

PHENIX 実験における VTX 検出器を用いた  
飛跡分類の有用性

広島大学理学部物理科学科  
クォーク物理学研究室

学籍番号 B096310

永嶋 和也

指導教官 : 杉立 徹 教授  
主査 : 志垣 賢太 准教授  
副査 : 高橋 徹 准教授

平成 25 年 2 月 27 日

## 概要

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) にある衝突型加速器 (RHIC) で行われている高エネルギー原子核衝突では、高温・高密度状態を作り出すことができる。この高温高密度状態では、クォークとグルーオンが強い相互作用による束縛から解放されてクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相に相転移することが知られている。この QGP を特徴づける現象にジェット抑制というものがある。ジェットとは、特定の方向にハドロンが集中して放出される現象である。しかし QGP のような高温高密度の媒体を通過するときにハドロン内のクォークが、その媒体との衝突によってエネルギーを損失するためジェット抑制が起こる。このジェット抑制という現象を調べるため 2011 年に、BNL の PHENIX 実験に VTX 検出器が導入した。この検出器はビーム衝突点近傍において、荷電粒子の飛跡、及びその飛跡とビーム衝突点との最近接距離 (DCA) 測定を行う。DCA は、親粒子の寿命に依存する値であるため、これを用いることで飛跡ごとに親粒子の寿命の長短を統計的に分類することが可能である。この検出器を用いて、アップクォークとストレンジネスクォークで構成される短寿命 K 中性中間子 ( $K_s^0$ ) の収量を測定することで、ストレンジネスクォークが受けるジェット抑制を知ることができる。本研究では、荷電  $\pi$  中間子対に崩壊する短寿命中性 K 中間子 ( $K_s^0$  粒子) の測定で有効であると考えられる DCA を用いた飛跡分類の有用性を議論した。なお、RHIC 加速器 11 年度実験において PHENIX 実験施設で収集した、核子対当たり重心系エネルギー 200GeV の金原子核相互衝突の実験データを用いた。DCA ごとにカットをかけた荷電  $\pi$  中間子対から不変質量分布を組むことで  $K_s^0$  粒子を同定した。これらの不変質量分布から  $K_s^0$  粒子の信号対背景雑音比を求め、それを比較することで DCA を用いたカットの最適化について考察した。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>6</b>
1.1	素粒子 . . . . .	6
1.2	高エネルギー原子核衝突 . . . . .	7
1.3	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) . . . . .	7
1.4	$K_0^s$ 中間子 . . . . .	8
1.5	DCA . . . . .	8
1.6	研究目的 . . . . .	9
<b>第 2 章</b>	<b>実験装置</b>	<b>11</b>
2.1	RHIC 加速器 . . . . .	11
2.2	PHENIX 実験 . . . . .	11
2.3	PHENIX 検出器 . . . . .	12
2.4	VTX 検出器 . . . . .	12
<b>第 3 章</b>	<b>解析方法</b>	<b>14</b>
3.1	データセット . . . . .	14
3.2	$K_s^0$ の再構成 . . . . .	14
3.3	不変質量分布 . . . . .	14
3.4	Event Mixing . . . . .	15
3.5	DCA カット . . . . .	15
3.5.1	ペアカット . . . . .	16
3.5.2	シングルカット . . . . .	16
3.5.3	DCA スライス . . . . .	16
3.6	DCA カットの最適値 . . . . .	17
<b>第 4 章</b>	<b>結果</b>	<b>18</b>
4.1	$K_s^0$ の同定 . . . . .	18
4.2	カットをかけた不変質量分布 . . . . .	20
4.3	カットの最適化 . . . . .	24
4.3.1	信号対背景比 (SB) . . . . .	24
4.3.2	significance . . . . .	25
4.3.3	信号対雑音比 (SN) . . . . .	27

4.4	カットの最適値 . . . . .	29
<b>第 5 章</b>	<b>考察</b>	<b>30</b>
5.0.1	ペアカット . . . . .	30
5.0.2	スライスカット . . . . .	30
5.0.3	シングルカット . . . . .	31
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>33</b>

# 目次

1.1	素粒子の一覧 [1]	6
1.2	原子核衝突の時間発展の様子 [2]	7
1.3	宇宙の歴史 [2]	8
1.4	各方向から見た DCA	9
2.1	RHIC 加速器の概観 [3]	11
2.2	PHENIX 検出器 [3]	12
2.3	VTX 検出器 [3]	13
3.1	Z 方向の DCA(zDCA)	16
3.2	XY 平面内の DCA (xyDCA)	16
4.1	不変質量分布	18
4.2	Mass/EventMixing	19
4.3	不変質量分布とスケールした EventMixing によるバックグラウンド	19
4.4	$K_s^0$ の不変質量分布であり、 $0.52\text{GeV}/c^2$ 付近にピークを持っている。	20
4.5	ペアカットをかけた不変質量分布	21
4.6	シングルカットをかけた不変質量分布	22
4.7	スライスカットをかけた不変質量分布	23
4.8	SB(ペアカット)	24
4.9	SB(シングルカット)	24
4.10	SB(スライスカット)	25
4.11	significance(ペアカット)	25
4.12	significance(シングルカット)	26
4.13	Significance(スライスカット)	26
4.14	SN(ペアカット)	27
4.15	SN(シングルカット)	28
4.16	SN(スライスカット)	28
4.17	SN(幅を増やしながらかスライスカット)	29
5.1	Significance(統計量を増やしてシングルカット)	31

5.2 SN(統計量を増やしてシングルカット) . . . . . 32

# 第1章 序論

## 1.1 素粒子

素粒子とは、物質を細分化していったときに最後にたどりつく最小構成要素のことである。素粒子は大きく2種類に分類され、物質を構成するフェルミ粒子と力を媒介するボース粒子がある。フェルミ粒子には、クォークやレプトンがありそれぞれ2系列3世代の系6種類が存在している。ボース粒子には、電磁相互作用を媒介する光子、弱い相互作用を媒介するウィークボゾン、強い相互作用を媒介するグルーオン、重力を媒介する重力子（未発見）、素粒子に質量を与えるヒッグス粒子などがある。またクォークとグルーオンは、色荷（カラーチャージ）と呼ばれている量子数を持っている。自然界では、色荷が混ざることによって無色になるように作られている。この法則に従ってクォークで構成されるものがハドロンである。このハドロンの代表例が陽子や中性子である。

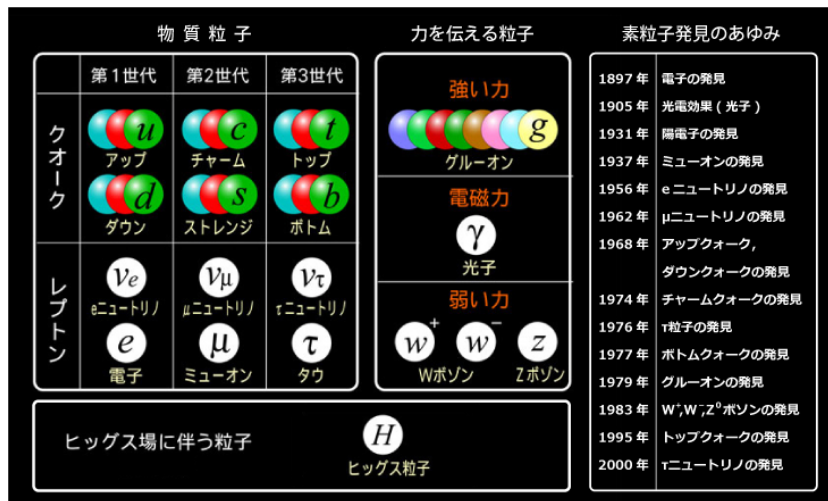


図 1.1: 素粒子の一覧 [1]

## 1.2 高エネルギー原子核衝突

高エネルギー原子核衝突では、まず衝突させる原子核をほぼ光速まで加速させる。この時に相対論的効果により原子核は、進行方向にローレンツ収縮を起こすためディスク状になる。そしてこれらが衝突することで超高温・高密度状態が作られる。先に述べたように超高温・高密度状態では、QGP相が生成される。しかしQGP相は、内部からの大きな圧力によって急激な膨張をするため温度が下がっていく。5 × 10<sup>-23</sup> 秒後には、クォークとグルーオンが再び強い相互作用を受けて閉じ込められるためハドロン相へ相転移を起こす。さらに膨張を続けていき粒子数や運動量が固定されていく。我々が観測することができるのはこの状態の粒子である。

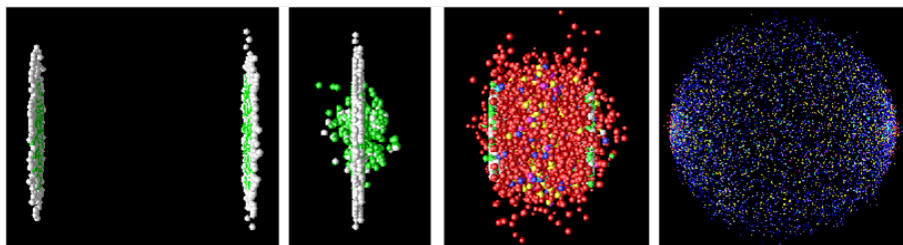


図 1.2: 原子核衝突の時間発展の様子 [2]

## 1.3 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

宇宙創成直後の数十万分の一秒間には、クォークグルーオンプラズマ (QGP) と呼ばれるクォークとグルーオンからなるプラズマ状態が存在していたと考えられている。その後、宇宙が冷えてきてクォークやグルーオンは、強い相互作用を受けて陽子や中性子の中に閉じ込められていき、現在の宇宙を創る物質が出来たと考えられている。そこで超高温、高密度の状態では、核子間の境界がなくなりクォークやグルーオンが、閉じ込め状態から解放されて QGP 相ができると考えられている。



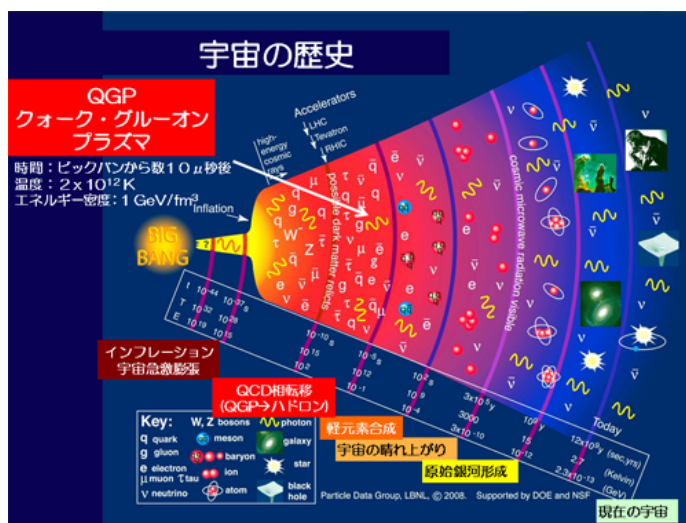


図 1.3: 宇宙の歴史 [2]

## 1.4 K0s 中間子

ハドロンは、バリオンとメソンに分類される。メソンは、クォークと反クォークが強い相互作用によって結合している。このメソンの中の種類の一つに K 中間子がある。K 中間子は、その寿命の長さによって  $K_{short}^0$  と  $K_{long}^0$  に分類される。本研究のターゲットとなっているのが、二つのうち寿命が短い方の  $K_{short}^0$  中間子である。この  $K_{short}^0$  中間子は、おもに中性  $\pi$  中間子対か荷電  $\pi$  中間子対に崩壊する。

## 1.5 DCA

DCA とは、高エネルギー原子核衝突において生成された粒子の崩壊粒子が作る飛跡とビーム衝突点との最近接距離である。ビーム軸方向 (Z 方向) とそれに垂直な平面 (XY 方向) から見た DCA が図 1.4 である。この DCA は、親粒子の寿命に依存する値である。つまり DCA の値を用いて親粒子の寿命の長短を統計的に分類することが可能である。DCA を用いることで、崩壊粒子の飛跡から崩壊点を求めることが困難な時や、崩壊粒子すべての飛跡を測定することが困難な時に有用性がある。

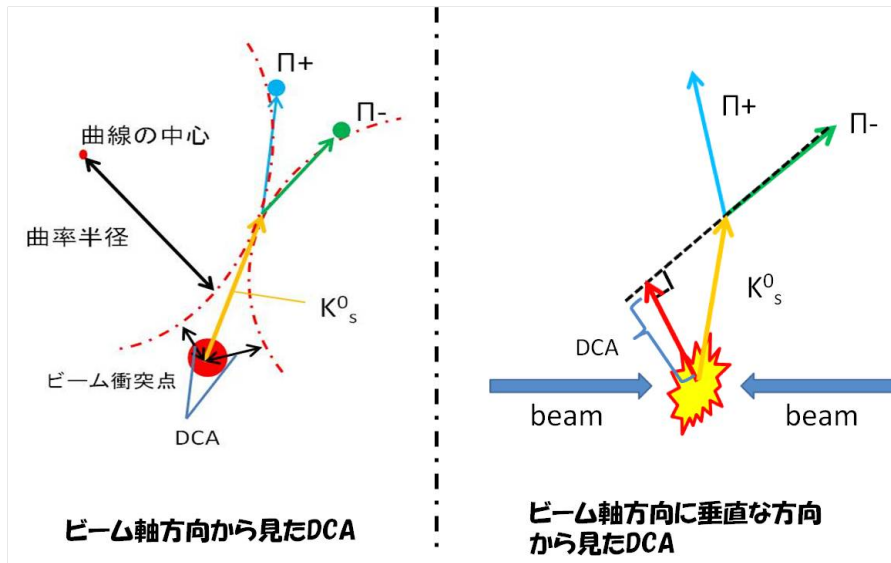


図 1.4: 各方向から見た DCA

## 1.6 研究目的

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) にある衝突型加速器 (RHIC) PHENIX 実験で行われている高エネルギー原子核衝突では、高温・高密度状態を作り出すことができる。この高温高密度状態では、クォークとグルーオンが強い相互作用による束縛から解放されてクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相に相転移することが知られている。この QGP を特徴づける現象にジェット抑制というものがある。ジェットとは、特定の方向にハドロンが集中して放出される現象である。しかし、QGP のような高温高密度の媒体を通過するときハドロン内のクォークが、その媒体との衝突によってエネルギーを損失するためジェット抑制が起こる。このジェット抑制という現象を調べるため、2011 年に、BNL の PHENIX 実験に VTX 検出器が導入した。この検出器はビーム衝突点近傍において、荷電粒子の飛跡、及びその飛跡とビーム衝突点との最近接距離 (DCA) 測定を行う。DCA は、親粒子の寿命に依存する値であるため、これを用いることで飛跡ごとに親粒子の寿命の長短を統計的に分類することが可能である。この検出器を用いて、アップクォークとストレンジクォークで構成される短寿命 K 中性中間子 ( $K_s^0$ ) の収量を測定することで、ストレンジクォークが受けるジェット抑制を知ることができる。また  $K_s^0$  の  $c\tau=27\text{mm}$  であるので、 $K_s^0$  の DCA も十分大きいことが期待される。

$\tau$ とは、光速×平均寿命で粒子が崩壊までに跳ぶ平均距離を表している。そこでDCAを用いて飛跡選択（DCA カット）を行うことで、 $K_s^0$ を同定する過程で発生するバックグラウンドを取り除くことが期待できる。DCA カットの条件を変えながら  $K_s^0$  の不変質量分布を組み、その不変質量分布からそれぞれの  $K_s^0$  の信号対背景比を求める。そしてそれらを比較することで、DCA カットの最適化について考察する。

## 第2章 実験装置

### 2.1 RHIC 加速器

RHIC(Relativistic Heavy Ion Collider) 加速器は米国ブルックヘブン国立研究所内にある円周 3.8km の 2 本のリングからなる衝突型加速器であり核子対当たりの重心衝突エネルギー 200GeV までの原子核衝突を起こすことが可能である。PHENIX、STAR、PHOBOS、BRAHMS の四つの実験プロジェクトがあり、2000 年より稼動を始めている。図 ?? に RHIC の概観を示す。

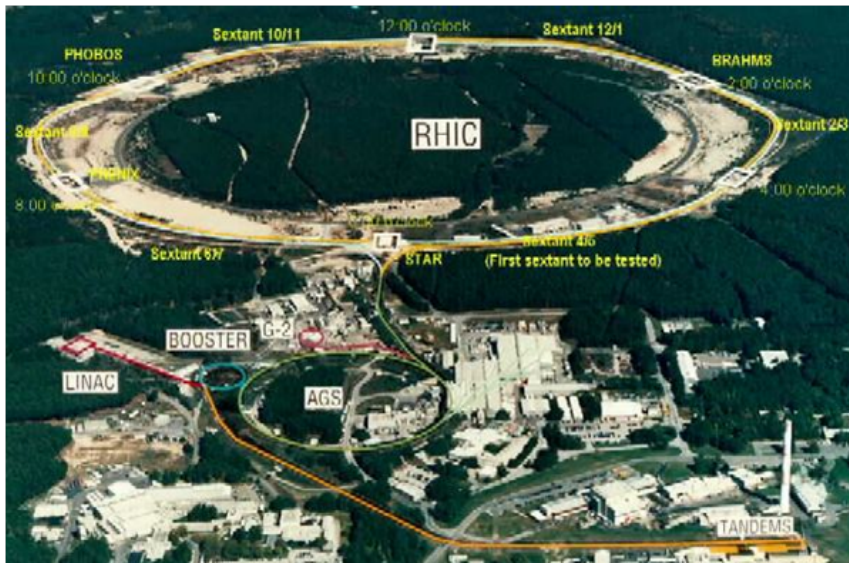


図 2.1: RHIC 加速器の概観 [3]

### 2.2 PHENIX 実験

PHENIX 実験では、QGP を実験室内で実現してその性質を研究することを目的としている。世界 14ヶ国 70 あまりの研究機関から 500 名を超える研究者が参加している。

## 2.3 PHENIX 検出器

RHIC の主要実験の一つである PHENIX (Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment) 検出器の構成を図 2.2 にて示す。PHENIX 実験の測定器は、中央の電磁石を囲む二つのスペクトロメータ (東アームと西アーム) と、衝突点近傍付近に設置された検出器と、ビーム軸の前後方に設置された両ミューオンアームから構成されている。衝突で生成されたハドロン粒子、光子、電子、ミューオンを測定することができる。本研究では、ビーム衝突点近傍にある荷電粒子の飛跡を検出する VERTEX ディテクターを使用した。次に VERTEX ディテクターの説明をする。

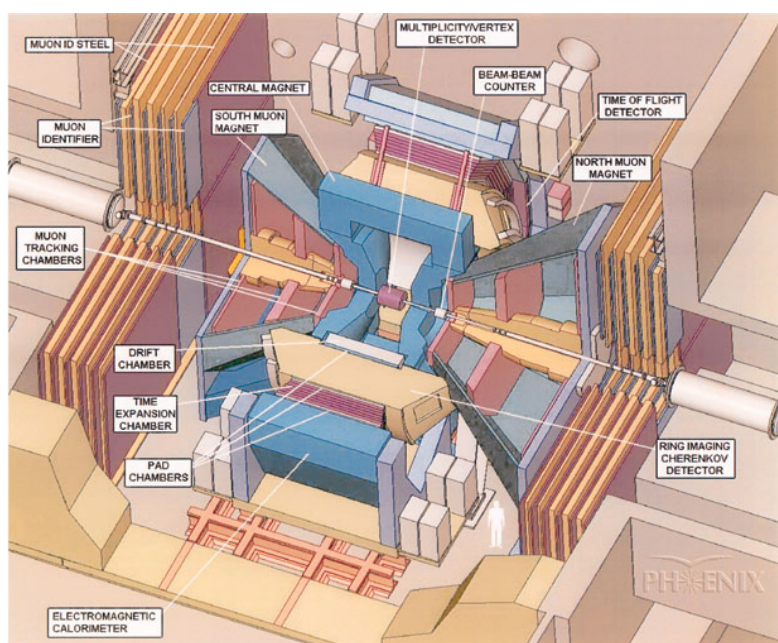


図 2.2: PHENIX 検出器 [3]

## 2.4 VTX 検出器

VTX 検出器 (VERTEX TRACKER) は、衝突点付近を広い範囲に高精度で測定することで、寿命の長い D,B 中間子を区別したりジェットイベントをとらえることを目的として作られたディテクターである。片側半分の概観を図 2.3 で示す。4 重の構造をしていて内側 2 枚では、Solder bump を一つの pixel とし外側 2 枚では、strip ディテクターをひとつの pixel とした構造になっている。それぞれのレイヤーのパラメータは下の表にまと

めてある。これら4つのレイヤーで荷電粒子が通った位置を精度良く測定することで、飛跡として検出することができる。また、その飛跡とビーム衝突点との最近接距離（DCA）を測定することができる。

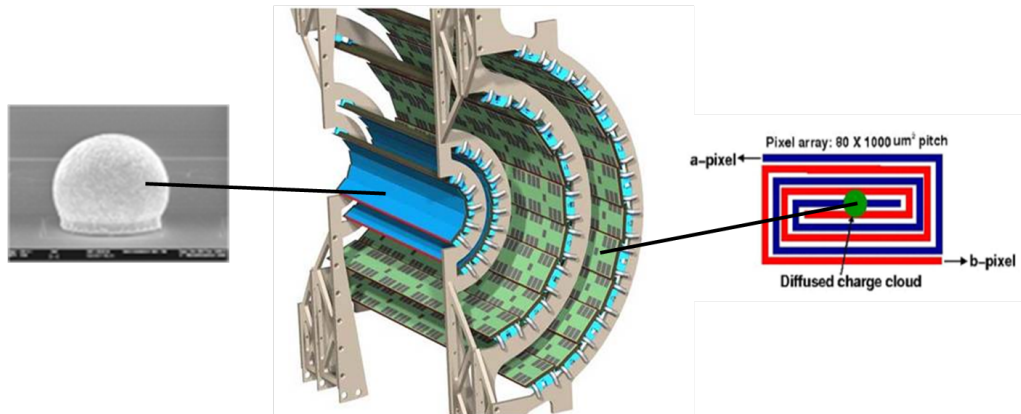


図 2.3: VTX 検出器 [3]

表 2.1: VTX パラメーター

	kind	R(cm)	Z(cm)	Channel	Pixel Size
Layer1	Pixel	2.5	$\pm 10$	1,310,720	50um( $\phi$ ) $\times$ 425um(Z)
Layer2	Pixel	5	$\pm 10$	2,671,440	50um( $\phi$ ) $\times$ 425um(Z)
Layer3	Stripixel	11.7	$\pm 16$	112,880	80um( $\phi$ ) $\times$ 1000um(Z)
Layer4	Stripixel	16.6	$\pm 19$	221,184	80um( $\phi$ ) $\times$ 1000um(Z)

## 第3章 解析方法

### 3.1 データセット

本研究で用いたデータは、PHENIX 実験の Run11、核子対あたり重心系エネルギー 200GeV 金原子核相互衝突の VTX で、ミニマムバイアストリガー条件で収集したデータである。ミニマムバイアストリガーとは、原子核衝突が起こった時に検出できるだけのすべての粒子を測定する条件である。本研究では、データ容量を抑え高横運動量を効率よく解析するために  $2\text{GeV}/c^2$  以上の粒子だけを選んだ。

### 3.2 $K_s^0$ の再構成

VTX 検出器で、各荷電粒子の運動量、飛ぶ方向が測定できるので、これらとエネルギー保存則と運動量保存則により親粒子の質量を計算する。親粒子の質量を  $M$ 、エネルギーを  $E$ 、運動量を  $P$  とし、崩壊粒子の質量を  $m_1$ 、 $m_2$ 、エネルギーを  $e_1$ 、 $e_2$ 、運動量を  $p_1$ 、 $p_2$  とする。

エネルギー保存則から

$$E^2 = e_1 + e_2 = (p_1^2 + m_1^2) + (p_2^2 + m_2^2)$$

ここで運動量は、 $x, y, z$  それぞれの方向で保存されるので

$$E^2 = (p_{x1}^2 + m_1^2) + (p_{x2}^2 + m_2^2) + (p_{y1}^2 + m_1^2) + (p_{y2}^2 + m_2^2) + (p_{z1}^2 + m_1^2) + (p_{z2}^2 + m_2^2)$$

また運動量保存則により親粒子の運動量は

$$|P| = |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|$$

これらより

$$M^2 = (E^2 - P^2)$$

から親粒子の質量を求める。

### 3.3 不変質量分布

衝突事象ごとに測定された飛跡 (トラック) のすべての組み合わせで、不変質量を組む。この時測定された荷電粒子の 8 割以上は、荷電  $\pi$  中間子であることが知られている。よって、本研究ではすべてのトラックが荷電  $\pi$

中間子によるものだとして行った。また  $K_s^0$  由来の2つのトラックは、荷電  $\pi$  中間子対であるため2つのトラックの符号が異なる時のみを選んだ。こうして不変質量を組むと約 0.498 GeV あたりにピークを持つ不変質量分布が得られる。

### 3.4 Event Mixing

上で不変質量分布を組んだときに衝突事象ごとにすべての組み合わせで行ったが、1つの  $K_s^0$  由来でないもののトラックで組んだものは、すべてバックグラウンドとなる。これを組み合わせによるバックグラウンド (Combinatorial Background) という。この Combinatorial Background を取り除くために行うのが、Event Mixing である。

具体的には、異なる衝突事象でのトラック同士で不変質量を組む。こうすることで、上で述べたバックグラウンドの形を再現することができる。次に二つの分布では高さが違うので、スケールする必要がある。不変質量分布の  $K_s^0$  の質量の付近以外は、Combinatorial Background によるものであるため 2~3 GeV の範囲で、ヒストグラム同士を割って定数でフィッティングすれば比を求めることができる。こうしてスケールしたものを不変質量分布から差し引くことで、不変質量のピークだけを見ることができる。

### 3.5 DCA カット

説明したように DCA は親粒子の寿命に依存するので、そこで様々な条件の DCA カットをかけたトラックで、 $K_s^0$  粒子の mass を組んだ。下図に XY 平面内と Z 方向の DCA 分布を乗せておく。どちらの分布もおおよそ 0~0.7 cm の範囲に分布している。XY 平面内の DCA 分布の 0.1 cm ~ 0.2 cm の範囲にある不規則なピークは、フォトンコンバージョンによるものである。フォトンコンバージョンとは、フォトンが検出器内で電子を対生成することである。これらの電子対の DCA がこの範囲に分布してしまっている。



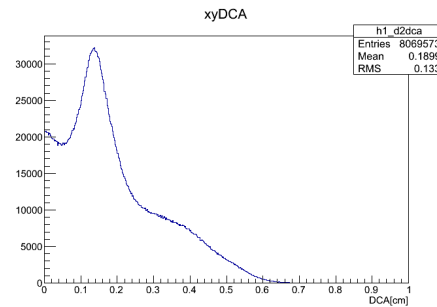
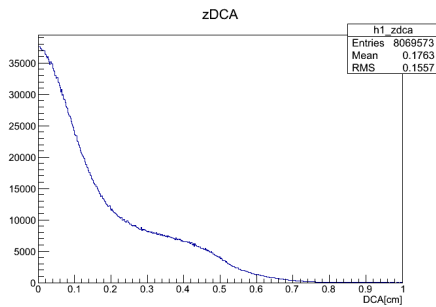


図 3.1: Z 方向の DCA(zDCA)      図 3.2: XY 平面内の DCA (xyDCA)

### 3.5.1 ペアカット

不変質量分布を組む時に両方の DCA が大きいことを要求する。

条件は、

Z 方向の DCA は、  $0 < zDCA < 0.5\text{cm}$  で一定のカットをかける。

XY 平面内の DCA は、  $a < xyDCA$  というように DCA の小さいものをカットするような条件で、これを  $a=0\sim 0.5\text{cm}$  の範囲で変えていく。

### 3.5.2 シングルカット

不変質量分布を組む時にどちらか一方の DCA が大きいことを要求する。

条件は上と同様で、

Z 方向の DCA は、  $0 < zDCA < 0.5$  で一定のカットをかける。

XY 平面内の DCA は、  $a < xyDCA$  というように DCA の小さいものをカットするような条件で、これを  $a=0\sim 0.5\text{cm}$  の範囲で変えていく。

### 3.5.3 DCA スライス

DCA 分布のある範囲内のトラックのみを選ぶ。

条件は、

Z 方向の DCA は、  $0 < zDCA < 0.5$  で一定のカットをかける。

XY 平面内の DCA は、  $a < xyDCA < a + 0.05$  というようにカットをかける。  $0\sim 0.5\text{cm}$  まで  $0.05\text{cm}$  の幅でスライスしていく。

### 3.6 DCA カットの最適値

上で述べたカットで、どのような条件、どのような値が、 $K_s^0$  粒子の同定に適しているかを求める。まず各条件ごとにカットの値を変えながら二つのトラックから不変質量分布を組む。その不変質量分布の  $K_s^0$  粒子の mass である  $0.498\text{GeV}/c^2$  付近をガウス関数と二次までの多項式でフィットする。フィットしたガウス関数の中心値から  $1\sigma$  の範囲で、それぞれの関数を積分する。ここでガウス関数を積分したものを  $K_s^0$  粒子の量  $S$  とし、二次までの多項式を積分したものをバックグラウンドの量  $B$  とする。この二つの量を用いて、 $S/B$ 、 $S/\sqrt{B}$ 、 $S/\sqrt{S+B}$  を比較することでカットの最適値を求める。

## 第4章 結果

### 4.1 $K_s^0$ の同定

解析方法で述べた方法で、VTX 検出器で測定した電荷の異なる粒子同士を組み合わせた不変質量分布が図 4.1 である。エラーには、統計誤差が付いている。次に Event Mixing によりバックグラウンドの形を再現し、これを用いて図 4.1 を割ったものが図 4.2 である。ピーク以外の所で、スケールファクターが小さくなる傾向にあるため、よりピークに近いところで定数でフィットする必要がある。そうしてスケールしたバックグラウンドと  $K_s^0$  の不変質量分布を比較したものが図 4.3 である。 $K_s^0$  の不変質量分布からスケールしたバックグラウンドを差し引いて、 $K_s^0$  の不変質量分布のピークだけをプロットしたものが図 4.4 である。

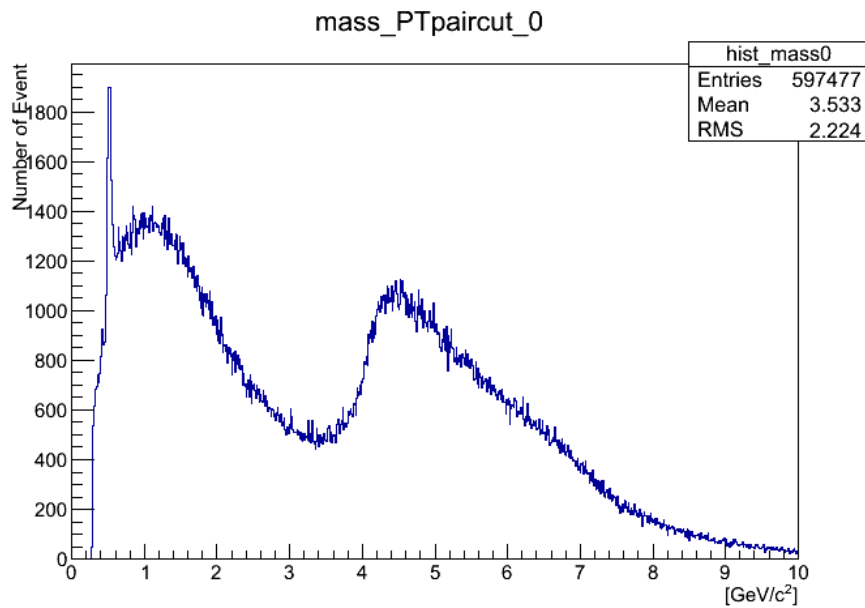


図 4.1: VTX 検出器で測定した電荷の異なる粒子同士で、不変質量分布を組んだ。

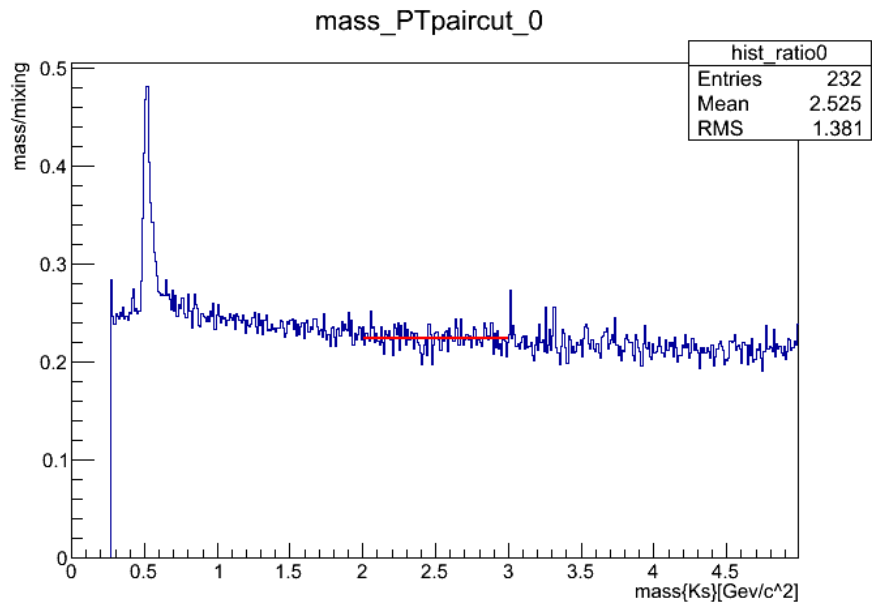


図 4.2: 不変質量分布を Event Mixing で求めたバックグラウンドで割ったものである。

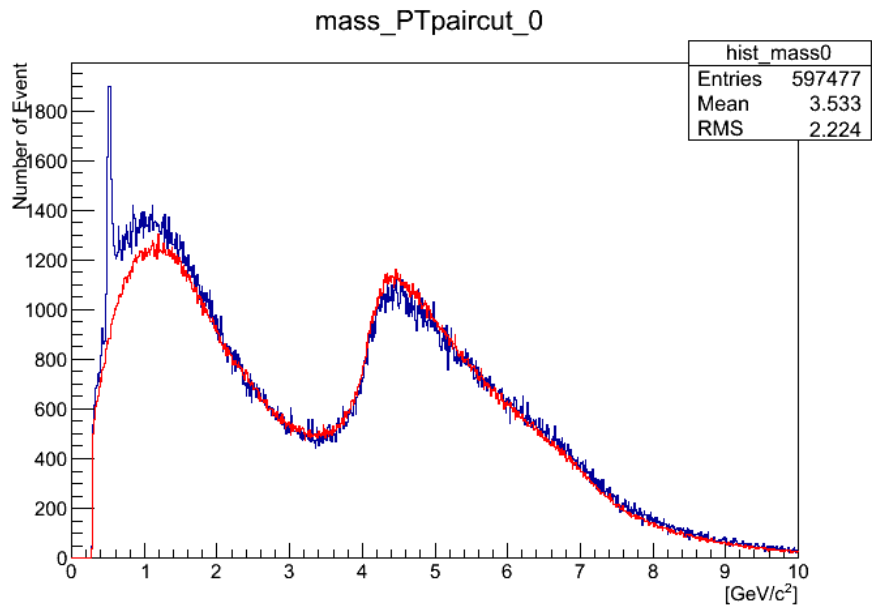


図 4.3: 不変質量分布とスケールした EventMixing によるバックグラウンドである。

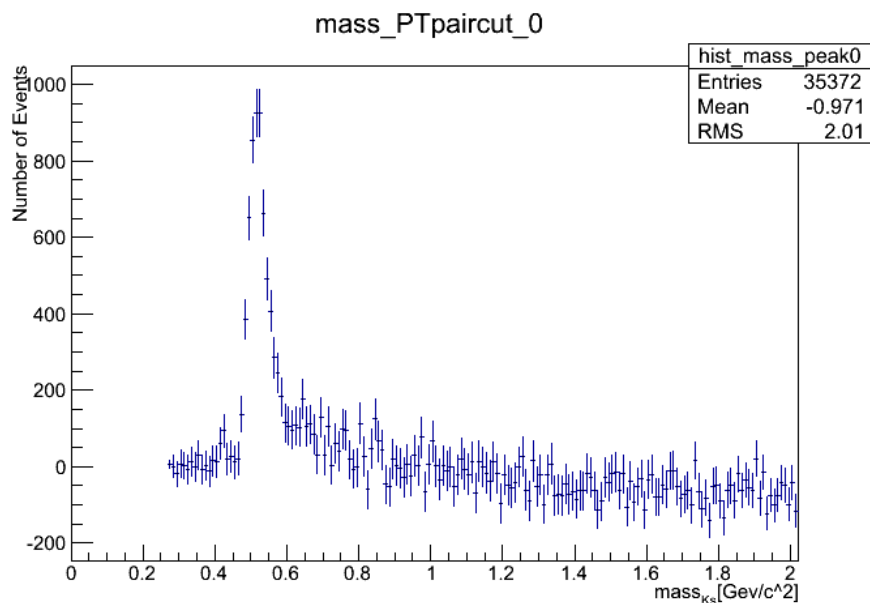


図 4.4:  $K_s^0$  の不変質量分布であり、 $0.52\text{GeV}/c^2$  付近にピークを持っている。

## 4.2 カットをかけた不変質量分布

先に述べたようにカット条件、カットの値を変えて  $K_s^0$  の不変質量分布を組んだ。DCA を用いてシングルカットした  $K_s^0$  の不変質量分布をカットの値ごとにプロットしたものが図 4.5 である。同様に DCA を用いたペアカットしたものが図 4.6 である。次に DCA スライスした  $K_s^0$  の不変質量分布が図 4.7 である。ペアカット、シングルカットをかけた不変質量分布をカット値ごとに比べただけでは、カットによってピークがよく見えるようになったかどうか判断することができない。逆に DCA でスライスカットをかけた分布を見比べると、DCA が小さい範囲ではあまりピークが見えないが、 $0.3\text{cm} \sim 0.35\text{cm}$  でスライスしたものが最もピークがよく見えているように見える。次にこれらの結果を定量的に解析する。

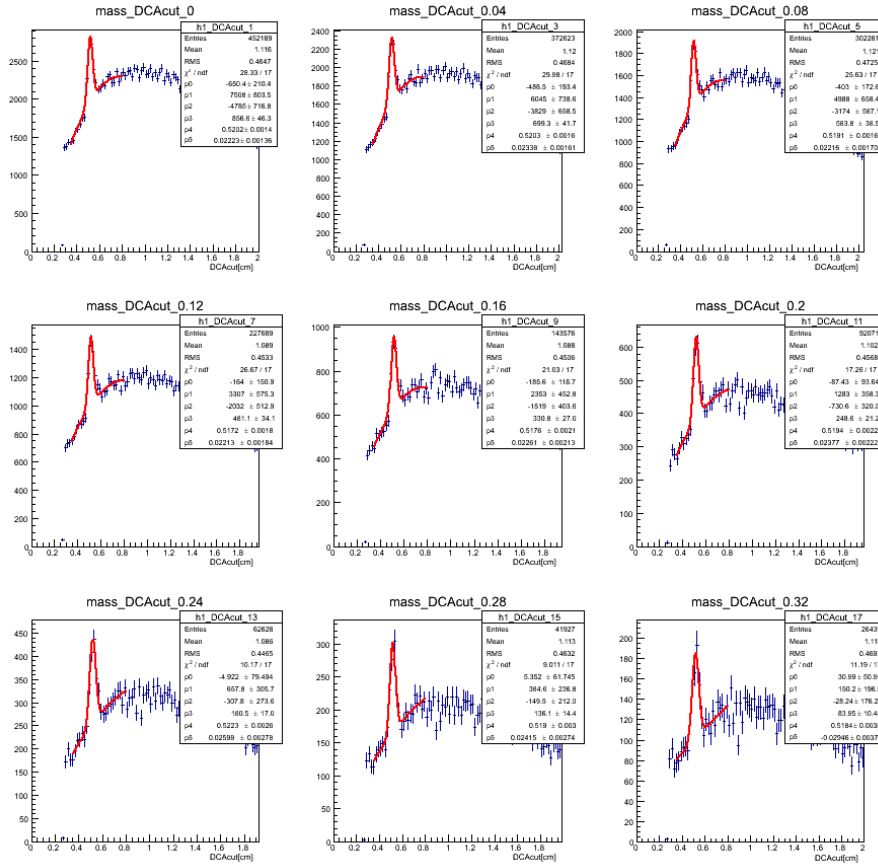


図 4.5: 条件値の DCA より大きいトラックのみで不変質量を組んだ。統計誤差をエラーとして付けている。タイトルの数字がカットの値を表している。0 はカットなしという意味である。ヒストグラムをみただけでは、カットをかけたことでピークがよく見えるようになったことが分からないので、シグナル部分とバックグラウンド部分の収量を求めて定量的に議論する。

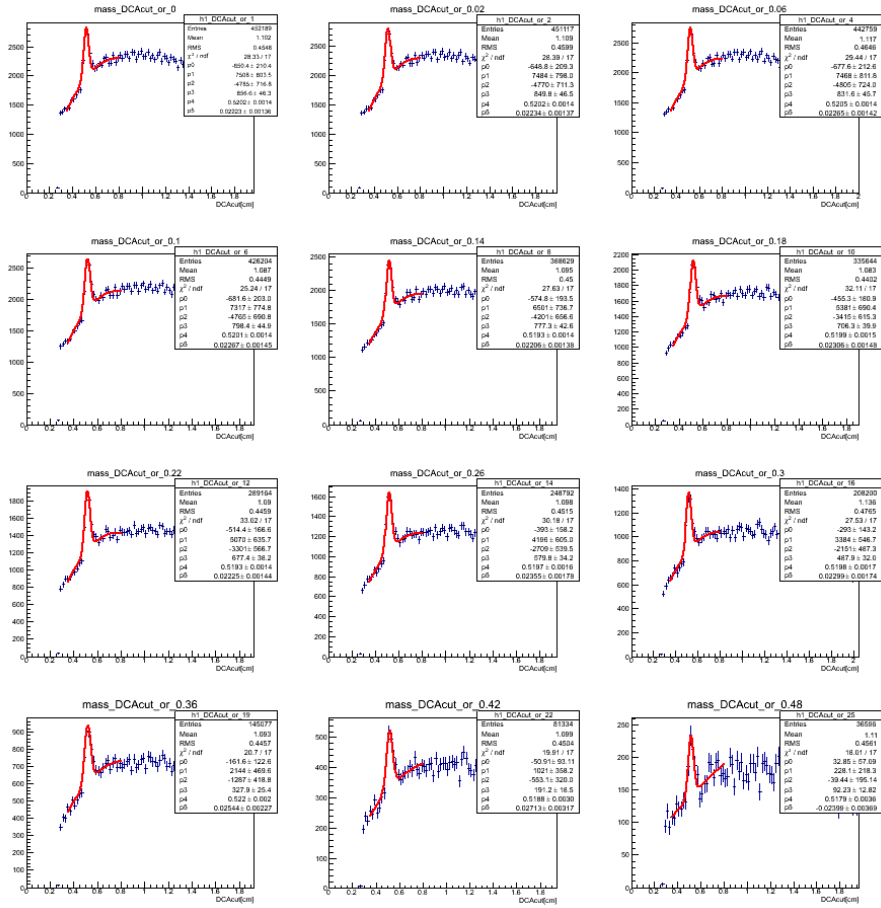


図 4.6: 二つのトラックのうちどちらかの DCA が条件値より大きい時のみ不変質量を組んだ。統計誤差をエラーとして付けている。タイトルの数字がカットの値を表している。0 はカットなしという意味である。ヒストグラムをみただけでは、カットをかけたことでピークがよく見えるようになったことが分からないので、シグナル部分とバックグラウンド部分の収量を求めて定量的に議論する。

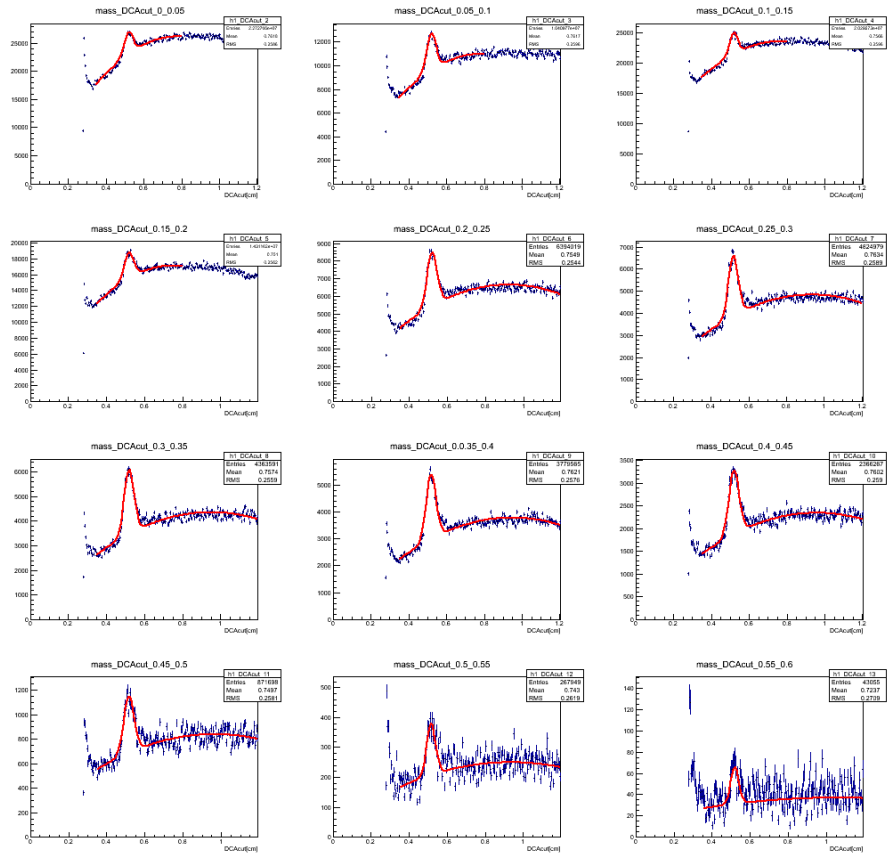


図 4.7: 二つのトラックの DCA が条件値の範囲内であるときのみ不変質量を組んだ。統計誤差をエラーとして付けている。タイトルの数字がカットの範囲を表している。0.3cm~0.35cm の範囲でカットしたものが、最もピークが良くなっているように見える。



### 4.3 カットの最適化

ここでは、解析方法でも述べたように不変質量分布のピーク部分を中心値から  $1\sigma$  の範囲で積分したものを S、バックグラウンドの部分を中心値から  $1\sigma$  の範囲で積分したものを B として扱う。

#### 4.3.1 信号対背景比 (SB)

ここで SB とは、先に述べた量 S,B の値を用いて  $S/B$  としたもので、単純にシグナルとバックグラウンドの比をとったものである。

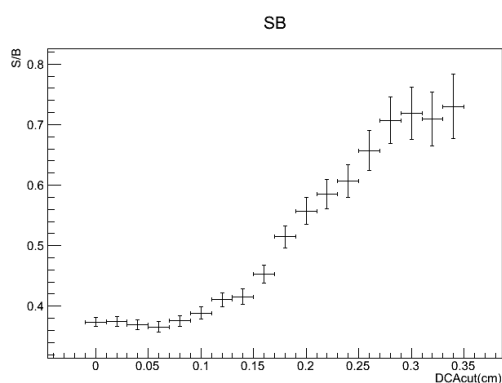


図 4.8: ペアカットをかけた不変質量分布から求めた S,B から  $S/B$  を求めて、それをカットの値ごとにプロットした。カットをきつくすると SB がよくなっているのが分かる。

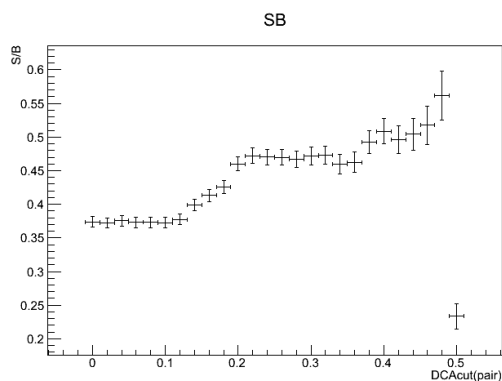


図 4.9: シングルカットをかけた不変質量分布から求めた SB から  $S/B$  を求めて、カットの値ごとにプロットした。ペアカット同様にカットの値をきつくしていくと SB が良くなるのがわかる。

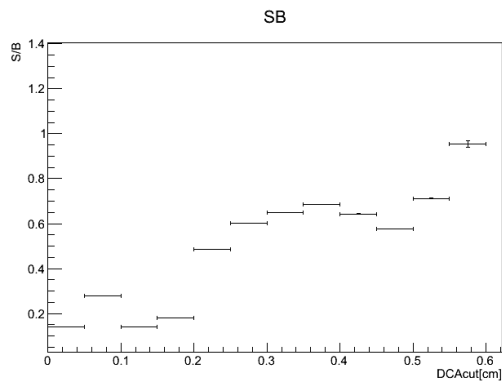


図 4.10: 各データ点は、各ビン幅の DCA 分布でカットをかけた不変質量分布から SB を求めた。少し揺らいでいるが、DCA の大きいところでカットをかけたほうが SB は良くなっている。

### 4.3.2 significance

ここで Significant とは、 $S/\sqrt{B}$  を表す。 $\sqrt{B}$  は、B の値の統計誤差に相当する値であるので、Significant は B に対する S の統計的優位性を表している。この値が大きければ大きいほうが、その値が統計的揺らぎである確率が小さくなる。

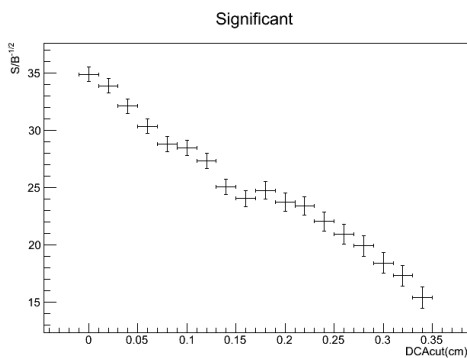


図 4.11: ペアカットをかけた不変質量分布から求めた S,B から  $\sqrt{B}$  を求めて、それをカットの値ごとにプロットした。カットの値をきつくと Significant が悪くなっていることが分かる。つまりカットの値を大きくするにつれてバックグラウンドに対するシグナルの統計的優位性が低くなっているということになる。

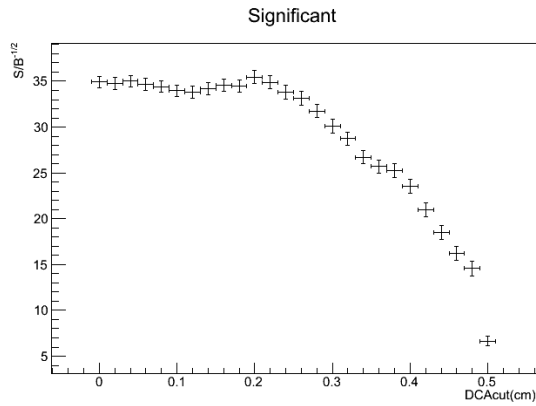


図 4.12: シングルカットをかけた不変質量分布から求めた  $S, B$  から  $S/\sqrt{B}$  を求めて、それをカットの値ごとにプロットした。ペアカットと同様にカットの値を大きくするにつれて悪くなっているため、カットをきつくすることでバックグラウンドに対するシグナルの統計的優位性が悪くなっている。しかし  $0.22\text{cm}$  の範囲までは、一定値をとっているように見える。この部分については、後で考察する。

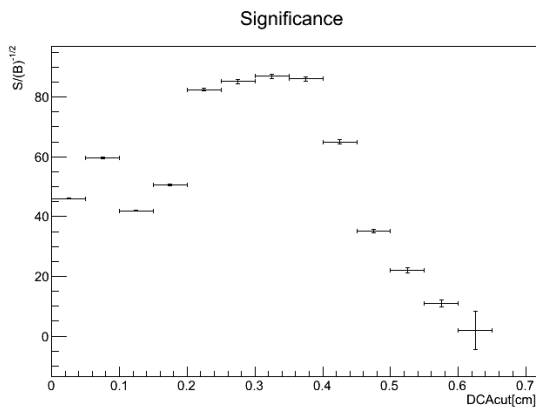


図 4.13: 各データ点は、各ビン幅の  $DCA$  分布でカットをかけた不変質量分布から significance を求めた。  $0.3\text{cm} \sim 0.35\text{cm}$  の幅でカットした significance が最も良くなっていることが分かる。

### 4.3.3 信号対雑音比 (SN)

ここで SN とは、 $S/\sqrt{S+B}$  を表す。 $\sqrt{S+B}$  は、ピーク部分の統計誤差に相当する値である。そのため SN は、誤差に対するシグナル部分の統計的優位性を表している。

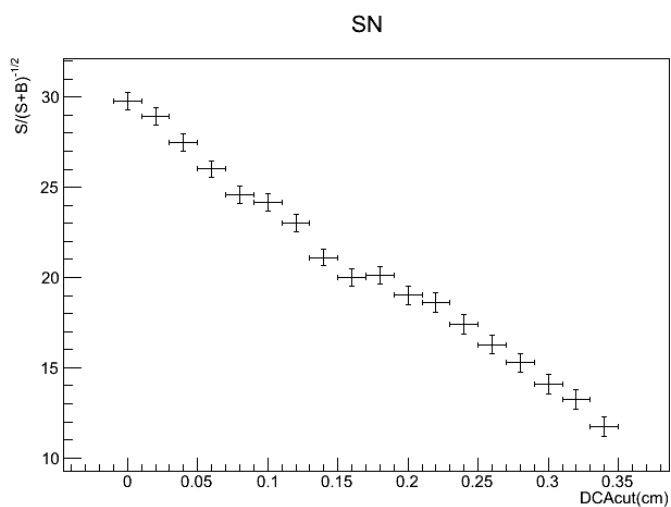


図 4.14: ペアカットをかけた不変質量分布から求めた S,B から  $S/\sqrt{S+B}$  を求めて、それをカットの値ごとにプロットした。カットの値を大きくするにつれて SN も悪くなっているなので、カットをきつくすることでシグナルの統計的優位性が悪くなっているためこのカットは有効でないことが分かる。

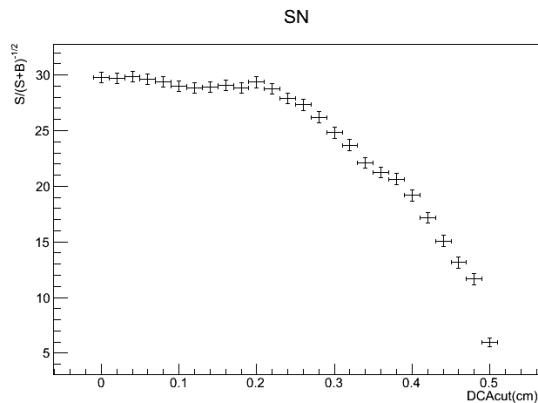


図 4.15: シングルカットをかけた不変質量分布から求めた  $S, B$  から  $S/\sqrt{S+B}$  を求めて、それをカットの値ごとにプロットした。カットの値を大きくするにつれて SN も悪くなっている、カットをきつくすることでシグナルの統計的優位性が悪くなっている。0~0.2cm の範囲で一定値をとっているが、カットの値を大きくすることで統計数が減るためカットをかけないほうがよい。

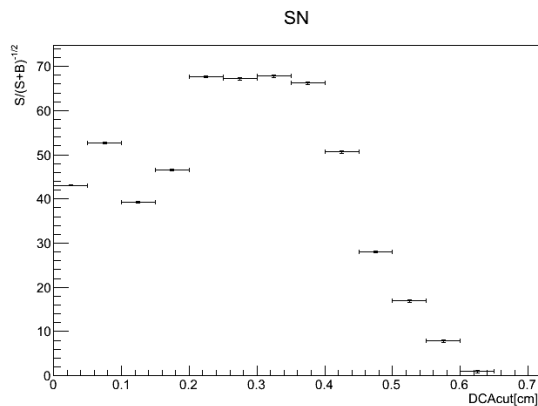


図 4.16: 各データ点は、各ビン幅の DCA 分布でカットをかけた不変質量分布から SN を求めた。Significance 同様に 0.3cm~0.35cm の幅でカットした SN が最も良くなっている。このプロットからスライスカットが有効であることが分かる。

#### 4.4 カットの最適値

スライスカットのSNが0.2cm~0.4cmの範囲で大きくなっているということは、この範囲で $K_s^0$ のDCA分布に対してバックグラウンドとなる粒子のDCA分布の比が大きくなっていると考えられる。 $K_s^0$ とバックグラウンドのDCA分布比の大きくなる範囲でのカットが最適なカットである。そこでスライスカットの最適値、つまりカットするDCA分布の幅の最適値を求める。上のスライスカットにより求めたSNのプロットのピーク値である0.3cmを $K_s^0$ とバックグラウンドのDCA分布比が最も良いと考える。その0.3cmを中心値としその中心値からの数cmの幅でカットする。そしてカットする幅を変えながらSNを求めることで、カットの最適値を求める。

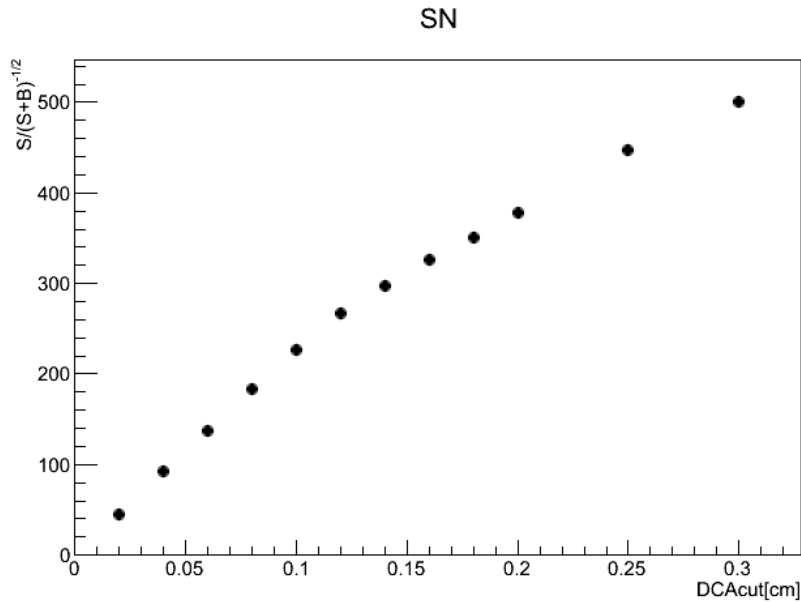


図 4.17: 上で述べたように DCA が 0.3cm を中心にカットする幅を大きくしながら不変質量分布を組んで、SB、Significance、SN を求めている。カットする幅を大きくすると SN も大きくなっていることが分かる。そして 0.3cm の所は、カットをかけていない値である。よってカットをかけないほうが SN がよくなるので、このカットは有効ではない。

## 第5章 考察

衝突事象ごとに不変質量分布を組むことで、 $0.51\text{GeV}/c^2$  付近にピークを持つ不変質量分布が得られた。しかし  $K_S^0$  の不変質量は、およそ  $0.498\text{GeV}/c^2$  である。このずれは、PHENIX 検出器で各粒子の運動量を測定する際に、運動量を大きく見積もってしまっていることが原因と考えられる。この運動量の補正は、今後の課題である。そしてイベントミキシングによりバックグラウンドを再現し、差し引くことで  $K_S^0$  の不変質量分布を得ることができた。また DCA を用いたカットを評価するために、様々な条件の DCA カットをかけた不変質量分布から Signal 部分と BackGround 部分の収量を求め、それを元に定量的に評価した。

### 5.0.1 ペアカット

SB がカットをきつくするほど良くなっているので、カットの範囲を大きくすることでバックグラウンドの成分を多く取り除くことができていると考えられる。しかしカットの範囲を大きくすると、同時に統計数も失われる。そのためバックグラウンドを取り除くことができるが統計数を失いすぎないようにバランスのとれたカットが望ましい。そこで Significance または SN の値を比較したが、どちらもカットの値を大きくすることで小さくなった。これらの結果からペアカットでは、バックグラウンドをカットすることができるが統計数を大きく失ってしまうので、有効ではないと結論付ける。

### 5.0.2 スライスカット

DCA 分布を  $0.5\text{cm}$  幅でスライスカットをかけて組んだ不変質量分布から求めた SN では、 $0.3\text{cm}\sim 0.35\text{cm}$  の範囲が最も SN が良くなった。しかし  $0.5\text{cm}$  という狭い範囲では、統計数を大きく失うためカットをかけていないときより SN の値が小さい。そこで  $0.3\text{cm}$  を中心にカットする範囲を大きくしながら SN を比較すると、範囲を大きくすると SN も大きくなった。この結果からスライスカットは、有効ではないと結論付ける。

### 5.0.3 シングルカット

シングルカットでは、ペアカット同様にカットの範囲を大きくするとSBは大きくなるが、Significance,SN はともに小さくなった。しかし Significance,SN では、0.22cm までの範囲でのカットでほとんど値が変化しなかった。この理由は、x y 方向の DCA 分布のおよそ 0.1cm~0.2cm の範囲に分布しているフォトンコンバージョンによって生成された電子対が作るバックグラウンドが原因と考えられる。つまり DCA が 0.2cm 以下をカットすることで、フォトンコンバージョンによるバックグラウンドを抑えることができると考えられる。そこでシングルカットの 0.22cm までの範囲のを詳しく調べるために統計数を 200 倍に増やして、シングルカットをかけたときの Significance を比較した。

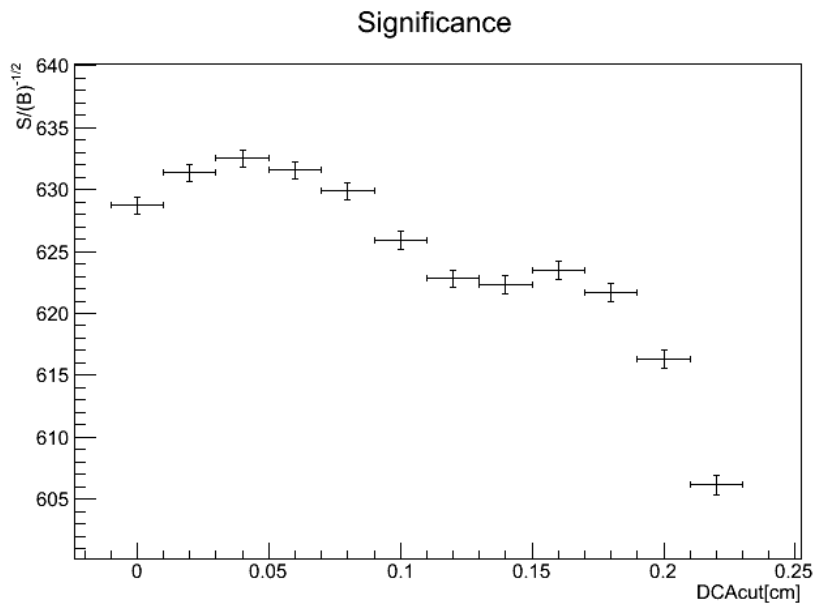


図 5.1: シングルカットをかけた不変質量分布から求めた Significance を求めた。図 4.12 に対して統計数を増やして、0.25cm 以下を拡大している。横軸の 0 は、カットなしを表していて、0.04cm 以下をカットしたものが最大となっている。またカットの範囲を大きくすることで一度減少するが、0.16cm の所で極大値をとっている。つまり DCA が 0.16cm 以下をカットすることで、フォトンコンバージョンによるバックグラウンドを抑えることができていると考えられるが、Significance は最大にならなかった。よってシングルカットの条件で DCA が 0.04cm 以下のトラックをカットするのが最適な DCA カットとである。



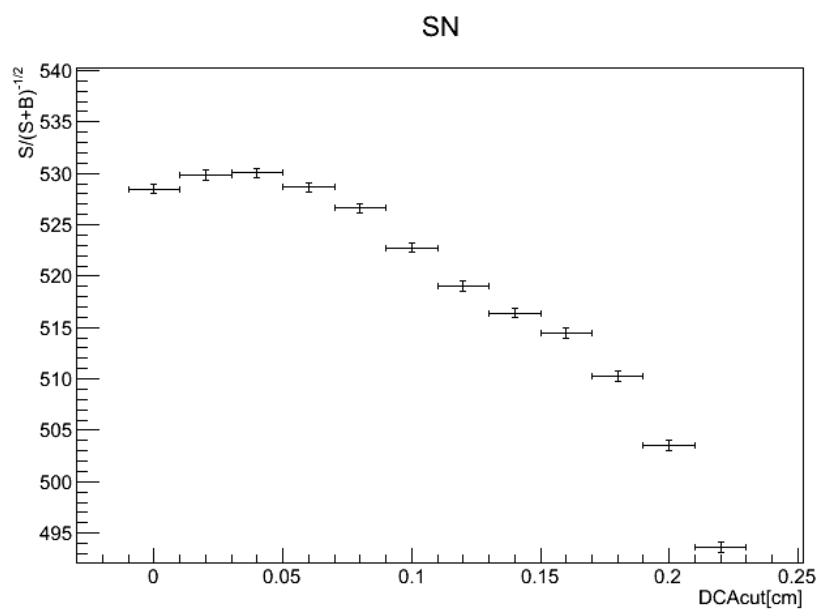


図 5.2: シングルカットをかけた不変質量分布から求めた Significance を求めた。図 4.15 に対して統計数を増やして、0.25cm 以下を拡大している。Significance と同様に横軸の 0 は、カットなしを表していて、0.04cm 以下をカットしたものが最大となっている。

## 第6章 結論

本研究では、PHENIX 実験の VTX 検出器で測定した各飛跡の DCA を用いた飛跡分類の有用性について研究した。まず VTX 検出器で測定した各飛跡の運動量、電荷、跳んだ方向より不変質量分布を組んで、Event Mixing 法によってバックグラウンドを差し引いた。その結果  $0.52\text{GeV}/c^2$  付近にピークを持つ  $K_s^0$  の不変質量分布が得られた。しかし  $K_s^0$  の不変質量である  $0.498\text{GeV}/c^2$  と一致しないのは、運動量の測定方法に原因があると考えられるが、この補正は今後の課題とする。 $K_s^0$  の不変質量分布が得られたので、このピークをよりよく見るために DCA を用いた飛跡選択を行った。そこでこの飛跡選択を最適化するために Significance、SN を用いて定量的に議論した。その結果 Significance、SN の両方ともを最大とした条件と値は、不変質量のどちらか片方の DCA が  $0.04\text{cm}$  より大きいことを要求する飛跡選択であった。よってこの条件が最適な DCA カットであると結論づけることができた。

本研究では、XY 方向の DCA にのみ注目して解析を行ったが、今後は Z 方向についても詳しく調べる必要がある。また、 $K_s^0$  の DCA 分布とバックグラウンドとなる粒子の DCA 分布をシミュレーションを用いて導出することで、Significance、SN 以外からのアプローチも可能であると考えられる。

まだいくつかの課題は残っているが、DCA を用いた解析の有用性を示すことができた。よって今後 DCA を用いた解析を従来の方法で、測定の難しい粒子に応用できることが期待できる。

## 謝辞

本研究を行う上で関わって頂いたすべての方に感謝をします。

杉立先生には、ミーティングでの鋭い指摘やアドバイスにより研究を進めていく上での心得や着眼点など多くのことを学びました。

志垣先生には、大変お世話になりました。本研究に取り組むきっかけを与えてくれたり、毎週のミーティングでの的確な指摘や助言でこの研究を正しい方向に導いていただきました。

本間先生、三好先生には、様々な視点から物理の議論をして頂いて、研究の理解を深めることができました。

理化学研究所の秋葉さんと蜂谷さんには、この研究を行う上で必要なデータや情報を頂いたり質問にも親身になって答えて頂きました。ありがとうございます。

大学院博士課程の先輩方では、中宮さんには物理やコンピュータの初歩的な事や解析手法など多くのことを教えていただきました。渡辺さんには、コンピュータの使い方など基礎的な部分などを教えていただきました。

大学院修士課程の先輩方では、星野さんには常に研究の進行状況を気にかけていただき、研究の技術的な部分で多くのことを教えていただきました。八野さん、辻さん、大屋さんにはミーティングなどで多くのアドバイスを頂きました。

最後に同じ四年生の関畑君には、物理解析の技術的な事を多く教えてもらいました。谷崎さんには、プログラミング技術で多くのことを教えてもらいました。また雑談や息抜きにもよく付き合ってもらいました。湯浅君、中里君、市間君、江川君とは、相談したり、議論をすることで多くのことを学ぶことができました。これからもよろしくお願いします。

多くの方々の支えがあって、本研究を進めることができました。本当にありがとうございます。

## 参考文献

- [1] KEK home page, <http://www.kek.jp/ja/>
- [2] ATLAS home page, <http://atlas.kek.jp/>
- [3] BNL home page, <http://www.bnl.gov>