

広島大学 理学部物理学科

卒業論文

高位置分解能シリコン光センサーを用いた  
リングイメージ型チェレンコフ検出器による  
GeV 領域  $\mu$  粒子同定の実現可能性評価

B193071 栗田 峻輔  
(クォーク物理学研究室)

指導教員 志垣 賢太  
主査 八野 哲  
副査 深澤 泰司

# 目次

1	序論	4
1.1	強い相互作用	4
1.2	クォーク・グルーオン・プラズマ	5
1.3	ハドロンの質量起源	6
1.3.1	ハドロンの質量獲得	6
1.3.2	カイラル対称性の自発的破れ	6
1.3.3	カイラル対称性の自発的破れの部分的回復	6
1.4	レプトン対測定 of 歴史	7
1.4.1	電子対測定: SPS-CERES/SPS-NA45 実験及び RHIC-STAR/RHIC-PHENIX 実験	7
1.4.2	$\mu$ 粒子対測定: SPS-NA60 実験	8
1.4.3	LHC-ALICE 実験	9
1.5	荷電粒子の同定	9
1.5.1	TPC	10
1.5.2	TOF	10
1.6	リングイメージ型チェレンコフ検出器	11
1.6.1	チェレンコフ光	11
1.6.2	RICH 検出器の仕組みと例	12
1.7	シリコン光センサー	13
1.8	RICH for ALICE 3	13
2	研究動機	15
3	研究手法	16
3.1	高エネルギー衝突イベントの生成/Pythia8	16
3.2	検出器系と粒子の反応/GEANT4	16
3.3	SiPM の検出効率と時間分解能	17
3.4	チェレンコフ角の導出	17
3.5	チェレンコフリングの決定/HTM	18
3.6	検出効率と純度	18
4	結果	20
4.1	光子と荷電粒子の検出	20
4.2	チェレンコフリングの決定	20
4.3	標準偏差 $\sigma$ によるカットの決定	21
4.4	チェレンコフ角の $\beta$ 依存性	22
4.5	光子数の角度依存性	23
4.6	光子の角度分布	23
4.7	角度と親粒子の運動量の相関関係	24
4.8	検出効率	25
4.9	純度	26
4.10	$\beta_{CherenkovAngle}$ と親粒子の運動量の相関	27

4.11	HTM の妥当性 . . . . .	27
5	考察	28
5.1	バックグラウンドについて . . . . .	28
5.2	陽子陽子衝突シミュレーションの粒子収量による補正 . . . . .	30
6	結論と展望	32
	謝辞	33
	参考文献	34
	付録 A 式 (5) から求めた角度	36

## 概要

ハドロンの質量起源を説明する有力な理論としてカイラル対称性の自発的破れがある。カイラル対称性は高温相のクォーク・グルーオン・プラズマ内において対称性が部分的に回復することが予想されている。この理論の検証には高エネルギー重イオン衝突実験において、レプトン対に崩壊する低横運動量・低質量ベクトル中間子が有効なプローブであり、これまで低運動量領域の粒子同定が容易な電子が用いられてきたが、膨大な背景事象が問題となり未だに同理論の検証はできていない。一方で、低運動量  $\mu$  粒子対測定では背景事象の大幅な削減が期待できるが、質量の近い  $\mu$  粒子と  $\pi$  中間子を見分けることが難しいという問題がある。

粒子同定技術の一つにリングイメージ型チェレンコフ検出器がある。荷電粒子が放出するチェレンコフ光の放出角度と荷電粒子の運動量の相関から、荷電粒子の質量を求めることができる。しかし、従来の光電子増倍管を用いたチェレンコフ光検出技術では位置分解能が悪いため、 $\mu$  粒子と  $\pi$  中間子のチェレンコフ光放出角度の違いを見分けることは困難であった。

本研究では位置分解能に優れたシリコン光センサーを用いることで、低運動領域における  $\mu$  粒子と  $\pi$  中間子の分離同定が実現可能かシミュレーションを用いて研究した。

# 1 序論

本章では本研究に関わる理論、物理的背景、及び検出器についての基本的な事項を説明する。

## 1.1 強い相互作用

現代の素粒子物理学は物質を構成する 12 種類の素粒子と、それらの粒子間に働く基本相互作用を説明する標準理論からなる。物質を構成する粒子はクォーク (6 種類) とレプトン (6 種類) に分けられ、どちらもフェルミ粒子である。相互作用は力を伝える粒子の交換として理解され、そのような粒子をゲージ粒子という。ゲージ粒子として強い相互作用でのグルーオン、電磁相互作用での光子、弱い相互作用でのウィークボソン、重力相互作用でのグラビトンが挙げられる。

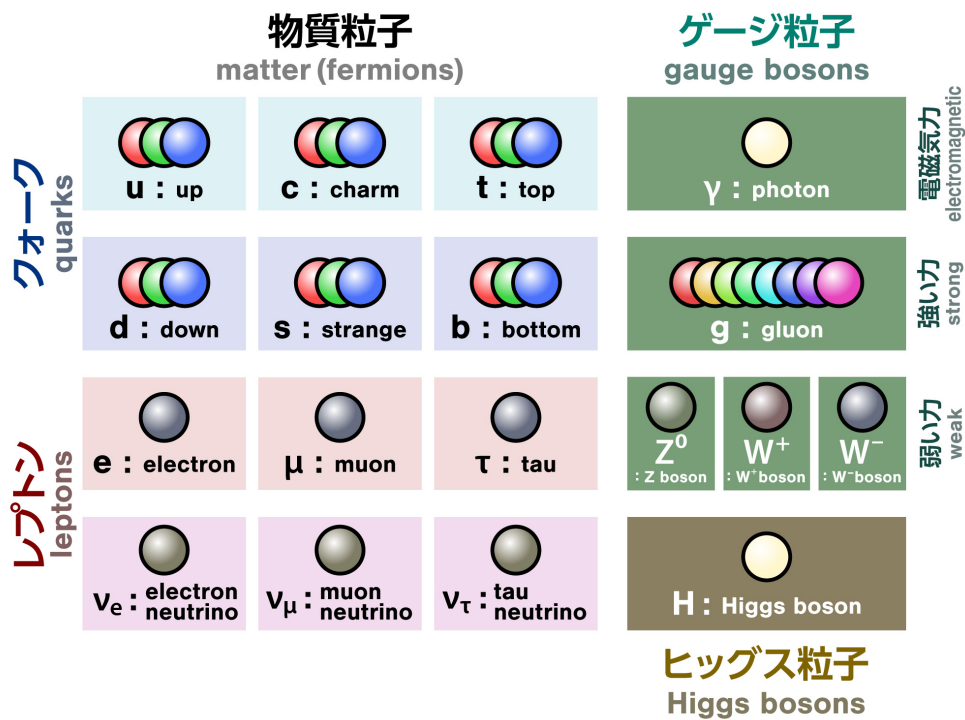


図 1 標準模型の基本粒子 [1]

この中でクォークとグルーオンの強い相互作用を記述する理論を量子色力学 (QCD) という。クォークとグルーオンは電磁気学における電荷 (+, -) のようにカラー荷 (赤、青、緑) と呼ばれるチャージを持つ。電荷と違いクォークはそれ単体では観測されず、クォーク 1 つ (単独のカラー) を取り出そうとすると、対生成で強い相互作用が安定するカラーが白色になるような組み合わせを作った状態で観測される。これには強い相互作用の性質である漸近的自由性「QCD の結合定数 (図 2) は高エネルギー (近距離) 領域では弱結合、低エネルギー (遠距離) 領域では強結合 [2]」が関わっている。核子の大きさ程度以上の距離になると全体として白色の状態しか安定に存在できないこの現象はクォークの閉じ込めと呼ばれる。(赤、青、緑)、(反赤、反青、反緑) のように 3 つのクォークで構成されるものをバリオン、(赤、反赤)、(青、反青)、(緑、反緑) のようにクォークと反クォークからなるものをメソンといい、2 つを合わせてハドロンと呼ぶ。バリオンの例として陽子 (uud)、メソンの例として π 中間子 (u $\bar{d}$ ) がある。

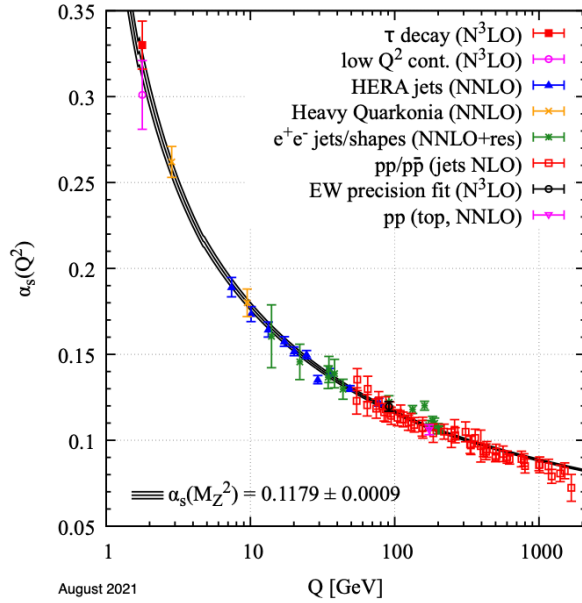


図2 QCD の結合定数。Ref.[3]

### 1.2 クォーク・グルーオン・プラズマ

クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) とは、クォークとグルーオンから構成される高温・高密度のプラズマ状態のことである。前節で述べたようにクォークはグルーオンの交換による強い相互作用の影響でハドロンに閉じ込められている。しかし高温・高密度下はハドロン同士の境界が曖昧になり、クォークが動ける範囲が広がって閉じ込めから解放される。ビッグバンから数十マイクロ秒後の宇宙がこの状態であり、カイラル対称性が回復していたと考えられている。

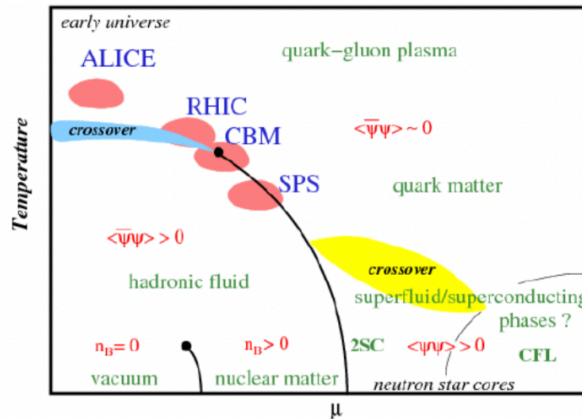


図3 QGP 相図。縦軸: 温度、横軸: ハドロン密度。Ref.[4]

実験で人工的に QGP を作り出す手段として、RHIC 加速器 (BNL) や LHC 加速器 (CERN) での高エネルギー重イオン衝突実験がある。実際に RHIC では金原子核同士の衝突で、LHC では鉛原子核同士の衝突で QGP が作られていることが間接的に確認されている (例: ジェットクエンチング [5]、 $J/\psi$  粒子の抑制現象)。

### 1.3 ハドロンの質量起源

#### 1.3.1 ハドロンの質量獲得

素粒子物理学の課題としてハドロンの質量獲得メカニズムの解明がある。例えば陽子は3つのクォーク (uud) からなり、クォーク1個あたりの裸の質量は数 MeV 程度である。しかし、実際の陽子の質量は約 938 MeV であり、クォークの質量だけでは説明できない。このギャップを説明する有力な理論がカイラル対称性の自発的破れである。

#### 1.3.2 カイラル対称性の自発的破れ

カイラル対称性とは粒子の右巻き、左巻きを区別する対称性である。フェルミ粒子であるクォークはスピン  $1/2$  を持ち、スピン  $1/2$  は運動方向に対して同方向かその反対方向のどちらかを取る。前者を右巻き、後者を左巻きと言い、これを明確に区別できるときにカイラル対称性があるという。粒子が光速で進むときに右巻き、左巻きを区別できるため、カイラル対称性は粒子の質量が0の時に成り立つと分かる。

実際はクォークがヒッグス機構により質量を獲得するため、カイラル対称性は破れている。これをカイラル対称性の自発的破れという。カイラル対称性の破れの秩序変数としてカイラル凝縮  $\langle q\bar{q} \rangle$  がある。カイラル対称性が破れることで真空中にクォーク、反クォークが凝縮し、これらと作用することでハドロンの質量獲得が起こるとされている。

#### 1.3.3 カイラル対称性の自発的破れの部分的回復

カイラル凝縮がカイラル対称性の破れ具合に関係しているということから、カイラル凝縮が0に近づく (高温・高密度になる (図4)) とカイラル対称性の部分的回復も起こると予想できる。高温相である QGP でもカイラル対称性の部分的回復が起こっていると考えられ、その検証のための有効なプローブとしてレプトン対に崩壊する低横運動量・低質量ベクトル中間子がある。低横運動量については1.5の荷電粒子の同定で説明する。ここでは低質量ベクトル中間子について説明する。

全角運動量が1で奇のパリティを持つ中間子をベクトル中間子という。その中で u,d,s のクォークから構成されるベクトル中間子のことを低質量ベクトル中間子と呼ぶ。u,d,s クォークはカイラル対称性による質量獲得割合が高く、低質量ベクトル中間子は短寿命である。具体的には  $\omega, \phi, \rho^0, \rho^\pm, K^{*0}, \bar{K}^{*0}, K^{*\pm}$  が低質量ベクトル中間子である。

このことから低横運動量・低質量ベクトル中間子は QGP 内でレプトン対に崩壊する確率が高く、強い相互作用を受けないレプトン対は情報を失うことなく検出器に届くと期待できる。従って我々が実際に測定するのは電子か  $\mu$  粒子となり、これらの粒子同定が課題となる。

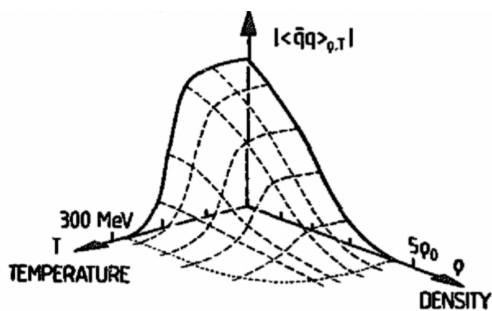


図4 カイラル凝縮の温度密度依存性。Ref.[7]

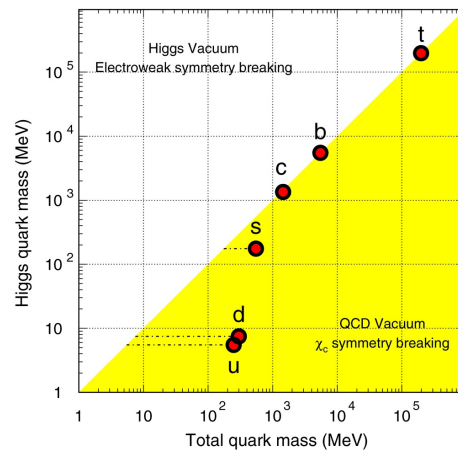


図5 QCD 真空とヒッグス真空中のクォーク質量。Ref[9]

## 1.4 レプトン対測定 of 歴史

素粒子には以下に示すようにエネルギー領域によって支配的な物理現象がある。

- LMR(low mass region,  $m < 1$  GeV): 媒質効果によるベクトル中間子の質量変化
- IMR(intermediate,  $1 < m < 2.5$  GeV): カイラルミキシングによる収率向上、DD 相関崩壊、熱的放射
- HMR(high,  $m > 2.5$  GeV): Drell-Yan 過程、クォークonia の対生成

つまり LMR でのレプトン対の収量変化を観測することは  $\rho$  の質量変化の観測となる。ここではこれまで行われた LMR でのレプトン対測定と解析結果を紹介する。

### 1.4.1 電子対測定：SPS-CERES/SPS-NA45 実験及び RHIC-STAR/RHIC-PHENIX 実験

低質量電子対での測定として CERN-SPS 加速器を用いた固定標的実験の CERES 実験、NA45 実験と、BNL-RHIC 加速器を用いた PHENIX 実験がある。特に CERES 実験では電子・陽電子対での低質量レプトン対の測定で、重イオン同士衝突 (A-A 衝突) において電子対の低質量領域での質量変化が初めて観測された。これは p-Be 衝突や p-Au 衝突 (図 6) といった陽子との衝突では見られなかったものである。

以下に示すグラフは縦軸に電子・陽電子対の数、横軸に不変質量をとった粒子衝突における電子対の質量分布である。グラフ中に示されている実線はカクテルと呼ばれ、終状態の粒子収量、真空の崩壊比から見積もられたメソン崩壊由来のレプトン対の数である。(図 7) は  $0.2 \sim 0.6$  GeV/c<sup>2</sup> の辺りでカクテルと実験データに有意なずれ (低質量電子対収量の増大) があることがわかる。

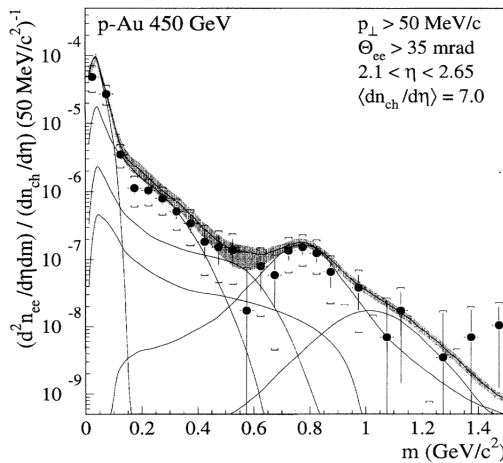


図 6 p-Au 衝突での電子対の不変質量分布  
Ref.[12]

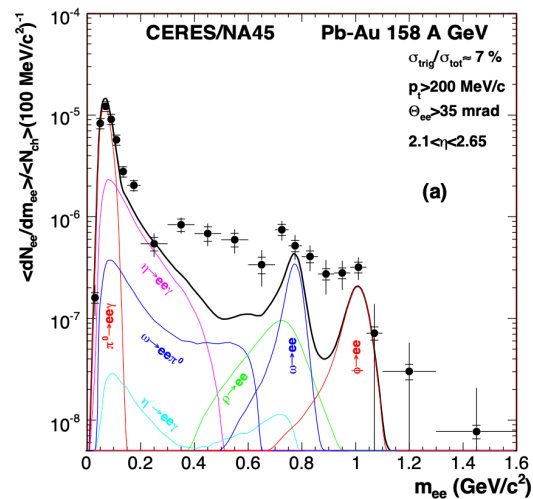


図 7 Pb-Au 衝突での電子対の不変質量分布  
Ref.[13]

このずれを説明するシナリオとしてベクトル中間子  $\rho$  の「ドロップニング」と「ブロードニング」がある。ドロップニングとは  $\rho$  の質量スペクトルが低質量側にドロップすることである。ブロードニングとはハドロン多体効果によって  $\rho$  の質量スペクトルが広がることである。

CERES 実験では  $\pi^+\pi^- \rightarrow \rho \rightarrow e^+e^-$  の過程でかつ  $\rho$  のブロードニングが起こっているというシナリオで粒子収量のずれを説明できたが、質量変化について議論できるレベルの分解能と統計精度がなかった。また  $\pi^0$  由来の Dalitz 崩壊 ( $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$ ) からくる膨大なバックグラウンドも電子対測定における課題の 1 つである。

RHIC-STAR 実験は SPS 加速器よりも高いエネルギーでの A-A 衝突実験が行われた。具体的には SPS の重心エネルギーから RHIC のエネルギー上限である  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV を体系的に測定した (Beam Energy Scan-I program)。



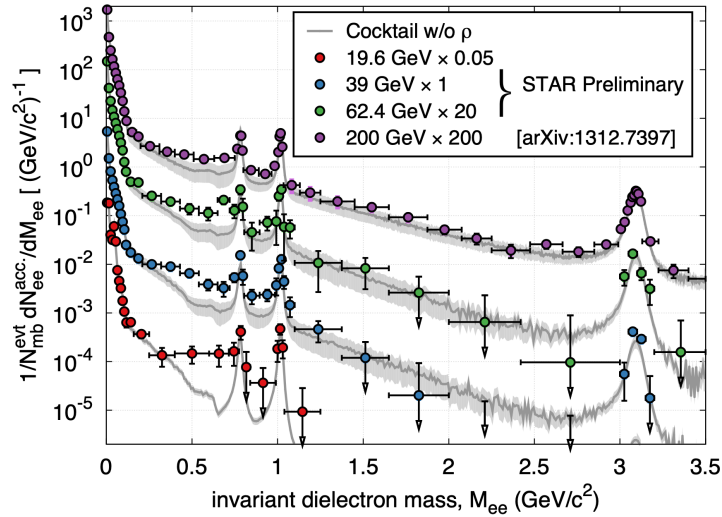
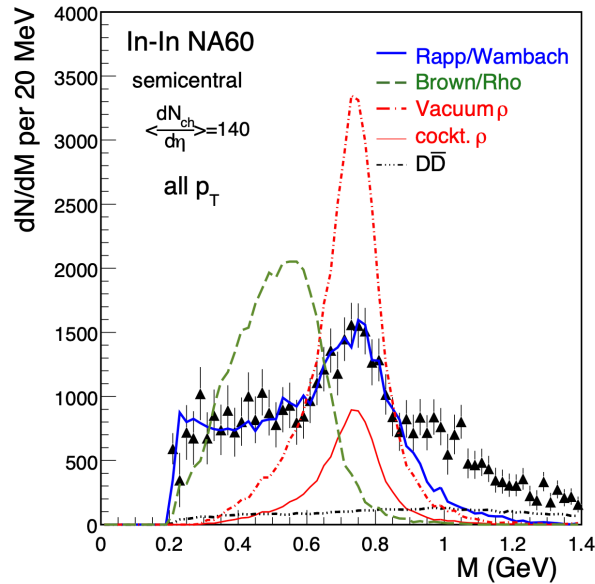


図8 Au-Au 衝突での電子対の不変質量分布 [14]

重イオン衝突測定結果での LMR において通常のハドロン崩壊では説明できない粒子収量の増大が観測されている。しかしこれらの測定結果は、熱光子からの内部変換による電子対の寄与や  $\rho$  のドロッピング、ブロードニングを考慮しても説明できていない [16]。

#### 1.4.2 $\mu$ 粒子対測定：SPS-NA60 実験

NA60 実験ではインジウム同士衝突 (In-In) での低質量  $\mu$  粒子対を用いた  $\rho$  の質量測定が行われた。大幅にバックグラウンドが削減できたことで定量的な測定を行うことができ、明確な収量増大を観測した。

図9 In-In 衝突での  $\mu$  粒子対の不変質量分布 [17]

しかしこの実験結果はハドロン多体効果によるブロードニングのみで説明できてしまったため、質量変化とカイラル対称性の回復を結びつけることができなかった。

### 1.4.3 LHC-ALICE 実験

より高い重心エネルギーを目指して計画されたのが LHC 加速器を用いた ALICE 実験である。LHC 加速器では陽子-陽子で  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ 、鉛-鉛で  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$  を出すことができる。

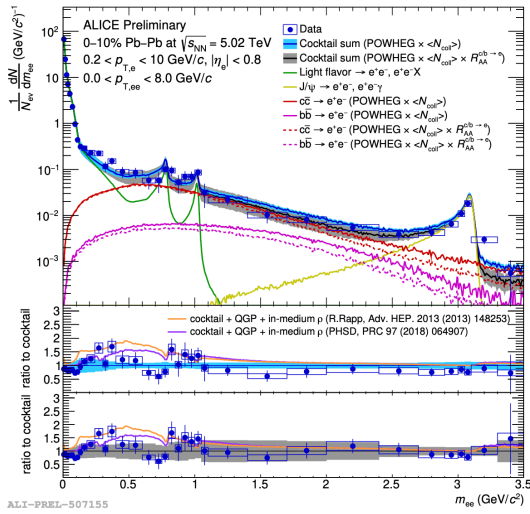


図 10 Pb-Pb 衝突での電子対の不変質量分布 [18]

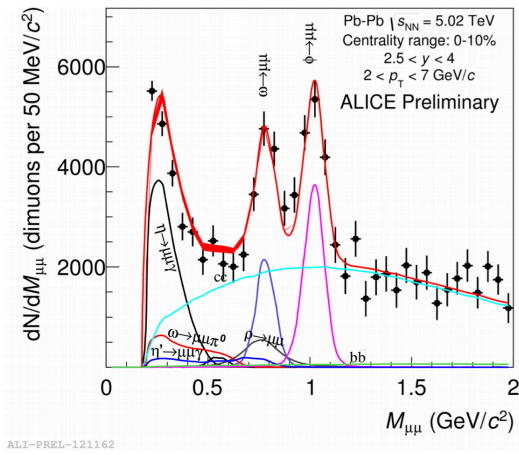


図 11 Pb-Pb 衝突での  $\mu$  粒子対の不変質量分布 [19]

電子対測定 (図 10) では膨大なバックグラウンドが原因で議論できるほどの正確な統計がない。

$\mu$  粒子測定 (図 11) については後述する検出方法の関係で質量分解能が悪く、 $\mu$  粒子での質量変化を見ることはできていない。

## 1.5 荷電粒子の同定

高エネルギー重イオン衝突実験では荷電粒子の飛跡、運動量、エネルギー損失などから粒子の同定を行う。ここでは例として ALICE 実験で使われている検出器とデータをもとに説明する。検出器は重イオン衝突が起こる衝突点を基準として、衝突点を取り囲むセントラル領域、重イオンビームの軸に対して浅い角度に出てくる粒子を狙う前方領域に分けられる。セントラル領域の利点は理論的な計算が楽であること、欠点はバックグラウンドが多いことである。

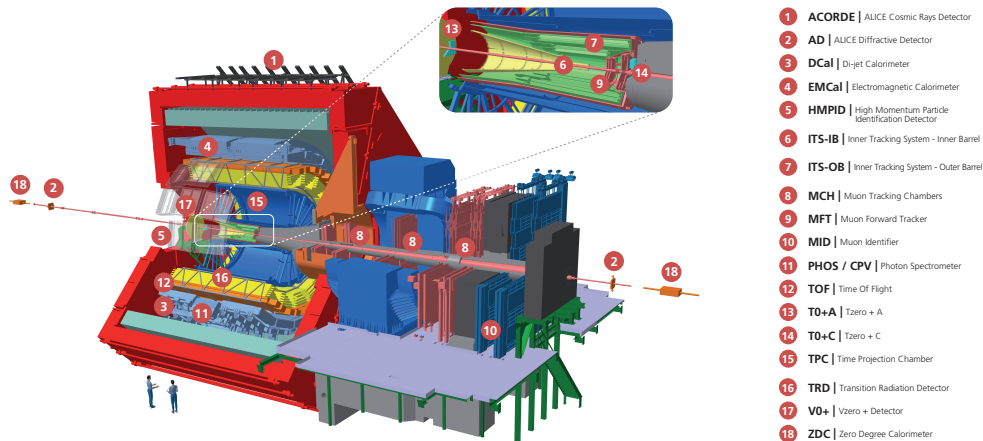


図 12 ALICE Run 3 での検出器系 [20]

荷電粒子同定をするセントラル領域での検出器例として TPC(Time Projection Chamber)、TOF(Time Of Flight)、HMPID(High Momentum Particle Identification Detector) がある。

### 1.5.1 TPC

TPC は荷電粒子の飛跡再構成、運動量測定、エネルギー損失測定を行い、荷電粒子が物質中を通過する際に失うエネルギーと運動量の相関から粒子の同定を行う。

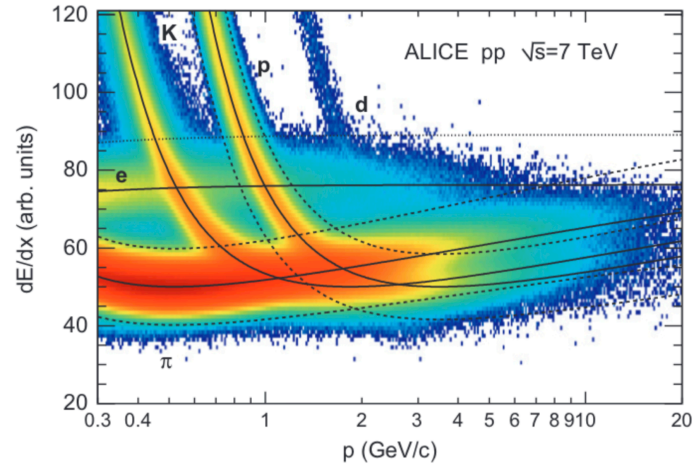


図 13 TPC による PID[21]

### 1.5.2 TOF

TOF は荷電粒子の飛行時間の測定を行い、TPC で得られた飛行距離、運動量の測定結果と組み合わせることで粒子同定を行う。

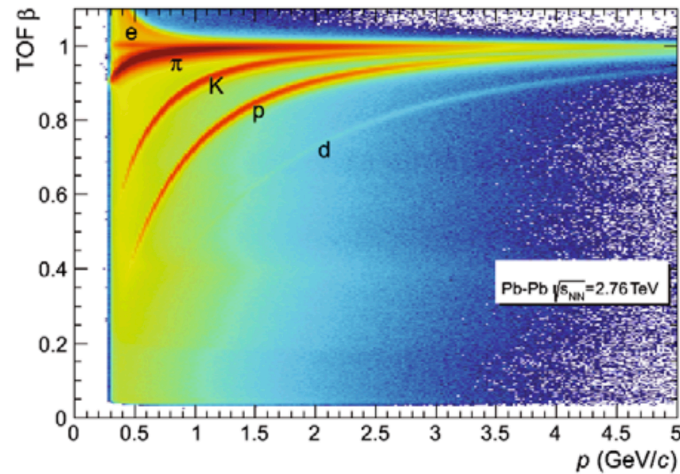


図 14 TOF による PID[22]

図 13,14 と次節で説明する RICH の PID(図 19) から分かるように、セントラル領域での検出器で  $\mu$  粒子の検出をすることは出来ていない。なぜなら質量の近い  $\pi$  中間子との分離が困難だからである。そのため  $\mu$  粒子は鉛の吸収層で  $\pi$  中間子をはじめとしたバックグラウンドをカットできる前方領域の検出器で測定する。前方領域の利点はバックグラウンドが少ないことであり、欠点は鉛の吸収層を挟むことで粒子の飛跡再構成が難しいことである。重イオンビーム軸に対して垂直方向の運動量成分のことを横運動量 (transverse momentum,  $p_T$ ) という。  $\mu$  粒子対の測定は検出器の位置の関係上、低横運動量の粒子を測定することに

なる。

## 1.6 リングイメージ型チェレンコフ検出器

荷電粒子が放出するチェレンコフ光の放出角度と荷電粒子の運動量の相関から、荷電粒子の質量を求める粒子同定技術がある。これを用いた検出器がリングイメージ型チェレンコフ検出器であり、RICH(Ring-imaging Cherenkov) と呼ばれる。

### 1.6.1 チェレンコフ光

チェレンコフ光とは荷電粒子が物質中(屈折率  $n$ ) を通過する時の速度  $v$  が、その物質中での光速  $c$  より速い時に発生する光のことである。これを式で表すと、

$$v > \frac{c}{n} \quad (1)$$

荷電粒子の進行方向とチェレンコフ光の放射方向のなす角を  $\theta$  とすると、

$$\cos \theta = \frac{c}{nv} = \frac{1}{n\beta} \quad (2)$$

である。

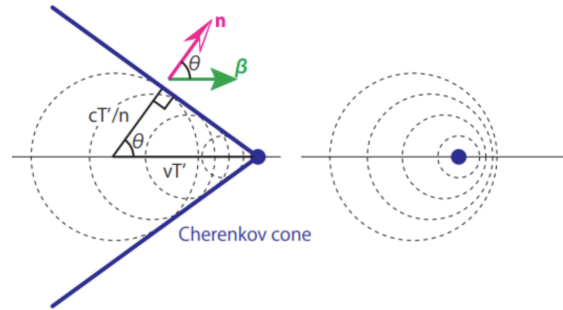


図 15 チェレンコフ放射とその条件。[24]

Frank-Tamm の公式より単位周波数、単位距離あたりに荷電粒子(電荷  $Ze$ ) が電磁波として放出する放射のエネルギーは、

$$\frac{dW}{d\omega dz} = \frac{(Ze)^2 \omega}{c^2} \left( 1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right) \quad (3)$$

$E = \hbar\omega$  の光子数を  $N$  とすると、

$$W = EN = \hbar\omega N$$

より単位周波数、単位距離あたりに荷電粒子が放出する光子数は、

$$\frac{dN}{d\omega dz} = \frac{(Ze)^2}{\hbar c} \left( 1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right) = \frac{Z^2 \alpha}{c} \sin^2 \theta \quad (4)$$

という関係があることがわかる。ここで  $\alpha$  は微細構造定数、2つ目の等号では(2)を用いた。

また(2)より荷電粒子の質量を  $m$  として、

$$\begin{aligned} \frac{1}{n^2 \beta^2} &= \cos^2 \theta \\ 1 - \beta^2 &= \beta^2 n^2 \cos^2 \theta - \beta^2 \\ m^2 (1 - \beta^2) &= m^2 \beta^2 (n^2 \cos^2 \theta - 1) \\ m &= \frac{m\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \sqrt{n^2 \cos^2 \theta - 1} \end{aligned}$$

と式変形することでチェレンコフ光の放射角度と荷電粒子の質量の関係式が導かれる。

$$m = \frac{p}{c} \sqrt{n^2 \cos^2 \theta - 1} \quad (5)$$

ここで荷電粒子の運動量  $p$  について、粒子は光速に近い運動をおこなっているため、

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

を用いた。

### 1.6.2 RICH 検出器の仕組みと例

RICH 検出器はエアロジェルなどのラジエーターを通過して発生したチェレンコフ光を光電子増倍管などの光センサーで検出することでチェレンコフ光の放射角度を求める。荷電粒子の運動量は別の検出器によって測定する。

チェレンコフ光の光センサーへの取り込み方で近接焦点型 (図 16) とミラー焦点型 (図 17) の 2 種類の型がある。

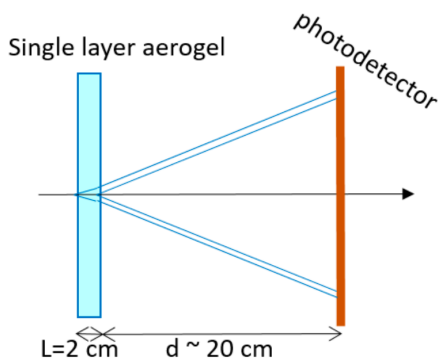


図 16 近接焦点型 [25]

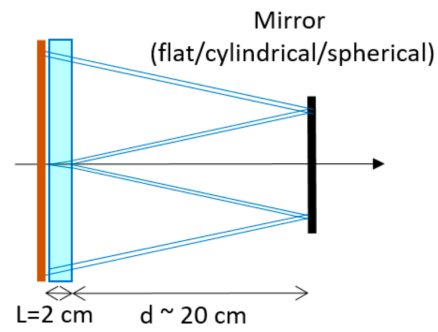


図 17 ミラー焦点型 [25]

近接焦点型の長所として構造が単純であるため、鏡の設置スペースや幾何学的な配置を考えなくて良いことが挙げられる。短所として角度分解能を上げるためにエアロジェルを薄くすると検出光子数が下がってしまうという点がある。

ミラー焦点型は鏡の曲率や位置関係で色々な種類があるが、基本のコンセプトは鏡でチェレンコフ光を集光して検出光子数の増加と角度分解能の向上を目指すことにある。

RICH 検出器の例として ALICE 2 に導入されている HMPID (図 12、図 18) がある。HMPID は  $C_6F_{14}$  のラジエーターと MWPC を用いた光子検出器からなる近接焦点型の RICH 検出器である。

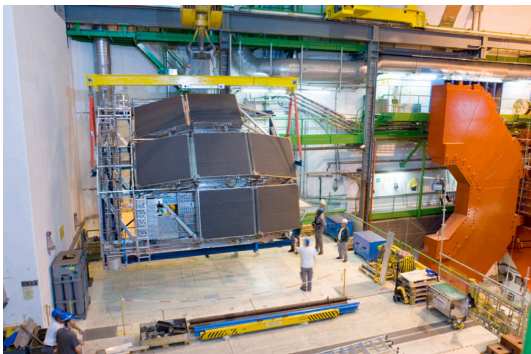


図 18 HMPID の外観。7つのモジュールからなる。[26]

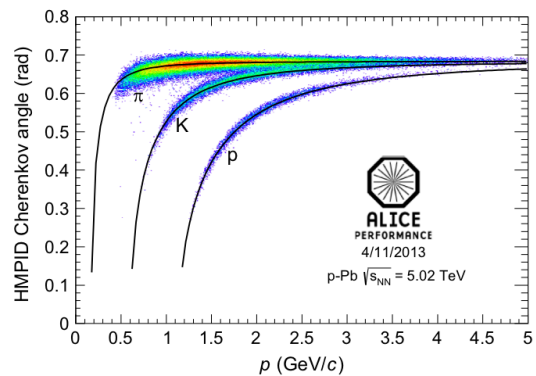


図 19 HMPID から得られたチェレンコフ角と荷電粒子の運動量のヒストグラム [27]

HMPID は  $3 \text{ GeV}/c$  以下の  $\pi$  中間子、K 中間子の分離と、 $5 \text{ GeV}/c$  以下の K 中間子、陽子の分離が可能である (図 19)。

## 1.7 シリコン光センサー

高エネルギー素粒子実験で使われる検出器の一つにシリコン光センサー (Silicon Photomultipliers) がある。シリコン結晶に不純物を加えると半導体となり、リンを加えることでできる n 型、ホウ素を加えることでできる p 型がある。n 型はリンがシリコンと共有結合する際に余る電子 ( $e^-$ ) が自由電子のように動くことで電流を流せるようになる。n 型の不純物原子をドナーと呼ぶ。p 型はホウ素の価電子が 3 つであるためシリコンと結合しない空の軌道ができる。これに近くの電子が移ると新たに空の軌道ができて、さらにそこに別の電子が入るといったことが繰り返される。この様子はあたかも正の電荷を持った粒子が移動して電流を流しているように見える。この見かけ上の粒子をホール ( $h$ ) と呼び、p 型の不純物原子をアクセプターと呼ぶ。自由電子とホールを合わせてキャリアと呼ぶ。

ここで p 型半導体と n 型半導体を接合すると熱運動で移動した自由電子とホールが接合面付近で衝突して対消滅する。これを再結合と呼ぶ。再結合が起こるとその領域はキャリアがない層となる。これを空乏層という。p 型側がプラスになる方向に電流を流せば常に自由電子とホールが供給されるが、逆方向に電圧を印加すると空乏層は広がって電流が流れなくなる。

このようなシリコン結晶中を荷電粒子が通り抜けるとクーロン力で結晶が励起されて、自由電子・ホール対 ( $dE/dx(\text{MIP})$  で約  $100 \text{ e-h}/\mu\text{m}$ ) が生成される (図 20)。また励起エネルギー以上のエネルギーを持つ光子が入射した場合も自由電子・ホール対が生成される。空乏層にはキャリアがないので生成された自由電子は空乏層内の電場により p 型の電極へ、ホールは n 型の電極へ移動する。これを検出することで荷電粒子ないし光子が通過した場所やエネルギーがわかる。これがシリコンセンサーの仕組みである [23]。

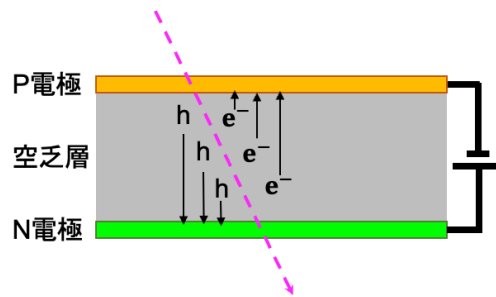


図 20 空乏層を通過した荷電粒子によってキャリアが生成される様子

シリコンセンサーにはストリップ型とピクセル型があり、ピクセル型の素子サイズは大体  $10 \mu\text{m}$  オーダーである。これが高い位置分解能の理由である。

## 1.8 RICH for ALICE 3

ALICE 実験は 2030 年代に行われる LHC Run 5 に向けて検出器のアップグレードを計画しており、これは ALICE 3 と呼ばれる。ALICE 3 の特徴は  $|\eta| < 4$  をカバーするセントラル領域の検出器系に、高い位置分解能をもつシリコン検出器を導入することである。これにより更なる粒子トラッキング、粒子識別の向上が期待される。

ALICE 3 での RICH 検出器は  $|\eta| < 1.75$  の領域をカバーする。  $500 \text{ MeV}/c$  から  $2 \text{ GeV}/c$  での  $e/\pi$  分離、  $10 \text{ GeV}$  までの荷電粒子同定 ( $3\sigma$  の  $\pi/K$  分離) の役割を担う。光子検出面には SiPM を導入し、  $1.5 \text{ mrad}$  の角度分解能を実現する。

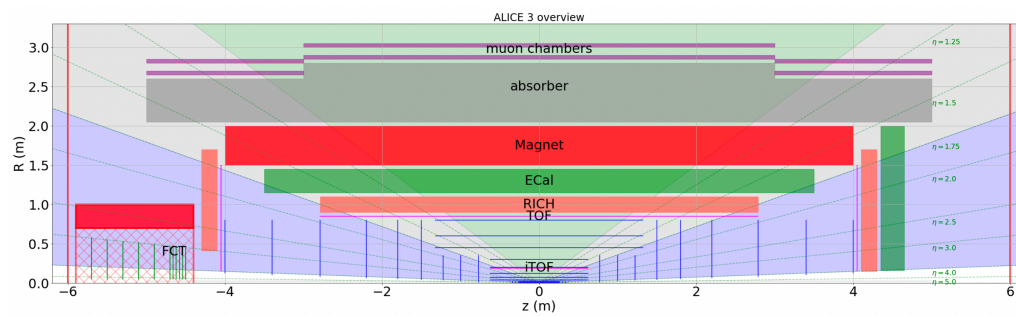


図 21 ALICE 3 検出器の縦断面図 [25]

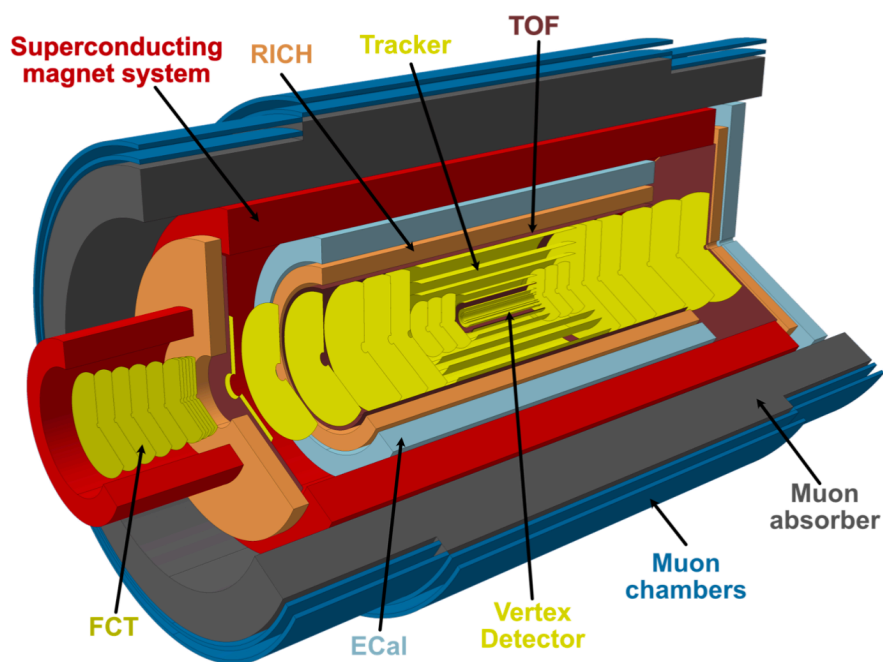


図 22 ALICE 3 の検出器コンセプト [25]

## 2 研究動機

カイラル対称性の回復を観測するには、重イオン衝突実験でのレプトン対に崩壊する低横運動量・低質量ベクトル中間子が有効なプローブである。しかし序論で述べた通り、レプトン対の測定は電子対でのバックグラウンドの多さ、 $\mu$ 粒子対でのトラックマッチングの難しさといった課題があった。この課題を解決する方法としてバックグラウンドの少ない $\mu$ 粒子での測定、アブソーバーを通さないセントラル領域での測定、高位置分解能をもつシリコン検出器の導入がある。ALICE 3で計画されている RICH 検出器はシリコン光センサー SiPM を導入したセントラル領域の検出器である。本研究では今まで測定されてこなかったセントラル領域での $\mu$ 粒子測定を目標として、ALICE 3-RICH 検出器での $\mu$ 粒子同定がどの程度実現可能であるかシミュレーションを用いて評価することを目的とする。



### 3 研究手法

ここではシミュレーションから解析までの流れを説明する。本研究では単純な陽子-陽子衝突イベントでの性能評価をする。

#### 3.1 高エネルギー衝突イベントの生成/Pythia8

Pythia とは高エネルギーでの物理衝突イベントを生成するモンテカルロイベントジェネレータである。電子、陽子、光子、重原子核の衝突イベントを様々な理論やモデルを考慮して生成する。Pythia は当初 Fortran で開発されていたが、c++ に書き直されたものが Pythia8 である。本研究では  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  の陽子-陽子衝突を生成する。

#### 3.2 検出器系と粒子の反応/GEANT4

GEANT4 とは物質中を通過する粒子のシミュレートをするためのツールキットである。検出器などのジオメトリの構築、ジオメトリの物質組成、磁場などの設定、粒子の種類や物理的情報の設定が可能である。c++ で記述されたツール・キット形式でのオープンソースであることから手軽さと自由度の高さで、高エネルギー物理以外の医療や放射線遮蔽などで幅広く使われている。

Pythia8 の衝突イベントで生成された粒子はこの GEANT4 で設定された検出器系 (検出器やエアロジェル) との反応をシミュレートする。具体的には衝突イベントから出てきた粒子がどこを通過してどの検出器まで到達したか、検出器を通過するときに何か反応があったか、チェレンコフ光発生条件の荷電粒子がエアロジェルを通過したときにチェレンコフ光がどの方向に発生して検出器で光子を観測したかをシミュレーションする。表 1,2 は今回の GEANT4 での設定である。

表 1 RICH より内側にある検出器の設定

	半径 [cm]	長さ [cm]	厚さ [ $\mu\text{m}$ ]
inner tracker	1.8	1.8	50
	2.8	2.8	50
	3.8	3.8	50
outer tracker	8	8	500
	20	20	500
	25	25	500
	40	40	500
	55	55	500
	80	80	500
	100	100	500

表 2 RICH の設定

	半径 [cm]	長さ [cm]	厚さ	屈折率
inner	100	100		1.00028201(容器内)
outer	122	122		
sensor	122	122	500 $\mu\text{m}$	
Aerogel	100	100	2 cm	1.03

### 3.3 SiPM の検出効率と時間分解能

序論でも述べたように ALICE 3 の RICH 検出器では高い位置分解能をもつシリコン光センサー SiPM を用いる。本研究でのシミュレーション評価では浜松ホトニクス の MPPC(multi-pixel photon detector)S13360 シリーズ 3050CS を想定している。表 3 は今回使用する MPPC の仕様、図 23 は光子検出効率 (photon detection efficiency:PDE) の波長依存分布である。

表 3 S13360-3050CS の仕様 [30]

ピクセルピッチ [ $\mu\text{m}$ ]	50
有効受光面サイズ [mm]	3.0×3.0
ピクセル数	3600
感度波長範囲 [nm]	270 ~ 900
最大感度波長 [nm]	450
光子検出効率 (PDE)[%]	40

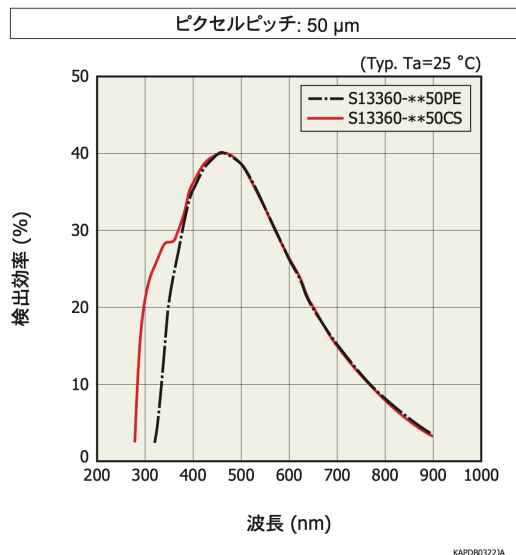


図 23 S13360-3050CS の PDE の波長依存分布 [30]

GEANT4 では SiPM の性能を含めた粒子の検出効率や時間分解能のゆらぎまではシミュレートできない。そのため RICH で検出した荷電粒子、光子それぞれに対して、エネルギーに応じた検出効率の影響を考慮する処理を行う。

### 3.4 チェレンコフ角の導出

(図 24) は衝突点で生成された荷電粒子がエアロジェルでチェレンコフ光を放出して検出器にヒットするまでを表した模式図である。スケールは誇張してある。

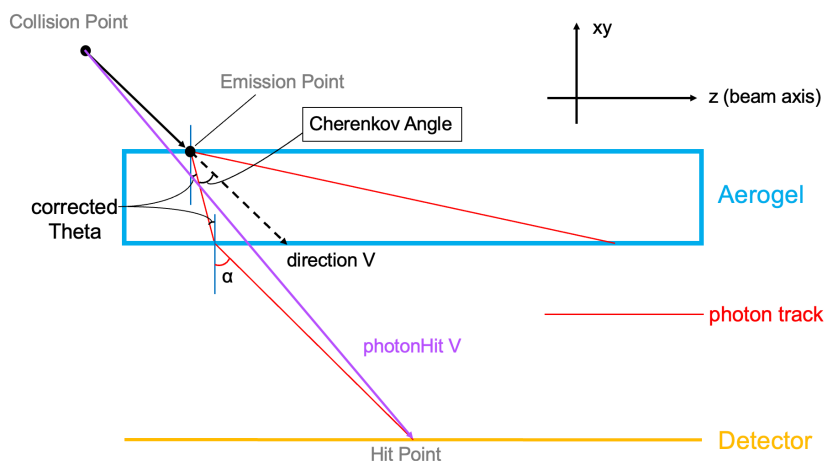


図 24 Cherenkov Angle を求める。

本来であれば条件を満たしている限り、荷電粒子がエアロジェル中を通過している間ずっとチェレンコフ光は放射されるが、今回は代表してある 1 点 (Emission Point) でのみ放射が起こると考える。エアロジェル内で発生したチェレンコフ光はエアロジェル層を出るときに屈折し、その後にシリコン光センサーに検出される (Hit Point)。チェレンコフ光放射点は RICH 検出器より内側にある検出器で検出された飛跡と運動量から直線近似で決定する。これらの情報からチェレンコフ光の放射角を求める。

エアロジェルと検出器内の屈折率はわかっているので角度  $\alpha$  が分かればすぐに求まるが、これを求める術がないので近似する。

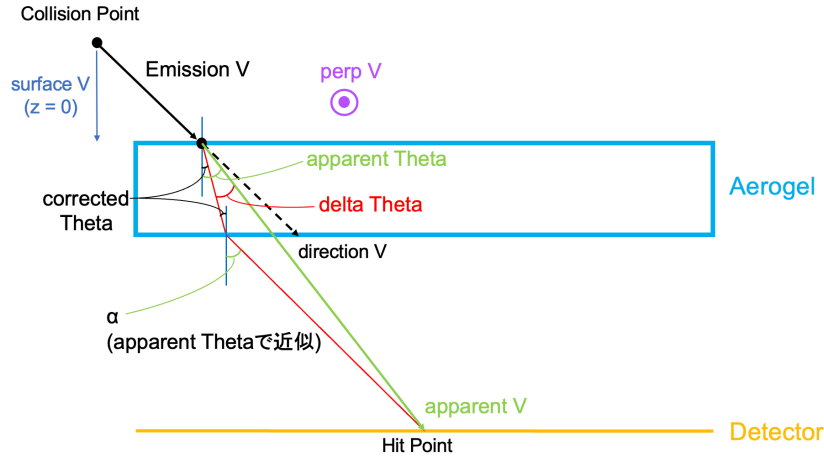


図 25 apparent Theta での近似

Emission Point と Hit Point を結ぶ apparent V と surface V がなす角を apparent Theta とする。これを角度  $\alpha$  の近似として使う。スネルの法則から、

$$\text{correctedTheta} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1} \text{apparentTheta}\right) \quad (6)$$

$n_1$  は Aerogel の屈折率、 $n_2$  はそれ以外の検出器内の屈折率である。これより delta Theta を求めることができる。perp V は surface V と apparent V の外積である。apparent Theta を垂直な perp V を軸にして delta Theta 回転させたものと direction V のなす角を計算すれば Cherenkov Angle が求まる。

### 3.5 チェレンコフリングの決定/HTM

序論で導出したチェレンコフ光の放射角度と荷電粒子の質量の関係式 (5) より、粒子同定にはその粒子から生成されたチェレンコフ光が検出面に作るチェレンコフリングの決定が必要である。この円の決定方法として使用されるのがハフ変換 (Hough Transform Method : HTM) である。ハフ変換は画像から円や線を検出する手法である。今回は予め荷電粒子と生成された光子の角度を求めておき、少しずつ角度の範囲を変えながら一番エントリーが多かった角度範囲をチェレンコフ光の放射角度とする。

### 3.6 検出効率と純度

検出器の性能を評価する指標として検出効率 (Efficiency) と純度 (Purity) がある。検出効率の定義は

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{検出器が粒子 } A \text{ を検出した数}}{\text{実際に生成された粒子 } A \text{ の数}} \quad (7)$$

である。ここでの検出器が粒子 A を検出した数とは、「angle-momentum の関係が粒子 A の理論値の  $3\sigma$  以内にある粒子」のうち「本当に粒子 A」である数のことを指す。

純度の定義は

$$\text{Purity} = \frac{\text{検出器が粒子 } A \text{ と判断した粒子のうち本当に粒子 } A \text{ である数}}{\text{検出器が粒子 } A \text{ だと判断した数}} \quad (8)$$

である。ここでの検出器が粒子 A だと判断した数とは、「angle-momentum の関係が粒子 A の理論値の  $3\sigma$  以内にある粒子」のことを指す。

## 4 結果

今回のシミュレーションは時間がかかる上にデータ量が多いため統計量を貯めるのが大変である。そこで衝突イベントを挟まずに単一の粒子そのものを検出器に向かって打ち出す single particle simulation によって得たデータを解析した。今回は  $e, \mu, \pi, K, p$  をそれぞれ 10000 個ずつ検出器に打ち込んだシミュレーションデータを用いた。

### 4.1 光子と荷電粒子の検出

RICH 検出器で粒子を検出したときのヒットマップである。今回は例として  $\pi$  中間子のヒットマップを示す。1 イベント (1 粒子) だけを取り出して描写している。また検出面での荷電粒子衝突点と光子衝突点の距離について、1 cm 未満と 20 cm より大きいものはカットしている。チェレンコフリングが確認できる。

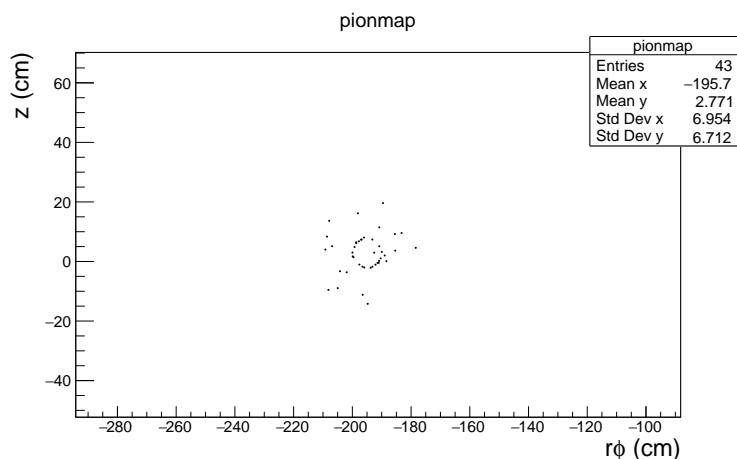


図 26  $\pi$  中間子のヒットマップ

### 4.2 チェレンコフリングの決定

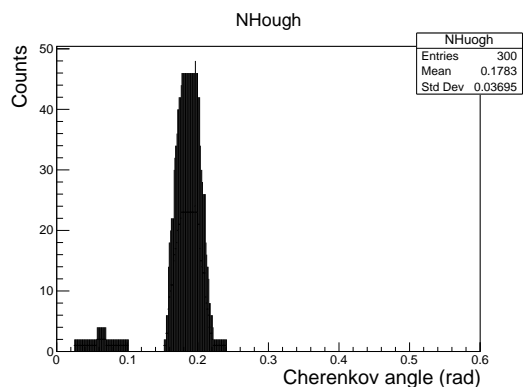


図 27 角度別のエントリー数

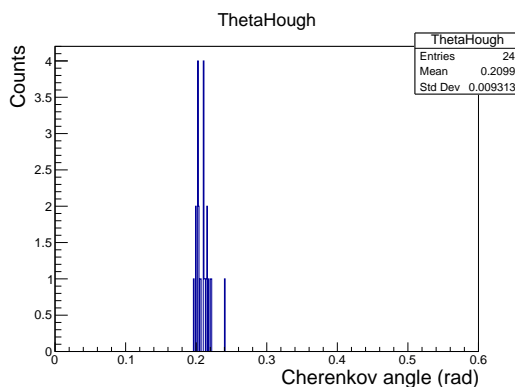


図 28 決定したチェレンコフリングを構成する光子

図 27 は HTM でチェレンコフリングを決定する時のヒストグラムである。0 rad から一定の角度幅 (45 mrad) でスキャンしていき、一番エントリー数が多かった角度に属する光子をチェレンコフリングを構成する光子と決定する。決定した後のヒストグラムが図 28 である。

### 4.3 標準偏差 $\sigma$ によるカットの決定

図 29 はチェレンコフリングを構成する光子のチェレンコフ角の標準偏差分布である。これは言い換えればチェレンコフリングの幅である (図 30)。

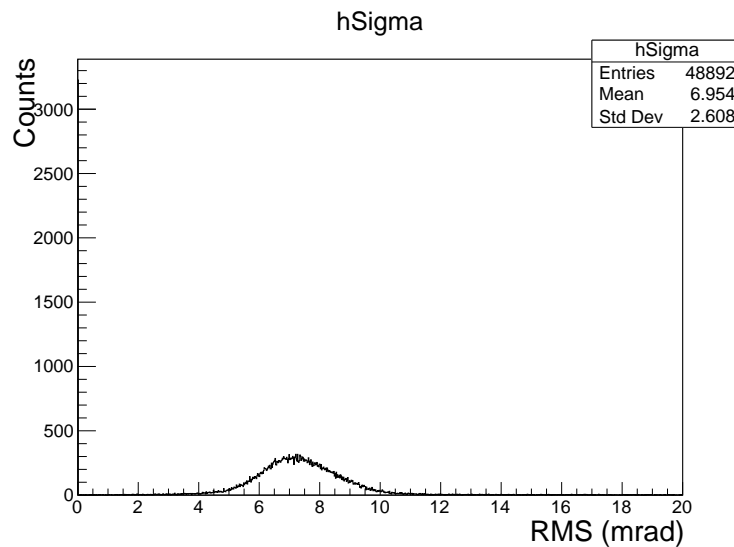


図 29 チェレンコフ角の標準偏差

荷電粒子は Aerogel に入った瞬間から出るまでずっとチェレンコフ光を出すので、検出面には幅を持ったチェレンコフリングが見える。チェレンコフリングの決定ではこの幅よりも広い範囲で決定したので、より正確な幅を決定する必要がある。しかしどの光子がどこを通過した時点で発生したものを決定するのは不可能である。そこでこの幅をチェレンコフ角の標準偏差と考えて計算してみる。

$x_0, x_1$  間の距離を 1cm、 $x_1, x_2$  間の距離を 20 cm、放射角を 0.24 rad とすると  $B, x_2$  間は約 4.89 cm、 $A, x_2$  間は約 5.13 cm であることから、最大のばらつき角度  $\angle Ax_0B$  は約 0.01 rad となる。これは図 29 で標準偏差の最大値とほぼ同じである。

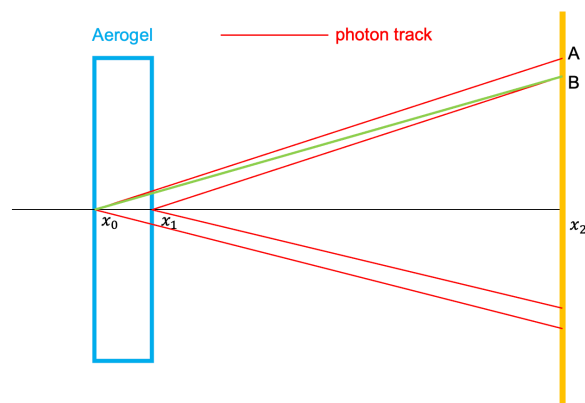


図 30 チェレンコフリングの幅

従ってチェレンコフリング幅に入るイベントを抽出するためにはこの標準偏差に基づくカットをかける必要がある。ガウシアンによってフィッティングした結果が図 31, 表 4 である。

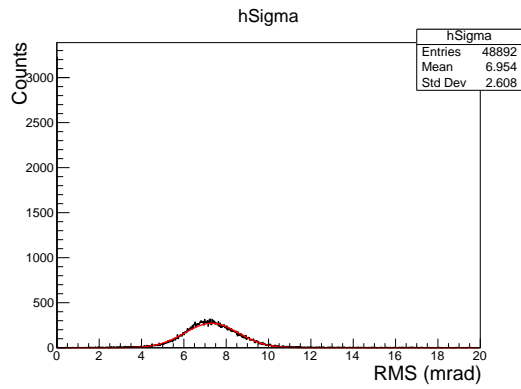


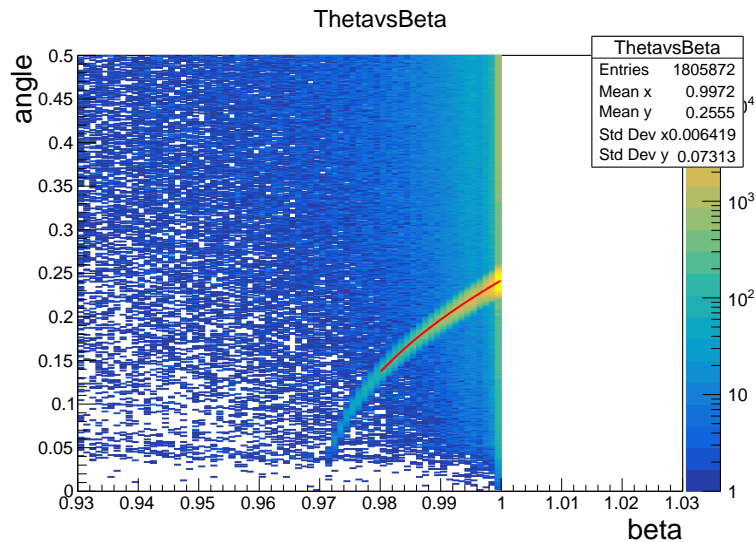
図 31 ガウシアンによるフィッティング

表 4 ガウシアンによるフィッティング結果

	value	error
constant	2.72052e+02	1.73332e+00
Mean	7.31085e+00	6.13803e-03
Sigma	1.26100e+00	5.23988e-03

例として  $1\sigma$  (66.8%) を取る場合は  $6.04985 < \sigma < 8.57185$ 、 $3\sigma$  (99.7%) を取る場合は  $3.52785 < \sigma < 11.09385$  のカットをかけることになる。今回は  $1\sigma$  のカットをかけている。

#### 4.4 チェレンコフ角の $\beta$ 依存性

図 32 縦軸: 角度, 横軸:  $\beta$ 

チェレンコフ光由来の光子は式 (2) に従うため、 $\beta$  と角度の相関を見た時にそのストラクチャーが見えるはずである。図はその結果であり、赤実線は式 (2) より予測されるストラクチャーの位置である。赤実践に沿って見えるストラクチャーがチェレンコフ光由来の光子と予測できる。

## 4.5 光子数の角度依存性

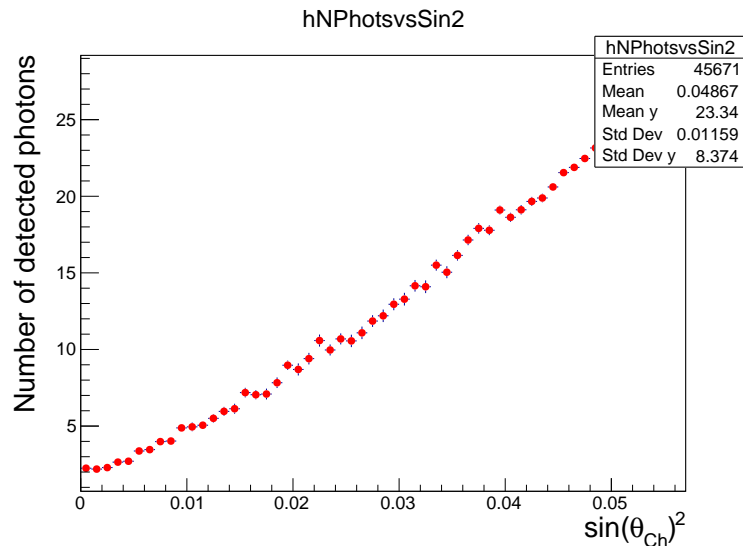


図 33 検出光子数とチェレンコフ光放射角の関係

チェレンコフ光によって放出される光子数  $N$  と放射角度には比例関係があることを序論で述べた (式 (4))。図 33 は検出器で検出したチェレンコフリングを形成する光子数とその放射角度  $\sin \theta$  の 2 乗の関係である。比例関係が見られることからチェレンコフ光が発生してリングを観測していることが確認できる。

## 4.6 光子の角度分布

以上よりチェレンコフ光の発生と検出面での粒子の検出を確認できた。これより親粒子からの光子の放射角度を調べる。図 34 は検出面で検出した荷電粒子と光子がなす角度のヒストグラムである。図 35 はその中でも HTM によって求めたチェレンコフリングを構成する光子のみを抽出したヒストグラムである。

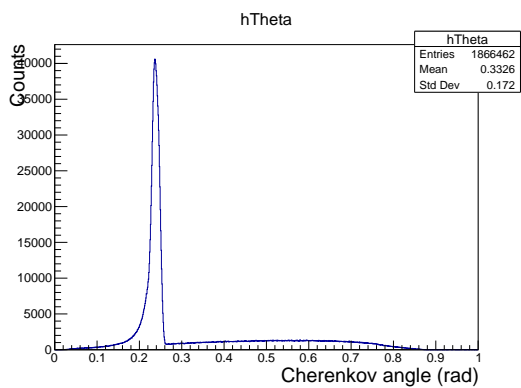


図 34 荷電粒子と光子の角度分布

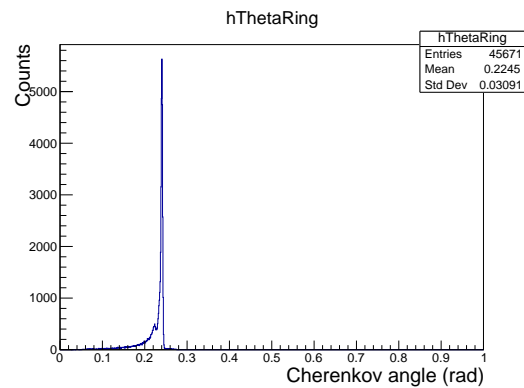


図 35 チェレンコフリングを構成する光子の角度分布

どちらも共通して 0.24 rad 付近にピークが見られる。これは荷電粒子の運動量が大きくなる (速度が速くなる) とチェレンコフ光の放射角度が収束することからわかる ( $\because \arccos(\lim_{v \rightarrow c} 1/\beta n_{Aerogel}) \approx 0.24$ )。



## 4.7 角度と親粒子の運動量の相関関係

図 36 は全て粒子の角度分布 (図 34) と親粒子の運動量の相関をプロットした二次元ヒストグラムである。黒と赤の実線は式 (5) から導かれる粒子毎の分布である。

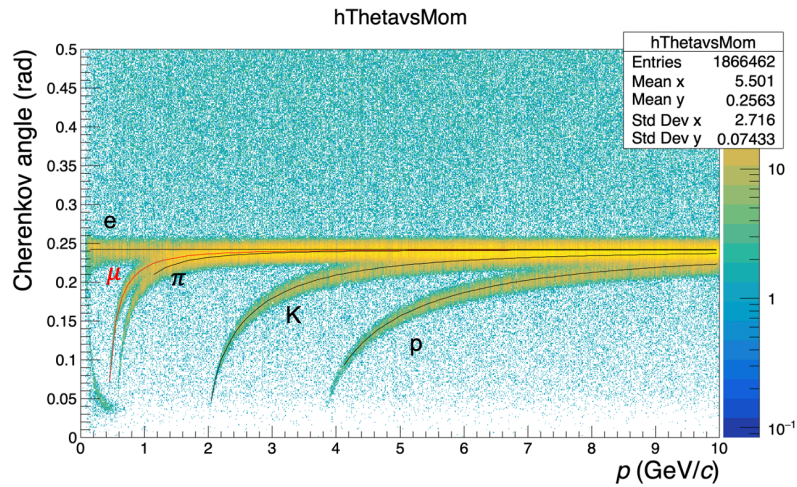


図 36 縦軸:hTheta(図 34), 横軸: 親粒子の運動量

理論値の実線に合うようにピークが見えている。一方でこのままだとバックグラウンドが多く、特に  $0 \sim 0.6 \text{ GeV}/c$ ,  $0 \sim 0.2 \text{ rad}$  の範囲には粒子同定に関係ない形を持ったバックグラウンドが見られる。

チェレンコフリングを構成する光子に絞って運動量との相関をプロットしたのが図 37 である。チェレンコフリングを構成する光子の角度の標準偏差  $\sigma$  について、 $0.006 < \sigma < 0.008$  を満たすものだけを選ぶカットをかけている。バックグラウンドを大幅に除去できることを確認した。

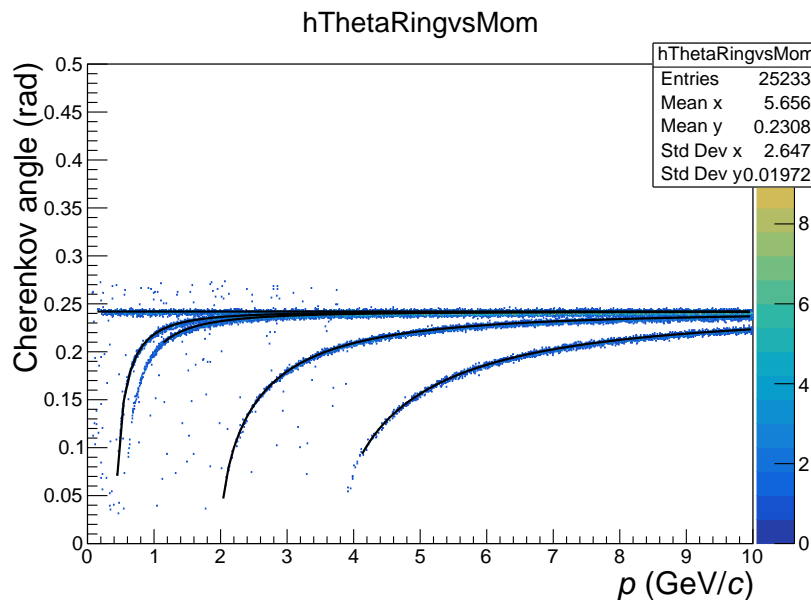


図 37 縦軸:hThetaRing(図 35), 横軸: 親粒子の運動量

## 4.8 検出効率

以下は粒子別の検出効率である。

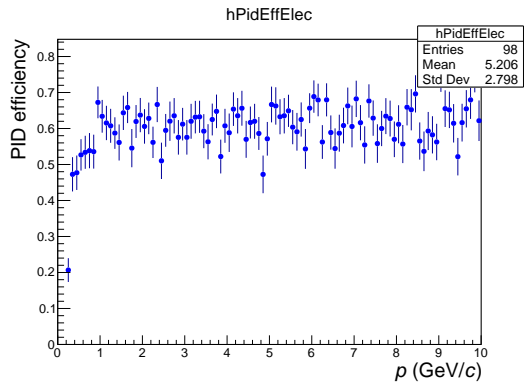


図 38 電子の検出効率

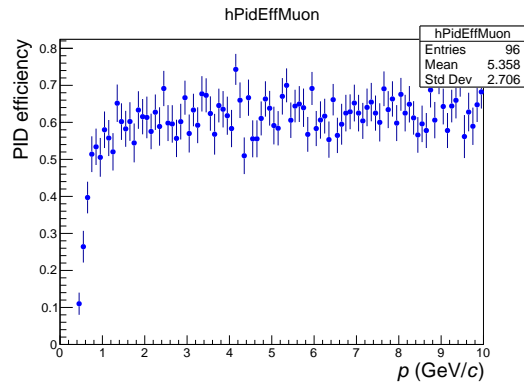


図 39  $\mu$  粒子の検出効率

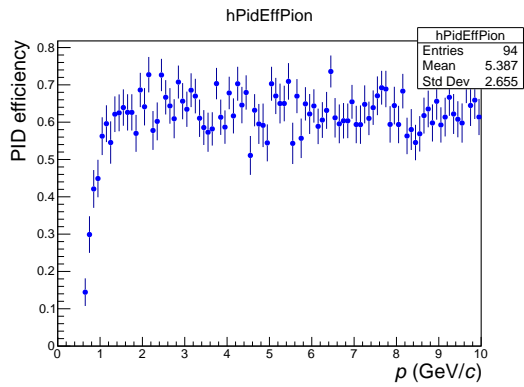


図 40  $\pi$  中間子の検出効率

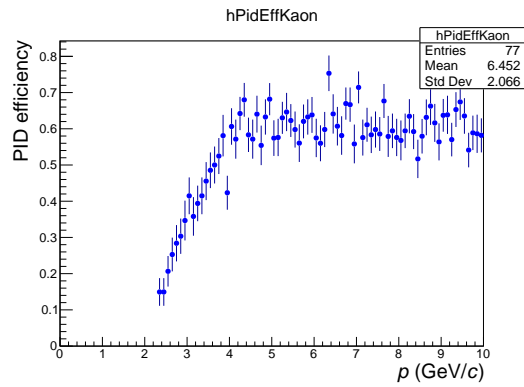


図 41 K 中間子の検出効率

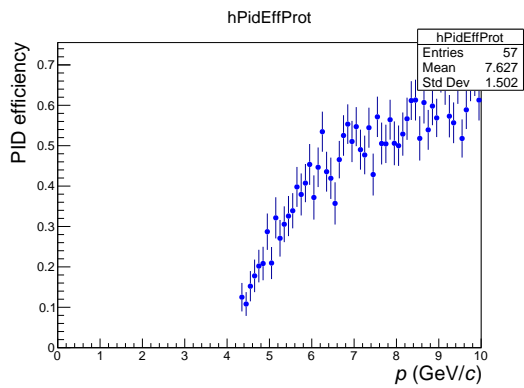


図 42 陽子の検出効率

## 4.9 純度

以下は粒子別の純度である。

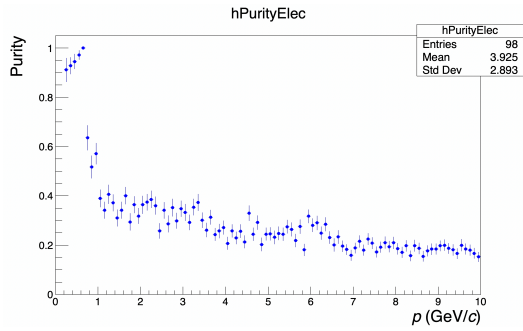


図 43 電子の純度

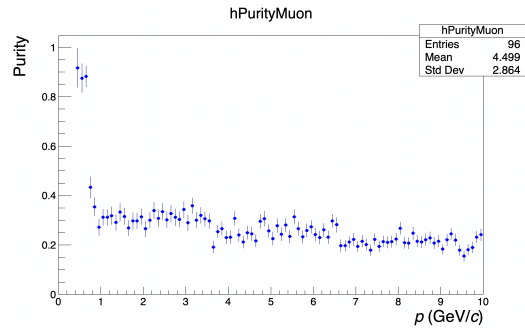
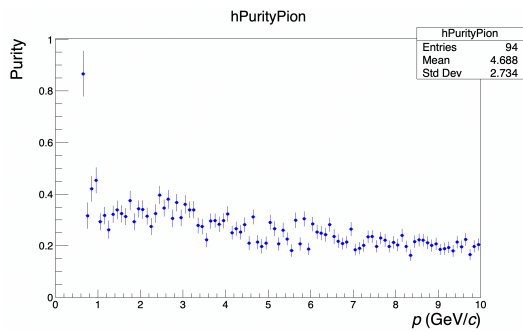
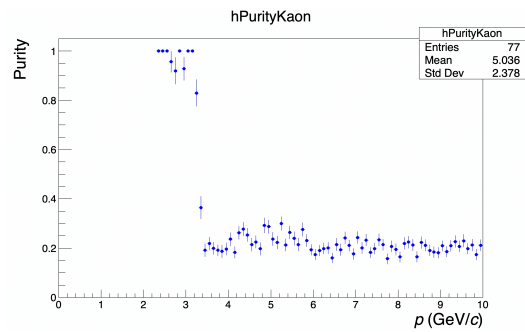
図 44  $\mu$  粒子の純度図 45  $\pi$  中間子の純度

図 46 K 中間子の純度

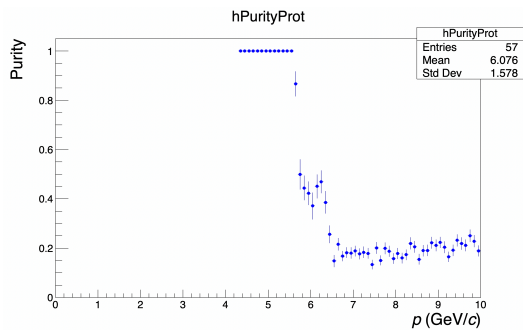


図 47 陽子の純度

4.10  $\beta_{CherenkovAngle}$  と親粒子の運動量の相関

チェレンコフ角と  $\beta$  の関係式 (2) より、チェレンコフ角から  $\beta$  を求めることができる。 $\beta$  と親粒子の運動量の相関は TOF の PID (図 14) と同じものになるはずである。図 48 はチェレンコフ角より求めた  $\beta$  と運動量の二次元ヒストグラムである。図 37 や図 14 と同じようなピークを持つことが確認できる。

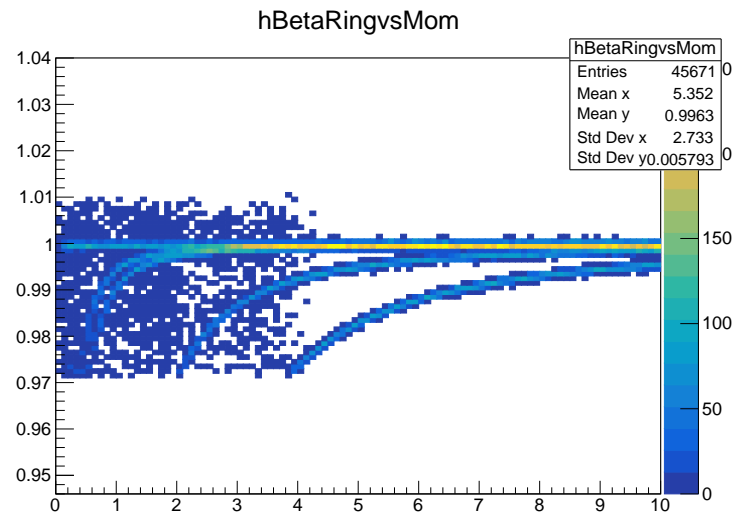


図 48 縦軸: チェレンコフ角より求めた  $\beta$ 、横軸: 親粒子の運動量

## 4.11 HTM の妥当性

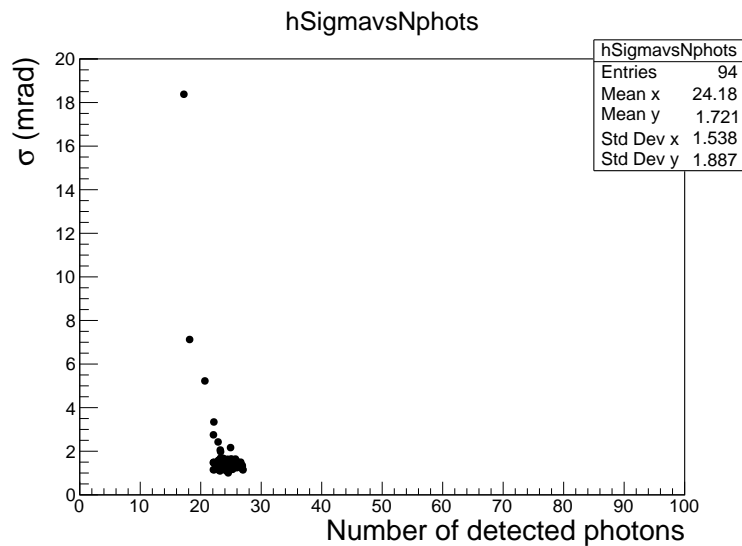


図 49 検出光子数とチェレンコフ角の標準偏差の相関関係

図 49 は HTM で決定するとき選ばれた光子の数とその時の角度の標準偏差の相関関係である。数が多いほどリングの決定とチェレンコフ角が正確になる。エントリー数が 20 個以上ある場合は今回の RICH の分解能 1.5 mrad に収束していることがわかる。

## 5 考察

## 5.1 バックグラウンドについて

図 36 の低 GeV 領域に見られた謎のバックグラウンドが何粒子由来のものか調べた。

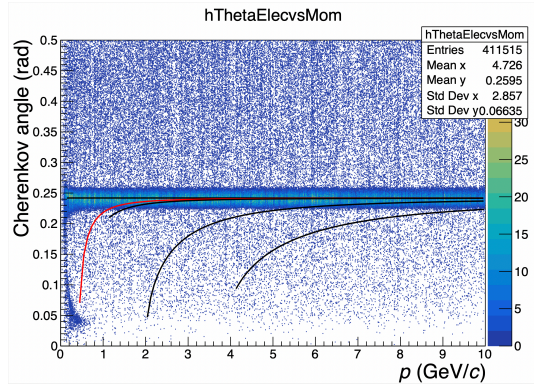


図 50 電子のみ

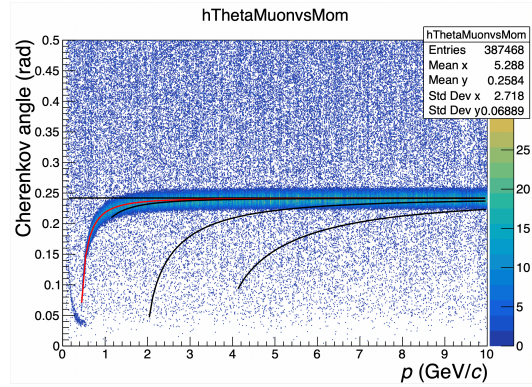
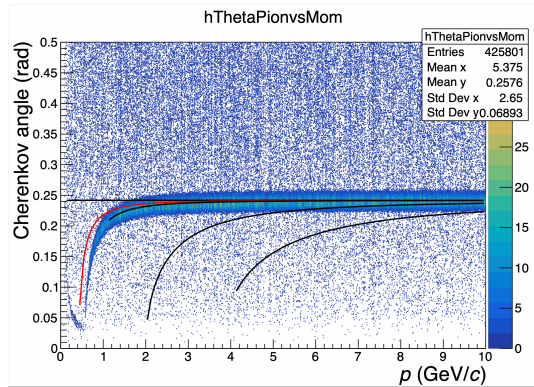
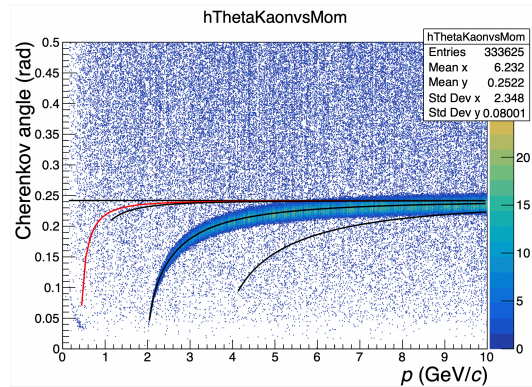
図 51  $\mu$  粒子のみ図 52  $\pi$  中間子のみ

図 53 K 中間子のみ

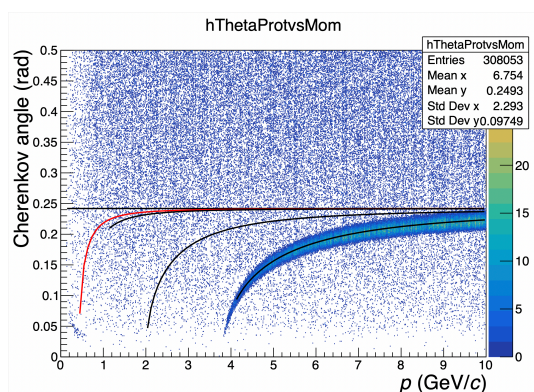


図 54 陽子のみ

電子が一番エントリー数が多いが、他の粒子にも同じような形のバックグラウンドが見えていることから、粒子の質量に起因するものではないと考えられる。そこで粒子別の  $\beta$  依存を見てみる。

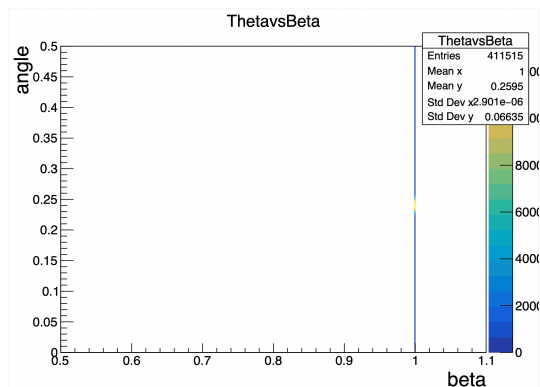


図 55 電子のみ

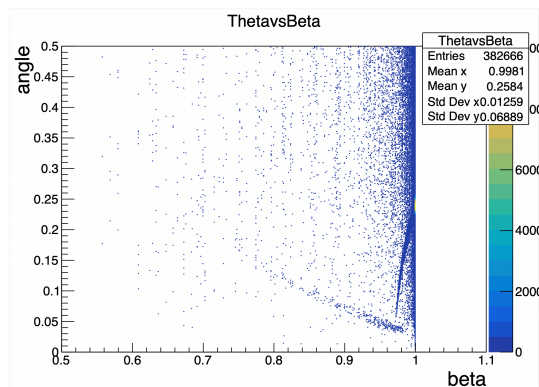
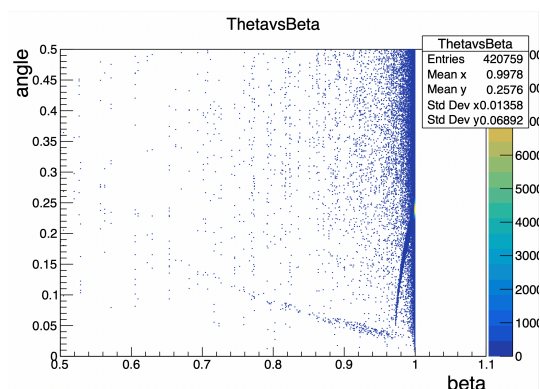
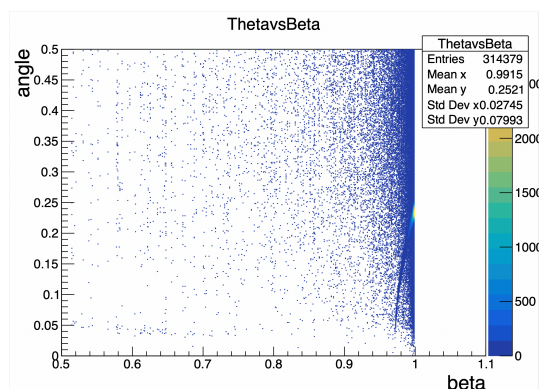
図 56  $\mu$  粒子のみ図 57  $\pi$  中間子のみ

図 58 K 中間子のみ

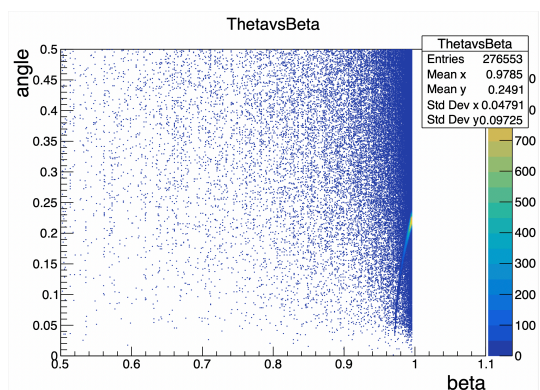


図 59 陽子のみ

図 55 の黄実線は式 (2) から予測されるチェレンコフ由来のストラクチャーである。 $\mu$  粒子と  $\pi$  中間子に無関係のストラクチャーが見える。そこでこのストラクチャーを消すことができる  $\beta > 0.98$  のカットをかけてみる。

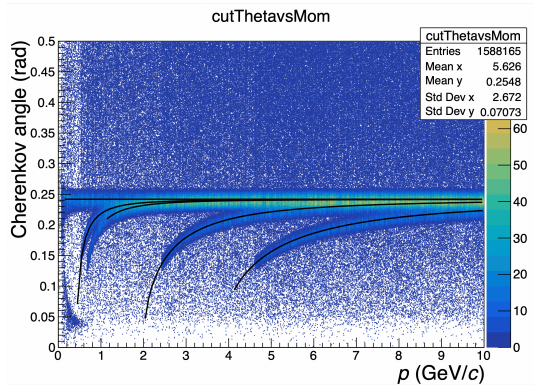


図 60 全粒子、カットあり

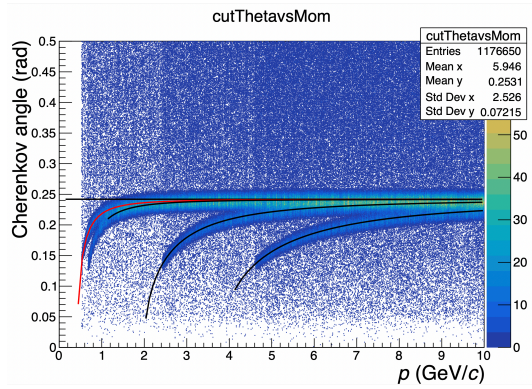


図 61 電子以外の粒子、カットあり

図 60 はカットをかけた全粒子のプロットである。カットをかけたが図 50 でも見られた電子からくるバックグラウンドは処理できなかった。このバックグラウンドの原因については分からなかった。図 61 は電子を除いたものである。こちらではストラクチャーが見えないことから、カットが正しく働いていることがわかる。 $\mu$  粒子、 $\pi$  中間子で見られたバックグラウンドの原因については、使ったシミュレーションデータが持っている情報の中から突き止めることはできなかった。

### 5.2 陽子陽子衝突シミュレーションの粒子収量による補正

今回解析に用いた single particle simulation は荷電粒子がすべて同じ数ずつ入っていたが、本来は粒子毎に生成数は違う。そこで  $\sqrt{s} = 13$  TeV の陽子陽子衝突 50000 回のシミュレーションデータで得た荷電粒子の生成比をもとに純度について重みをかけて評価する。

シミュレーションによる粒子収量は以下の通り。

表 5 粒子収量

	電子	$\mu$ 粒子	$\pi$ 中間子	K 中間子	陽子
収量	3608	322	382347	33702	16675

この粒子収量をもとに重み付けをした純度のヒストグラムを示す。

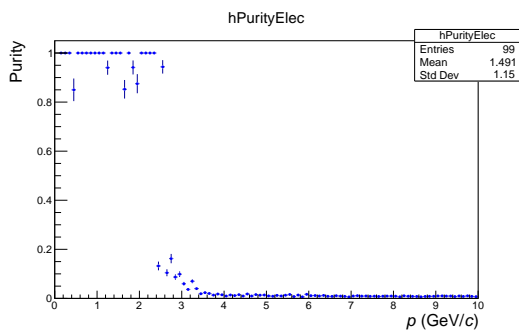


図 62 補正した電子の純度

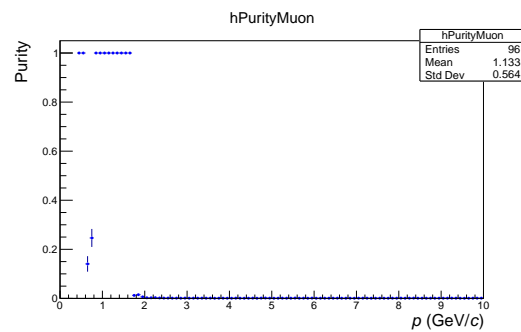


図 63 補正した  $\mu$  粒子の純度

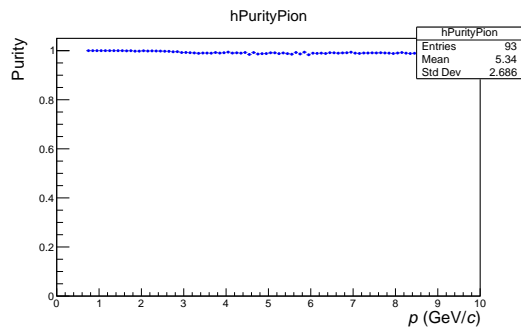
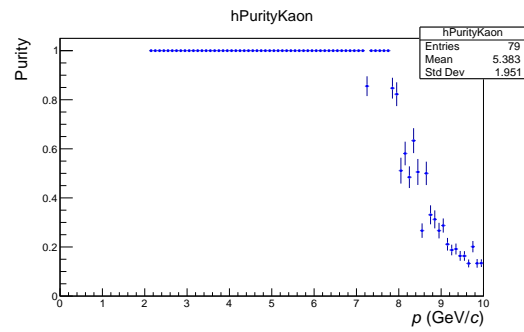
図 64 補正した  $\pi$  中間子の純度

図 65 補正した K 中間子の純度

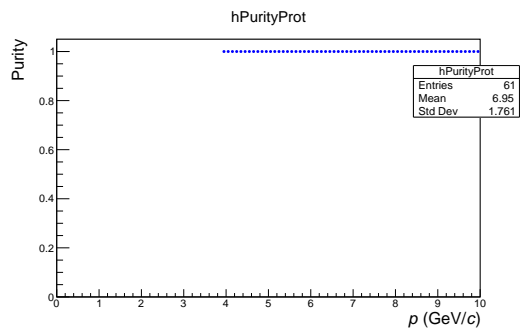
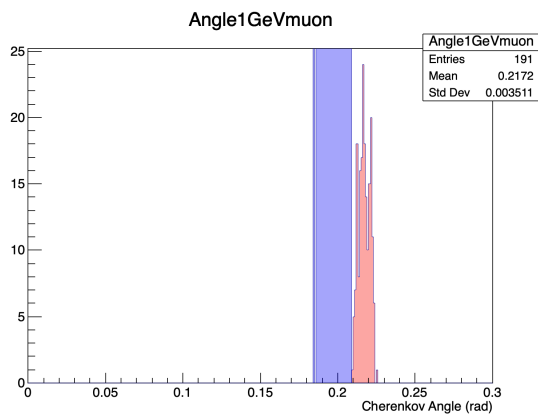
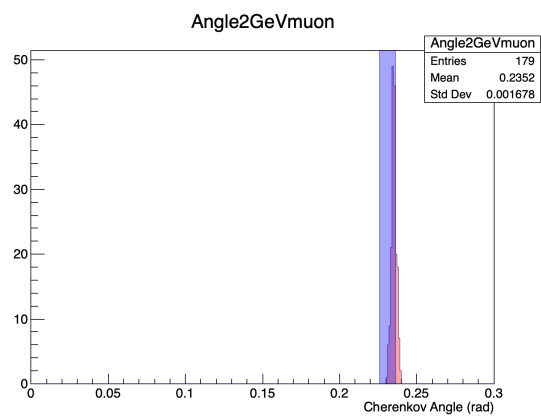


図 66 補正した陽子の純度

$\pi$  中間子は生成量が多いため、 $\pi$  中間子の純度は高くなっている。そのほかの粒子については図 37 の図から予測できるように、ほかの粒子の理論値と離れている運動量領域では高い純度の値を出している。

$\mu$  粒子の純度が  $2 \text{ GeV}/c$  を超えると一気に純度が悪くなるもの  $\pi$  中間子の生成量が多いことが理由である。図 67 は運動量  $1 \text{ GeV}/c$  での、図 68 は  $2 \text{ GeV}/c$  での角度別のエントリー数を示したヒストグラムである。赤色が  $\mu$  粒子の分布であり、青色が  $\pi$  中間子の分布である。図 67 では 2 つの分布はしっかり分離していることがわかるが、図 68 では  $\mu$  粒子の分布がほとんど  $\pi$  中間子に呑まれていることがわかる。これが純度が悪くなっている理由である。

図 67  $0.9 < p < 1.1$ 図 68  $1.9 < p < 2.1$



## 6 結論と展望

本研究では今まで前方領域でしか測定されてこなかった $\mu$ 粒子をセントラル領域で同定することを想定したシミュレーションによる評価を行った。結果として ALICE 3 で導入予定の RICH 検出器では  $3\sigma$  のカットで 50~70% 程度の検出効率と 2 GeV/c 未満の運動領域で 100% 近くの高い純度が期待できることがシミュレーションから分かった。

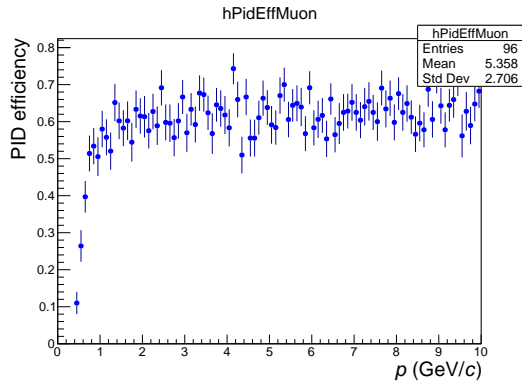


図 69  $\mu$  粒子の検出効率

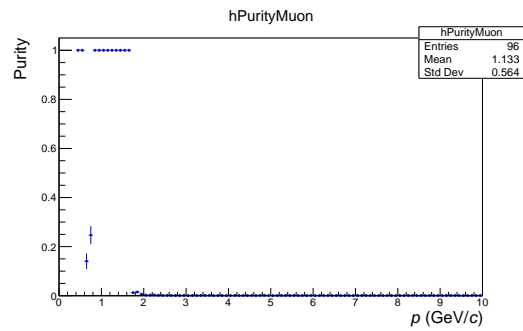


図 70 補正した  $\mu$  粒子の純度

今回の研究結果より、ALICE 3 での RICH 検出器はセントラル領域での  $\mu$  粒子同定が見込める性能があることが分かった。これにより電子対では説明できなかった軽いベクトル中間子の質量変化測定もセントラルでの  $\mu$  粒子対測定という新たなアプローチが可能となる。

今後はより複雑な鉛-鉛衝突のイベントを用いた解析をしていきたい。

## 謝辞

本研究には多くの方にお力添えをいただきました。特に八野哲助教には多くの時間を割いてシミュレーションの仕組み、解析コードの改良、解析の仕方やアイデアをいただきました。本当にありがとうございました。志垣賢太教授には研究室ミーティングで解析に関する指摘や研究する上で大事な姿勢についてご教授いただきました。山口頼人准教授にはミーティング以外でも居室にて度々話しかけていただき、卒論の乗り切り方などについても教えてもらえました。古墳の話が面白かったです。本間謙輔准教授には LabEx にて素粒子実験の基礎を教えていただいたり、音楽など物理以外の興味について話す機会がありとても面白く勉強になりました。三好隆博助教にはゼミの指導をしていただき、素粒子物理の基礎を身につけることができました。ありがとうございました。また今回の解析の根幹となる RICH シミュレーションのエキスパートである Giacomo 氏にも大変お世話になりました。シミュレーションや解析コードがうまく動かないときに zoom での会議やデータファイルの提供をしてくれたおかげでこうして卒論を書くことができました。ありがとうございます。同級生や先輩方にもお世話になりました。副田さん、添田さんにはシミュレーションを動かすためにパソコンのセットアップを手伝っていただいたり、エラーが出たときに相談に乗っていただきました。息抜きにテニスや麻雀をしたり、呑みに連れていってもらえて楽しかったです。黒口くんにはシミュレーションがうまくいかないときに助けてもらいました。シミュレーションを無事動かせるようになったのは黒口君のおかげです。啓くん、大地くんには解析コードの書き直しの時に相談に乗ってもらいました。ありがとう。最後に苦難を共にした同級生と、自分が好きなことをやることを応援してくれる親に深く感謝します。

## 参考文献

- [1] HIGGSTAN, ”標準模型の基本粒子”,  
<https://higgstan.com/wp/wp-content/uploads/2022/06/elementary-normalB-white.jpg>. (Accessed on 24/01/2023).
- [2] 菅沼秀夫, ”閉じ込めとカイラル対称性: 有効理論と格子 QCD での緒研究”,  
<http://www.pt.div.jps.or.jp/chiral-sympo/2.pdf>. (Accessed on 24/01/2023).
- [3] PDG, ”9. Quantum Chromodynamics”,  
<https://pdg.lbl.gov/2021/reviews/rpp2021-rev-qcd.pdf>. (Accessed on 24/01/2023).
- [4] NAJMUL HAQUE, ”Some Applications of Hard Thermal Loop Perturbation Theory in Quark Gluon Plasma”, <https://arxiv.org/abs/1407.2473>. (Accessed on 24/01/2023).
- [5] CERN, ”Heavy ions and quark-gluon plasma”,  
<https://home.web.cern.ch/science/physics/heavy-ions-and-quark-gluon-plasma>. (Accessed on 24/01/2023).
- [6] LHC ALICE 実験 日本グループ, ”クォーク・グルーオン・プラズマ”,  
<http://alice-j.org/クォーク・グルーオンプラズマ-qgp/>. (Accessed on 24/01/2023).
- [7] W. Weise, Nuclear aspects of chiral symmetry, *Nuclear Physics A*, **553**, 59–72, (1993).
- [8] カイラル対称性,  
[https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np2/index.html?plugin=attach&refer=public&openfile=chiral\\_symmetry.pdf](https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np2/index.html?plugin=attach&refer=public&openfile=chiral_symmetry.pdf). (Accessed on 24/01/2023).
- [9] X. Zhu et al.,  $D\bar{D}$  correlations as a sensitive probe for thermalization in high energy nuclear collisions, *Physics Letters B*, **647**, 5-6, 366–370, (2007).
- [10] 八野哲, ”Future plan of dilepton measurement”,  
[https://www.hken.phys.nagoya-u.ac.jp/hip/hippages/hip36/hip36\\_Yano.pdf](https://www.hken.phys.nagoya-u.ac.jp/hip/hippages/hip36/hip36_Yano.pdf). (Accessed on 24/01/2023).
- [11] 北沢正清, レプトン対生成量 (理論),  
[http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masakiyo.kitazawa/presen/14/150327QGP\\_dilepton.pdf](http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~masakiyo.kitazawa/presen/14/150327QGP_dilepton.pdf). (Accessed on 24/01/2023).
- [12] G. Agakichiev et al., CERES Collaboration, Enhanced Production of Low-Mass Electron Pairs in 200 GeV/Nucleon S-Au Collisions at the CERN Super Proton Synchrotron, *Physical Review Letters*, **75**, 7, 1272, (1995).
- [13] D. Adamova et al., CERES Collaboration, Modification of the  $\rho$  meson detected by low-mass electron-positron pairs in central PbAu collisions at 158A GeV/c, *Physics Letters B*, **666**, 5, 425–429, (2008).
- [14] Studying the Phase Diagram of QCD Matter at RHIC, (01/6/2014),  
[https://drupal.star.bnl.gov/STAR/files/BES\\_WPIL\\_ver6.9\\_Cover.pdf](https://drupal.star.bnl.gov/STAR/files/BES_WPIL_ver6.9_Cover.pdf). (Accessed on 24/01/2023).
- [15] A. Adare et al., PHENIX Collaboration, Detailed measurement of the  $e^+e^-$  pair continuum in p+p and Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV and implications for direct photon production,  
<https://arxiv.org/abs/0912.0244>. (Accessed on 24/01/2023).
- [16] 高エネルギー重イオン衝突による物理,  
<http://kakudan.rcnp.osaka-u.ac.jp/jp/researcher/kakukon/futurerep2012/pdf/57-S2p167-202.pdf>. (Accessed on 24/01/2023).
- [17] NA60 Collaboration, NA60 results on thermal dimuon,  
<https://arxiv.org/abs/0812.3053>. (Accessed on 24/01/2023).
- [18] H. Sebastian Scheid, Real and virtual direct photon measurements with ALICE,  
<https://arxiv.org/abs/2211.11934>. (Accessed on 24/01/2023).
- [19] Ester A. R. Casula,  $\phi$  meson production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with ALICE at the LHC,  
<https://indico.cern.ch/event/433345/contributions/2358547/attachments/1408885/2154102/earc>

- \_2017-02-08-QM.pdf. (Accessed on 24/01/2023).
- [20] CERN Document Server, ALICE Schematics as during RUN3 (after upgrade), <https://cds.cern.ch/record/2263642>, (Accessed on 24/01/2023).
  - [21] Weilin Yu et al., ALICE TPC Collaboration, Particle identification of the ALICE TPC via  $dE/dx$ , *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **706**, 55–58, (2013).
  - [22] A.Akindinov et al., Performance of the ALICE Time-Of-Flight detector at the LHC, *The European Physical Journal Plus*, **128**, 1–9, (2013).
  - [23] 坪平透, ”シリコンセンサーの基礎”, <https://research.kek.jp/people/tsuboy/20090601-soukendai/soukendai-jisshuu.pdf>. (Accessed on 31/01/2023).
  - [24] 宇宙物理メモ, ”チェレンコフ放射”, <https://github-nakasho.github.io/astroelec/cherenkov>. (Accessed on 24/01/2023).
  - [25] ALICE Collaboration, Letter of intent for ALICE 3: A next-generation heavy-ion experiment at the LHC, <https://arxiv.org/abs/2211.02491>, (Accessed on 24/01/2023).
  - [26] The ALICE Collaboration *et al*, The ALICE experiment at the CERN LHC, *Journal of Instrumentation*, **3**, S08002, (August 2008).
  - [27] Giacomo Volpe, ALICE Collaboration, Pattern recognition and PID procedure with the ALICE-HMPID, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **766**, 259–262, (2014).
  - [28] W.R.Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, (1987).
  - [29] Roberto Preghenella, ”g4me”, <https://github.com/preghenella/g4me/tree/master>. (Accessed on 24/01/2023).
  - [30] 浜松ホトニクス, ”S13360-3050CS”, [https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc\\_mppc-array/S13360-3050CS.html](https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array/S13360-3050CS.html). (Accessed on 31/01/2023).

## 付録 A 式 (5) から求めた角度

表 6: calculated cherenkov angle

momentum [GeV/c]	electron [rad]	muon [rad]	pion [rad]	kaon [rad]	proton [rad]
0.1	0.241892172				
0.2	0.241931856				
0.3	0.241939204				
0.4	0.241941776				
0.5	0.241942967	0.124063671			
0.6	0.241943613	0.168649938	0.080083963		
0.7	0.241944003	0.190703376	0.141652235		
0.8	0.241944256	0.20379918	0.170274093		
0.9	0.24194443	0.212335932	0.187470791		
1	0.241944554	0.218249452	0.198900691		
1.1	0.241944646	0.22253	0.206972081		
1.2	0.241944715	0.225734938	0.212917663		
1.3	0.24194477	0.228200106	0.21743896		
1.4	0.241944813	0.230138663	0.220964773		
1.5	0.241944848	0.231691611	0.223771366		
1.6	0.241944876	0.232955438	0.226044161		
1.7	0.2419449	0.233998072	0.227911798		
1.8	0.241944919	0.234868508	0.229466006		
1.9	0.241944936	0.235602833	0.230773733		
2	0.241944951	0.236228116	0.23188483		
2.1	0.241944963	0.236764995	0.232837074	0.072961872	
2.2	0.241944973	0.237229433	0.233659532	0.099874705	
2.3	0.241944983	0.237633934	0.234374879	0.118511165	
2.4	0.241944991	0.23798841	0.235001023	0.132762668	
2.5	0.241944998	0.238300802	0.235552264	0.14419791	
2.6	0.241945005	0.23857753	0.236040135	0.153647079	
2.7	0.24194501	0.238823834	0.236474025	0.161615024	
2.8	0.241945015	0.239044025	0.236861639	0.168436035	
2.9	0.24194502	0.239241673	0.237209351	0.174344589	
3	0.241945024	0.239419758	0.237522472	0.179512122	
3.1	0.241945028	0.239580783	0.237805454	0.184067976	
3.2	0.241945031	0.239726863	0.238062055	0.18811217	
3.3	0.241945034	0.239859795	0.238295461	0.19172359	
3.4	0.241945037	0.23998111	0.238508393	0.194965488	
3.5	0.24194504	0.240092128	0.238703182	0.197889282	
3.6	0.241945042	0.240193981	0.238881836	0.200537263	
3.7	0.241945044	0.240287653	0.239046093	0.202944578	
3.8	0.241945046	0.240373997	0.239197461	0.205140695	
3.9	0.241945048	0.24045376	0.239337257	0.207150522	0.053379519
4	0.24194505	0.240527594	0.239466633	0.208995259	0.074503041
4.1	0.241945051	0.240596073	0.2395866	0.21069307	0.089783959
4.2	0.241945053	0.240659703	0.239698051	0.212259607	0.101971674
4.3	0.241945054	0.240718931	0.239801774	0.213708426	0.11214912
4.4	0.241945055	0.240774156	0.239898469	0.215051333	0.120882619

続く

続き

momentum [GeV/c]	electron [rad]	muon [rad]	pion [rad]	kaon [rad]	proton [rad]
4.5	0.241945057	0.240825729	0.239988757	0.216298647	0.128515103
4.6	0.241945058	0.240873966	0.240073192	0.217459432	0.135274043
4.7	0.241945059	0.240919149	0.240152271	0.218541678	0.141320016
4.8	0.24194506	0.240961531	0.240226437	0.219552451	0.146771619
4.9	0.241945061	0.241001338	0.240296089	0.220498027	0.151719495
5	0.241945062	0.241038775	0.240361588	0.221383993	0.156234805
5.1	0.241945062	0.241074026	0.240423256	0.22221534	0.160374626
5.2	0.241945063	0.241107259	0.240481388	0.222996536	0.164185554
5.3	0.241945064	0.241138625	0.240536248	0.223731598	0.167706189
5.4	0.241945065	0.241168261	0.240588078	0.224424139	0.170968906
5.5	0.241945065	0.241196293	0.240637098	0.225077421	0.17400115
5.6	0.241945066	0.241222833	0.240683506	0.225694396	0.176826402
5.7	0.241945066	0.241247986	0.240727486	0.226277737	0.179464911
5.8	0.241945067	0.241271847	0.240769204	0.226829876	0.181934268
5.9	0.241945068	0.241294504	0.240808812	0.227353024	0.184249846
6	0.241945068	0.241316035	0.240846451	0.227849197	0.186425159
6.1	0.241945069	0.241336514	0.240882249	0.228320238	0.188472148
6.2	0.241945069	0.241356009	0.240916324	0.228767833	0.190401411
6.3	0.241945069	0.241374581	0.240948786	0.229193528	0.192222394
6.4	0.24194507	0.241392289	0.240979734	0.229598742	0.19394355
6.5	0.24194507	0.241409184	0.241009261	0.22998478	0.195572467
6.6	0.241945071	0.241425317	0.241037453	0.230352843	0.197115984
6.7	0.241945071	0.241440731	0.24106439	0.23070404	0.198580279
6.8	0.241945071	0.24145547	0.241090144	0.231039393	0.19997095
6.9	0.241945072	0.241469571	0.241114784	0.23135985	0.201293083
7	0.241945072	0.241483072	0.241138374	0.231666286	0.202551311
7.1	0.241945072	0.241496006	0.241160972	0.231959513	0.203749863
7.2	0.241945073	0.241508404	0.241182633	0.232240285	0.204892607
7.3	0.241945073	0.241520295	0.241203408	0.232509302	0.20598309
7.4	0.241945073	0.241531708	0.241223346	0.232767216	0.20702457
7.5	0.241945073	0.241542666	0.241242489	0.233014634	0.208020044
7.6	0.241945074	0.241553194	0.241260881	0.23325212	0.208972274
7.7	0.241945074	0.241563314	0.241278559	0.233480203	0.209883813
7.8	0.241945074	0.241573047	0.241295561	0.233699375	0.210757018
7.9	0.241945074	0.241582413	0.241311921	0.233910097	0.211594075
8	0.241945074	0.241591429	0.241327669	0.234112801	0.21239701
8.1	0.241945075	0.241600113	0.241342837	0.23430789	0.213167705
8.2	0.241945075	0.241608481	0.241357453	0.234495744	0.213907909
8.3	0.241945075	0.241616548	0.241371543	0.234676716	0.214619252
8.4	0.241945075	0.241624328	0.241385132	0.234851142	0.215303253
8.5	0.241945075	0.241631836	0.241398243	0.235019334	0.215961329
8.6	0.241945076	0.241639082	0.241410899	0.235181588	0.216594806
8.7	0.241945076	0.24164608	0.241423121	0.23533818	0.217204921
8.8	0.241945076	0.241652841	0.241434928	0.235489373	0.217792836
8.9	0.241945076	0.241659375	0.241446339	0.235635413	0.218359636
9	0.241945076	0.241665692	0.24145737	0.235776533	0.218906343
9.1	0.241945076	0.241671802	0.24146804	0.235912952	0.219433913
9.2	0.241945077	0.241677713	0.241478363	0.236044877	0.219943248
9.3	0.241945077	0.241683435	0.241488355	0.236172504	0.220435192

続く

続き

momentum [GeV/c]	electron [rad]	muon [rad]	pion [rad]	kaon [rad]	proton [rad]
9.4	0.241945077	0.241688975	0.241498029	0.23629602	0.220910545
9.5	0.241945077	0.241694341	0.241507399	0.236415598	0.221370057
9.6	0.241945077	0.24169954	0.241516478	0.236531406	0.221814435
9.7	0.241945077	0.241704579	0.241525276	0.2366436	0.22224435
9.8	0.241945077	0.241709465	0.241533807	0.236752331	0.222660431
9.9	0.241945077	0.241714203	0.24154208	0.23685774	0.223063276
10	0.241945077	0.241718799	0.241550106	0.23695996	0.223453448

*end*