

2023年度 卒業論文

sPHENIX-INTT 検出器のための衝突点
測定方法の開発

奈良女子大学 理学部 数物科学科 物理学コース
高エネルギー物理学研究室

池本真尋

2024年 3月5日

概要

2023年5月より、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の重イオン衝突型加速器 RHIC を用いた sPHENIX 実験が稼働した。この実験は、2000～2016年に同地で行われていた PHENIX 実験の後継実験である。クォークとグルーオンが閉じ込めから解放された状態であるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の性質の解明を主な目的としており、ハドロンジェットやウプシロン中間子の測定を行っている。

本研究では、シリコン飛跡検出器 INTT を使用したビーム衝突点の Z 座標を精度よく決定する手法を開発・検討した。開発では、陽子+陽子衝突および検出器のシミュレーションを用いて、シリコン飛跡検出器 INTT を使用して z 方向の衝突点をより精度よく求める手法の開発を行なった。主に、INTT 検出器を用いて再構成した飛跡と x-y 原点との最近接距離上にある z 位置である DCAz 座標のプロットを用いて、衝突点を計算した。そのために、複数の異なる手法で z 方向の衝突点を求め、結果を比較・検討し、より良い計算方法を決定した。

その結果、誤差を用いて平均値を求めたうえ、その平均値から 1 シグマの範囲内にある飛跡のみで再度平均値を求める手法で 0.964[cm] という分解能が得られ、最も精度が高いことがわかった。

今後の課題としては、DCAz 座標を用いず、ヒット位置とその傾きを用いる手法について再検討すること、本研究を実際のデータに反映することがあげられる。

目次

第 1 章	序論	2
1.1	QGP (Quark-Gluon Plasma)	2
1.2	高エネルギー原子核衝突実験	3
1.3	研究背景	3
1.3.1	RHIC	3
1.3.2	sPHENIX 実験	4
1.3.3	飛跡検出器群	4
1.4	本研究の目的	5
第 2 章	中間飛跡検出器 INTT	6
2.1	シリコンセンサー	6
2.2	FPHX チップ	7
2.3	HDI (High Density Interconnect)	7
第 3 章	衝突点の再構成	8
3.1	クラスタリング	8
3.2	トラックレットの生成	9
3.3	DCA _z 座標の求め方	9
第 4 章	衝突点測定方法の開発	11
4.1	DCA _z 座標を用いて衝突点を求める	11
4.1.1	DCA _z 座標プロットを用いた場合	11
4.1.2	誤差を含めた DCA _z 座標プロットを用いた場合	15
4.1.3	位置分解能幅を誤差とした DCA _z 座標プロットを用いた場合	19
4.2	加重平均法から衝突点を求める	22
4.2.1	クラスターの z 座標を用いた場合	22
4.2.2	クラスターの z 座標とトラックの傾き a を用いた場合	24
4.3	研究結果	25
第 5 章	結論	27
	付録	29

目次

1.1	宇宙の歴史	2
1.2	RHIC の俯瞰図	3
1.3	sPHENIX 検出器	4
2.1	INTT 検出器	6
2.2	実際のシリコンセンサーラダー	6
2.3	シリコンセンサーモジュール	7
3.1	衝突点再構成の概要図	8
3.2	x-y 平面上のトラックレット	9
3.3	角度差分布	9
3.4	x-y 平面における DCAz 座標点	10
3.5	r-z 平面における DCAz 座標点	10
4.1	平均法から求めた z_vertex	12
4.2	ピーク法から求めた z_vertex	12
4.3	3 シグマ平均法から求めた z_vertex	13
4.4	1 シグマ平均法から求めた z_vertex	14
4.5	z_vertex のプロット比較	14
4.6	z_vertex の分解能比較	14
4.7	DCAz 座標の誤差の取り方	15
4.8	誤差を考慮した平均法	16
4.9	誤差を考慮したピーク法	16
4.10	誤差を考慮した 3 シグマ平均法	17
4.11	誤差を考慮した 1 シグマ平均法	18
4.12	誤差付き DCAz プロットを用いた z_vertex のプロット比較	18
4.13	誤差付き DCAz プロットを用いた z_vertex の分解能比較	18
4.14	DCAz 座標の位置分解能を誤差範囲とする取り方	19
4.15	位置分解能を誤差範囲として考慮した平均法	20
4.16	位置分解能を誤差範囲として考慮したピーク法	20
4.17	位置分解能を誤差範囲として考慮した 3 シグマ平均法	21
4.18	位置分解能を誤差範囲として考慮した 1 シグマ平均法	21
4.19	位置分解能を誤差とした DCAz プロットを用いた z_vertex のプロット比較	22
4.20	位置分解能を誤差とした DCAz プロットを用いた z_vertex の分解能比較	22
4.21	クラスターの z 座標を用いる加重平均法の概要図	23

4.22	クラスターの z 座標を用いた加重平均法	23
4.23	クラスターの z 座標とトラックの傾き a を用いる加重平均法の概要図	24
4.24	クラスターの z 座標とトラックの傾き a を用いた加重平均法	25
4.25	各方法で求めた z_{vertex} の分解能比較	26

第1章 序論

1.1 QGP (Quark-Gluon Plasma)

我々の周りのものを構成している原子は、原子核と電子から構成されている。その原子核は陽子と中性子から構成されており、陽子と中性子をまとめて核子と呼ぶ。核子はクォークとグルーオンという素粒子から構成されている。

QGP とは、クォークとグルーオンからなる、超高温・高エネルギー密度の物質のことである。

通常、クォークやグルーオンは核子内部に閉じ込められている。しかし高温では「閉じ込め」が破れ、クォークやグルーオンが広い空間を比較的自由に動き回る相になる。これを QGP という。この相は宇宙初期、ビッグバンから数 μ ～数十 μ 秒後に存在していたと考えられている。図 1.1 は、ビッグバン後の宇宙の時空発展を表した図である。[1, 2]

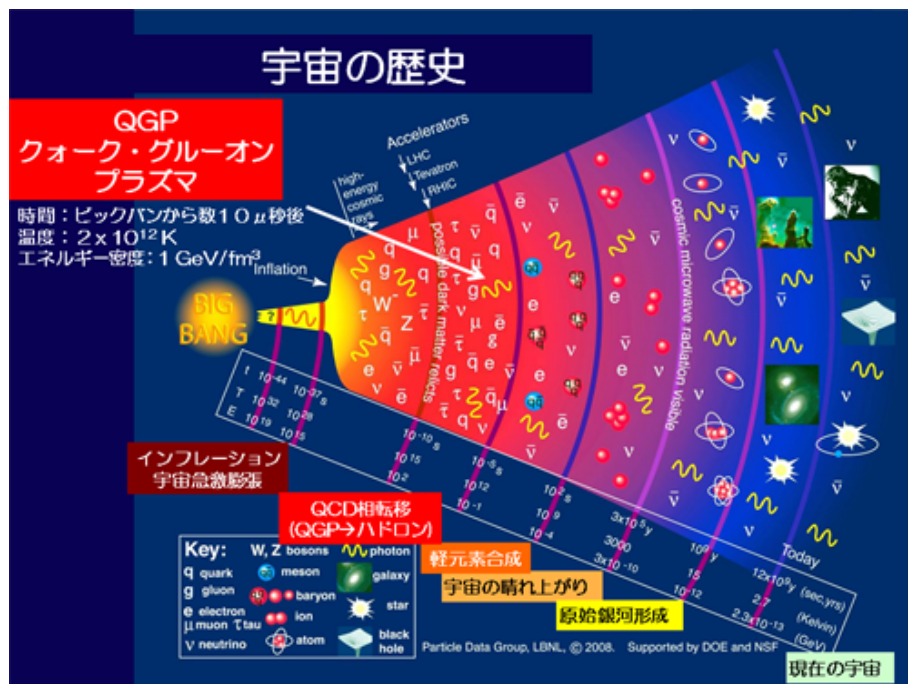


図 1.1: 宇宙の歴史

1.2 高エネルギー原子核衝突実験

高エネルギー原子核衝突実験とは、高エネルギーに加速した重い原子核同士を衝突させる実験である。高エネルギーの原子核同士を衝突させることで高温高密度状態を実験室系で作り出し、QGPを生成することができる。この実験の主な目的は、QGPの生成およびその性質の解明である。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 (Relativistic Heavy Ion Collider, 以下 RHIC) にて、金原子核同士を超高エネルギーで衝突させることにより QGP を人工的に作り出せるようになった。現在は RHIC とヨーロッパにある欧州原子核研究機構 (CERN) にある LHC で高エネルギー原子核衝突実験が行われている。LHC 加速器での ALICE 実験では、QGP だけでなく強い相互作用の理論である量子色力学 (QCD) の測定も行っている。ここでは、陽子核対、鉛原子核対、陽子核と鉛原子核などの衝突実験を行っている。実験室で到達する最高温度において強い相互作用を受ける物質の性質に関する理解を深めている。[3, 4]

1.3 研究背景

1.3.1 RHIC

RHIC とは、BNL にある世界初の重イオン衝突型加速器である (図 1.2)。金原子核対や重陽子・金原子核、銅原子核・金原子核衝突などを行っており、最大重心系エネルギーは金原子核対 200GeV、陽子対 200GeV である。周長 3.8km の 2 つの超伝導加速器リングからなり、衝突点は 6 カ所ある。各衝突点で実験が可能であり、現在は sPHENIX 実験と STAR 実験が稼働している。[3]

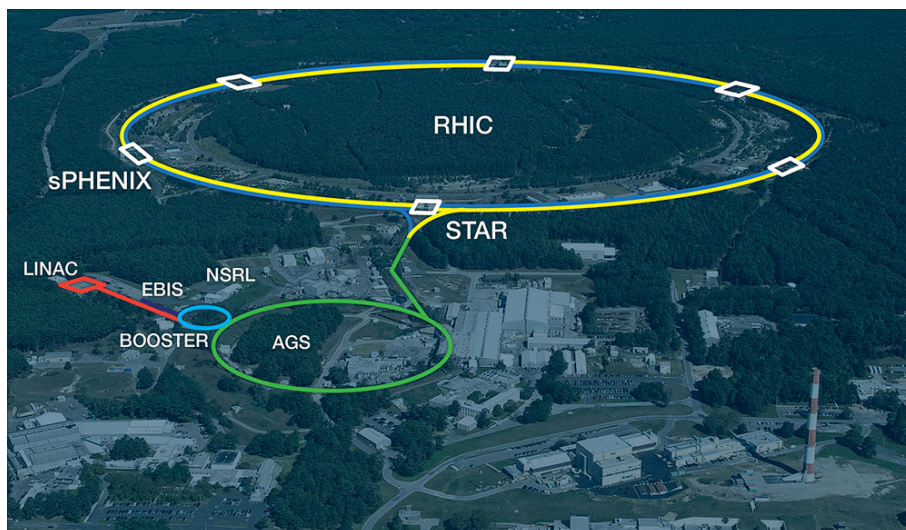


図 1.2: RHIC の俯瞰図

1.3.2 sPHENIX 実験

RHIC では 2000 年から 2016 年にかけて PHENIX 実験が行われていた。PHENIX 実験の目的は原子核衝突反応によって QGP を再現し、その性質を研究することにあつた。[1]

sPHENIX 実験は PHENIX 実験をさらに高度化したものであり、2023 年より稼働が始まった。sPHENIX 実験ではジェット、ジェット対の相関関係、 Υ 粒子などを測定し、QGP の輸送係数と色遮蔽長の温度依存性を決定する。これらの測定は高い検出効率と大きな検出範囲を持つハドロンカロリメータ、電磁カロリメータ、3つの飛跡検出器によって行われており、飛跡検出器は質量の異なる3つの Υ 状態を識別するのに十分な質量分解能を持つ。[2]

1.3.3 飛跡検出器群

sPHENIX 実験の飛跡検出器は内側から MVTX、INTT、TPC の3つで構成されている (図 1.3)。

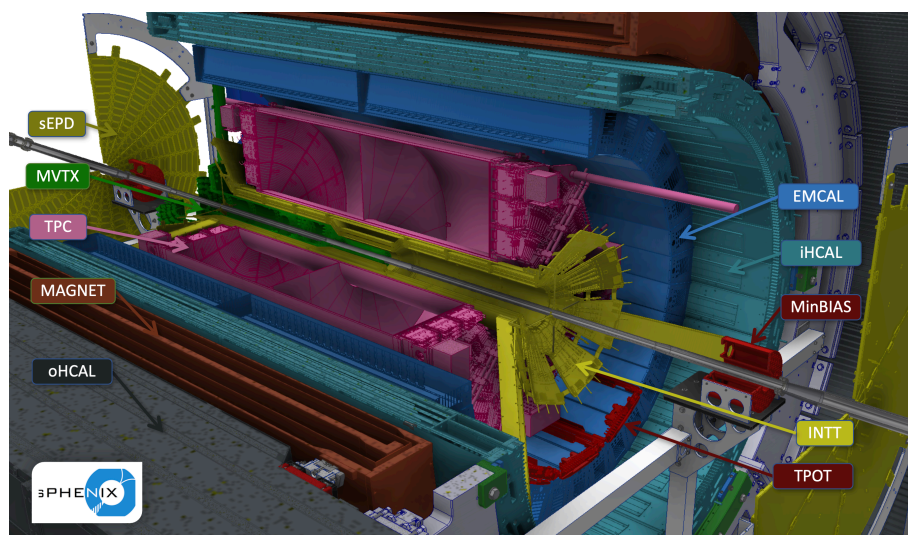


図 1.3: sPHENIX 検出器

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

MVTX とは、sPHENIX 検出器の最内層に位置するピクセル型シリコン検出器である。LHC 加速器での ALICE 実験において開発された MAPS (Monolithic Active Pixel Sensor) を用いている。ビームパイプから 2 – 4cm に位置する。3層の樽状構造となっており、ピクセルサイズは $27\mu\text{m} \times 29\mu\text{m}$ である。衝突中心からビーム軸方向に $\pm 10\text{cm}$ 、方位角方向に対して 2π の範囲を覆っている。MVTX では精度の高い飛跡再構成が実現可能であり、衝突点と生成粒子の最近接距離を測定することによって重いクォークの検出を行う。[2, 6]

INTT (INTermediate Tracker)

INTTとは、sPHENIX 検出器において、MVTX・TPC 間に位置するストリップ型シリコン検出器である。ビームパイプから 6 – 12cm に位置する。衝突中心からビーム軸方向に $\pm 23\text{cm}$ 、方位角方向に対して 2π の範囲を覆っている。INTT は MVTX と TPC での飛跡を繋ぎ、運動量分解能を上げるとともに各飛跡に 1 ビームバンチ以下の時間情報を与える役割を担う。より詳細な説明は第 2 章に記す。[2]

TPC (Time Projection Chamber)

TPC とは、sPHENIX 検出器の最外層に位置するガス検出器である。ビームパイプから 20 – 78cm に位置しており、48 枚の読み出しパッドからなる。衝突中心からビーム軸方向に $\pm 1\text{m}$ 、方位角方向に対して 2π の範囲を覆っている。高い位置分解能を持ち、荷電粒子における運動量測定において中心的な役割を担う。また、粒子のエネルギー損失 (dE/dx) を用いて荷電粒子の識別を行うこともできる。[2]

1.4 本研究の目的

本研究の目的は、 z 方向の衝突点をより精度良く求めることである。

衝突点を求めなければいけない理由として、検出効率の評価と、中性粒子の測定があげられる。粒子の衝突点の位置や検出器内の通過位置による検出効率の影響を考慮するために、検出器の効率を評価する必要がある。衝突点の位置に基づいてデータを分割し、場所ごとに検出効率を見積もる。また、中性粒子は電荷を持たないため、飛跡検出器では測定できない。そのため、中性粒子の方向は、衝突点とカロリメータ（エネルギー測定器）のヒット位置を使用して決定される。それらから中性粒子の運動量を求めることで、衝突して崩壊する前の状態がわかる。これらの目的のため、衝突点を求める必要がある。

また、 z 方向は x, y 方向に比べて分解能が低く、ビーム交差も広いため、衝突ごとに衝突点を精度良く決める必要がある。分解能に関する詳細な説明は第 2 章に記す。

これらのため、INTT を用いて衝突点を測定する手法を開発し、複数の異なる手法を比較・検討した。

第2章 中間飛跡検出器INTT

INTTは2層の樽状の構造をしており、内層と外層にそれぞれ24本、32本の計56本のシリコンセンサーラダーが配置されている。立体角の隙間を無くすため、内層、外層はそれぞれ半径が異なる2層構造になっており、合計で4つの層をもつ。それらの半径は、それぞれ7cm、10cmである。INTTに用いられているシリコンセンサーラダーは、ストリップ型シリコンセンサー、FPHX読み出しチップ、HDIから構成されている。2つのシリコンセンサーモジュールで1本のセンサーラダーが構成されている。シリコンセンサーについては2.1節で記す。以下に、INTT検出器の断面図(2.1)と実際のシリコンセンサーラダー(2.2)を示す。

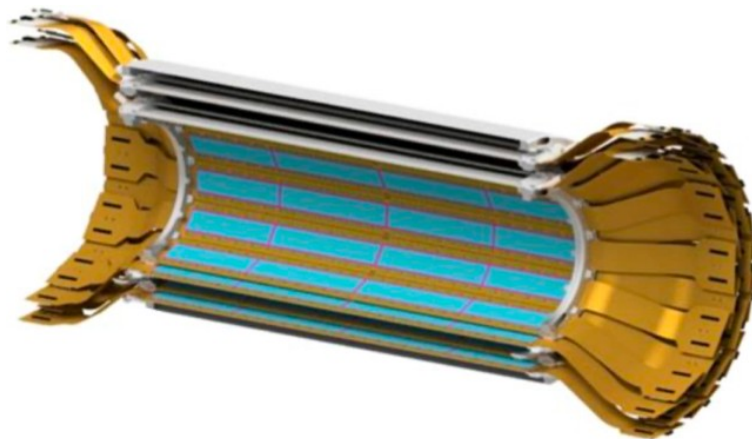


図 2.1: INTT 検出器

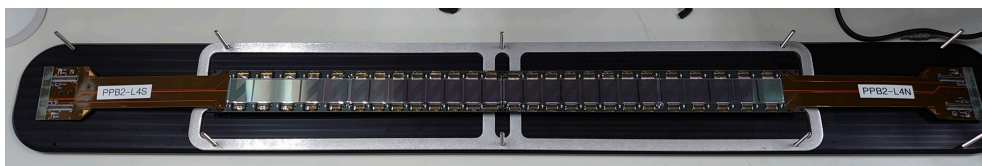


図 2.2: 実際のシリコンセンサーラダー

2.1 シリコンセンサー

1つのストリップは縦： $78\mu\text{m}$ 、横： 16mm (Type-A) もしくは 20mm (Type-B)、厚さ： $320\mu\text{m}$ のストリップ128個からなっている。以降このストリップを channel と呼ぶ。

Type-A シリコンセンサーが 8×2 個、Type-B シリコンセンサーが 5×2 個、計 26 個のシリコンセンサーで 1 つのシリコンセンサーモジュールが構成されている。

シリコンセンサーを図 2.3 に示す。[2]

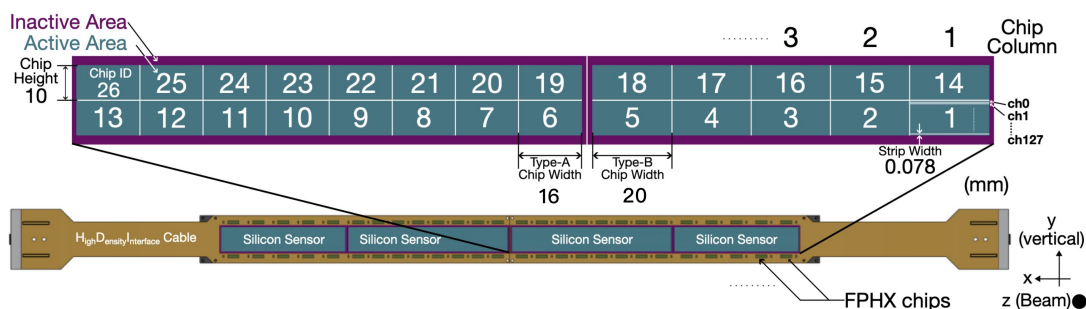


図 2.3: シリコンセンサーモジュール

2.2 FPHX チップ

FPHX チップとは、センサーからの信号を読み出すためのチップで、PHENIX 実験のシリコン検出器 FVTX でも用いられた。1 チップあたり 128 個の読み出しチャンネルを持っており、各チャンネルにおいて波形整形を行い、3bit の ADC を出力する。ADC0-7 の各閾値は 8bit の DAC によって設定できる。FPHX チップはシリコンセンサーおよび読み出し基板 (HDI) とワイヤーボンディングによって接続されている。[2]

2.3 HDI (High Density Interconnect)

HDI とは、入出力信号を後段のデータ処理回路と接続するとともに、シリコンセンサーと FPHX チップに電源を供給するための基板である。FPC (Flexible Printed Circuits) という柔軟性が高く、薄い基板で作られている。データを処理する読み出し基板 ROC (Read Out Card) とはコンバージョンケーブルおよび BusExtender を用いて接続される。[2]

第3章 衝突点の再構成

この章では、本研究の概要・解析手法について記述する。
本研究では、以下の手順で衝突点を再構成する。

1. 検出器のヒットチャンネルをクラスタリングし、ヒット位置を再構成する
2. 内層、外層のヒットを用いて飛跡を再構成する。
3. 再構成した飛跡と原点との最近接位置を求める
4. z 衝突点を決定する

まず、二層からなる検出器の内層 (inner barrel)、外層 (outer barrel) それぞれのヒット位置を再構成し、それを用いて飛跡を再構成する。次に、飛跡と x - y 原点 $(0,0)$ との最近接距離 (DCA) とその z 位置 (DCA $_z$ 座標) を求める。最後に、求めた DCA $_z$ 座標を用いて z 方向の衝突点 (z -vertex) を決定する。それぞれについての詳しい説明を以下に記述する。

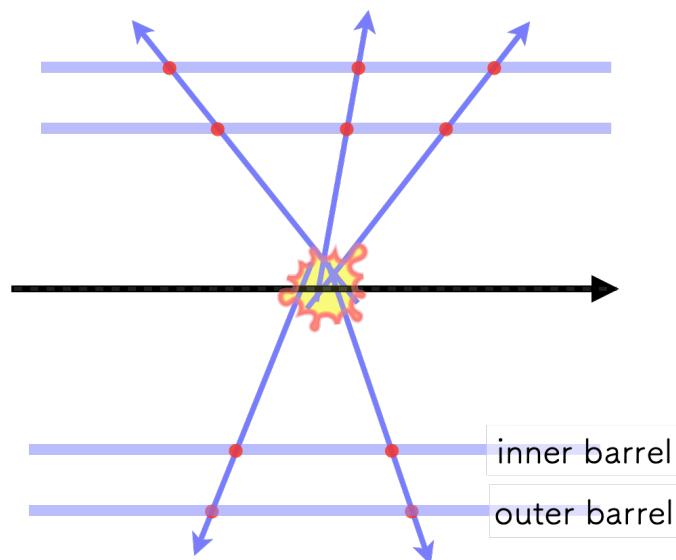


図 3.1: 衝突点再構成の概要図

3.1 クラスタリング

INTT では、データは channel 単位で測定される。しかし、荷電粒子が斜め方向に入射したときや入射位置によっては複数の channel にまたがって通過する場合がある。このとき

1 粒子の hit が各 channel に分かれて記録される、つまり 1 つの hit が複数の hit として記録されることになる。そのため、本研究では同時刻に隣り合った channel にヒットがあった場合、同一粒子が通過した際の hit であるとみなす。この同一粒子による hit を 1 つにまとめることをクラスタリングという。具体的には、損失エネルギーに対応する ADC 値を重みとして求めたクラスタの重心位置を新しい hit 位置とした。1 つにまとめた hit のことをクラスタと呼ぶ。

以下にクラスタリングにおける hit 位置の計算式を示す。[2]

$$\text{clustered channel} = \frac{\sum (\text{ADC}_i \times \text{channel}_i)}{\sum \text{ADC}_i}$$

3.2 トラックレットの生成

飛跡再構成時に内層・外層それぞれで決めたクラスタ位置のペアを、トラックレットと呼ぶ。ペアを選ぶ条件として、図 3.2 のように、x-y 平面上で内層上のクラスタ A と外層上のクラスタ B との角度差が $|\Delta\phi_{AB}| < 0.01$ であるものを選ぶ。ここで、図 3.3 は横軸がクラスタ A の角度 ϕ_A 、縦軸がクラスタ A と B の角度差 $\Delta\phi_{AB}$ の分布である。

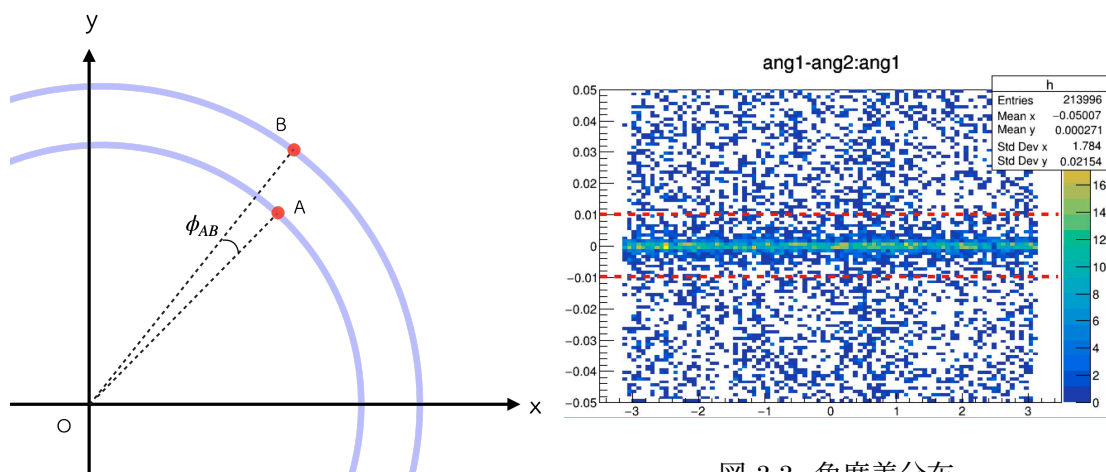


図 3.3: 角度差分布

図 3.2: x-y 平面上のトラックレット

3.3 DCAz 座標の求め方

再構成したトラックレットと原点間の最近接距離 (DCA) を計算し、その z 位置 (DCAz 座標) を求める。DCA は、x-y 平面上のクラスタ A とクラスタ B の間の単位ベクトル \vec{u} 、クラスタ A と原点 O 間のベクトル \vec{v} の二つのベクトルを用いて計算される。この時点での衝突点は未知であるため、原点 (0,0) を初期値とする。これらを用いて、DCA 座標とクラスタ A の距離 DCA_L 、DCA 座標と原点の距離 DCA_{2D} を計算する。

$$DCA_L = \vec{v} \cdot \vec{u} = \vec{v} \cdot \cos \phi$$

$$DCA_{2D} = \vec{v} \times \vec{u} = \vec{v} \cdot \sin \phi$$

続いて、 DCA_L を用いて DCA_z 座標を計算する。

$$DCA_z = DCA_L \times u_z + A_z$$

ここで求めた DCA_z 座標を用いて、衝突点を計算していく。[7]

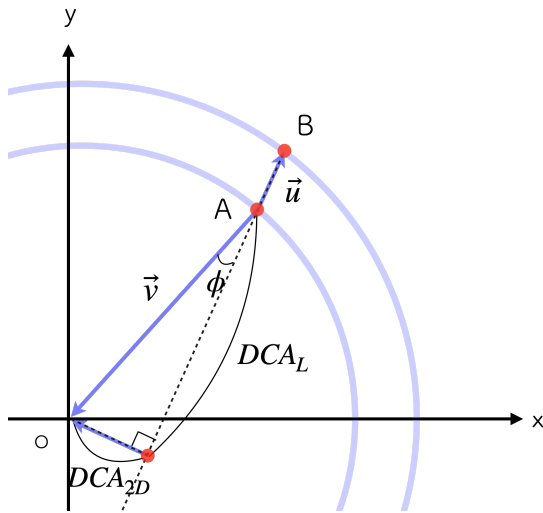


図 3.4: x-y 平面における DCA_z 座標点

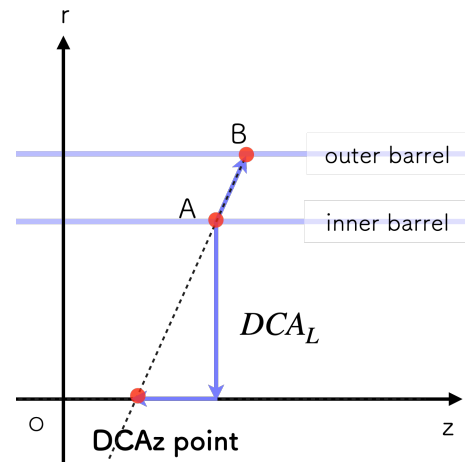


図 3.5: r-z 平面における DCA_z 座標点

第4章 衝突点測定方法の開発

本研究では、シミュレーションデータを用いて開発を行なった。用いたシミュレーションデータは Pythia を用いて作成された、陽子対衝突 (200GeV) データである。sPHENIX 全体の検出器シミュレーションであり、2023 年度の sPHENIX 試運転に合わせて磁場なしのデータとなっている。衝突点の真値はそれぞれ $(x,y)=(0,0)$ 、 z 軸方向のみ $\sigma = 20\text{cm}$ 、イベント数は 10000 のシミュレーションデータを使用している。

4.1 DCA_z 座標を用いて衝突点を求める

1 イベント毎に DCA_z 座標のヒストグラムを作成し、そのプロットを用いて衝突点を計算した。ここでは、平均法、ピーク法、3 シグマの範囲内での平均法、1 シグマの範囲内での平均法の 4 種の方法で計算を行った。このとき、トラックレットが存在しないイベントが数十存在しており、それらのイベントは排除して解析を行った。

また、求めた z_{vertex} とシミュレーションデータの真値 (truth) の z_{vertex} との差分もプロットした。求めた z_{vertex} の値が正確であればあるほど真値に近づくので、差分は小さくなり、ヒストグラムは細くなる。差分ヒストグラムの標準偏差が衝突点の測定分解能を表す。

以下では異なる手法によって求めた z_{vertex} の精度と、差分分布を用いて評価する。

4.1.1 DCA_z 座標プロットを用いた場合

平均法

1 イベント毎に作成した DCA_z 座標の分布から平均値を計算し、その平均値を z_{vertex} と考える方法。全イベントで同様に分布を作成し、 z_{vertex} を計算した。

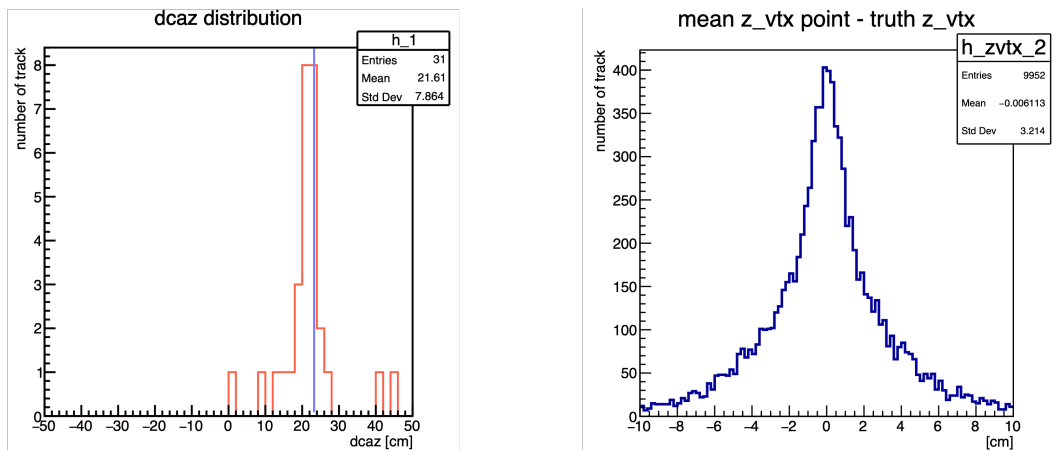


図 4.1: 平均法から求めた z_vertex

図 4.1 において、左図が 1 イベントの DCAz 座標プロットである。DCAz 座標分布は、z 軸方向の chip の幅が最大で 2cm あるため、それにあわせて bin 幅を 2cm に設定している。青い線が引いてある値が平均値、つまりこの平均法において求めた z_vertex である。右図が全イベントの z_vertex とシミュレーションデータの真値 (truth) の z_vertex の差分布である。

今回の平均法では、3.214[cm] という分解能が得られた。この方法での問題点として、ヒストグラムのピーク位置から離れた位置にある値も全て含めて平均値を求めているということが挙げられる。離れた値を含めてしまうことで精度が下がってしまうと考えられる。よって、離れた値を入れずに衝突点を求める方法を以下で考える。

ピーク法

1 イベント毎に作成した DCAz 座標分布のピークの値を z_vertex と考える方法。ピークの値のみを考慮することで、離れた位置にある値を含めずに衝突点を求めることができる。

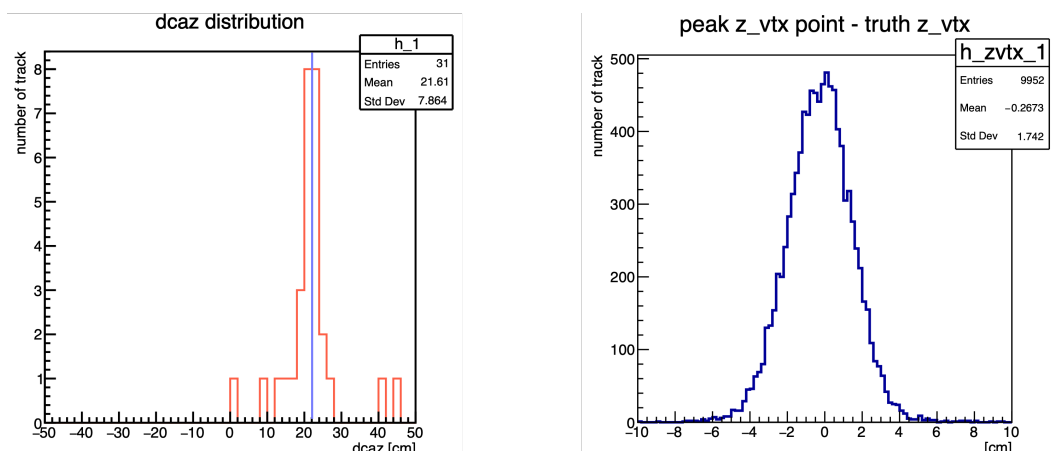


図 4.2: ピーク法から求めた z_vertex

図 4.2 左図が 1 イベントの DCAz 座標プロット、右図が全イベントの z_{vertex} と truth の z_{vertex} の差分布である。

今回のピーク法では、1.742[cm] という分解能が得られた。上記の平均法よりも良い値を得ることができた。

3 シグマの範囲内での平均法

続いて、1 イベント毎に作成した DCAz 座標分布において、使用する値の範囲を決めて平均値を求めるという方法を考えた。DCAz 座標分布の平均値から 3 シグマの範囲内にあるデータのみを用いて平均値を求め、その値を z_{vertex} と考えた。

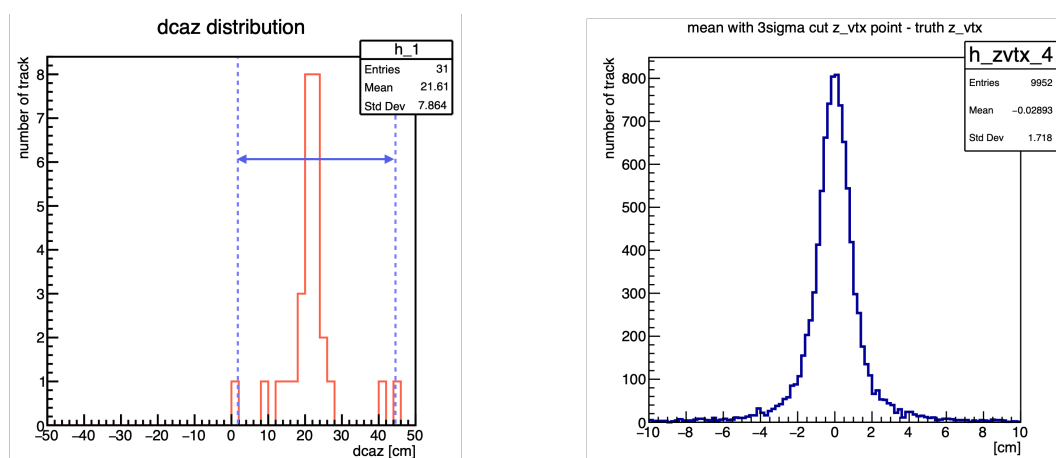


図 4.3: 3 シグマ平均法から求めた z_{vertex}

図 4.3 左図が 1 イベントの DCAz 座標プロット、右図が全イベントの z_{vertex} と truth の z_{vertex} の差分布である。左図において、青線の範囲内で平均値を計算した。

今回の 3 シグマ平均法では、1.718[cm] という分解能が得られた。

1 シグマの範囲内での平均法

次に、DCAz 座標分布の平均値から 1 シグマの範囲内にあるデータのみを用いて平均値を求め、その値を z_{vertex} とする方法を考えた。3 シグマ平均法よりも狭い範囲にあるデータを使用することで、より精度の良い結果が得られると考える。

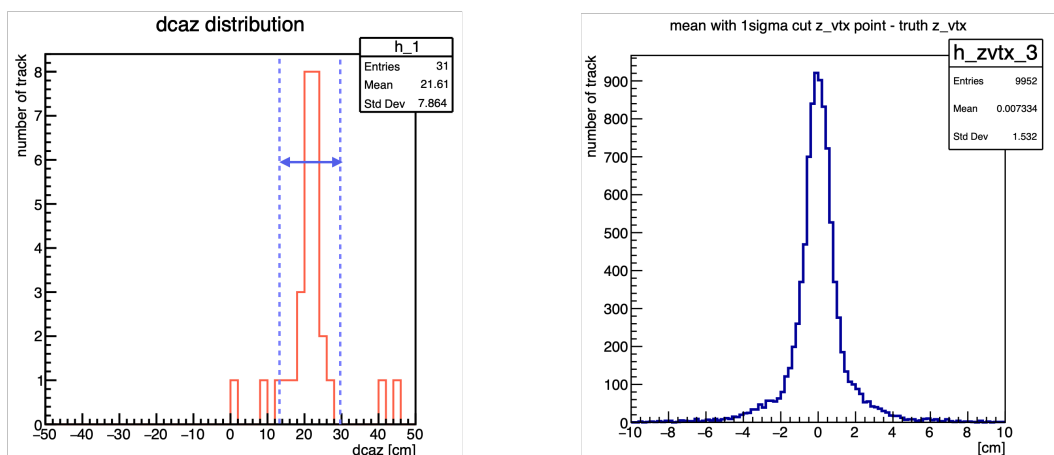


図 4.4: 1 シグマ平均法から求めた z-vertex

図 4.4 左図が 1 イベントの DCAz 座標プロット、右図が全イベントの z-vertex と truth の z-vertex の差分布である。左図において、青線の範囲内で平均値を計算した。

今回の 1 シグマ平均法では、1.532[cm] という分解能が得られた。

まとめ

上記四種類の方法で求めた z-vertex のプロットを重ね合わせて描画し、比較した。

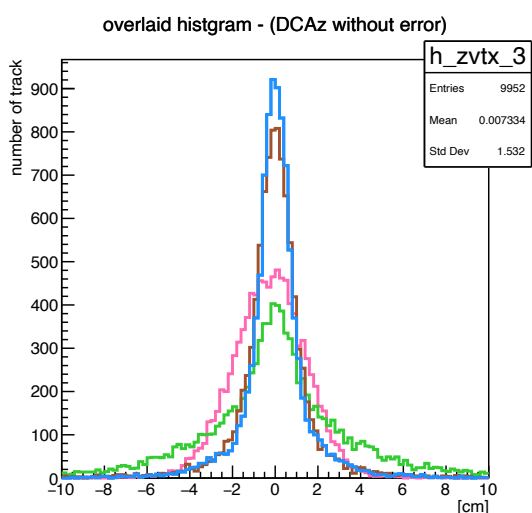


図 4.5: z-vertex のプロット比較

	Std値[cm]
平均法	3.214
ピーク法	1.742
3σカットをかけた 平均法	1.718
1σカットをかけた 平均法	1.532

図 4.6: z-vertex の分解能比較

1 シグマ平均法で求めた分解能が一番高く、ヒストグラムも細いことから、最も精度が良いことがわかる。また、ピーク法とカットをかけた平均法を比べると、値の差は小さいが、カットをかけた平均法の方がヒストグラムが細く長いことから、ピーク法に比べて測定安定度が増していることもわかる。

4.1.2 誤差を含めた DCAz 座標プロットを用いた場合

ここまで、クラスターの z 位置は、ストリップの中心としていた。しかし、実際は、粒子はストリップのどこでも通過できる。そこで、クラスターの z 位置の取り得る範囲を考慮するため、ストリップサイズをクラスターの誤差とし、トラックレットによる DCAz 位置の範囲は、2 層のクラスターの正負の誤差をそれぞれ結んだ線によって定義した。これらの誤差の取り方は図 4.7 で示している。また、図 4.7 の下部では、Track1、2 による DCAz の取り得る範囲=誤差を例示している。この誤差を用いて衝突点を求めるため、ヒストグラムを用いて、それぞれの手法で計算した。1 トラックレットは、ヒストグラム中の DCAz が取り得る領域を一様に埋める。これを 1 イベントのトラックレット分繰り返すことで、誤差ありの DCAz ヒストグラムを得ることができる。[8]

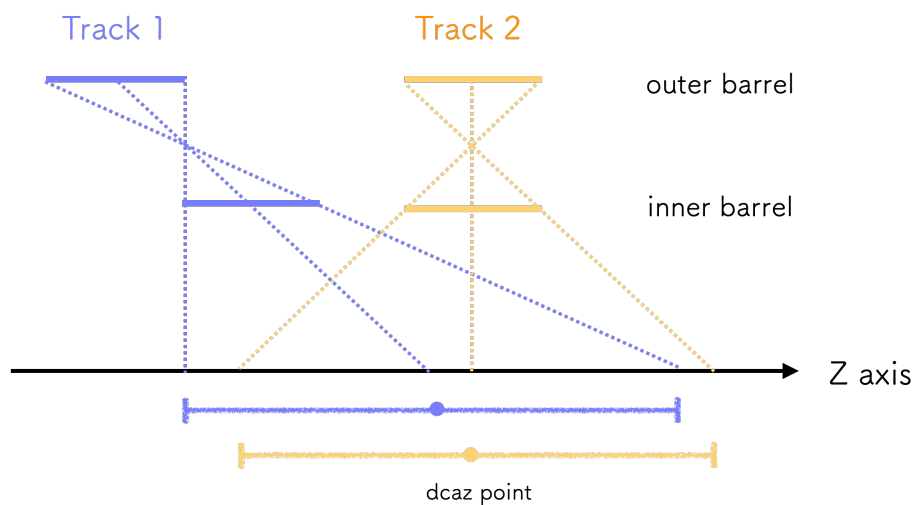


図 4.7: DCAz 座標の誤差の取り方

誤差範囲を含めた DCAz 座標のプロットを 1 イベント毎作成し、同様に z_{vertex} を計算した。誤差範囲を含めた DCAz 座標分布は、誤差幅を 0.05cm ずつに区切ってプロットしているため、bin 幅は 0.05cm となっている。

平均法

1 イベント毎に作成した誤差付き DCAz 座標の分布から平均値を計算し、その平均値を z_{vertex} と考える方法。

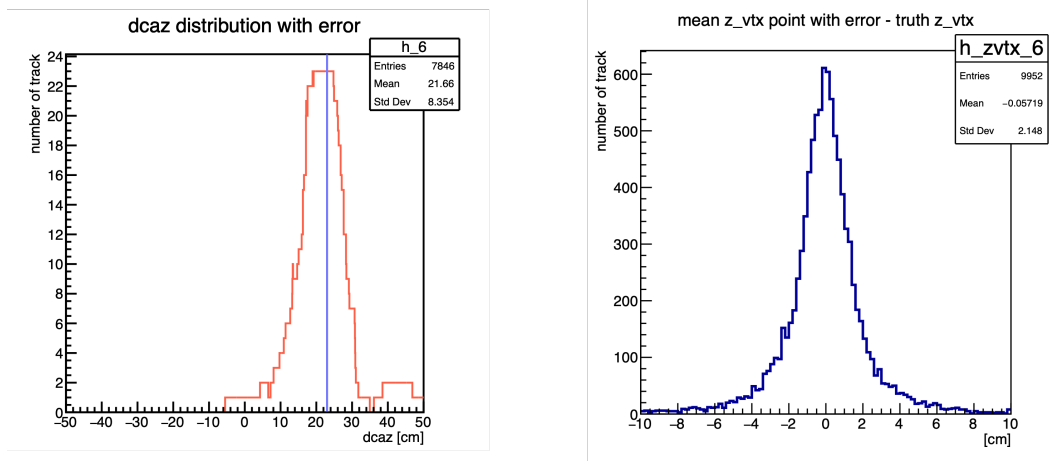


図 4.8: 誤差を考慮した平均法

図 4.8 左図が 1 イベントの誤差範囲を含めた DCAz 座標プロット、右図が全イベントの z_{vertex} と truth の z_{vertex} の差分布である。左図において、誤差範囲を含めてプロットすると DCAz 座標一点のみをプロットした時に比べて、値が誤差分幅を持つようになったが、誤差を考慮することで値が安定するようになった。

誤差を含めた DCAz 座標プロットを用いた平均法では、2.148[cm] という分解能が得られた。

ピーク法

1 イベント毎に作成した誤差付き DCAz 座標分布のピークの値を z_{vertex} と考える方法。

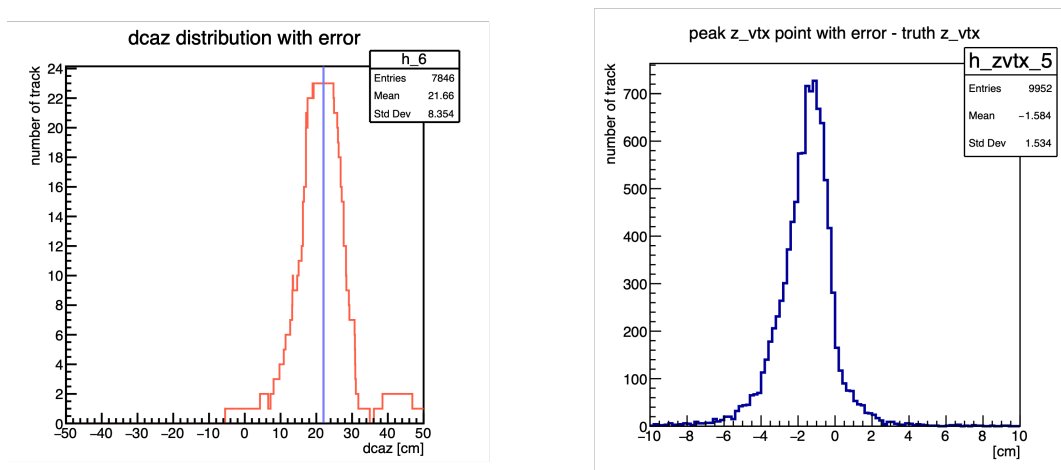


図 4.9: 誤差を考慮したピーク法

図 4.9 左図が 1 イベントの DCAz 座標プロット、右図が全イベントの z_{vertex} と truth の z_{vertex} の差分布である。

今回のピーク法では、1.534[cm] という分解能が得られた。平均法に比べて分解能は高くなったが、右図のピーク位置が大幅に左にずれていることから、ピーク法は不安定であると考えられる。

3 シグマの範囲内での平均法

誤差付き DCAz 座標分布の平均値から 3 シグマの範囲内にあるデータのみを用いて平均値を求め、その値を z_vertex と考える方法。

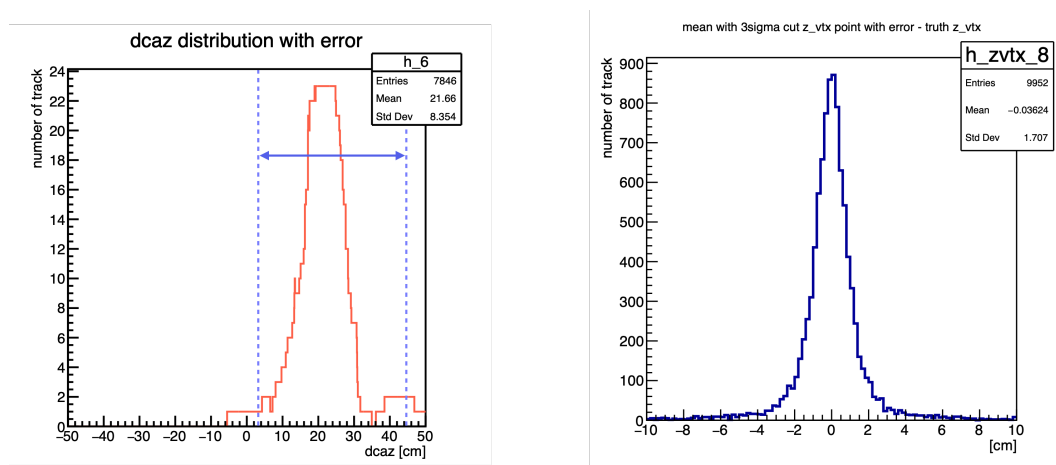


図 4.10: 誤差を考慮した 3 シグマ平均法

図 4.10 左図が 1 イベントの DCAz 座標プロット、右図が全イベントの z_vertex と truth の z_vertex の差分布である。左図において、青線の範囲内で平均値を計算した。

今回の 3 シグマ平均法では、1.707[cm] という分解能が得られた。

1 シグマの範囲内での平均法

DCAz 座標分布の平均値から 1 シグマの範囲内にあるデータのみを用いて平均値を求め、その値を z_vertex と考える方法。

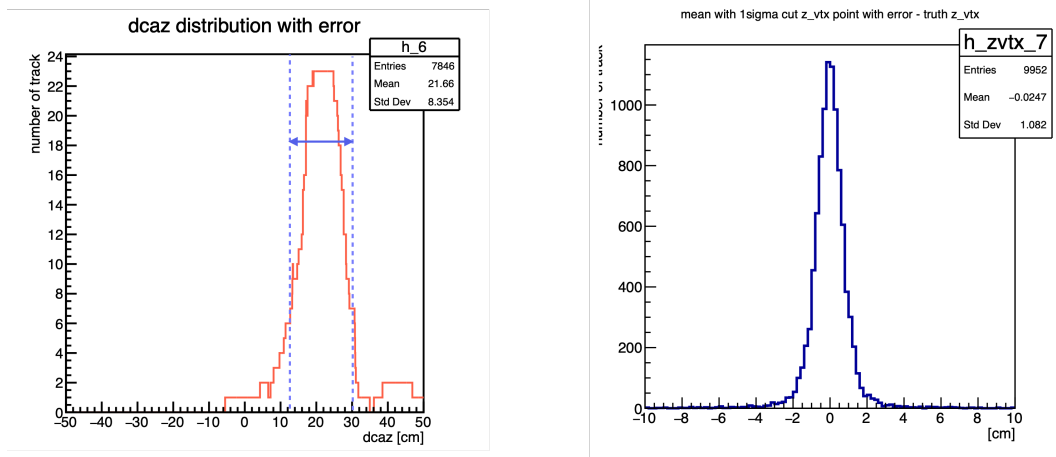
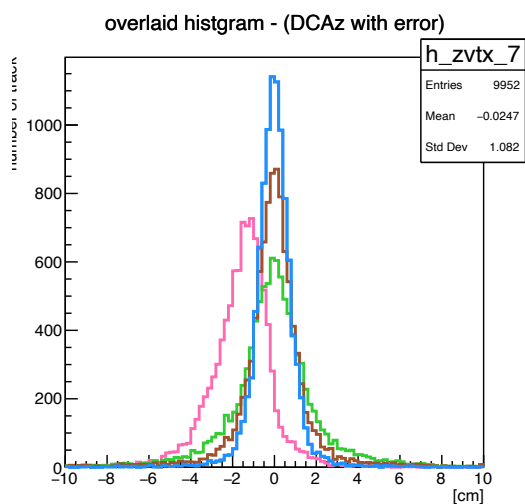


図 4.11: 誤差を考慮した 1 シグマ平均法

図 4.4 左図が 1 イベントの DCAz 座標プロット、右図が全イベントの z_{vertex} と truth の z_{vertex} の差分布である。左図において、青線の範囲内で平均値を計算した。今回の 1 シグマ平均法では、1.082[cm] という分解能が得られた。

まとめ

上記四種類の方法で求めた z_{vertex} のプロットを重ね合わせて描画し、比較した。



	Std値[cm]
平均法	2.148
ピーク法	1.534
3 σ 平均法	1.707
1 σ 平均法	1.082

図 4.13: 誤差付き DCAz プロットを用いた z_{vertex} の分解能比較

図 4.12: 誤差付き DCAz プロットを用いた z_{vertex} のプロット比較

1 シグマ平均法で求めた分解能が一番高く、ヒストグラムも細いことから、最も精度が良く、測定安定度も高いことがわかる。また、ピーク法の分解能だけ見ると 1 シグマ平均

法の次に良い結果となっているが、ヒストグラムのピーク部分が他の方法でのヒストグラムより離れていることから、ピーク法は不安定であると考えられる。

4.1.3 位置分解能幅を誤差とした DCAz 座標プロットを用いた場合

クラスターの z 座標の分布し得る範囲を DCAz 座標の誤差として考えた場合、誤差範囲が広すぎる可能性がある。そこで、クラスターの z 座標の分布し得る範囲の位置分解能 (分布し得る範囲/ $\sqrt{12}$) を誤差範囲とする方法を考える。

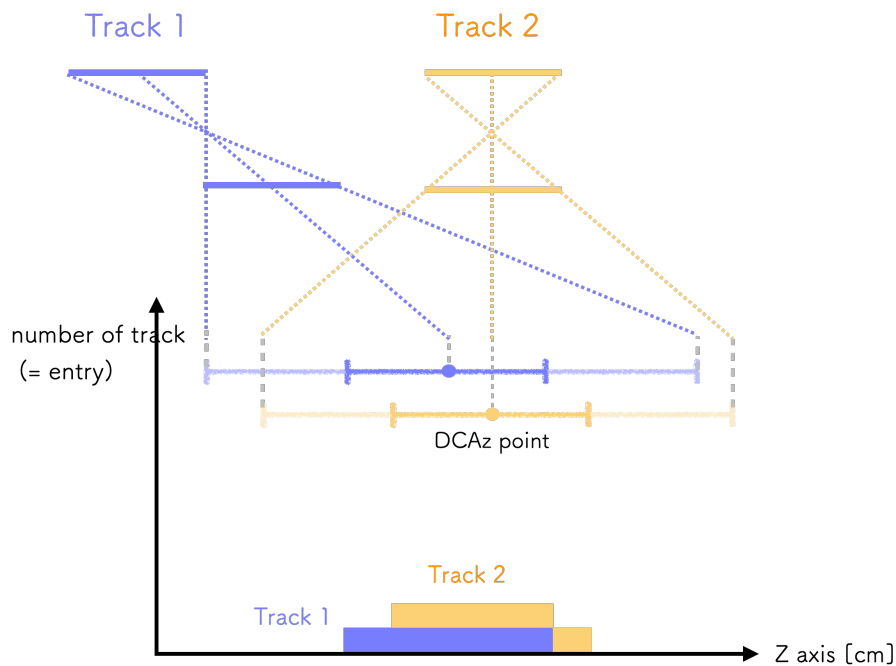


図 4.14: DCAz 座標の位置分解能を誤差範囲とする取り方

誤差範囲を含めた DCAz 座標のプロットを 1 イベント毎作成し、同様に z_{vertex} を計算した。誤差幅を 0.05cm ずつに区切ってプロットしているため、bin 幅は 0.05cm となっている。

平均法

1 イベント毎に作成した DCAz 座標の分布から平均値を計算し、その平均値を z_{vertex} と考える方法。

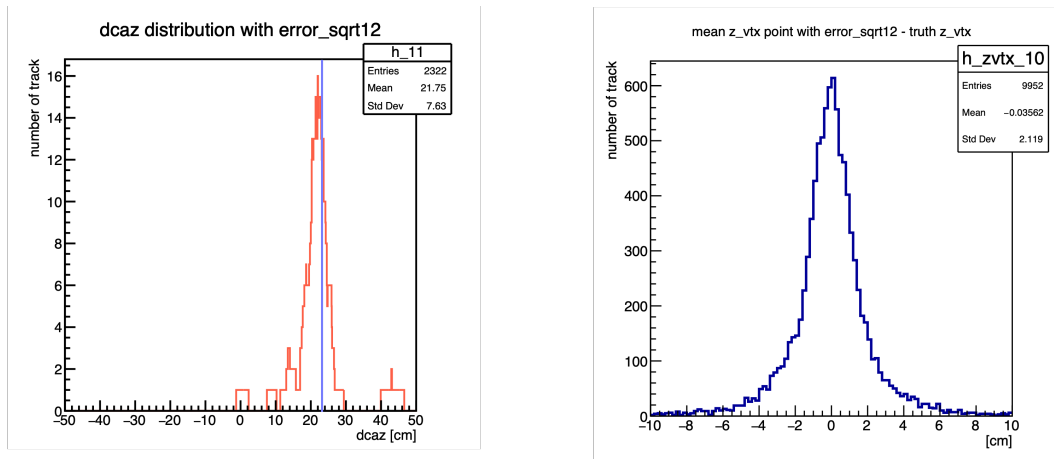


図 4.15: 位置分解能を誤差範囲として考慮した平均法

図 4.15 左図が 1 イベントの誤差範囲を含めた DCAz 座標プロット、右図が全イベントの z_vtx と truth の z_vtx の差分布である。左図において、全範囲を誤差として考えていた時に比べて値の持つ幅が狭まったことがわかる。

z 座標の全分布範囲の位置分解能を誤差としてを含めた DCAz 座標プロットを用いた平均法では、2.119[cm] という分解能が得られた。

ピーク法

1 イベント毎に作成した DCAz 座標分布のピークの値を z_vtx と考える方法。

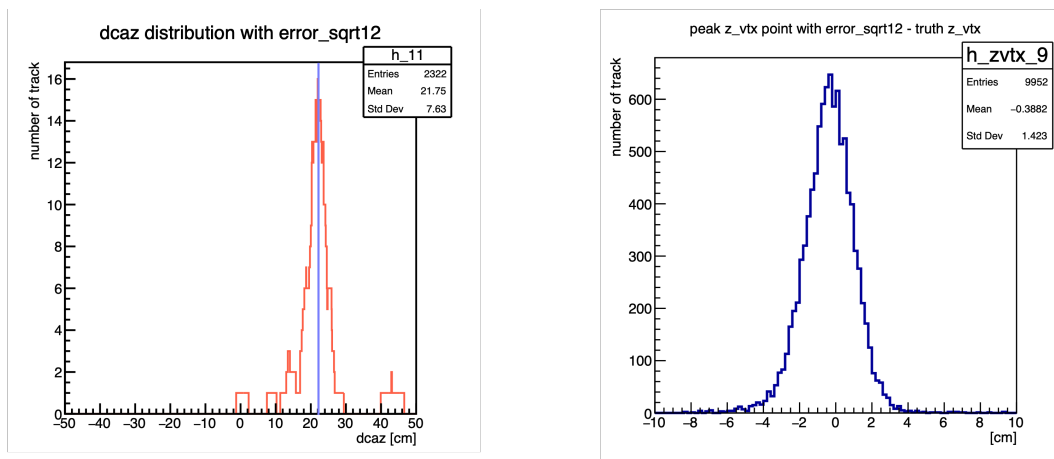


図 4.16: 位置分解能を誤差範囲として考慮したピーク法

図 4.16 左図が 1 イベントの DCAz 座標プロット、右図が全イベントの z_vtx と truth の z_vtx の差分布である。

今回のピーク法では、1.423[cm] という分解能が得られた。

3 シグマの範囲内での平均法

DCA_z 座標分布の平均値から 3 シグマの範囲内にあるデータのみを用いて平均値を求め、その値を z_{vertex} と考える方法。

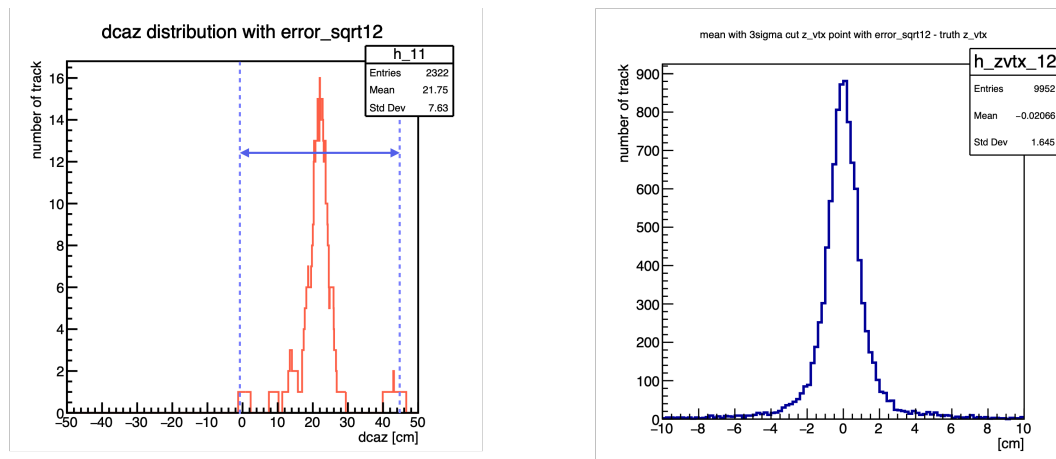


図 4.17: 位置分解能を誤差範囲として考慮した 3 シグマ平均法

図 4.17 左図が 1 イベントの DCA_z 座標プロット、右図が全イベントの z_{vertex} と truth の z_{vertex} の差分布である。左図において、青線の範囲内で平均値を計算した。

今回の 3 シグマ平均法では、1.645[cm] という分解能が得られた。

1 シグマの範囲内での平均法

DCA_z 座標分布の平均値から 1 シグマの範囲内にあるデータのみを用いて平均値を求め、その値を z_{vertex} と考える方法。

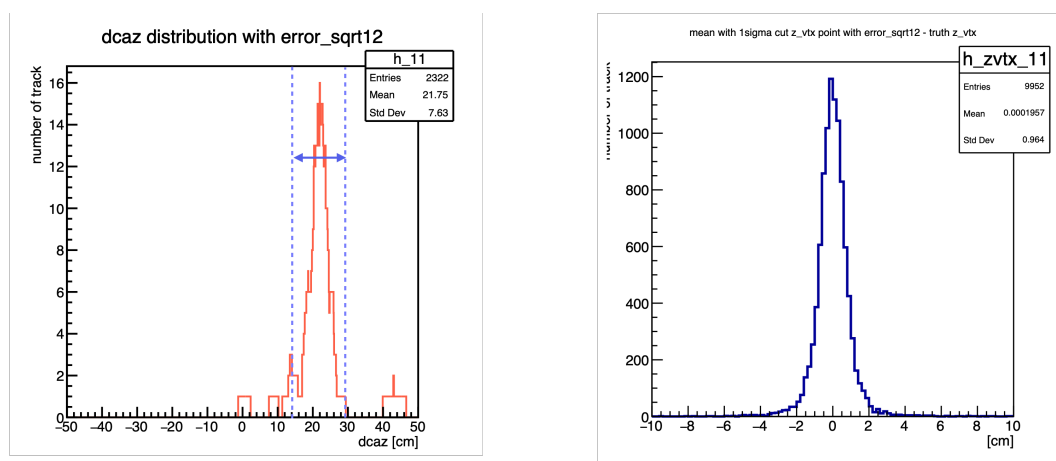


図 4.18: 位置分解能を誤差範囲として考慮した 1 シグマ平均法

図 4.18 左図が 1 イベントの DCAz 座標プロット、右図が全イベントの z_vertex と truth の z_vertex の差分布である。左図において、青線の範囲内で平均値を計算した。

今回の 1 シグマ平均法では、0.964[cm] という分解能が得られた。

まとめ

上記四種類の方法で求めた z_vertex のプロットを重ね合わせて描画し、比較した。

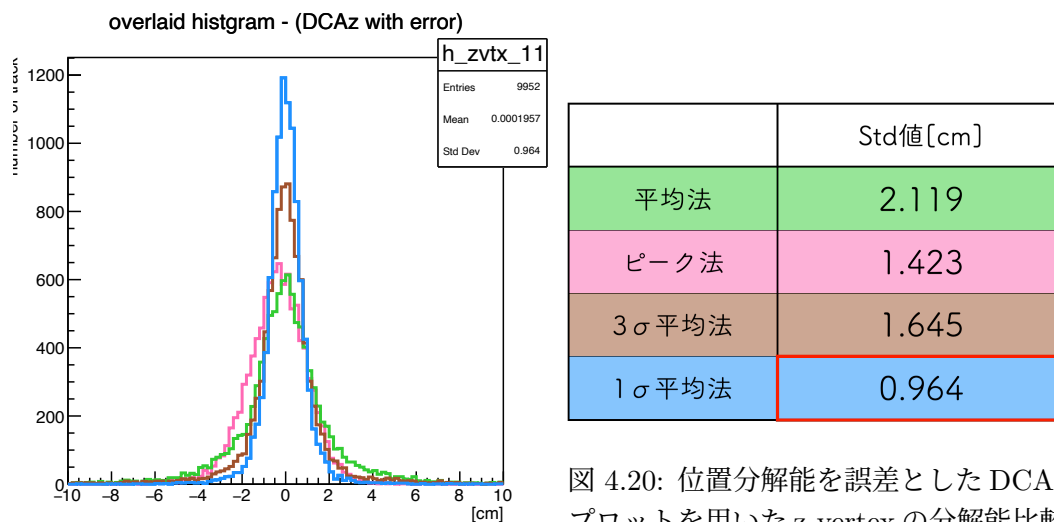


図 4.20: 位置分解能を誤差とした DCAz プロットを用いた z_vertex の分解能比較

図 4.19: 位置分解能を誤差とした DCAz プロットを用いた z_vertex のプロット比較

1 シグマ平均法で求めた分解能が一番高く、ヒストグラムも細いことから、最も精度が良く、測定安定度も高いことがわかる。

4.2 加重平均法から衝突点を求める

ここまでは、DCAz 座標を用いて衝突点を求める方法を考えてきた。次に、DCAz 座標ではなく、それぞれのクラスターが持つ座標や、トラックの持つ傾きを考慮して衝突点を求める方法を考える。

4.2.1 クラスターの z 座標を用いた場合

1つのイベントが持つ全クラスターの z 座標から一番近い点 V_z を一点決め、z_vertex とする方法。

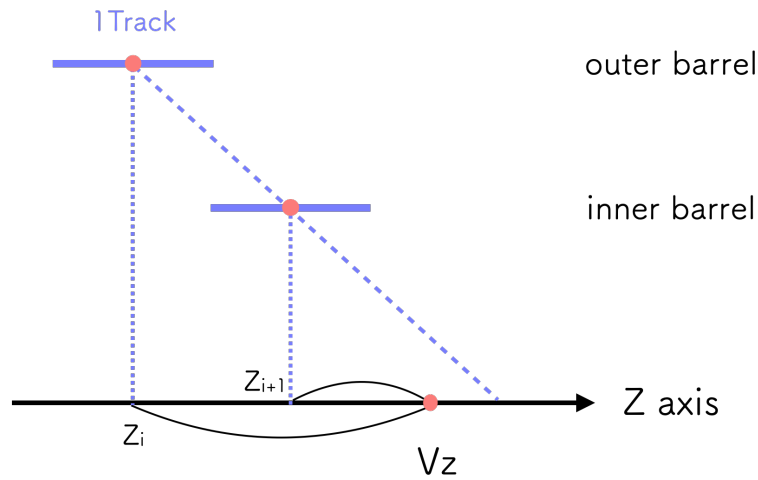


図 4.21: クラスターの z 座標を用いる加重平均法の概要図

クラスターの z 座標と V_Z との距離を求め、その距離の合計値 L が一番小さくなる時の V_Z を z -vertex とする。 L は以下のように表せられる。

$$L = \sum_{i=1}^{2n} \frac{(Z_i - V_Z)^2}{\sigma_i^2}$$

ここで、 n は1つのイベントが持つトラックの数である。 σ はクラスターの z 座標のもつ分布し得る幅、つまり chip の幅である。 chip-typeA の幅が 2.0cm、 chip-typeB の幅が 1.6cm である。

$$\frac{\partial L}{\partial V_Z} = 0$$

となるとき V_Z を求める。これをイベント数分計算し、求めた z -vertex と truth の z -vertex との差分をプロットし、検討した。

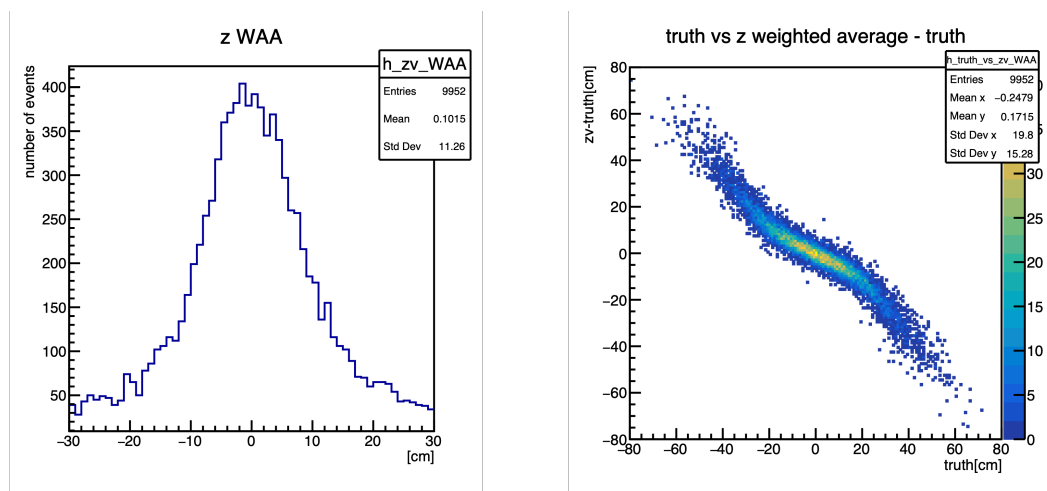


図 4.22: クラスターの z 座標を用いた加重平均法

図 4.22 の左図が、求めた z_vertex と truth の z_vertex との差分プロット。右図が、横軸が truth の z_vertex 、縦軸が求めた z_vertex と truth の z_vertex との差分の二次元ヒストグラム。

今回のクラスターの z 座標を用いた加重平均法では、11.259[cm] という分解能が得られた。トラックの傾きの情報が入っていないので、これまで求めた方法に比べて分解能が悪くなっていると考えられる。また、二次元ヒストグラムにおいて、truth の z_vertex が原点より正にずれると求めた z_vertex と truth の差分の値は負にずれ、truth のが原点より負にずれると求めた z_vertex と truth の差分の値は正にずれる。これも、トラックの傾きの情報が入っていないからだと考えられる。

4.2.2 クラスターの z 座標とトラックの傾き a を用いた場合

次に、クラスターの z 座標とトラックの傾き a の情報を用いて z_vertex を求める方法を考える。1つのイベント中の全てのトラックが通る点 V_z を一点決め、その点を z_vertex と考えた。

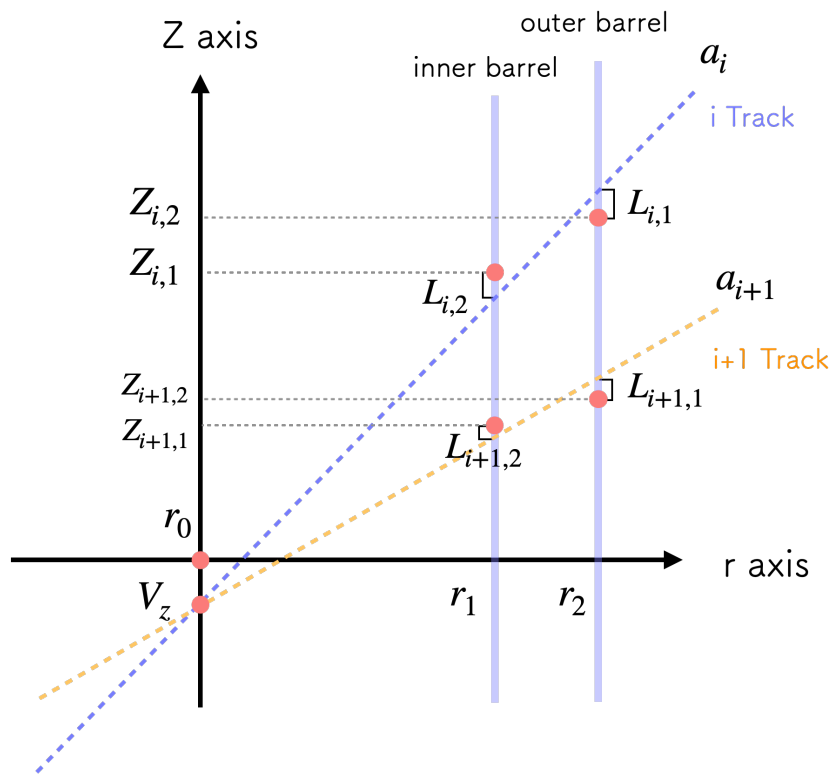


図 4.23: クラスターの z 座標とトラックの傾き a を用いる加重平均法の概要図

まず、求めたい衝突点 V_z から 2 点のクラスターに向かって線を引き、その傾きを a_i とする。傾き a_i の線が通った barrel 上の点とクラスターの z 座標との距離を求め、その距離の合計値 L が一番小さくなる時の V_z を求め、 z_vertex とする。 L は以下のように表せられる。

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 \frac{(Z_{ij} - (a_i(r_j - r_0) + V_Z))^2}{\sigma_{Z_{ij}}^2}$$

ここで、 n は1つのイベントが持つトラック数。 $r_0 = \sqrt{x_{vt}x^2 + y_{vt}x^2}$, $j = 1, 2$, $\sigma_{z_{ij}} = 1.6$ or 2.0 となる。

$$\frac{\partial L}{\partial V_Z} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 \frac{-2Z_{ij}}{\sigma_{Z_{ij}}^2} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 a_i(r_j - r_0) + 2 \cdot 2nV_Z = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial a_i} = \sum_{j=1}^2 \frac{-2Z_{ij}(r_i - r_0)}{\sigma_{Z_{ij}}^2} + \sum_{j=1}^2 a_i(r_j - r_0)^2 + 2V_Z \sum_{j=1}^2 (r_j - r_0) = 0$$

となるとき V_Z , a_i を最小二乗法で求める。これをイベント数分計算し、求めた z_vertex と $truth$ の z_vertex との差分をプロットし、検討した。

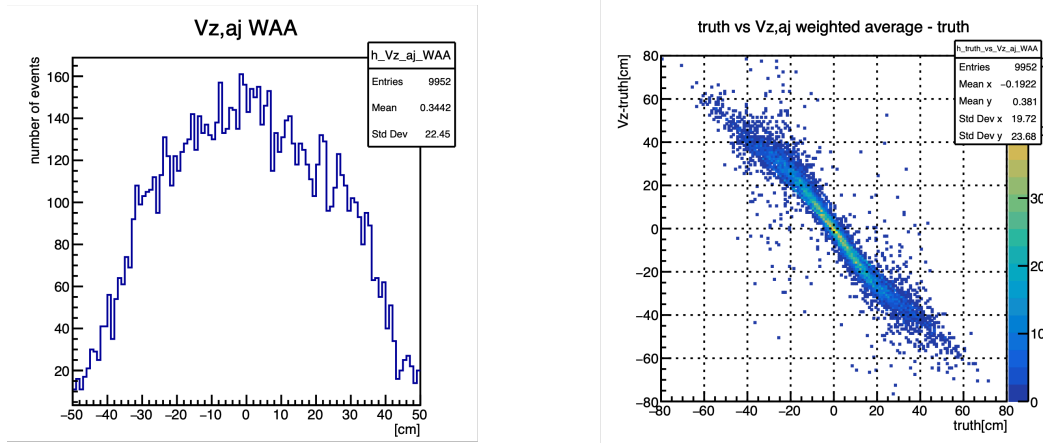


図 4.24: クラスターの z 座標とトラックの傾き a を用いた加重平均法

図 4.24 の左図が、求めた z_vertex と $truth$ の z_vertex との差分プロット。右図が、横軸が $truth$ の z_vertex 、縦軸が求めた z_vertex と $truth$ の z_vertex との差分の二次元ヒストグラム。

今回のクラスターの z 座標を用いた加重平均法では、 $22.446[\text{cm}]$ という分解能が得られた。 z_vertex の分布が今までのものよりかなり太く、分解能の値も非常に大きくなってしまった。二次元ヒストグラムでは、縦軸の値が 0 のところに値が集まると予想していたが、斜めに相関が見えてしまった。ここから、計算方法や解析コードにミスがあると考えられる。それらを確認し、改善および再考慮する必要がある。

4.3 研究結果

求めた z_vertex の分解能値をまとめた。

計算方法		Std[cm]
誤差なしDCAz座標の プロットを使用	平均法	3.214
	ピーク法	1.742
	3シグマ平均法	1.718
	1シグマ平均法	1.532
取り得る全幅を誤差と したDCAz座標の プロットを使用	平均法	2.148
	ピーク法	1.534
	3シグマ平均法	1.707
	1シグマ平均法	1.082
位置分解能幅を誤差と したDCAz座標の プロットを使用	平均法	2.119
	ピーク法	1.423
	3シグマ平均法	1.645
	1シグマ平均法	0.964
加重平均法	クラスターのz座標	11.259
	クラスターのz座標と傾きa	22.446

図 4.25: 各方法で求めた z_vertex の分解能比較

DCAz 座標が取り得る範囲の位置分解能幅を誤差として考慮した DCAz 座標のプロットを用いた 1シグマ平均法が、一番精度良く z_vertex を求められることがわかった。また、それぞれ使用する DCAz 座標のプロットで比較すると、誤差を考慮した場合の方が精度が良く、誤差幅は取り得る範囲の位置分解能幅を誤差とした方が精度が良くなることがわかった。加重平均法においては、DCAz 座標プロットを用いる場合と比べて分解能の値がかなり大きくなってしまったため、計算方法や解析コードを見直し、再考慮する必要がある。

第5章 結論

本研究では、sPHENIX 全体の検出器シミュレーションデータを用いて、INTT 検出器で衝突点を精度良く求める方法を開発した。

検出効率の評価および中性粒子を測定するために衝突点を求める必要があり、INTT 検出器では特に z 方向の分解能が x, y 方向よりも低いため、 z 方向の衝突点をより精度良く求めるために数種類の方法で計算して分解能を比較し、最適な計算方法を調べた。

その結果、飛跡と $x-y$ 原点との最近接距離上にある z 位置である DCA_z 座標に、 DCA_z 座標の取り得る範囲の位置分解能幅を誤差として考慮したプロットを用いると精度良く衝突点を求められることがわかった。衝突点を求める際には、使用するデータを 1 シグマの範囲内にあるデータに絞り、そこから平均値を求める方法を用いることで一番精度の良い結果が得られた。

また、 DCA_z 座標を使用しない方法も考えたが、 DCA_z 座標プロットを使用した結果に比べると精度が悪い結果となった。計算方法や解析コードにミスがある可能性があるため、見直して再考慮すること、またシミュレーションデータだけでなく実際のデータにも反映することが今後の課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、宮林先生、下村先生、蜂谷先生をはじめとする研究室の先生方、秋葉さん、中川さん、糠塚さんをはじめとする理化学研究所の方々に、多くのご協力とご支援を賜りましたことを心より感謝申し上げます。特に、指導教員である蜂谷先生には大変お世話になりました。数多くの機会を与えてくださり、データ解析の手法や物理学の知識を教えていただきました。個別の質問にも熱心かつ丁寧にお答えいただき、研究においてだけでなく、精神的にもお力添えいただきました。下村先生には特に重イオンミーティングにおいて熱心なご指導を受け、深く感謝しております。

また、INTTグループの先輩方、特に本研究室 M1 の辻端日菜子先輩には、解析プログラムやシミュレーションデータの作成だけでなく多岐にわたるご指導を賜り、一年を通して本当にお世話になりました。初めて C++ 言語に触れた私に 0 から丁寧知識を授けてくださり、sPHENIX 実験及び INTT 検出器に関する知識や解析に必要な技術、研究に対する姿勢まで、多くのことを学ばせていただきました。卒業研究発表前には発表スライドの添削まで手掛けていただき、そのおかげで無事発表を終えることができました。お忙しい中、惜しみないご協力をいただきましたこと、心より感謝いたします。今後も辻端さんのような先輩になれるよう努力いたします。

そして1年間共に研究室で過ごした同期の石垣さん、尾崎さん、甘さん、高村さん、寺坂さん、森本さんにも感謝申し上げます。切磋琢磨できる仲間がいたからこそ、ここまでの成果を得ることができました。これからのみんなの未来に幸多からんことを心より祈っています。そして、今後ともよろしく願います。

最後に、献身的に支えてくださり、応援してくれた家族に心から感謝いたします。

付録

第 4.1.3 章では、クラスターの z 座標の分布し得る範囲の位置分解能幅 (分布し得る範囲 $/\sqrt{12}$) を誤差範囲として DCA_z 座標をプロットする方法について述べた。ここではなぜ位置分解能幅が分布し得る範囲 $/\sqrt{12}$ となるかについて説明する。

幅 d (1.6cm or 2.0cm) のセンサーに一つの荷電粒子が入射するとき、入射位置は一様に分布する。センサーの左端の位置を z_0 とすると、存在確率密度 P は以下のように表せられる。

$$P = \frac{1}{d}$$

このとき、入射位置の期待値 $E(z)$ は、

$$\begin{aligned} E(z) &= \int_{z_0}^{z_0+d} P z dz \\ &= z_0 + \frac{1}{2} d \end{aligned}$$

となる。したがって、位置分解能 σ_z は

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= \int_{z_0}^{z_0+d} P \times (z - E(z))^2 dz \\ &= \frac{d^2}{12} \end{aligned}$$

よって、

$$\sigma_z = \frac{d}{\sqrt{12}}$$

となる。以上より、位置分解能幅をとる場合は分布し得るストリップ幅 $/\sqrt{12}$ となる。[9]

関連図書

- [1] 秋葉康之『クォーク・グルーオン・プラズマの物理』2014, 共立出版
- [2] 辻端日菜子『sPHENIX-IN TT 検出器の性能評価のための GEANT4 による Coulomb Scattering 効果の見積もり』2022, 奈良女子大学, 卒業論文
- [3] 波多美咲『RHIC-sPHENIX 実験初年データにおける粒子多重度の測定』2023, 奈良女子大学, 修士論文
- [4] The ALICE experiment『A journey through QCD』2022.11.08 <https://arxiv.org/abs/2211.04384>
- [5] sPHENIX『sPHENIX Beam Use Proposal』2020.08.31 <https://indico.bnl.gov/event/9301/attachments/30172/47155/sPH-TRG-2020-001.pdf>
- [6] The Alice Collaboration『Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System』 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/41/8/087002/pdf>
- [7] 蜂谷崇『sPHENIX_note_for_preliminary_request_2023_7_27_IN TT_MBD.pdf』2023, 奈良女子大学
- [8] Chen-Wei Shih『dNdet a_2023_11_01_vtx_data1_IN TT.pdf』2023, 台湾國立中央大學
- [9] 山元大生『ピクセル検出器評価のための飛跡再構成テレスコープの位置分解能の研究』2018, 大阪大学大学院, 修士論文