

広島大学 理学部 物理学科

卒業論文

ALICE 実験次期データ解析系による
 μ 粒子検出効率の基礎的見積

B185737 伊藤 友
(クォーク物理学研究室)

2022 年 2 月 25 日

指導教員 志垣 賢太 教授
主査 志垣 賢太 教授
副査 野中 千穂 教授

概要

欧州原子核研究機構（CERN）LHC 加速器では世界最高エネルギーの重イオン衝突実験を行っており、ALICE 実験ではクォーク・グルーオン・プラズマの研究を進めている。LHC は 2019 年から長期停止期間であり、2022 年から開始する次期運転に向けてアップグレードを計画している。ALICE 実験では課題であった μ 粒子検出における飛跡再構成の精度向上と統計量の増加を克服する為、新しい飛跡検出器 Muon Forward Tracker (MFT) と O^2 (Online-Offline) システムを導入する。 O^2 はデータ連続読み出しを可能にするシステムであると同時に、次期データ解析系として新しく移行する。本研究では次期データ解析の為に、 O^2 を用いて MFT を導入した新規 μ 粒子検出系における μ 粒子検出効率の見積を目的とする。p-p 衝突（重心系衝突エネルギー $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ ）イベントにおいて、バックグラウンドとなる π, K 中間子崩壊由来の μ 粒子を除去した検出効率を算出した。 π, K の寿命が他の μ 粒子を生成する粒子に比べ長いことから、衝突点から μ 粒子の生成点までの距離に基づいた指標を用いて除去を試みた。結果、本研究で用いた指標では効果的なバックグラウンド除去が出来なかった。これは指標が効果的である原理の間違いでなく検出器の飛跡再構成に原因があることが判明した。現状再構成の成功率は低く、再構成の成功・失敗は本研究で用いたバックグラウンド除去の指標に大きく影響を与える。再構成が失敗した飛跡より算出したバックグラウンド除去指標はシグナルと区別が難しく、よってバックグラウンド除去の効果に悪影響を与えた。失敗検出器の再構成失敗飛跡を取り除く事に成功すれば本研究で用いた指標によるバックグラウンド除去が効果的であることを確認しており、よって μ 粒子解析において、再構成成功率の向上、又は再構成が失敗した飛跡を除去可能な指標の模索が重要な課題であることを指摘する。

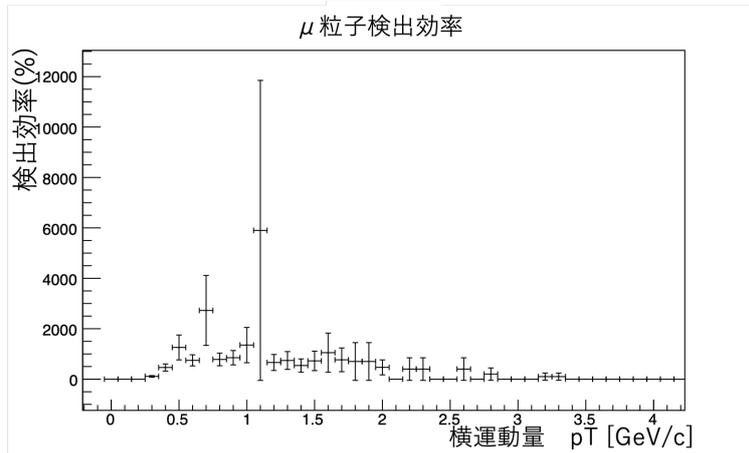


図 1: 横運動量毎の μ 粒子検出効率

目次

第 1 章	序論	5
1.1	QCD	5
1.2	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)	5
1.3	QGP の実験的研究	6
1.3.1	重イオン衝突実験	6
1.3.2	μ 粒子測定	7
1.4	π, K 中間子崩壊によるバックグラウンド μ 粒子	7
1.5	研究目的	7
第 2 章	研究背景	9
2.1	ALICE 実験	9
2.2	次期運転アップグレード	10
2.3	新規前方 μ 粒子検出系	11
2.3.1	ミューオンスペクトロメーター	11
2.3.2	Muon Forward Tracker (MFT)	12
2.4	O^2 の導入背景と構造	12
第 3 章	解析準備	14
3.1	シミュレーション設定	14
3.1.1	Geant4	14
3.1.2	PYTHIA	14
3.2	飛跡再構成	15
3.2.1	MFT-MCH-MID 飛跡再構成	15
3.2.2	マッチング	15
第 4 章	解析手順	17
4.1	μ 粒子検出効率の算出	17
4.2	バックグラウンド除去	17
4.3	S/B 比を用いたバックグラウンド除去評価	18
第 5 章	結果・考察	19
5.1	シミュレーション結果	19
5.2	μ 粒子検出効率の見積結果	20
5.3	バックグラウンド除去結果	21
5.4	考察	24
第 6 章	まとめ・課題	26

謝辞	27
参考文献	27

目次

1	横運動量毎の μ 粒子検出効率	0
1.1	バリオン（左）と中間子（右）	5
1.2	QGP 相転移の温度、密度相関 [15]	6
1.3	ハドロンの収量抑制 [7]	6
2.1	ALICE 検出器 [13]	9
2.2	CERN スケジュール [14]	10
2.3	新規 μ 粒子検出系	11
2.4	ミューオンスペクトロメーター [2]	12
2.5	Muon Forward Tracker [8]	12
2.6	O^2 フローチャート	13
3.1	シミュレーション設定	14
3.2	飛跡再構成の様子	15
3.3	ハドロン吸収体通過の様子	15
4.1	再構成生成点距離の導出方法	18
4.2	実生成点距離の導出方法	18
5.1	生成したシグナル μ 粒子の横運動量分布	20
5.2	検出した粒子の横運動量分布	20
5.3	横運動量毎の μ 粒子検出効率	21
5.4	シグナル（赤）とバックグラウンド（青）の実生成点のずれ分布（左）とバックグラウンドの実生成点のずれの全体像（右）	21
5.5	実生成点のずれのカットに対する $S^{\frac{3}{2}}/B$	22
5.6	シグナル（赤）とバックグラウンド（青）の再構成生成点のずれ分布	22
5.7	再構成生成点のずれのカットに対する $S^{\frac{3}{2}}/B$	22
5.8	シグナルの生成点のずれ差（コレクトマッチ）	23
5.9	バックグラウンドの生成点のずれ差（コレクトマッチ）	23
5.10	シグナルの生成点のずれ差（フェイクマッチ）	23
5.11	バックグラウンドの生成点のずれ差（フェイクマッチ）	23
5.12	シグナル（赤）とバックグラウンド（青）の再構成生成点のずれ分布（コレクトマッチ）	24
5.13	再構成生成点のずれのカットに対する $S^{\frac{3}{2}}/B$ （コレクトマッチ）	24

表 目 次

1.1	標準模型 17つの素粒子	5
1.2	主な μ 粒子の生成源 [1]	7
5.1	生成された μ 粒子の生成源	19
5.2	再構成された飛跡情報	20

第1章 序論

1.1 QCD

自然界に存在する相互作用は強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用、重力相互作用の4つである。その内素粒子理論の標準模型は強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用の3つを記述する。相互作用はゲージボソンの交換により媒介される。現在素粒子は基本の構成要素である6つのクォーク、6つのレプトンに4つのゲージボソン、ヒッグス粒子を含めた17種類である。

量子色力学 (QCD) は標準模型を記述する理論の1つであり、強い相互作用を説明する。強い相互作用で交換されるゲージボソンはグルーオンである。強い相互作用が作用するクォークとグルーオンは色荷と呼ばれる量子数 (赤、青、緑) を持つ。強い相互作用の性質として、クォークとグルーオンは通常単体で取り出すことはできない。これを「クォークの閉じ込め」と呼ぶ。クォークとグルーオンは合成によって色荷が重ねて白になる組み合わせのみ自由粒子として存在する。こうして合成された粒子はハドロンと呼ばれる。ハドロンにはバリオンとメソン (中間子) が存在し、3つのクォークの組み合わせによりバリオンが、1つのクォークと1つの反クォーク (色荷は補色になる) の組み合わせにより中間子が合成される [17]。

表 1.1: 標準模型 17つの素粒子

フェルミ粒子	第一世代	第二世代	第三世代	相互作用	ゲージボソン
クォーク	u	c	t	強い相互作用	g
	d	s	b	弱い相互作用	W^\pm, Z
レプトン	e	μ	τ	電磁相互作用	γ
	ν_e	ν_μ	ν_τ	ヒッグス粒子	H

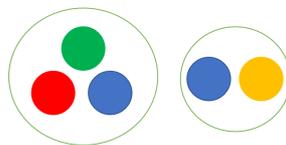
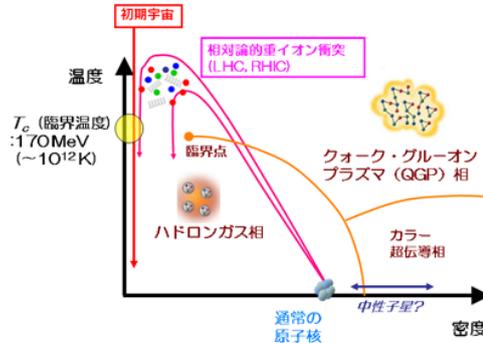


図 1.1: バリオン (左) と中間子 (右)

1.2 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

前節で述べた通りクォークとグルーオンは通常単体で取り出すことはできないが、高温又は高密度状態でクォークの閉じ込めは破れると予想されている。このクォーク閉じ込めが破れた状態をクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) と呼ぶ。QGP は温度にしておよそ 200MeV で生成され、

QGP は宇宙初期ビッグバン直後の 10^{-6} 秒 $\sim 10^{-5}$ 秒の間に生成していたとされている。QGP は強い相互作用の問題を解明する手がかりであると同時に、宇宙初期の構造の手がかりでもある [12]。



5

図 1.2: QGP 相転移の温度、密度相関 [15]

1.3 QGP の実験的研究

1.3.1 重イオン衝突実験

現在 QGP を生成する唯一の方法は重イオン衝突実験である。加速器を用いて鉛などの重イオンを加速させ、正面衝突を起こすことで QGP 生成温度に達することが可能である。重イオン衝突実験で確認された QGP 生成の証拠として高横運動量ハドロンの収量抑制がある。これは p-p 衝突で確認されていない現象であり、パートン（クォークやグルーオン）が QGP のような高密度媒体を通過する際に強い相互作用によってエネルギーを損失することが原因である [15]。

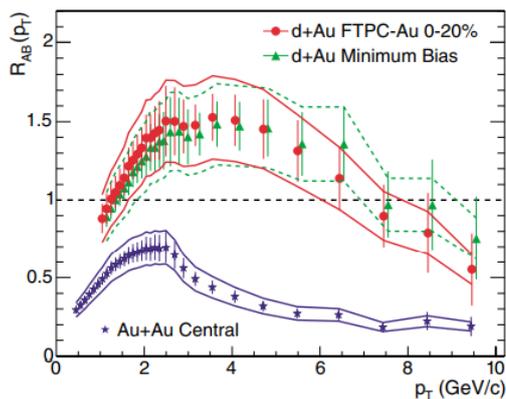


図 1.3: ハドロンの収量抑制 [7]

1.3.2 μ 粒子測定

QGP の実験的研究において、 μ 粒子がプローブとして適している。理由は

- ・強い相互作用を受けない。
- ・電子と比べ、背景事象が少ない。

ことが挙げられる。QGP はクォークとグルーオンの高密度媒体であるので強い相互作用の影響を受けない点でレプトンが効果的である。また、電子はレプトンの条件を満たすが π^0 中間子からの Dalitz 崩壊による背景事象が多い。

1.4 π, K 中間子崩壊によるバックグラウンド μ 粒子

表 1.2: 主な μ 粒子の生成源 [1]

ベクター中間子	寿命 (s)
J/ψ	7.09×10^{-21}
$\rho_0(770)$	4.46×10^{-24}
$\omega(782)$	7.61×10^{-23}
$\phi(1020)$	1.55×10^{-22}
重フレーバー中間子	
D	$\sim 10^{-12}$
B	$\sim 10^{-12}$
π, K	
π^\pm	2.60×10^{-8}
K^\pm	1.24×10^{-8}
K_L^0	5.12×10^{-8}

表 1.2 は衝突実験において生成される μ 粒子の主な生成源である。QGP 研究において研究対象となる粒子は寿命が短く QGP 内で崩壊する軽いベクター中間子 ($\rho_0(770)$ 、 $\omega(782)$ 、 $\phi(1020)$) や衝突初期に生成する重フレーバー粒子 (J/ψ 、 D 、 B など) である。 π, K 中間子は寿命が長く、QGP 生成から遠く離れた場所で崩壊する為に QGP のプローブ適さない。よって、 μ 粒子をプローブとする研究では π, K 中間子崩壊による μ 粒子はバックグラウンドとして扱う。[2]

1.5 研究目的

2022 年から開始予定の ALICE 実験次期運転 (Run 3) では MFT 導入により新たな μ 粒子検出系での実験データが取得可能である。その際検出効率は得られたデータ数を実際に生成された粒子数に補正するために用いる。但し検出に成功する μ 粒子には π, K 崩壊から得られる μ 粒子が多く混ざっており、これらはバックグラウンドとして解析に大きく影響を与える。検出効率はシグナルとなる μ 粒子数への補正を行うため、バックグラウンドを除去した検出効率を求める必要がある。そのため本研究は Run 3 より新たに導入される解析フレームワークを用いて、MFT 導入後の新規 μ 粒子検出系におけるバックグラウンドを除去した μ 検出効率を算出する。算出にはシ

ミュレーションを用いる。生成する粒子数は横運動量毎で異なる為、本研究では横運動量による検出効率の依存性を算出する。横運動量はビーム軸に垂直な方向の運動量成分であり、ローレンツ不変である為実験でよく用いられる。最終的に算出する検出効率は以下のとおりである。

$$E_{ff}(p_T) = \frac{\text{バックグラウンド除去後の検出数}(p_T)}{\text{生成シグナル数}(p_T)}$$

第2章 研究背景

2.1 ALICE 実験

LHC-ALICE 実験はスイス・ジュネーブ近郊の欧州原子核研究機構 (CERN) において、唯一 QGP の性質の解明を目的とした実験である。日本では広島大学、東京大学、筑波大学、長崎総合科学大学、奈良女子大学、佐賀大学が参加している。衝突点で生成される粒子はよく知られた陽子や中性子、電子、光子の他に、 π 中間子やストレンジネス (s)、チャーム (c)、ビューティー (b) を含む中間子やバリオン等であり、これら粒子を識別、生成点の特定、運動量の算出を行うため、ALICE 検出器は多様な検出器で構成されている。ALICE 検出器は大きく分けて中央領域 $-0.9 \leq \eta \leq 0.9$ に入る荷電粒子を検出するセントラルバレルと前方領域 $-3.6 \leq \eta \leq -2.45$ (MFT 導入後) に入る μ 粒子を検出するミュオンアームで構成されている。ALICE での座標系はビーム軸を Z 軸に、ミュオンアームからセントラルバレル (図 2.1 では右から左方向) に正をとる。原点は ITS 中心であり、衝突は原点で発生するように設定する。よってミュオンアームの各検出器は Z 軸負の座標に設置している。

[6] [13]。

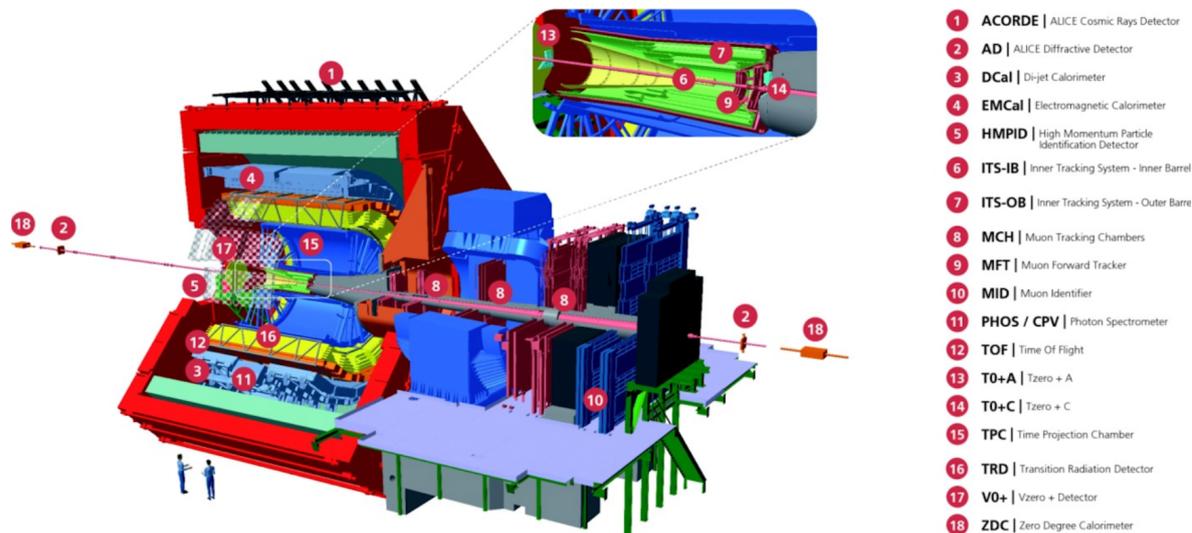


図 2.1: ALICE 検出器 [13]

2.2 次期運転アップグレード

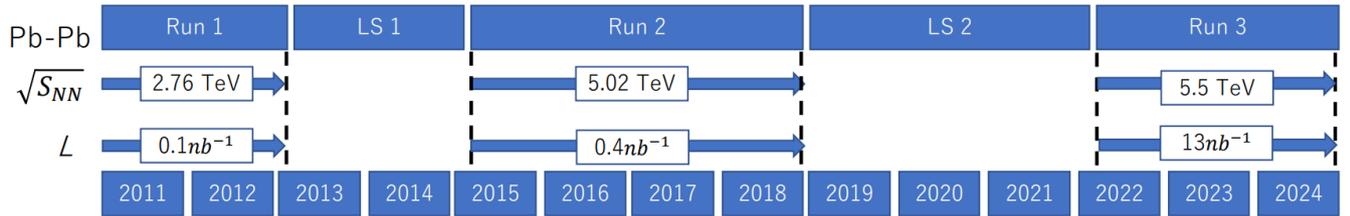


図 2.2: CERN スケジュール [14]

LHC は 2019 年から長期停止期間 (LS2) に入っており、2022 年から開始予定の Run 3 に向けて加速器と検出器のアップグレードを行っている (図 2.2)。結果 Pb-Pb 衝突実験において核子対あたり重心衝突系エネルギー $\sqrt{s_{NN}} = 5.5\text{TeV}$ 、ルミノシティ $L = 6 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、Run3 期間中で 13nb^{-1} に向上し、衝突頻度は 50kHz に及ぶ。

以下に ALICE 実験に関わるアップグレード内容を記述する。Muon Forward Tracker と O^2 に関しては詳細は後述する。

- InnerTrackingSystem (ITS)

ビームパイプに最も近い検出器であり、 $-1.22 \leq \eta \leq 1.22$ を覆う。衝突点と二次粒子の崩壊点を再構成する飛跡検出器である。Run 3 では以下の変更点がある。

- ・ 1 層目をビームパイプに近づける。
- ・ 7 層目の追加。
- ・ 全層をシリコンピクセルセンサーに変更する。

結果、データ読み出しを Pb-Pb 衝突にて 50kHz、p-p 衝突にて 400kHz で行い、500MeV/c の低運動量で $r\phi$ 分解能を 3 倍、z 軸分解能で 5 倍に向上した。[3]

-Time Projection Chamber (TPC)

ITS を覆う飛跡検出器。荷電粒子の飛跡再構成、運動量測定、粒子識別を行う。時間情報を取得可能であり、3次元の生成点を再構成可能である。ルミノシティの向上を受け、以前までの MWPC では読み出し速度が不足している為、新たに GEM 検出器に置き換える。GEM 検出器はワイヤチャンバーに変わるガス検出器として注目しており、陽極と陰極の距離が短い為高頻度の入射粒子に対応する。読み出し速度は 2 桁向上する。[5] [16]

-Muon Forward Tracker (MFT)

詳細は後述する。ミューオンアームに追加する飛跡検出器である。

-Online Offline System (O^2)

詳細は後述する。データ連続読み出しを可能にするシステム。解析フレームワークとしての役割も兼ねている。

2.3 新規前方 μ 粒子検出系

Run 3 における前方 μ 粒子検出系はミューオンスペクトロメーターと MFT の複合系である。

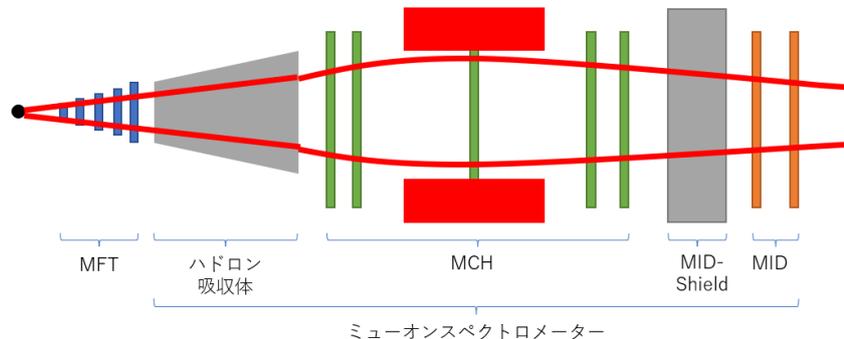


図 2.3: 新規 μ 粒子検出系

2.3.1 ミューオンスペクトロメーター

ミューオンスペクトロメーターは μ 粒子以外の粒子を吸収し除去するハドロン吸収体を置くことで μ 粒子を識別する検出系である。 $-4 \leq \eta \leq -2.5$ を覆う。ハドロン吸収体以降は 5 枚の飛跡検出器と運動量測定のための双極子磁石で構成されるミューオンチェンバー (MCH)、2 枚の抵抗板チャンバーで構成される Muon Identifier (MID) とハドロン吸収体を通過した μ 粒子以外の粒子を除去する MID-Shield によって構成される。全長にしてハドロン吸収体から MID の 2 枚目まで 16.2m に及ぶ巨大な検出系である。以下にそれぞれの特徴を記す。

- ・ハドロン吸収体：厚さ約 4m のカーボン、鉄、コンクリートで構成する吸収体。運動量 $p \geq 4$ を満たす μ 粒子が通過できる ($-5.03\text{m} \leq z \leq -0.9\text{m}$)。
- ・MCH：位置分解能 $100\mu\text{m}$ の飛跡検出器 5 枚で構成する。双極子磁石の前に 2 枚、中に 1 枚、後ろに 2 枚置く。
- ・双極子磁石：ビーム軸平行に 0.7T の磁場を生成する ($-9.85\text{m} \leq z \leq -5\text{m}$)。
- ・MID-Shield：厚さ約 1.2m の鉄で構成する吸収体。ハドロン吸収体を通過したハドロンを吸収する。
- ・MID：時間分解能 2ns の抵抗板チャンバー 2 枚で構成する。 μ 粒子と特定するためのトリガーに用いる。 ($-17.1\text{m} \leq z \leq -16.1\text{m}$)

以前はハドロン吸収体での多重散乱による生成点再構成の誤差が課題であったが MFT 導入により改善されると期待する。[2]

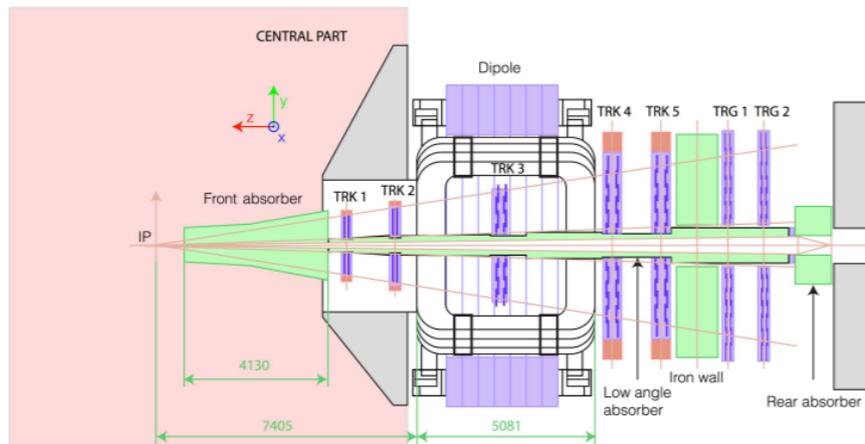


図 2.4: ミューオンスペクトロメーター [2]

2.3.2 Muon Forward Tracker (MFT)

前述した通りミューオンアームに新しく追加する飛跡検出器である。ハドロン吸収体の前で飛跡再構成を行うことにより生成点位置測定の精度を向上させる為に導入する検出器である。 $-3.6 \leq \eta \leq -2.45$ を覆う。シリコンピクセルセンサーで構成されたプレート 5 枚で構成されており、Z 軸 $-0.768 \leq z \leq -0.460$ に設置する。位置分解能は約 $5\mu\text{m}$ である。MFT 導入により以前まで判別不可能であったチャームを含む中間子 (D 等) とビューティーを含む中間子 (B 等) からくる μ 粒子の判別可能性を期待している。[8] [2]

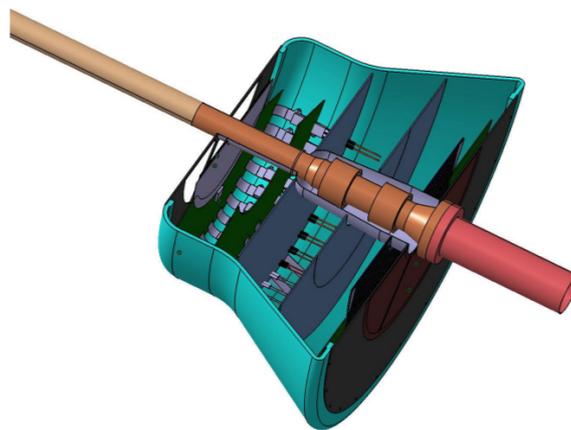


図 2.5: Muon Forward Tracker [8]

2.4 O^2 の導入背景と構造

前述した通りデータ連続読み出しを可能にするために導入するシステムである。オンラインでのデータ読み出し、データ圧縮とオフラインでのデータ解析を統括するシステムとして設計している。よって O^2 の導入より解析フレームワークが新しく移行する。ここでは O^2 の導入背景と構

造を記述する。

O^2 導入の背景は統計量の課題とアップグレードにおけるデータ量の課題である。統計量の課題はバックグラウンドに対するシグナルの低さに由来し、データ量の課題は Run 3 での Pb-Pb 衝突実験で読み出されるデータ量の増加に由来する。データ量は Run 1 のおよそ 100 倍に当たる 1TB/s を超える。よって膨大なデータ量を読み出し時に減らす必要がある。

O^2 のコンセプトは検出器から送られる全てのデータをコンピューティングシステムに転送することである。LHC のクロックを基準にして時間を細かく区切ったタイムフレームと更に細かく区切ったサブタイムフレームを用意し、各検出器から送られるデータをサブタイムフレーム内、次いでタイムフレーム内で同期する。サブタイムフレーム、タイムフレーム内で各検出器の較正とデータ再構成を行うことでデータ圧縮を圧縮し、アーカイブに送られる時点では 60-70GB/s まで削減される。更に非同期でデータ再構成、及びデータの質を管理する為のパラメーター較正を行い、最終的なデータとして保存される。[4] [9]



図 2.6: O^2 フローチャート

第3章 解析準備

μ 粒子検出効率の算出の前にシミュレーションにおける設定とデータ取得のプロセスを記述する。シミュレーション設定において Run 3 での μ 粒子検出系と衝突イベントを再現し、検出器のヒット情報をもとに飛跡再構成を行う。

3.1 シミュレーション設定

粒子生成情報は μ 粒子検出系を再現する Geant4 と衝突イベントを再現するジェネレーターにより生成する。今回使用したジェネレーターは p-p 衝突を再現する PYTHIA である。Geant4 を用いて構成した検出器を図 (3.1) に示す。

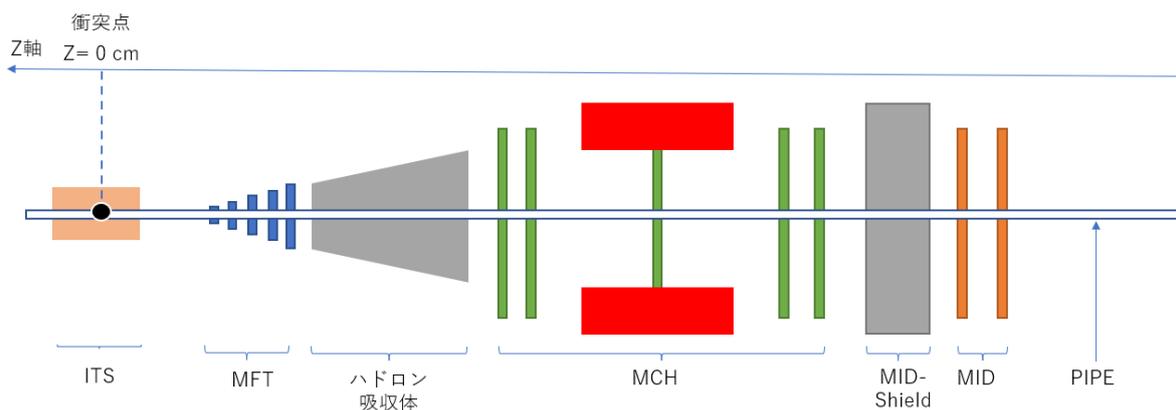


図 3.1: シミュレーション設定

3.1.1 Geant4

物質中を粒子が通過するシミュレーションを行うソフトウェアである。検出器の物質構造と形状、位置関係を設定することが可能である。シミュレーションはモンテカルロシミュレーションで行い、物質内での相互作用は統計に基づいてランダムに発生する。高エネルギーや原子核、加速器実験の他、医学や宇宙科学等様々な分野に使われる。[10]

3.1.2 PYTHIA

PYTHIA は主に高エネルギー粒子衝突によるパートン分布、及び粒子生成のシミュレーションを行うジェネレーターである。GEANT4 と同様にモンテカルロシミュレーションで行う。今回使

用した PYTHIA8.3 では p-p 衝突で重心系衝突エネルギーを最大 $\sqrt{s}14\text{TeV}$ 、Pb-Pb 衝突で核子対あた重心系衝突エネルギー最大 $\sqrt{s_{NN}}=5.52\text{TeV}$ でシミュレーション可能である。[11]

3.2 飛跡再構成

飛跡再構成とマッチングは現時点での ALICE/MFT 標準のものを使用する。

3.2.1 MFT-MCH-MID 飛跡再構成

今実験において検出の定義は MFT-MCH-MID 飛跡が再構成されることである。

飛跡再構成は MFT、MCH-MID で別に行う (図 3.2 では赤い実線)。MFT の飛跡情報をもとに MFT 飛跡を作り、MCH の飛跡情報と MID への到達情報をもとにミュオンスペクトロメーターの MCH-MID 飛跡を作る。最後に MFT 飛跡と MCH-MID 飛跡の再構成を行い、MFT-MCH-MID 飛跡を作る (図 3.2 では赤と黒の実線)。シミュレーションでは再構成された飛跡とその生成源である粒子情報の両方を取得することが可能であるが、MFT-MCH-MID 飛跡の生成源は MCH の飛跡の生成源と定義している。

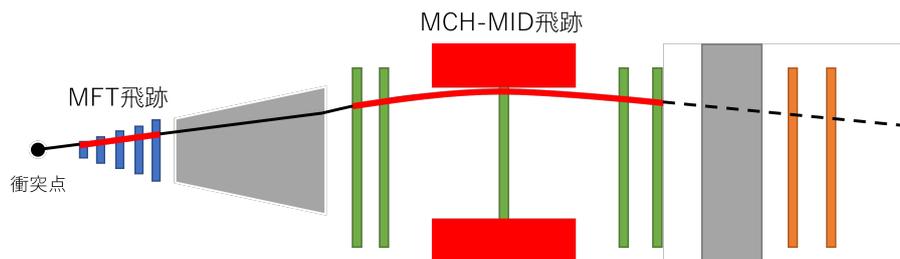


図 3.2: 飛跡再構成の様子

3.2.2 マッチング

MFT 飛跡と MCH-MID 飛跡の再構成をマッチングと呼ぶ。MCH を通過する粒子はハドロン吸収体を通過した粒子であるが、MFT を通過する粒子は μ 粒子以外にも e 、 π 、 K を多く含み、よって MCH-MID 飛跡に対する MFT 飛跡候補数は膨大である。更にハドロン吸収体での多重散乱の影響もあり (図 3.3)、正しいマッチングは困難である。

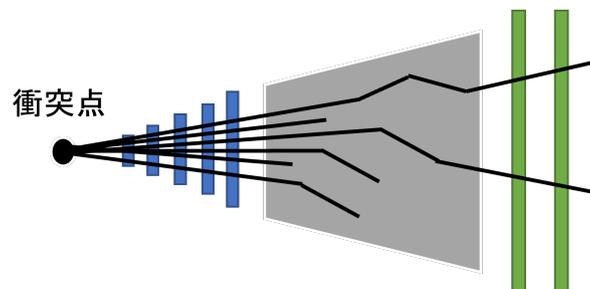


図 3.3: ハドロン吸収体通過の様子

シミュレーションではマッチングの成功（コレクトマッチ）と失敗（フェイクマッチ）を表すパラメーターが用意されており、再構成された飛跡毎に確認可能である。フェイクマッチした飛跡はMFT飛跡とMCH-MID飛跡毎の生成源が異なるが、前述の定義よりMCH-MID飛跡の生成源による飛跡となる。

第4章 解析手順

本研究では生成される μ 粒子のうち、 π, K 崩壊から生成する μ 粒子をバックグラウンドとして定義する。よってシグナルとバックグラウンドを

シグナル： μ 粒子 (π, K 粒子崩壊由来を除く)

バックグラウンド： μ 粒子以外の粒子と π, K 粒子崩壊由来の μ 粒子と定義する。

4.1 μ 粒子検出効率の算出

本研究では検出効率は再構成された飛跡の横運動量分布と衝突シミュレーションにより生成した μ 粒子の横運動量分布の比により算出される。

$$Eff(p_T) = \frac{\text{検出数}(p_T)}{\text{生成}\mu\text{粒子数}(p_p)}$$

但し解析ではシグナルとなる μ 粒子の生成数に補正する為、バックグラウンドとなる π, K からの μ 粒子は分母の生成した μ 粒子数より排除する。よって検出効率は正しくは

$$Eff(p_T) = \frac{\text{検出数}(p_T)}{\text{生成シグナル数}(p_T)}$$

である。再構成された飛跡の粒子種及び生成源は特定不可能であり、全て μ 粒子と判断するため分子は変化しない。分子からバックグラウンドを除去した検出効率を求める為にはバックグラウンドとシグナルを区別可能な指標を用いる。その為求める検出効率の最終目標は

$$Eff(p_T) = \frac{\text{バックグラウンド除去後の検出数}(p_T)}{\text{生成シグナル数}(p_T)}$$

本研究では分子の再構成された飛跡からバックグラウンドを除去する前の検出効率を算出し、その後シグナルとバックグラウンドを区別可能な指標を用いてバックグラウンドを除去した検出効率を算出する。

4.2 バックグラウンド除去

再構成された飛跡からバックグラウンドを除去する為、 π, K の寿命の長さを利用する。衝突点から生成点までの距離を指標に用いる。 π, K は寿命が長いために崩壊して μ 粒子を生成する位置が衝突点より遠く離れると予想する。この指標を以降「生成点のずれ」と呼ぶ。再構成された飛跡から生成点のずれの高い飛跡をカットすることによりバックグラウンドの除去が可能であると予想する。カットにより残った飛跡ではシグナルが占める割合がカット前より高くなると予想し、バックグラウンドに対するシグナルの割合である S/B 比の向上を期待する。

以下に生成点のずれの導出方法を記す。

再構成された飛跡は衝突点に最も近い場所で MFT の 1 枚目までである為、生成点は MFT 1 枚目から $z = 0$ の XY 平面まで直線的に伝播することで再構成する。よって生成点のずれは衝突点と $z = 0$ の XY 平面まで伝播された生成点までの距離である。以上の方法により導出した生成点のずれを以降「再構成生成点のずれ」と呼ぶ。

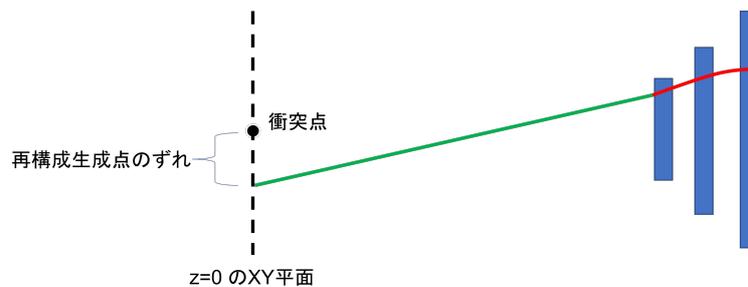


図 4.1: 再構成生成点距離の導出方法

また、生成点のずれによるバックグラウンド除去の原理を確認する為、シミュレーションで確認可能な実際の生成点のずれから運動量方向に沿って $z = 0$ の XY 平面まで直線的に伝播した生成点のずれを用いる。これを以降「実生成点のずれ」と呼ぶ。この値を再構成生成点のずれの真の値とする。

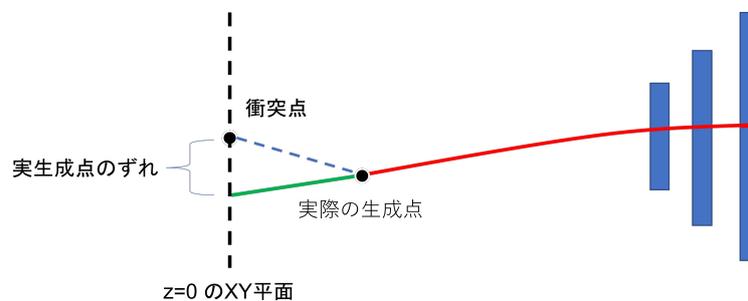


図 4.2: 実生成点距離の導出方法

4.3 S/B 比を用いたバックグラウンド除去評価

生成点のずれのカット条件決定の為、シグナルとバックグラウンドの比である S/B 比を用いる。ただし、シグナル数は生成点のずれによるカットにより減少し、統計的有意性が失われる。S/B 比ではこのシグナル数の統計的有意性の減少を考慮するため、シグナルの統計的有意性を示す \sqrt{S} を重み付けする。よって用いる指標は $S^{\frac{3}{2}}/B$ である。 $S^{\frac{3}{2}}/B$ の高い点を参考に、シグナルの検出効率と合わせて吟味し最終的な生成点のずれの条件を決定する。

第5章 結果・考察

5.1 シミュレーション結果

重心系衝突エネルギー $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ の p-p 最小バイアス衝突を 40000 回行った結果を以下に示す。MFT が覆う $-3.6 \leq \eta \leq -2.45$ に入る全ての μ 粒子の生成源を表示している。

表 5.1: 生成された μ 粒子の生成源

ベクター中間子	生成数 (p-p 衝突 40000 回)	生成数/p-p 衝突	割合 (%)
ρ	1	2.50×10^{-5}	4.01×10^{-3}
ω	8	2.00×10^{-4}	3.21×10^{-2}
ϕ	3	7.50×10^{-5}	1.20×10^{-2}
合計	12	3.00×10^{-4}	4.81×10^{-2}
重フレーバー中間子			
D	122	3.05×10^{-3}	4.90×10^{-1}
B	4	1.00×10^{-4}	1.61×10^{-2}
合計	126	3.15×10^{-3}	5.06×10^{-1}
π, K			
π	21126	5.28×10^{-1}	84.8
K	3634	9.09×10^{-2}	14.6
合計	24760	6.19×10^{-1}	99.4
その他			
τ	3	7.50×10^{-5}	1.20×10^{-2}
η	11	2.75×10^{-4}	4.41×10^{-2}
Λ	7	1.75×10^{-4}	2.81×10^{-2}
Ξ	1	2.50×10^{-5}	4.01×10^{-3}
合計	22	5.50×10^{-4}	8.82×10^{-2}
合計	24920	6.23×10^{-1}	

生成した μ 粒子の内バックグラウンドは 99.4% 占め、シグナルは合計 160 個であった。

次に、再構成された飛跡情報を以下に示す。今シミュレーションにおいては再構成された物理量の他に以下の 2 つの情報を確認する。

- ・ MFT-MCH-MID 飛跡再構成の成功/失敗 (コレクトマッチ/フェイクマッチ)

・ MFT-MCH-MID 飛跡の生成源情報と、その粒子の生成源（親粒子）情報

表 5.2: 再構成された飛跡情報

	検出数	コレクトマッチ
μ (発生源が π, K でない)	117	55
μ (発生源が π, K)	607	74
π, K	143	4
e	1	0
p	38	0
その他	5	0
合計	911	133

「その他」の項に入る数値は MCH に到達した時点の粒子種を特定できなかった再構成情報の数である。この場合、再構成情報を除くシミュレーション情報を入手できない。今回は「その他」の飛跡はバックグラウンドに数える。

5.2 μ 粒子検出効率の見積結果

生成した 160 個のシグナルの横運動量分布と再構成された 911 個の横運動量分布を以下に示す。

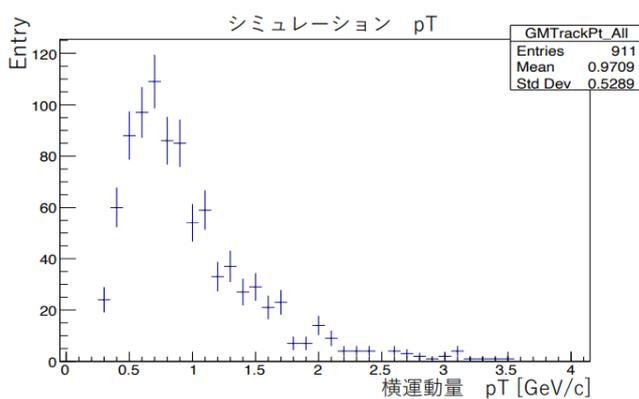
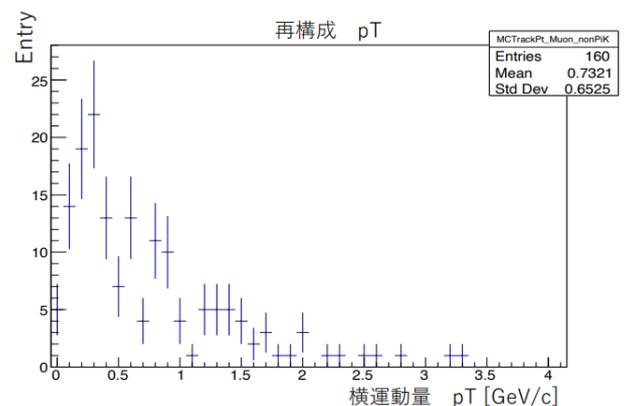
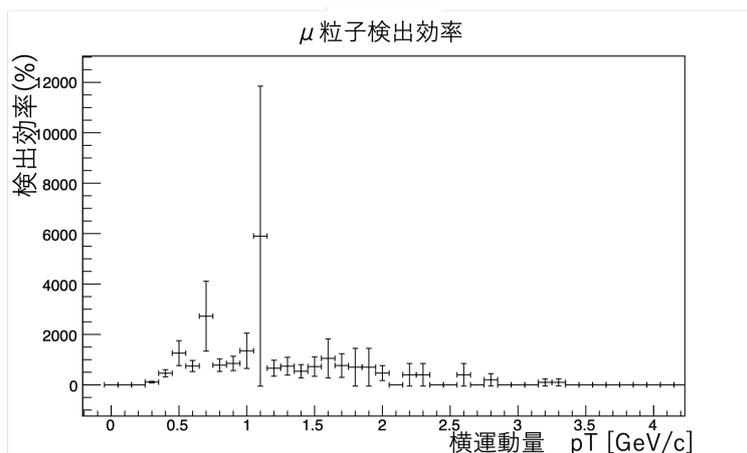
図 5.1: 生成したシグナル μ 粒子の横運動量分布

図 5.2: 検出した粒子の横運動量分布

これらのヒストグラム比を算出し、 μ 粒子検出効率を以下に示す。

図 5.3: 横運動量毎の μ 粒子検出効率

検出数は生成されたシグナルに対して 548% であり、100% を超えた。これは表 4.2 から読み取れる通りバックグラウンドの検出数が全体の検出数に対して 87.2% を占めることが原因である。

5.3 バックグラウンド除去結果

検出されたバックグラウンドとシグナルの実生成点のずれを確認し、シミュレーション情報より、生成点のずれにカットをかけた場合の $S^{\frac{3}{2}}/B$ を見積もった。粒子種を特定できなかった「その他」を除く 906 個の再構成情報の内 789 個のバックグラウンドと 117 個のシグナル用いて実生成点のずれ分布と $S^{\frac{3}{2}}/B$ を以下に示す。

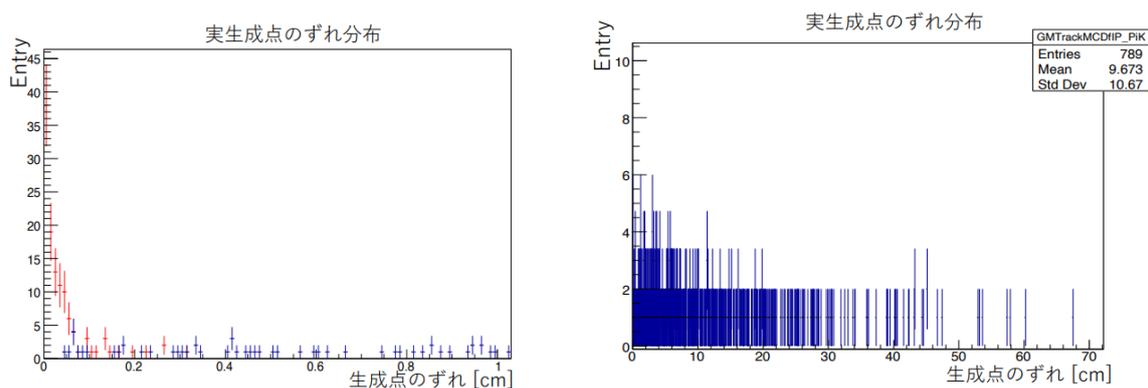


図 5.4: シグナル（赤）とバックグラウンド（青）の実生成点のずれ分布（左）とバックグラウンドの実生成点のずれの全体像（右）

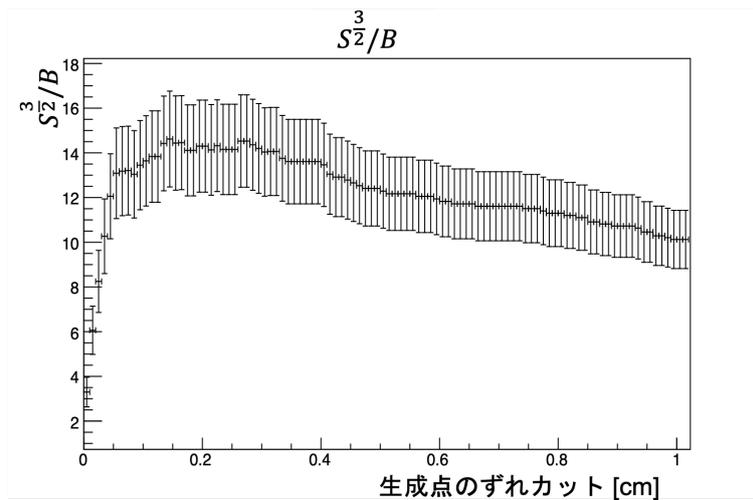


図 5.5: 実生成点のずれのカットに対する $S^{\frac{3}{2}}/B$

図 5.4 から、バックグラウンドの生成点のずれ分布はシグナルより広く広がっており、生成点のずれが大きい飛跡を除去し、小さい飛跡を選択することでバックグラウンド除去が可能であると推測できる。この粒子情報から求めた $S^{\frac{3}{2}}/B$ の値は生成点のずれが約 0.2cm 以上の飛跡を除去した場合で最も高くなり、生成点のずれの上限値を大きくしていくにつれ $S^{\frac{3}{2}}/B$ はカットをかけない値に漸近する様子を示した。これは生成点のずれカットによりバックグラウンドを効果的に除去可能である見積もり結果を示している。

次に検出されたバックグラウンドとシグナルの再構成生成点のずれを確認し、生成点のずれにカットをかけた場合の $S^{\frac{3}{2}}/B$ を導出した。再構成された「その他」も含める 911 個の粒子の内 794 個のバックグラウンドと 117 個のシグナルの再構成生成点のずれ分布と $S^{\frac{3}{2}}/B$ を以下に示す。

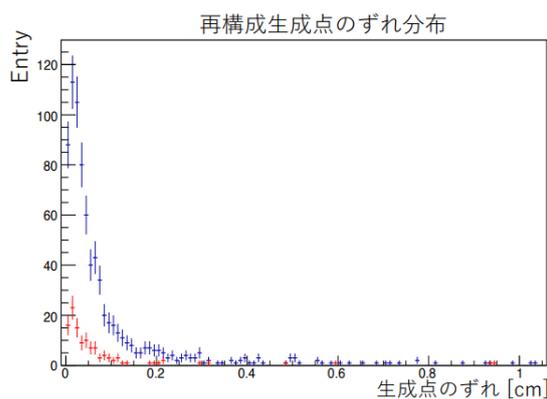


図 5.6: シグナル (赤) とバックグラウンド (青) の再構成生成点のずれ分布

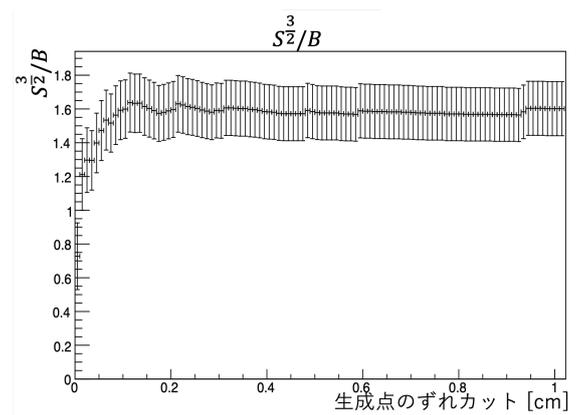


図 5.7: 再構成生成点のずれのカットに対する $S^{\frac{3}{2}}/B$

再構成生成点のずれ分布は実生成点分布のずれ分布と様子が異なる。バックグラウンドの分布が特に顕著であり、分布の広がりや衝突点に近い位置に算出された。こ

これは生成点のずれがシグナルにより近い値を算出していることを示し、この指標によるバックグラウンドとシグナルの区別がシミュレーション情報による見積もりと比べて難しくなることを示している。結果、 $S_{\frac{3}{2}}/B$ が最大化する点は、生成点のずれにカットをかけない点と同じ値を示した。これはバックグラウンドの除去が効果的に行われていないことを示す。

原因を確認する為、飛跡の再構成過程に原因があると仮定した。4.2 章で説明した通り、飛跡再構成は MFT 飛跡と MCH-MID 飛跡のマッチングは難しく、マッチング失敗により再構成情報に変化する可能性がある。よってこの変化が与える生成点のずれの影響を確認した。再構成生成点のずれと実生成点のずれの差を、再構成の過程におけるマッチングの成功・失敗ごとに分けて算出した。結果、再構成生成点のずれと実生成点のずれの関係性はシグナルとバックグラウンドで以下の様子を示した。

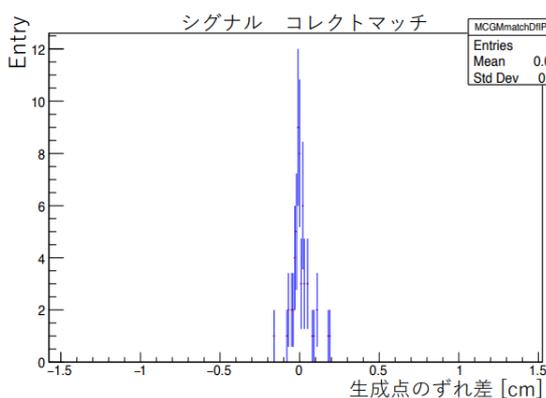


図 5.8: シグナルの生成点のずれ差 (コレク
トマッチ)

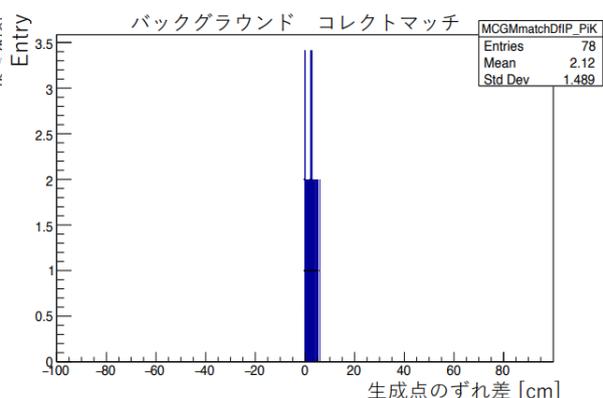


図 5.9: バックグラウンドの生成点のずれ差
(コレクトマッチ)

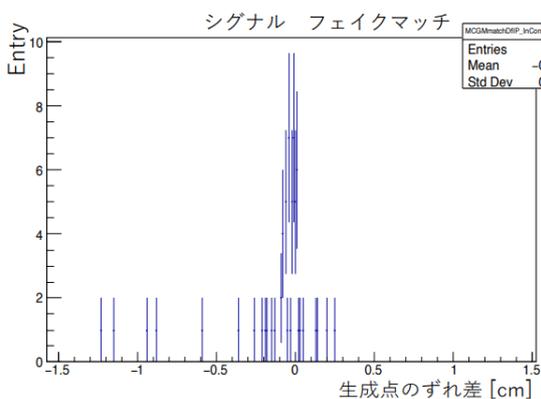


図 5.10: シグナルの生成点のずれ差 (フェイ
クマッチ)

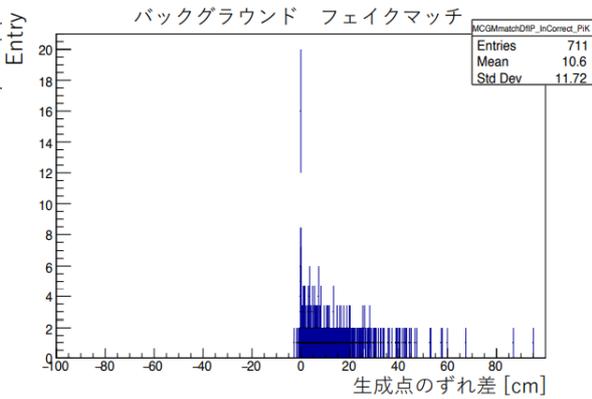


図 5.11: バックグラウンドの生成点のずれ差
(フェイクマッチ)

コレクトマッチとフェイクマッチに共通して生成点のずれ差はコレクトマッチよりフェイクマッチの方が大きく見られる。更に、バックグラウンドの生成点のずれ差が正に偏っている様子が見られる。この特徴からバックグラウンドの再構成生成点のずれは実生成点のずれより小さい値を出した。コレクトマッチが占める割合を確認するとシグナルが 47.0% であるのに対しバックグラウンドは 9.89% であり、バックグラウンドの方がより多くの割合をフェイクマッチが占め、コレ

クトマッチの約 10 倍であった。これらの結果より、 π, K 崩壊由来の μ 粒子は生成点のずれが大きい値を出すことを利用したバックグラウンド除去を効果的に行うためには生成点のずれを小さく出すフェイクマッチのバックグラウンドは減らす必要があると考えられる。

再構成によるマッチングがコレクトマッチした飛跡のみを選択した場合、つまりフェイクマッチを全て除去可能になった場合、この理想的な場合において生成点のずれのカットがどのように働くかを確認した。129 個のコレクトマッチした再構成情報の内、74 個のバックグラウンドと 55 個のシグナルの再構成生成点のずれ分布と $S^{\frac{3}{2}}/B$ を以下に示す。

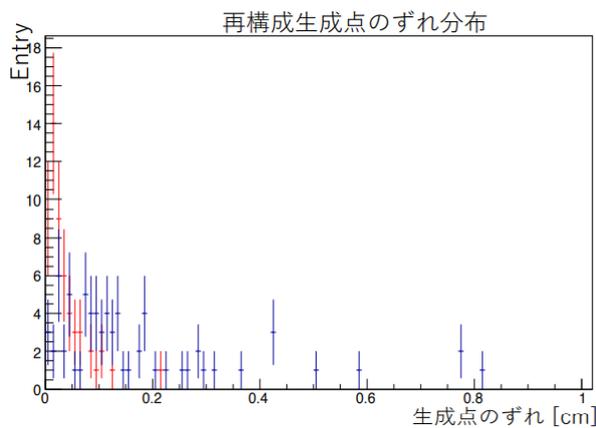


図 5.12: シグナル (赤) とバックグラウンド (青) の再構成生成点のずれ分布 (コレクトマッチ)

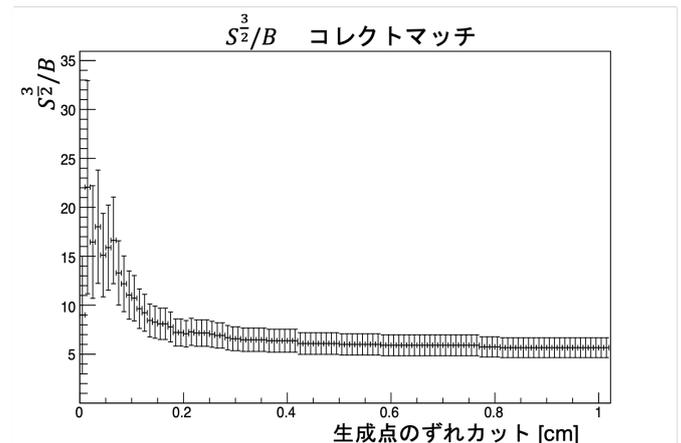


図 5.13: 再構成生成点のずれのカットに対する $S^{\frac{3}{2}}/B$ (コレクトマッチ)

図 5.12 はフェイクマッチを含めた図 5.6 に比べ、真の生成点ずれ分布である図 5.4 に近い生成点のずれ分布を示した。図 5.13 から、再構成のマッチングにおいてフェイクマッチをなくした場合、図 5.5 と同様生成点のずれによるカットにより $S^{\frac{3}{2}}/B$ が高くなり、カットをかけない値へと漸近することが読み取れる。これはバックグラウンドが効果的に除去可能であることを示す。よって、フェイクマッチの除去を可能にした場合では生成点のずれを利用したバックグラウンド除去を効果的に行うことが可能であり、フェイクマッチの除去の重要性が明らかとなった。

5.4 考察

算出した μ 粒子検出効率を図 4.5 より π, K 崩壊由来のバックグラウンドを多く含むために 548% であり、100% を大きく超えた。バックグラウンド除去のために用いた生成点のずれは π, K の寿命が長いために μ 粒子の生成点が衝突点より大きく離れることを利用しているが、この仮定は図 5.4 より正しいことが判明している。さらに、生成点のずれは図 5.5 よりバックグラウンドの効果的除去を可能にすることが判明している。但し、現状再構成により算出される生成点のずれでは、生成点のずれの真の値より小さい値を算出するフェイクマッチが再構成飛跡の多くを占めるためにシグナルとの区別が難しくなり、結果効果的なバックグラウンド除去が出来なかった。しかし、理想的な条件でフェイクマッチの除去を可能にした場合では図 5.13 により生成点のずれを利用したバックグラウンド除去が可能であった。よって、生成点のずれを利用したバックグラウンド除去を効果的に行うためにはフェイクマッチを減らす必要がある。マッチングの成功率を上げるか

フェイクマッチの飛跡を取り除く指標を見つけ出すことによりフェイクマッチを減らすことが可能であると考えられる。

第6章 まとめ・課題

本研究は次期運転の新規 μ 粒子検出系における μ 粒子検出効率を、それら検出器系を再現可能である新規解析系 O^2 フレームワークを用いたシミュレーションと解析により算出することが目的であった。解析の結果においては、現状 μ 粒子検出効率は検出された粒子にバックグラウンドを多く含む為に 548% と算出され、100% を超える。改善する為にはバックグラウンド、本研究では π, K の特徴を利用した除去の指標が必要である。本研究で用いた寿命の違いを用いる指標でのバックグラウンドの除去は原理的には正しいが、現状では再構成過程で起こる再構成失敗が原因で効果的な除去はできない。結論として、生成点のずれを用いたバックグラウンドの除去には

- ・ 飛跡再構成失敗の飛跡を取り除く指標を見つける
- ・ 飛跡再構成の成功率を上げる

これらの必要性を提示する。再構成に成功した飛跡の生成点再構成の精度は失敗した飛跡より高い。再構成が失敗した飛跡を除去することにより、生成点のずれをバックグラウンドの除去の指標として効果的になる可能性があり、理想的に再構成が失敗した飛跡を全て取り除いた場合の見積もり結果は生成点のずれによるバックグラウンド除去の可能性を支持している。

今後、これらの展望を現実にする取り組みと共に解析に用いた生成点のずれの伝搬方法や生成した μ 粒子の定義等を見直しも行っていく。生成点のずれは磁場と通過する物質内でのエネルギー損失を考慮することでより現実の値になると考えている。生成した μ 粒子は擬ラピディティの考慮だけでなく生成点を条件に加える事によりより正確な MFT に入射する μ 粒子を選択できると考えている。これらの課題を本研究を通して身につけた O^2 フレームワークによる解析手法の知識を土台に見直していく。

謝辞

本論文を作成するにあたりお世話になった方全てに最大限の感謝をいたします。

まず指導教官である志垣先生に心より感謝致します。今回の研究テーマを考えてくださり、研究に対する議論や助言だけでなく研究者としての姿勢に関して日ごろからご教授してくださりました。おかげで今もこの研究は誇りをもって努めることができます。山口先生には議論の場での助言だけでなく、研究室に訪れてくださった際の急な質問にも快く答えてくださり、大変お世話になりました。八野先生には本研究の土台である O^2 のチュートリアル作成、及びコードに関する知識を頂きました。本間先生には前期の Labex にて素粒子実験の貴重な経験や解析の基礎を頂きました。三好先生には前期で原子核・素粒子物理に関する理論の基礎を教えてくださいました。荻野さんには O^2 のアップデートや qx に関するサポートをして下さりました。大佐古さんには昔の研究室の話をいろいろ教えてくださいました。山川さんには ALICE の検出器のことで何度も教えてくださいました。桐田さんには推薦入試の際、推薦書を見ていただき、アドバイスを下さいました。大矢さんには ALICE の O^2 について教えてください、資料も頂きました。木村さんには日ごろから研究に関わる物理に関して幅広く教えてくださいました。徳本さんは卒業論文で序論の進め方を参考にさせていただきました。友廣さんは話す機会がほとんどありませんでしたがトポロジーの問題を一緒に解いたときは楽しかったです。重國さんには研究室行事で作業の指揮をして下さいました。石橋さんには推薦入試の推薦書の書き方と見本を見せて下さいました。江島さんには O^2 に関する様々な知識やアップデートに関する変更点、シミュレーションの構造等様々なサポートを日ごろからして下さいました。Izwan, Thanks to you, I have learned about many cultures. Please keep in touch with me more. 支えてくれた同期にも感謝します。羽佐田には効率的な生きざまそのものを教わりました。副田には的をつく意見とレッドブルを頂きました。添田にはよく一緒に夜中残って励みをくれました。西田は自分の研究内容を一番よく知っていろいろなコメントやプレゼンのコツを教えてくださいました。研究室以外でも、この大学生活で一緒に過ごした方全てに感謝いたします。一番よく遊んだりゆうには思考、音楽、その他様々な刺激を貰いました。浦賀には迷惑なほど家に行ったけど快く受け入れてくれました。落合にはいろいろ敵いませんでした。

最後に私を支えてくださった家族、アルバイト先の皆様、サークルの皆様に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 2021: Particle listings. https://pdg.lbl.gov/2021/listings/contents_listings.html. (Accessed on 02/08/2022).
- [2] Addendum to the alice upgrade letter of intent. <https://cds.cern.ch/record/1592659/files/LHCC-I-022-ADD-1.pdf>. (Accessed on 02/08/2022).
- [3] The alice its upgrade. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/41/8/087001/pdf>. (Accessed on 02/08/2022).
- [4] Alice o2 upgrade technical design report. <https://cds.cern.ch/record/2011297/files/ALICE-TDR-019.pdf>. (Accessed on 02/08/2022).
- [5] Alice-tdr-016.pdf. <https://cds.cern.ch/record/1622286/files/ALICE-TDR-016.pdf>. (Accessed on 02/08/2022).
- [6] Alice 実験 (検出器) — lhc alice-j group. <http://alice-j.org/alice/>. (Accessed on 02/08/2022).
- [7] daucorrelations.pdf. <http://nuclear.ucdavis.edu/~brovko/Quals/dAuCorrelations.pdf>. (Accessed on 02/08/2022).
- [8] <https://cds.cern.ch/record/1981898/files/alice-tdr-018.pdf>. <https://cds.cern.ch/record/1981898/files/ALICE-TDR-018.pdf>. (Accessed on 02/08/2022).
- [9] Jps2015s_chujo_v04.key. https://utkhii.px.tsukuba.ac.jp/report/2015/JPS2015s/JPS2015s_chujo_v04.pdf. (Accessed on 02/08/2022).
- [10] Overview — geant4.web.cern.ch. <https://geant4.web.cern.ch/node/1>. (Accessed on 02/08/2022).
- [11] Pythia 8.3 - pythia 8.3. <https://pythia.org/>. (Accessed on 02/08/2022).
- [12] Quark gluon plasma - qcd matter open forum (qcdmof). [https://qcdmof.cns.s.u-tokyo.ac.jp/index.php?Quark20\\${\%}\\$Gluon\\${\%}\\$20Plasma](https://qcdmof.cns.s.u-tokyo.ac.jp/index.php?Quark20${\%}$Gluon${\%}$20Plasma). (Accessed on 02/08/2022).
- [13] Quark physics group - lhc-alice experiment. <https://sites.google.com/cns.s.u-tokyo.ac.jp/quark-physics-group/>. (Accessed on 02/08/2022).
- [14] toshi_180402_lhc.key. https://indico.cern.ch/event/689910/contributions/2919913/attachments/1625803/2589021/toshi_180402_LHC.pdf. (Accessed on 02/08/2022).

-
- [15] クォーク・グルーオンプラズマ (qgp) — lhc alice-j group. <http://alice-j.org/クォーク・グルーオンプラズマ-qgp/>. (Accessed on 02/08/2022).
- [16] 技術ノート_vol19_no3. https://www.jstage.jst.go.jp/article/hamon/19/3/19_150/_pdf/-char/en. (Accessed on 02/08/2022).
- [17] B. ポッフ/C. ショルツ/F. サッチャー. 素粒子・原子核物理入門 改訂新版. 丸善, 2019.