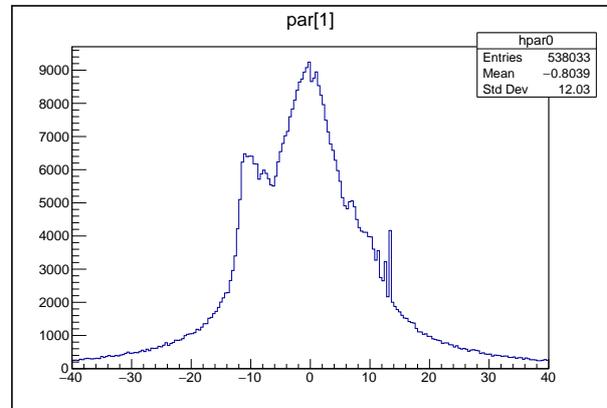
$$\chi^2 < 0.005$$

をフィットの閾値として採用した。

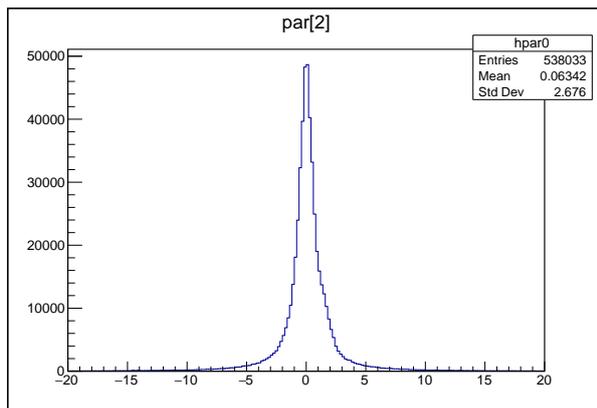
フィット閾値適用前後のフィッティングパラメータ分布をそれぞれ図 3.15 と 図 3.16 に示す。



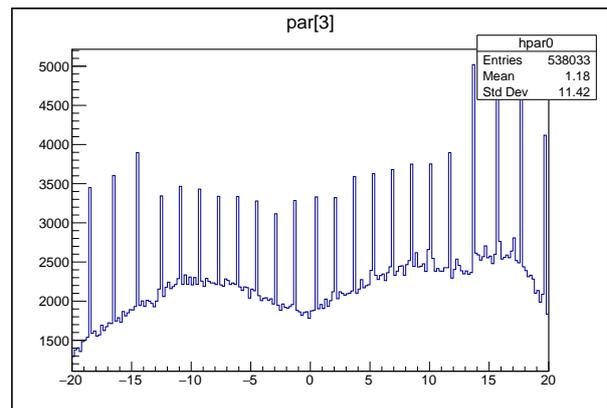
(a) 傾き a の分布



(b) 切片 b の分布

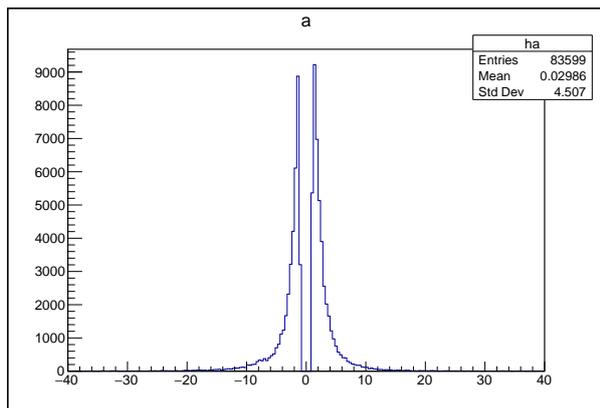


(c) 傾き c の分布

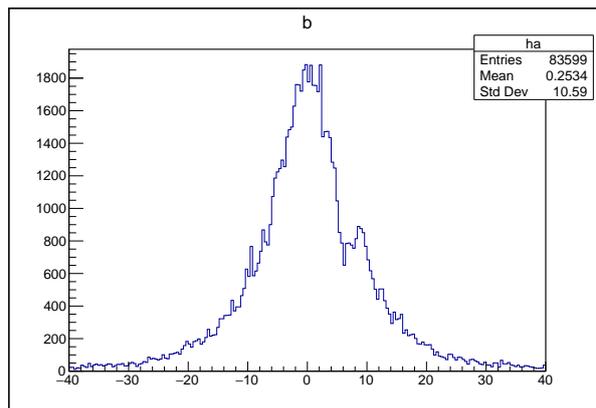


(d) 切片 d の分布

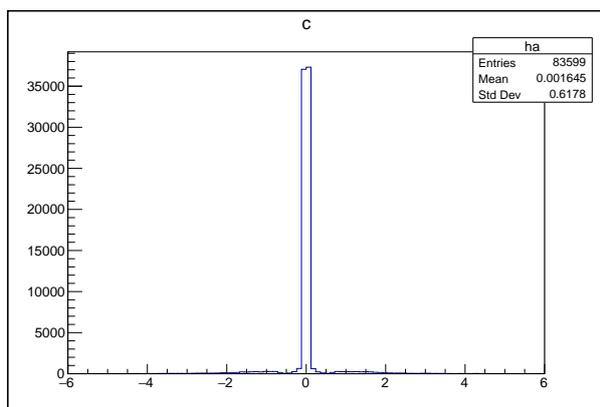
図 3.15: フィット閾値を適用する前のトラックごとのパラメータ分布



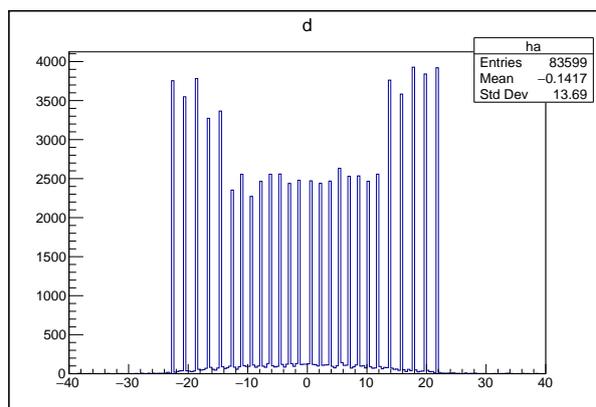
(a) 傾き a の分布



(b) 切片 b の分布



(c) 傾き c の分布



(d) 切片 d の分布

図 3.16: フィット閾値を適用した後のトラックごとのパラメータ分布

これらの結果から、フィット閾値を適用するとパラメータ分布が大きく変化することが分かった。また、図 3.16 の (d) の結果では、チップの位置にピークが立っていることがわかった。

3.6 検出効率算出方法

テストバレル上のクラスター毎にフィット線上の予測点と宇宙線トラックの最短距離 D を求めた。定義は下記の式の通りだ。

$$\begin{aligned}
 \hat{v} &= \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|}, \\
 \mathbf{r}_{\parallel} &= \frac{\Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{|\mathbf{v}|^2} \mathbf{v}, \\
 \mathbf{r}_{\perp} &= \Delta \mathbf{r} - \mathbf{r}_{\parallel}, \\
 D &= |\mathbf{r}_{\perp}|.
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

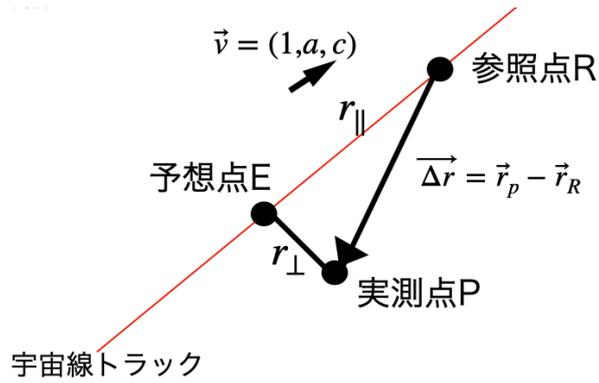


図 3.17: 最短距離 D の定義

最短距離ベクトル r_{\perp} を成分を xy, z 成分に分けた。図 3.18、3.19 実測点と同じ x 値 ($=x_0$) を持つ参照点を赤線のフィット線上に作り、ヒット測定点 P からトラックへの垂直ベクトルを使って D を求めた。 D を xy 成分、 z 成分に分けヒストグラムに表した。

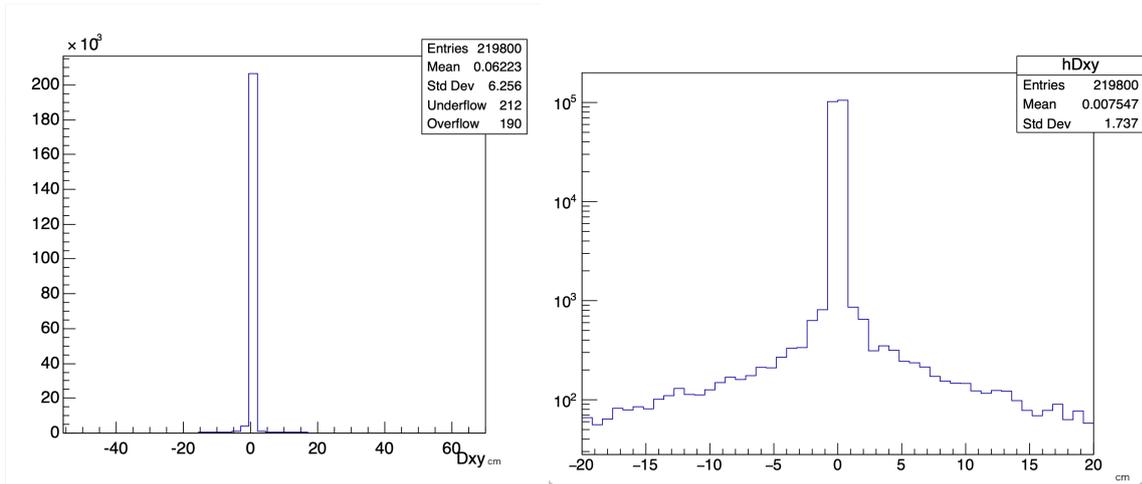


図 3.18: 左図: ラスターごとの最短距離 D の分布図. 右図: 左図の log 表記

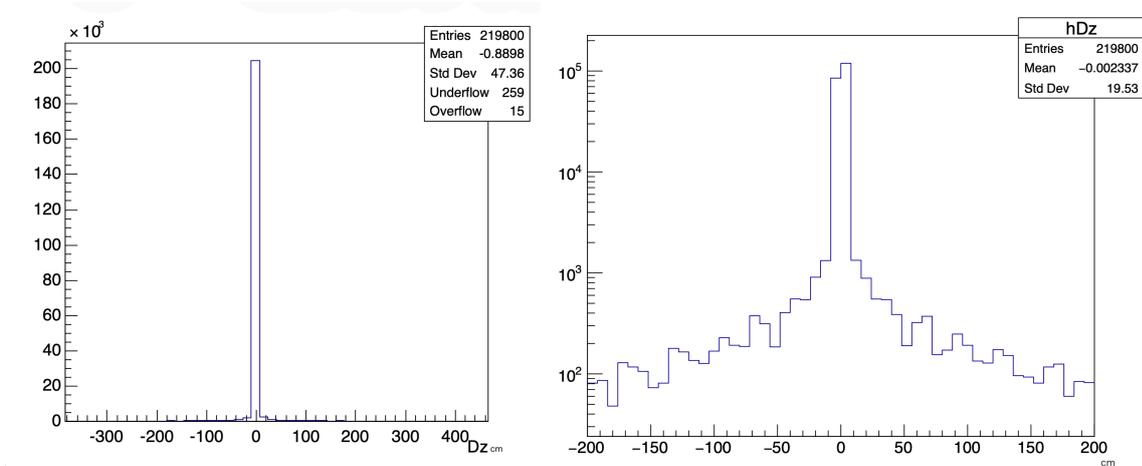


図 3.19: 左図: クラスターごとの最短距離 Dz の分布図. 右図: 左図の log 表記

図 3.19 と図 3.18 からは平均値 (mean) はほぼ 0 である。しかし、それぞれを log 表記した図 3.20 からはとても大きな値を持つものが存在することがわかった。

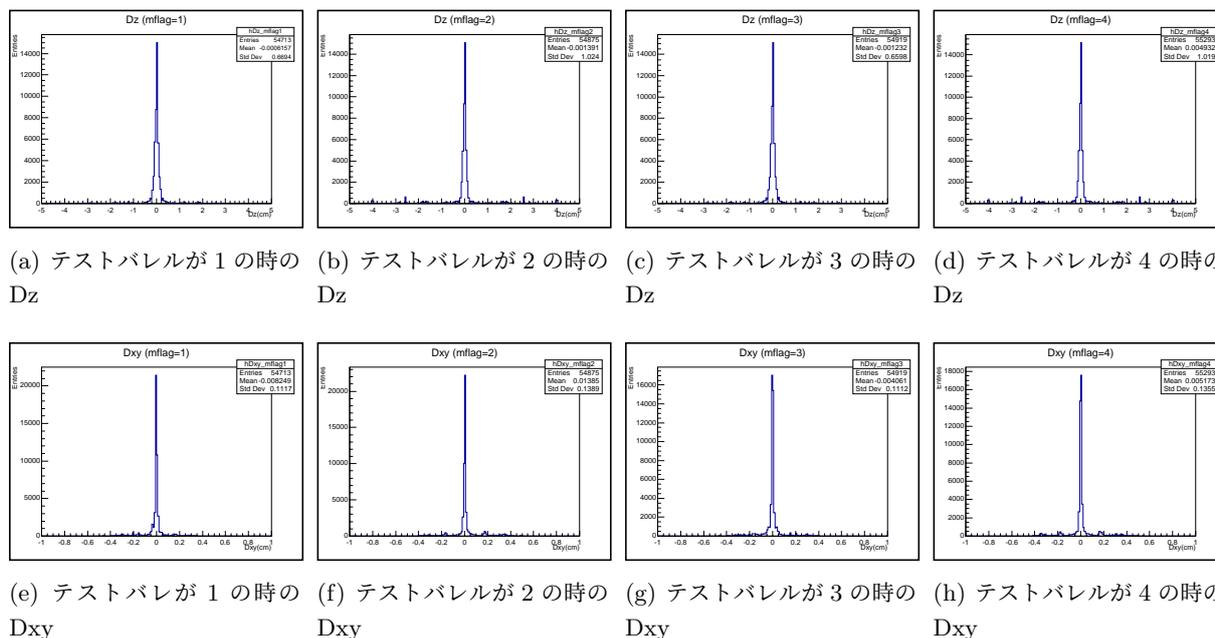


図 3.20: テストバレルごとの各クラスターの Dz および Dxy 分布

図 3.20 の結果では、平均値は 0 に近い値が出た。しかし、図 3.20 の (c) の分布図の範囲を広げ、log 表示したのが図 3.21 である。ここでの平均値は 0 から大きくマイナス方向に偏っていた。

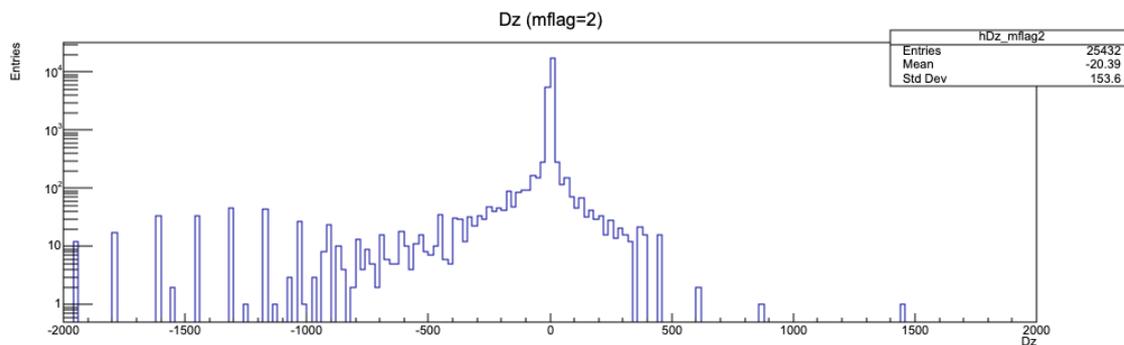


図 3.21: 図 3.20(c) の log 表記

3.7 解析手法

■**ヒット選定** ヒットレートが 0.00041 以上のチャンネルのみを使用し、クラスタリングを行った。

■**イベント選定** 以下の条件をすべて満たすイベントを選定した。

1. イベント内のクラスタ数が 3 以上であること
2. $y > 0$ および $y < 0$ の両領域にクラスタを持つこと
3. Inner 層および Outer 層の両方にクラスタを持つこと

4. 2つのクラスタ間の距離差が 0.1 cm 以上であること
5. クラスタ非検出イベントを追加すること
6. 多重テストクラスタイベントを除外すること

■トラック選定 さらに、以下の条件をトラックに課した。

1. フィット閾値

■検出効率を求める際に課す条件

1. $D_{xy} < 0.1 \text{ cm}$ かつ $D_z < 1.1 \text{ cm}$ を満たすこと

本解析では、最短距離 D を xy 平面内の距離 D_{xy} および z 方向の距離 D_z を定義した。

$$D_{xy} < 0.1 \text{ cm}, \quad D_z < 1.0 \text{ cm}. \quad (3.13)$$

解析結果は ROOT ファイルとして出力し、検出効率 ε を検出効率を求める際に課す条件を満たす場合、 N_{pass} のみに加算し、

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{pass}}}{N}$$

として求めた。 $D_{xy} < 0.1 \text{ cm}$ はストリップ幅 (約 $80 \mu\text{m}$) に対して約 10 チャンネル分に相当し、予測位置とクラスタ位置の対応を許容する範囲として設定した。また $D_z < 1.0 \text{ cm}$ は、クラスタリングが 1 チップ単位で行われることを考慮し、1 チップ分の位置ずれを許容する条件として定義した。

第 4 章 宇宙線測定データの解析結果と考察

本章では、前章までに構築した解析手法を用いて、INTT の検出効率を算出する。検出効率は、本研究の最終的な評価指標であり、解析手法全体の妥当性を反映する量である。

また、本研究で得られた実データにおける検出効率は、モンテカルロシミュレーションと比較して低い値を示した。そこで本章では、検出効率の算出に加え、この効率低下が解析手法の不備によるものではなく、宇宙線の入射角分布や検出器の幾何構造に起因するものであることを、先行研究および関連する知見を用いて検証する。

4.1 検出効率算出方法

■実データ解析における条件 本章では、第 3 章および第 4 章で導入した全ての解析条件を整理し、最終的に検出効率算出に用いた条件をまとめる。

1. 実データ解析に関する条件

- ヒットレートが 0.00041 以上のチャンネルのみを使用し、クラスタリングを行った。

2. イベント選定に関する条件

- イベント内のクラスタ数が 3 以上であること
- $y > 0$ および $y < 0$ の両領域にクラスタを持つこと
- Inner 層および Outer 層の両方にクラスタを持つこと
- 2 つのクラスタ間の距離差が 0.1 cm 以上であること
- 多重テストクラスタイベントを除外すること

3. トラック選定に関する条件

- 以下の条件を満たすトラックのみを解析に用いた。

$$\sum_i \frac{(y_i - f_1(x_i))^2}{(\delta y_i)^2} + \sum_i \frac{(z_i - f_2(x_i))^2}{(\delta z_i)^2} < 0.005$$

4. 検出効率を求める際に課す条件

- $D_{xy} < 0.1 \text{ cm}$ かつ $D_z < 1.1 \text{ cm}$ を満たすこと

前章で述べた様々なカットを適用させた。1-3 を課したクラスタ数を N 、1-4 を課すクラスタ数を N_{pass} とした。

4.2 検出効率解析結果

	REAL>Data				MC			
	バレル 1	バレル 2	バレル 3	バレル 4	バレル 1	バレル 2	バレル 3	バレル 4
χ^2	1.0				0.005			
ε	79.82 ± 0.3%	67.53 ± 0.3%	82.11 ± 0.3%	70.80 ± 0.3%	96.87 ± 0.04%	96.94 ± 0.04%	98.20 ± 0.04%	97.74 ± 0.04%

表 4.1: MC および実データにおけるバレル別の検出効率

シミュレーションデータでの検出効率の高さから、実測データの検出効率は低いことがわかった。

4.3 位置別の検出効率解析結果

次に求めた検出効率が xy 平面の位置によってどう分布するかを図 4.1 で示した。

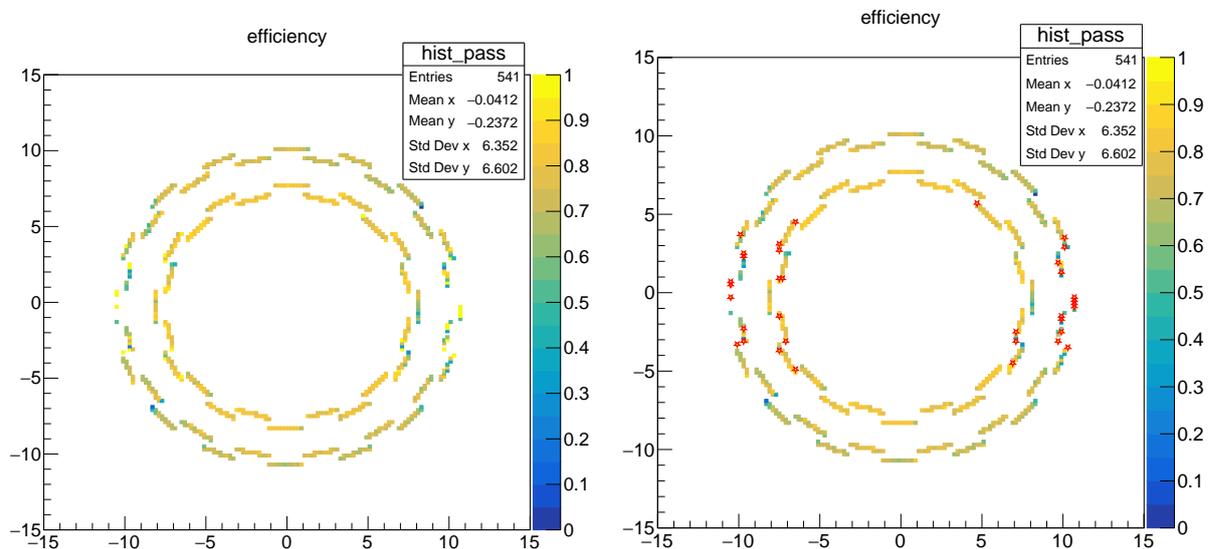


図 4.1: 左図: xy 平面からみた位置別の検出効率の分布 右図: 左図の検出効率が 90% を超える位置を赤星で表した

この結果から、ラダーとラダーの間の検出効率が低いこと。また、バレル自体の検出効率は 70% 以上の部分がほとんどであること。ラダー間での検出効率が結果に大きく作用していることがわかった。また、場所別の最も高い検出効率は 100%、最も低い値は 25% だった。

赤い星は 90% 以上の検出効率をもつ場所であることを示した。

この結果から、INTT 検出器の左右部分に当たるラダーの検出効率が良い傾向にあることがわかった。

4.4 最終結果と考察

■実データ解析における条件

1. 実データ解析に関する条件

2. イベント選定に関する条件
3. トラック選定に関する条件
 - 以下の条件を満たすトラックのみを解析に追加した。

+ クラスター非検出イベントを追加すること

	REAL>Data				MC			
	バレル 1	バレル 2	バレル 3	バレル 4	バレル 1	バレル 2	バレル 3	バレル 4
χ^2	1.0				0.005			
<i>hole</i>	3,437	7,931	3,322	4,076	113	273	36	716
ϵ	71.41 ± 0.3%	58.82 ± 0.3%	72.98 ± 0.3%	63.37 ± 0.3%	96.78 ± 0.04%	96.94 ± 0.04%	98.20 ± 0.04%	97.74 ± 0.04%

表 4.2: MC および実データにおけるバレル別の検出効率

N は予測点を置いたバレルにヒットが存在した事象数, *hole* はヒットが存在しなかった事象数を表す。実際にクラスター非検出イベントは検出効率に大きな影響を与えていることがわかった。

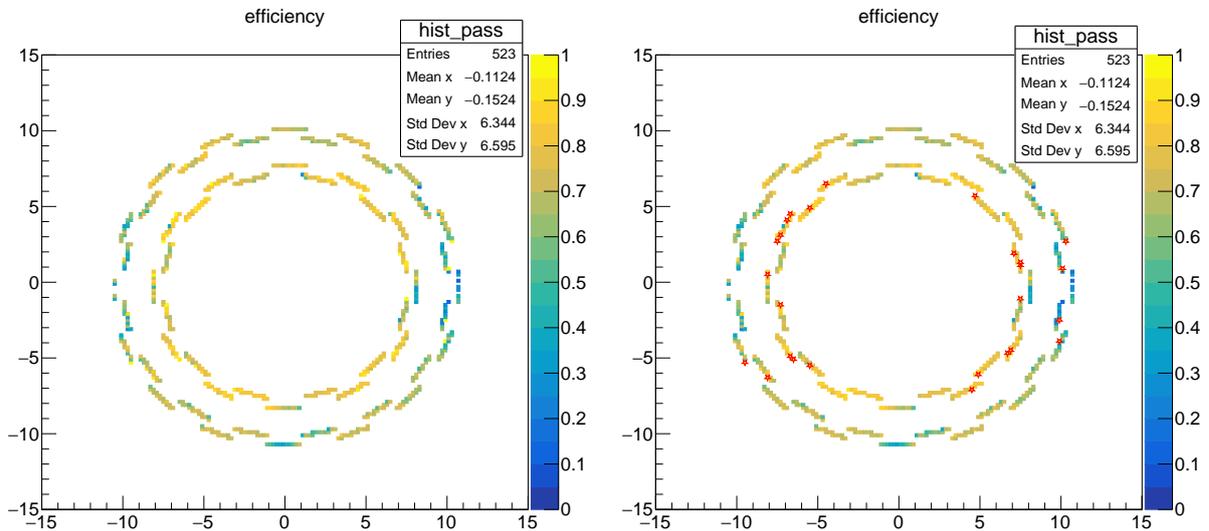


図 4.2: 左図: xy 平面からみた位置別の検出効率の分布 (非検出クラスターイベントを含む最終結果) 右図: 左図の検出効率が 90% を超える位置を赤星で表した

また、章 4.2 と章 4.3 ではそれぞれ絶対値が非常に大きい傾きや最短距離 D が見られた。前章で述べられていた絶対値の傾きの大きさと最短距離 D の傾向を図示した。図 4.3 では傾き a と D_{xy} の分布を図 4.4 では傾き c と D_z の分布を示した。

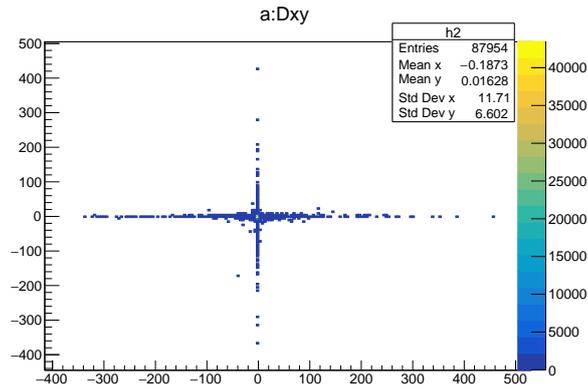


図 4.3: 傾き a と Dxy の分布

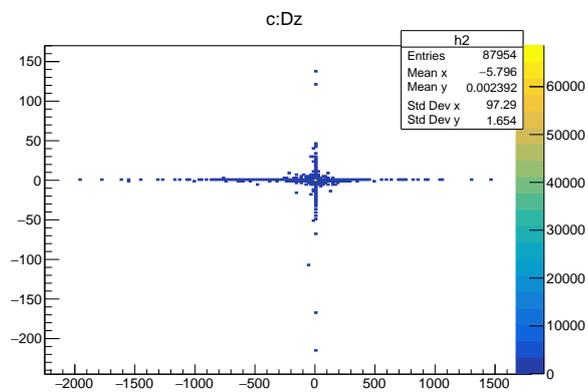


図 4.4: 傾き c と Dz の分布

これらの結果から、トラックの傾きが小さい事象において、クラスターとフィット直線との最短距離 D が大きくなる傾向が確認された。これは、 x を独立変数とした直線フィットにおいて、トラックが x 軸に対してほぼ平行となる場合、最近接点の評価が幾何学的に不安定になるためであると考えられる。

4.5 クラスタ非検出イベントによる影響

INTT の外層は半径 10 cm、内層は半径 7 cm である。そこで図 4.5 のように、その円の式とフィット式の交点にあたる位置を算出した。またその位置を図 4.5 で示した。

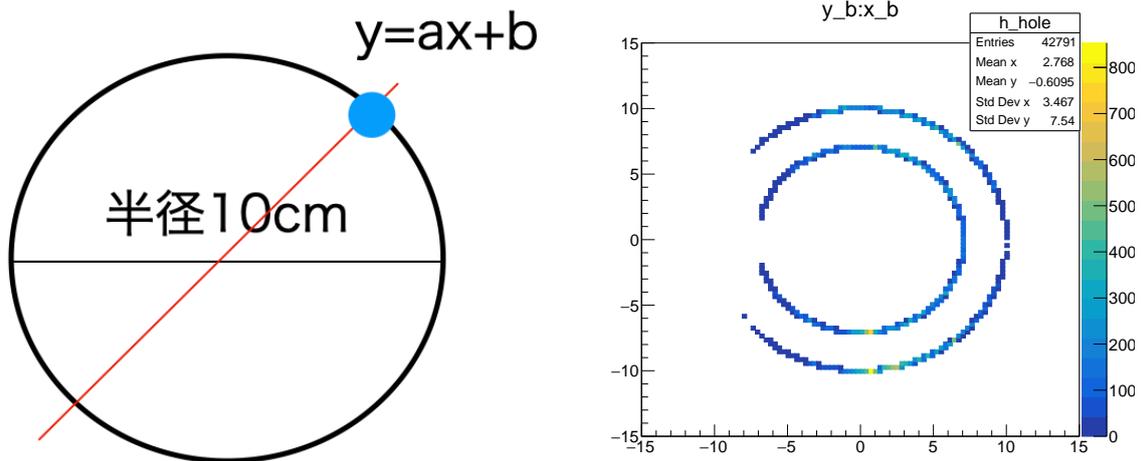


図 4.5: 左図：クラスター予測位置の算出方法 (INTT の半径が約 10cm と考えて、フィット式 $y=ax+b$ との交点を求めた) 右図：左図の方法を使って算出したクラスター非検出イベント予測位置分布

結果からわかることとして、ラダー間の隙間に当たる一部の位置で多くの予測点があったことが挙げられる。

4.6 傾きカットを用いた結果

■実データ解析における条件

1. 実データ解析に関する条件
2. イベント選定に関する条件
3. トラック選定に関する条件
 - 以下の条件を満たすトラックのみを解析から除外した。

- + |傾き a | < 1.0
- + |傾き a | > 2000
- + |傾き c | > 20

追加した傾きに対するカット条件は、INTT の空間分解能と検出器サイズに基づいて設定した。

まず xy 成分に対応する傾き a について考える。INTT の xy 方向の位置分解能は 1 channel あたり約 0.01 cm であり、バレルの直径は約 20 cm である。したがって、 xy 平面内で検出器全体を横断する場合に取りうる傾きの最大スケールは

$$\frac{20 \text{ cm}}{0.01 \text{ cm}} \sim 2.0 \times 10^3$$

程度であると見積もられる。このため、 $|a|$ が極端に大きい ($|a| \gg 2000$) 事象は、物理的な宇宙線トラックというよりも、フィットの不安定性や数値的な発散に起因する可能性が高いと判断し、解析から除外した。

次に z 成分に対応する傾き c について考える。INTT では z 方向のクラスタリングは chip 単位で行われており、1 chip は約 1.0 cm に相当する。一方、INTT の有効長は z 方向に約 ± 20 cm である。したがって、 z 方向における傾きの代表的なスケールは

$$\frac{20 \text{ cm}}{1 \text{ cm}} \sim 20$$

程度と見積もられる。このことから、 $|c|$ がこのスケールを大きく超える事象については、フィット幾何の不安定性による異常な最短距離評価が生じている可能性が高いため、解析から除外した。

また、oHcal の vertical coincidence トリガーは xy 平面において、

$$\frac{\pi}{4} \leq \phi \leq \frac{3\pi}{4}, \quad -\frac{3\pi}{4} \leq \phi \leq -\frac{\pi}{4}$$

の角度範囲で同時にヒットが検出された場合に発生する。このことから、その領域に当たる絶対値が 1 以下の傾きの宇宙線トラックを持つイベントを除外した。しかし、以下の表 4.2 のように検出効率に大きな変動はなかった。

	REAL>Data				MC			
	バレル 1	バレル 2	バレル 3	バレル 4	バレル 1	バレル 2	バレル 3	バレル 4
χ^2	1.0				0.005			
ε	79.98 ± 0.3%	67.54 ± 0.3%	82.11 ± 0.3%	70.80 ± 0.3%	96.87 ± 0.04%	96.94 ± 0.04%	98.20 ± 0.04%	97.74 ± 0.04%

表 4.3: MC および実データにおけるバレル別の検出効率

前節で最短距離が大きいクラスターはフィット線の傾きが小さい傾向があることから、やはり、統計量にあまり変化がなかった。傾きが小さいトラックには多くのイベントが含まれるため、傾きを使った最短距離が大きいクラスターを持つイベントの除去は困難だった。また位置による検出効率も図 4.6 に示した。

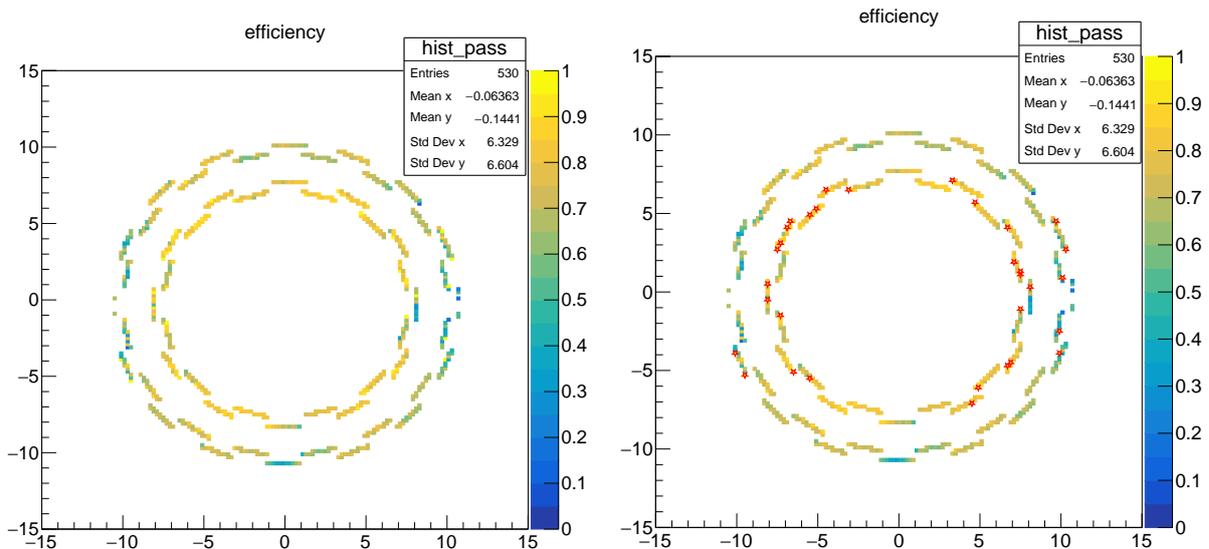


図 4.6: 左図: xy 平面における位置別の検出効率分布. (傾き条件 $\frac{\pi}{4} \leq \phi \leq \frac{3\pi}{4}$, および $-\frac{3\pi}{4} \leq \phi \leq -\frac{\pi}{4}$ を満たすトラックを除外した結果.) 右図: 左図の検出効率が 90% を超える位置を赤い星印で示した。

赤い星は 90% 以上の検出効率をもつ場所であることを示す。結果から内層はラダーの間を除く、ほとんどの位置で検出効率が 90% 以上である。また、バレルの間の検出効率が低いことがわかった。

第5章 まとめ

本研究では、RHIC-sPHENIX 実験における中間飛跡検出器 INTT の検出効率を、宇宙線データを用いて評価した。宇宙線イベントに特有の低多重度環境に対応するため、ノイズチャンネルの除去、イベント選定、およびトラック品質の選別を段階的に導入し、INTT バレルの位置別検出効率を算出した。

その結果、モンテカルロシミュレーションでは、すべてのバレルにおいて 95% 以上の高い検出効率を得られた一方で、実データでの最終結果では 58-72% 程度にとどまり、シミュレーションと比較して低い値を示すことが明らかとなった。

特に、 xy 平面における位置依存性を調べた結果、ラダーとラダーの間に対応する領域において、検出効率が低下していることが明確に確認された。さらに、テストバレルにクラスターを持たないクラスター非検出イベントを用いてクラスター予測位置の分布を調べたところ、ラダー間の隙間に対応する位置に予測点が集中する傾向が見られた。これらの結果は、宇宙線がラダー間の物理的ギャップを通過し、クラスターが形成されない事象が一定数存在するという仮説を支持するものである。

一方で、本研究におけるクラスター予測位置は、必ずしも INTT バレル表面上に制限されていないという制約があり、予測点と実際の検出器構造との対応には一定の不確実性が含まれている。今後は、予測点をバレル表面上に制限した解析や、より多くのクラスター非検出イベントを用いた統計精度の向上により、ラダー間ギャップの影響をより定量的に評価できると考えられる。

また、本解析では、宇宙線の検出器への入射角度が水平に近い事象において、クラスターとフィット直線との最短距離 D が大きくなる傾向が確認された。これは、 x を独立変数とした直線フィットにおいて、トラックが x 軸に対してほぼ平行となる場合、最近接点の評価が幾何学的に不安定になるためであると考えられる。実際、これらの事象の中には、 χ^2 が小さくフィット自体には成功しているものも含まれており、単純なカットによる除去は必ずしも適切ではない。

本研究で得られた結果は、INTT の検出効率に空間的不均一性が存在することを、実データを用いて初めて系統的に示したものである。本成果は、今後の検出器性能評価やアライメント調整、さらには物理解析における効率補正に対して、重要な知見を与えるものであり、将来的にはトラック方向に依存しない距離定義や新たなフィット手法の導入により、さらなる検出効率の向上が期待される。

参考文献

- [1] 鈴木彩香, “RHIC-sPHENIX 実験における INTT 検出器の性能評価のためのビームテスト実験のデータ解析”, 修士論文, 奈良女子大学大学院 (2020).
- [2] 柴田実香, “RHIC-sPHENIX 実験における中間飛跡検出器 INTT 用シリコンセンサー”, 卒業論文, 奈良女子大学 (2020).
- [3] 森田美羽, “RHIC-sPHENIX 実験のための INTT 検出器のデータ読み出し性能の評価”, 修士論文, 奈良女子大学大学院 (2022).
- [4] 並本ゆみか, “宇宙線を用いた sPHENIX 実験中間飛跡検出器 INTT 用シリコンセンサーの検出効率測定”, 修士論文, 奈良女子大学大学院 (2023).
- [5] 杉山由佳, “RHIC-sPHENIX 実験初年度データを用いた中間飛跡検出器 INTT の動作検証”, 修士論文, 奈良女子大学大学院 (2023).
- [6] F. Halzen and A. D. Martin, *Quarks and Leptons*, John Wiley & Sons, Inc. (1984).
- [7] 理化学研究所, “宇宙初期物質の小さなしずくを創成 RHIC 衝突型加速器で強い証拠を発見”, https://www.riken.jp/press/2018/20181211_1/index.html.
- [8] 竹内 淳, 『高校数学でわかる半導体の原理』, 講談社 (2007).
- [9] 三井真吾, “Super-LHC 用 p 型シリコンマイクロストリップセンサーのバルク部の放射線損傷”, 修士論文, 筑波大学大学院 (2010).
- [10] Particle Data Group, “Passage of Particles Through Matter”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2019).
- [11] Particle Data Group, “Atomic and Nuclear Properties of Materials”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2019).
- [12] 秋葉康之, 『クォーク・グルーオン・プラズマの物理』, 共立出版 (2014).
- [13] sPHENIX Collaboration, “sPHENIX Overview (Beam Use Proposal)”, https://indico.bnl.gov/event/20373/attachments/49393/84303/sPHENIX_Beam_Use_Proposal_2023.pdf.
- [14] sPHENIX Collaboration, “sPHENIX Technical Design Report”, https://indico.bnl.gov/event/7081/attachments/25527/38284/sphenix_tdr_20190513.pdf.
- [15] H. Klest, “Overview and design of the sPHENIX TPC”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1498**, 012025 (2020).
- [16] G. Nukazuka *et al.*, *ELPH Annual Report* (2022).
- [17] ブリタニカ・ジャパン, 『ブリタニカ国際大百科事典 小項目電子辞書版』, ブリタニカ・ジャパン (2015).
- [18] W. N. Cottingham and D. A. Greenwood, *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*, Cambridge University Press (2005).
(W. N. コットィンガム, D. A. グリーンウッド, 樺沢宇紀 訳, 『素粒子標準模型入門』, シュプリンガー・ジャパン (2005))
- [19] 三井真吾, “p 型シリコンストリップセンサーとピクセルセンサーの設計及び放射線損傷評価”, 博士論文, 総合研究大学院大学 (2013).
- [20] sPHENIX Collaboration, <https://wiki.bnl.gov/sPHENIX/index.php/SPHENIX>.
- [21] A. Adare *et al.*, “An Upgrade Proposal from the PHENIX Collaboration”, arXiv:1501.06197 (2015).
- [22] M. X. Liu, “A Monolithic-Active-Pixel-Sensor-based Vertex Detector (MVTX) for the sPHENIX Experiment at RHIC”, Ph.D. Thesis (2018).
- [23] H. Klest, “A Compact TPC for the sPHENIX Experiment”, *J. Phys.: Conf. Ser.* **2374**, 012147

- (2022).
- [24] J. R. Hoff *et al.*, “FPHX: a New Silicon Strip Readout Chip for the PHENIX Experiment at RHIC”, IEEE NSS/MIC (2009).
 - [25] T. Kondo *et al.*, “Development of Long and High-Density Flexible Printed Circuits”, J-STAGE (2022).
 - [26] 木舟 正, 『宇宙高エネルギー粒子の物理学』, 培風館 (2004).
 - [27] 柴田実香, “RHIC-sPHENIX 実験における中間飛跡検出器 INTT 用シリコンセンサーによる宇宙線測定”, 卒業論文, 奈良女子大学 (2019).
 - [28] Particle Data Group, “Passage of Particles Through Matter”, Prog. Theor. Exp. Phys. (2021).
- .

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々に支えていただきました。

特に、理化学研究所の糠塚様には、ご多忙の中多くの時間を割いていただき、解析で行き詰まった際や理解が不十分であった部分について、丁寧なご指導と的確な助言を賜りました。研究の方向性に迷った際にも親身にご相談に乗っていただき、本研究を最後まで遂行する上で大きな支えとなりました。ここに深く感謝申し上げます。

また、指導教員の先生方、下村先生、蜂谷先生、宮林先生には、研究内容に関する重要なお助言を数多く頂戴いたしました。先生方の的確なお指摘と温かいご指導が、本研究の質を高める大きな力となりました。

日々切磋琢磨してきた池本さん、尾崎さん、高村さん、石垣さんの同期の存在も、研究生活における大きな心の支えでした。夜遅くまで共に努力した時間は、私にとってかけがえのない経験となりました。さらに、大前さんをはじめとする後輩の皆さんには、差し入れや発表練習時のサポートなど、温かい応援をいただきましたことを感謝いたします。

また、現地アメリカや以前の研究テーマでお世話になった榎園さん、今回の解析に対してアドバイスをいただいた秋葉さんをはじめとする INTT グループにも大変お世話になりました。

最後に、これまで常に見守り、学業に専念できる環境を整えてくれた両親に、心より感謝申し上げます。修士論文の大詰めにおいても、集中できる環境を支えてくれたことに深く感謝しています。大学に通わせてくれたこと、そしてこのような有意義な研究経験を与えてくれたことに、改めて感謝の意を表します。

本研究は、多くの方々の支えがあってこそ成し遂げることができました。ここに記して、皆様に心より御礼申し上げます。