

修士論文

J-PARCにおける
チャームバリオン分光実験用
リングイメーシングチェレンコフ検出器の
粒子識別性能評価

大阪大学 大学院理学研究科 物理学専攻
徳田恵

2023年1月20日

概要

構成子クォークモデルでは記述できないハドロンの励起状態を記述するために、新しい有効自由度としてダイクォーク相関が考えられているが、ダイクォーク相関は実験的に確認できていない。クォーク間のカラーสปิน相互作用はクォークの質量に反比例するため、バリオン中の1つのクォークを u , d と比べて重いチャームクォークにすることで軽い u , d 間のダイクォーク相関を観測することができると考えられている。したがって、チャームバリオンの励起状態を包括的に測定することで、ダイクォーク相関の存在を明らかにすることができると期待されている。

我々は、J-PARC 高運動量ビームラインにおいてチャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験) を計画している。実験では、液体水素標的に $20 \text{ GeV}/c$ の π^- ビームを入射し、 $\pi^- + p \rightarrow D^{*-} + Y_c^{*+}$ 反応によってチャームバリオンの励起状態 (Y_c^{*+}) を生成する。 D^{*-} の崩壊先である π^- , K^+ と π^- ビームの四元運動量を測定することでミッシングマス法により Y_c^{*+} の質量を測定する。 D^{*-} の崩壊粒子は $2-16 \text{ GeV}/c$ の広い運動量領域をもつ。この広い運動量領域で粒子識別を行うためにリングイメージングチェレンコフ (RICH) 検出器の開発を行った。

RICH 検出器では、漏れ磁場の影響から光検出器として Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を使用する。MPPC の小さい面積の受光面で $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ の検出面を覆う必要があるため、チェレンコフ光を集光するためのコーン型ライトガイドを開発した。コーン型ライトガイドを使用したプロトタイプ検出器の性能評価のため、東北大学電子光理学研究センター (ELPH) においてテスト実験を行った。 $0.8 \text{ GeV}/c$ の陽電子を屈折率 1.04 のエアロゲルに照射して発生したチェレンコフ光を、曲率半径 3 m の球面鏡で反射させ、コーン型ライトガイドと MPPC を使用してリングイメージを測定した。テスト実験の解析からコーンの集光性能や暗電流の影響を評価し、Geant4 によるシミュレーションに実測値を反映させることで、実機における $\pi/K/p$ の粒子識別性能を評価した。

目次

第1章	序論	4
1.1	バリオンの構造	4
1.1.1	チャーム・バリオンにおけるダイクォーク相関	4
1.2	チャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験)	5
1.3	高運動量ビームライン	5
1.4	チャーム・バリオン・スペクトロメータ	6
1.5	本研究の目的	6
第2章	リングイメージング・チェレンコフ検出器	8
2.1	チェレンコフ放射	8
2.2	リングイメージング・チェレンコフ検出器	9
2.2.1	輻射体	9
2.2.2	球面鏡	9
2.2.3	光検出器	9
2.2.4	先行研究による要求性能	9
第3章	プロトタイプ検出器の性能評価試験	10
3.1	コーン型ライトガイドの深さ最適化	10
3.2	実験概要	13
3.3	実験セットアップ	13
3.4	解析と結果	13
3.4.1	光量の評価	13
3.4.2	暗電流の評価	13
第4章	GEANT4シミュレーションによる実機の粒子識別性能評価	15
4.1	Geant4シミュレーションによるテスト実験の再現	15
4.1.1	ジオメトリ	15
4.1.2	エアロゲル	16
4.1.3	球面鏡	16
4.1.4	MPPC	16
4.1.5	コーン型ライトガイド	18
4.2	Geant4シミュレーションによる実機シミュレーション	18
4.3	解析と結果	18
第5章	まとめ	19

目 次

1.1	チャームバリオン生成反応の模式図。終状態の K^+, π^-, π^- と入射ビームの四元運動量を測定することで、チャームバリオンの生成を同定しその質量情報を得る。	5
1.2	チャーム・バリオン・スペクトロメータの概要図。ビーム粒子測定用検出器群と標的と反応して生成された粒子を測定する磁気スペクトロメータで構成される。	7
2.1	チェレンコフ放射の模式図	8
3.1	Geant4 シミュレーションの模式図。コーンの深さを変えながら収率を確認した。	11
3.2	アルミコートの反射率の波長依存性 [7]。	11
3.3	平行光が入射した場合の 50 mm コーンの深さに対する収率。深さ 110 mm でサチュレーションする。	12
3.4	平行光が入射した場合の 30 mm コーンの深さに対する収率。深さ 31 mm でサチュレーションする。	12
3.5	Geant4 シミュレーションの模式図。光子の入射角度を変えながら収率を確認した。	12
3.6	50 mm コーンの光子の入射角度に対する収率。	13
3.7	30 mm コーンの光子の入射角度に対する収率。	13
3.8	実験セットアップを上から見た場合の概略図。	14
3.9	Multiplicity の概念図。Multiplicity は Photon を検出した MPPC の数であるため、この図の場合光子数は 4 だが Multiplicity は 3 となる。	14
4.1	テスト実験再現用シミュレーションのセットアップ。上から見た図。	15
4.2	使用した MPPC の構造。	16
4.3	50 mm コーンの場合の、コーン反射面の反射率に対する Multiplicity の変化。赤のラインが実験値の値。反射率を 0.675 とすることで実験値を再現できる。	17
4.4	30 mm コーンの場合の、コーン反射面の反射率に対する Multiplicity の変化。赤のラインが実験値の値。反射率を 0.67 とすることで実験値を再現できる。	17
4.5	暗電流を考慮しない場合の運動量毎のチェレンコフ角分布。青い点が π 、赤い点が K、緑の点が p を示す。エラーバーはチェレンコフ角の分布をガウスフィットした際の 1σ (角度分解能) としている。	18

表 目 次

3.1 使用したエアロゲルのパラメータ	14
-------------------------------	----

第1章 序論

1.1 バリオンの構造

ハドロンはクォークとグルーオンで構成される複合粒子であり、3つのクォークから構成されるバリオンと1つのクォークと1つの反クォークから構成されるメソンに分類される。構成子クォークモデルは、これまでに観測されている数多くのバリオンの性質を説明することができるが、一部の励起状態やエキゾチックハドロンと呼ばれる状態を説明することは困難である。近年、これらの状態を2つのクォーク間の相関であるダイクォーク相関を導入することで説明する試みがなされている [1]。しかしダイクォーク相関の存在は未だ実験的に確認できていない。

1.1.1 チャーム・バリオンにおけるダイクォーク相関

ダイクォーク相関とは2つのクォーク間の相関であり、3つのクォークで構成されるバリオンでは3対のダイクォーク相関が存在する。アップクォークやダウルクォークのみからなる軽いバリオンでは、この3対のダイクォーク相関は縮退しており1対のみを分離することは困難である。しかし、軽いクォークの1つを重いクォークに置き換えることで軽いクォーク間のダイクォーク相関を運動学的に分離することが可能となる。チャームバリオンは、アップクォーク、ダウルクォーク、ストレンジクォークらと比べて5倍程度の有効質量を持つチャームクォークを持つバリオンであるため、ダイクォーク相関が顕在化すると考えられている。図に示すように、チャームバリオンではダイクォークとチャームクォークの相対運動状態である λ モードと、ダイクォークの内部励起状態である ρ モードに運動学的に分離し、アイソトープシフトと呼ばれる2つの励起モードが準位構造に現れる。この2つの励起状態のエネルギー比は、

$$\frac{\hbar\omega_\rho}{\hbar\omega_\lambda} = \sqrt{\frac{3m_Q}{2m_q + m_Q}} \quad (1.1)$$

となる。ここで m_Q と m_q はそれぞれ重いクォークと軽いクォークの構成子クォーク質量である。重いクォークを含まず、3つのクォークが全て軽いクォークの場合は $m_Q = m_q$ であり(1.1)式より励起状態のエネルギー比は1となる。つまり λ モードと ρ モードは縮退していることがわかる。一方で、1つの重いクォークの質量 m_Q が他のクォークの質量 m_q に比べ十分に大きい場合、(1.1)式は

$$\frac{\hbar\omega_\rho}{\hbar\omega_\lambda} \longrightarrow \sqrt{3} \quad (1.2)$$

となる。また、クォーク間のカラーสปิน相互作用はクォークの質量に反比例するため、軽いクォーク同士の相関は軽いクォークと重いクォークとの相関よりも強くなる。した

がって、チャームバリオンの励起エネルギーや生成率、崩壊率を詳細に測定することで、ダイクォーク相関を明らかにすることができると期待されている。

1.2 チャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験)

我々は、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) のハドロン実験施設内にある高運動量ビームラインにおいてチャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験) を計画している。図 1.2 にチャームバリオン分光実験におけるチャームバリオン生成反応の模式図を示す。実験では、20 GeV/c の高運動量 2 次 π^- ビームを液体水素標的に照射し、生成されたチャームバリオンの励起状態を観測する。チャームバリオン (Y_c^{*+}) は (1.3) 式に示す反応によって生成する。この時生成される D^{*-} は (1.4) 式に示す崩壊モードにより、2 つの π^- と 1 つの K に崩壊する。これらの崩壊粒子と入射 π^- ビームの四元運動量を測定することで、missing mass spectroscopy によりチャームバリオンの質量スペクトルを得る。

$$\pi^- + p \rightarrow +D^{*-} + Y_c^{*+} \quad (1.3)$$

$$D^{*-} \rightarrow \pi^- + \bar{D}^0 \rightarrow \pi^- + \pi^- + K^+ \quad (1.4)$$

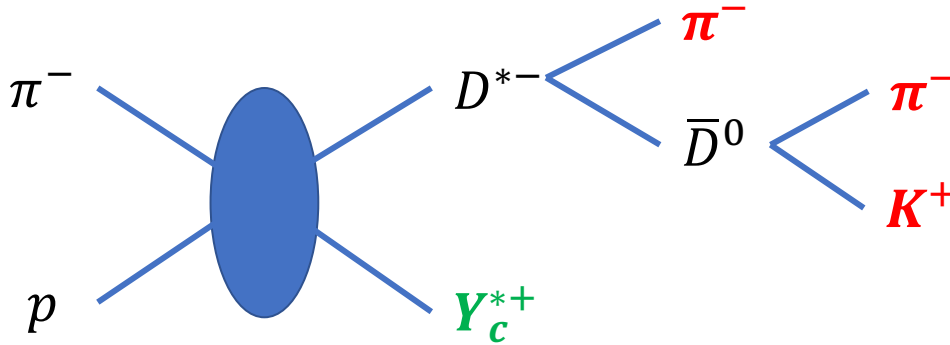


図 1.1: チャームバリオン生成反応の模式図。終状態の K^+, π^-, π^- と入射ビームの四元運動量を測定することで、チャームバリオンの生成を同定しその質量情報を得る。

1.3 高運動量ビームライン

チャームバリオン分光実験は、J-PARC ハドロン実験施設に新たに建設された高運動量ビームラインで行われる。このビームラインは、既存の一次陽子ビームラインを電磁石で

分岐させ、分岐点に二次粒子生成標的を置くことで 20 GeV/c までの高運動量二次粒子を供給できる。実験では、20 GeV/c の π^- ビームを用いる予定である。

1.4 チャーム・バリオン・スペクトロメータ

図 1.4 に、チャームバリオン・スペクトロメータの概要図を示す。生成標的は 4 g/cm^2 の液体水素 (LH_2) を用い、アクセプタンスが最大となるよう、スペクトロメータ磁石付近に設置する。missing mass spectroscopy を用いる場合、ビーム粒子と散乱粒子を測定する必要がある。そのため、チャーム・バリオン・スペクトロメータはビーム粒子測定用の検出器群と散乱粒子測定用の検出器群で構成されている。ビーム粒子測定用の検出器群は、ビーム粒子を識別するためのリングイメージング・チェレンコフ検出器、ビーム粒子の通過タイミングを測定するためのビームタイミング検出器、ビーム粒子の位置と角度を測定するためのシンチレーションファイバー検出器で構成される。高運動量ビームを用いた固定標的実験の場合、 D^{*-} からの崩壊粒子だけでなく、 Y_c^{*+} からの崩壊粒子も前方へ放出される。前方への崩壊粒子を効率よく測定するため、生成粒子測定には双極磁石システムを用いる。ビーム粒子 (π^-) の運動量が 20 GeV/c の場合、 D^{*-} の崩壊粒子である \bar{D}^0 から崩壊した K^+ と π^- は 2–16 GeV/c の運動量分布を持つ。これらは、標的下流のシンチレーションファイバー検出器、ドリフト・チェンバー、閾値型チェレンコフ検出器、リングイメージング・チェレンコフ検出器によって測定する。また、 D^{*-} からの低運動量の π^- と Y_c^{*+} からの崩壊粒子を広いアクセプタンスで測定するために、磁石内部にもタイミングカウンタと飛跡検出器を設置する。

1.5 本研究の目的

本研究の目的は、先行研究で設計された高運動量の生成粒子識別に用いるリングイメージング・チェレンコフ検出器の粒子識別性能を評価することである。目標性能としては、 $\pi/K/p$ の誤識別率 3% を未満に抑えるため、チェレンコフ角の角度分解能は 9.62 mrad が要求される [4]。本論文の内容は以下の通りである。2 章では、リングイメージング・チェレンコフ検出器について述べる。3 章では、製作したプロトタイプ検出機の性能評価試験について述べる。また、Geant4 を用いたシミュレーションのパラメータを調整し試験結果の再現を行なった。4 章では、3 章で調整したシミュレーションにより、実機の性能評価を行なった。

チャーム・バリオン・スペクトロメータ

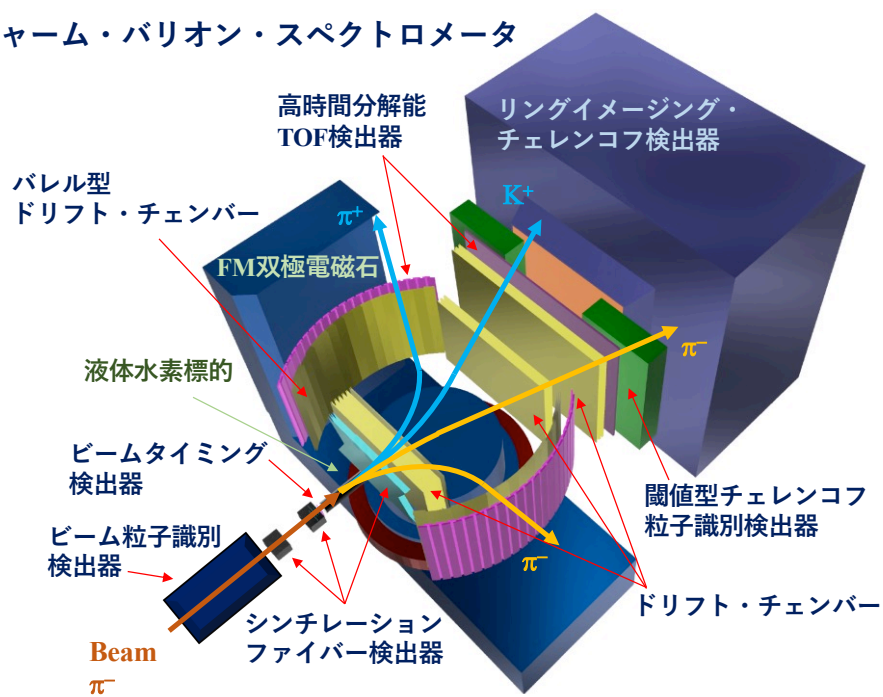


図 1.2: チャーム・バリオン・スペクトロメータの概要図。ビーム粒子測定用検出器群と標的と反応して生成された粒子を測定する磁気スペクトロメータで構成される。

第2章 リングイメージング・チェレンコフ検出器

2.1 チェレンコフ放射

チェレンコフ放射とは、荷電粒子が物質を通過する際に荷電粒子の速度がその物質中の光速を超えると光を発生する現象である。またその光をチェレンコフ光という。速度 β の荷電粒子が屈折率 n の物質中を通過する際に、チェレンコフ放射が発生する条件は (2.1) 式で表せる。

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (2.1)$$

チェレンコフ光は図 2.1 のように円錐状に発生し、その際のチェレンコフ角 θ_c は (2.2) 式のように表せる。

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (2.2)$$

また、単位長さの輻射体から発生するチェレンコフ光の光子数 dN/dx は (2.3) 式のように表される。

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi z^2 \alpha \int \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2} \quad (2.3)$$

ここで、 z は荷電粒子の電荷数、 α は微細構造定数、 λ はチェレンコフ光の波長である。

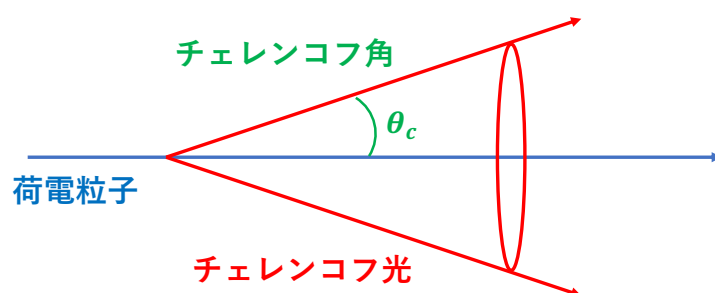


図 2.1: チェレンコフ放射の模式図。

2.2 リングイメージング・チェレンコフ検出器

(2.1) 式から、荷電粒子の質量 m と輻射体の屈折率 n が既知の場合、チェレンコフ放射が発生する荷電粒子の運動量の閾値 p_t は (2.4) 式のように表される。

$$p_t = \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (2.4)$$

したがって、荷電粒子の運動量が既知の場合、適切な屈折率の輻射体を用いることで荷電粒子の種類が特定できる。このように、チェレンコフ放射の有無で粒子識別を行うものを閾値型チェレンコフ検出器という。これに対し、チェレンコフ光を検出し、チェレンコフ角を測定することにより (2.2) 式から粒子の速度を求め、粒子識別を行うものをリングイメージング・チェレンコフ検出器という。今回は、リングイメージング型のチェレンコフ検出器についての研究を行った。

2.2.1 輻射体

チャームバリオン分光実験では、リングイメージング・チェレンコフ検出器で 2–16 GeV/c の広い運動量領域での $\pi/K/p$ の粒子識別が必要となるため、2 種類の輻射体を用いる。低運動量の粒子識別には低屈折率の輻射体

2.2.2 球面鏡

2.2.3 光検出器

2.2.4 先行研究による要求性能

第3章 プロトタイプ検出器の性能評価 試験

3.1 コーン型ライトガイドの深さ最適化

RICHでは光検出器としてMPPCを使用するが、MPPCは受光面の面積が小さく、チェレンコフ光はチェレンコフ光は発光量が少ないため、コーン型ライトガイドを用いて集光を行うことにした。今回のテスト実験では、セグメントサイズの違いによる分解能への影響を理解するために図??の様な2種類のコーン型ライトガイドを製作した。

先行研究からセグメントサイズは50 mm以下が要求されているので、入口直径は50 mmと、それより小さい30 mmのコーンを検討した。MPPCを取り付けるため、出口直径はどちらもMPPCの対角線の長さと同じ8.5 mmとした。各コーンの深さによって集光効率が変わるため、最適な深さをGEANT4によるシミュレーションを用いて決定した。

図 3.1 の様にコーン入口に対して垂直・一様に光子を入射させ、コーンの入口と出口での光子数を測定した。コーンは厚さ1 mmのAlとし、入口は外側の直径がセグメントサイズに対応するため、外側の直径をそれぞれ50 mmと30 mmとした。出口は内側にMPPCを取り付ける必要があるため、内側の直径をともに8.5 mmとした。また、Alの反射率は図 3.2を参考に波長依存性を考慮して設定した。コーンの収率を、

$$\text{収率} = \frac{\text{出口での光子数}}{\text{入口での光子数}} \quad (3.1)$$

とし、コーンの深さに対する収率を調べた。その結果を図 3.3、 3.4 に示す。

50 mm コーンは110 mm, 30 mm コーンは31 mm で収率がサチュレーションすることが分かった。

続いて、図 3.5 光子が検出面に対して角度を持って一様に入射した場合の収率について、サチュレーションした付近のコーンの深さで調べた。50 mm コーンは深さ110 mm、120 mm、130 mm、30 mm コーンは深さ31 mm、32 mm、33 mm で比較を行なった。その結果を図 3.6, 3.7 に示す。コーンの深さを深くすると、角度のついた入射粒子に対して収率が良くなることがわかった。また、工作精度の影響を抑えるために、コーンの深さは図 3.3, 3.4 でサチュレーションし出した深さよりも少し深めの50 mm コーンは深さ120 mm、30 mm コーンは深さ33 mm を採用した。

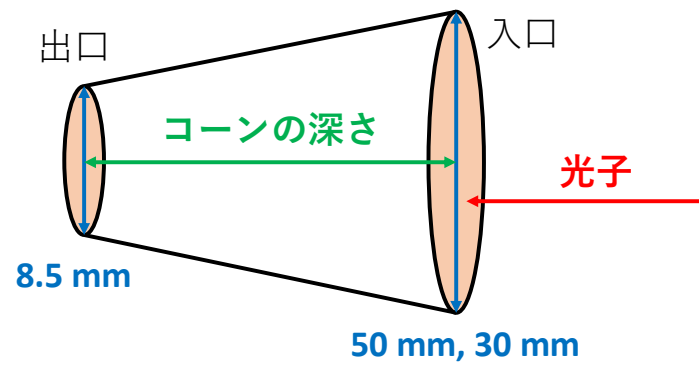


図 3.1: Geant4 シミュレーションの模式図。コーンの深さを変えながら収率を確認した。

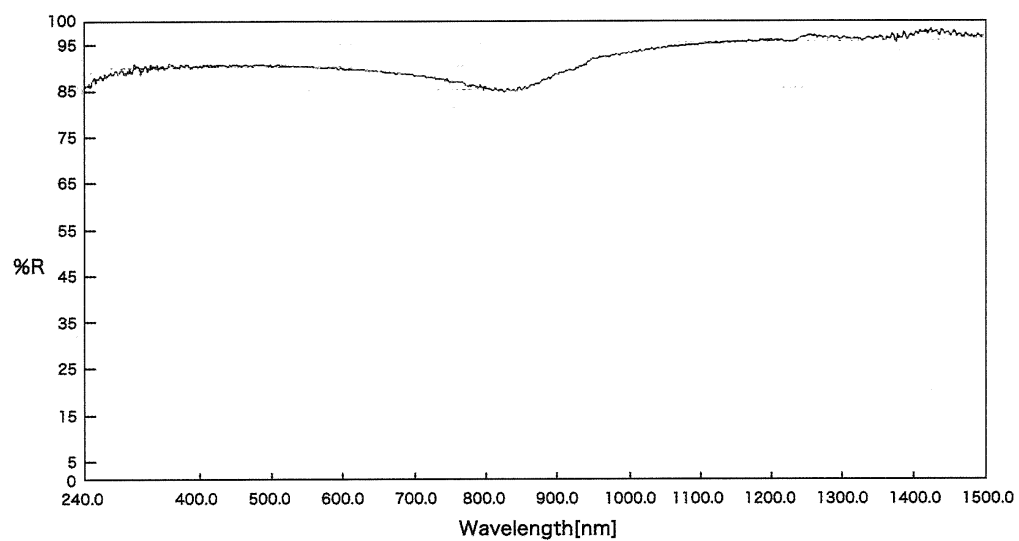


図 3.2: アルミコートの反射率の波長依存性 [7]。

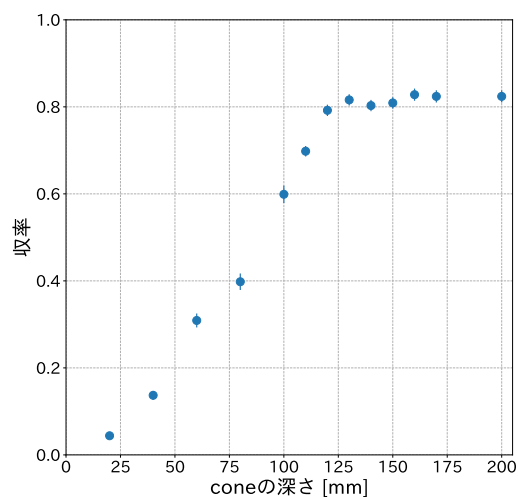


図 3.3: 平行光が入射した場合の 50 mm コーンの深さに対する収率。深さ 110 mm でサチュレーションする。

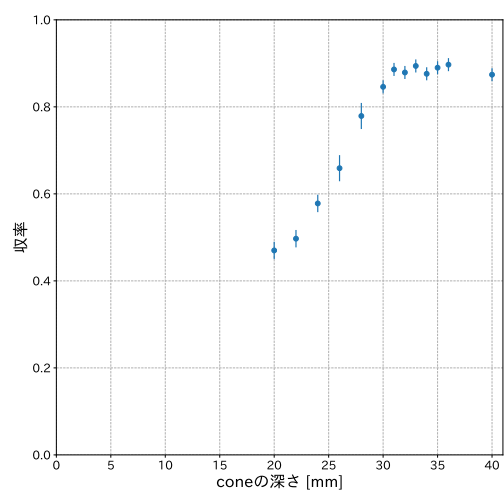


図 3.4: 平行光が入射した場合の 30 mm コーンの深さに対する収率。深さ 31 mm でサチュレーションする。

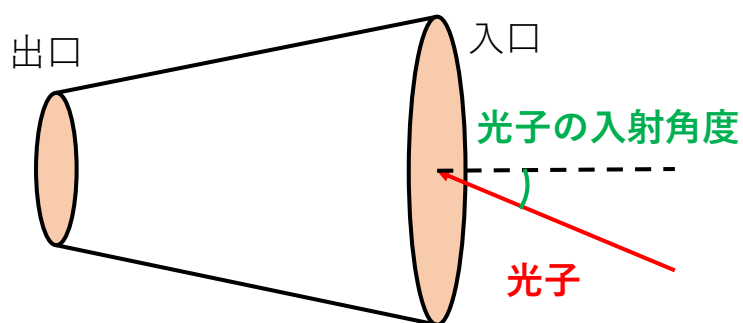


図 3.5: Geant4 シミュレーションの模式図。光子の入射角度を変えながら収率を確認した。

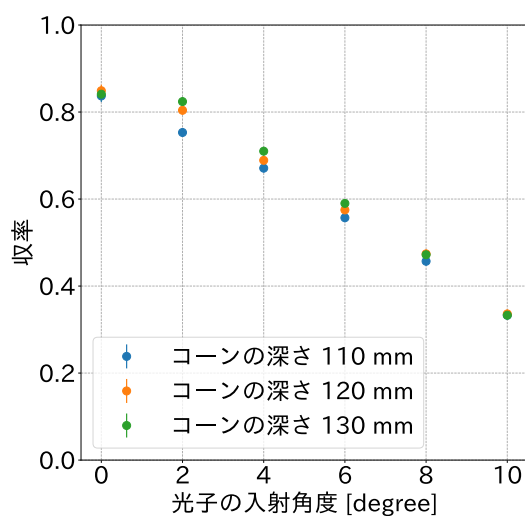


図 3.6: 50 mm コーン的光子の入射角度に対する収率。

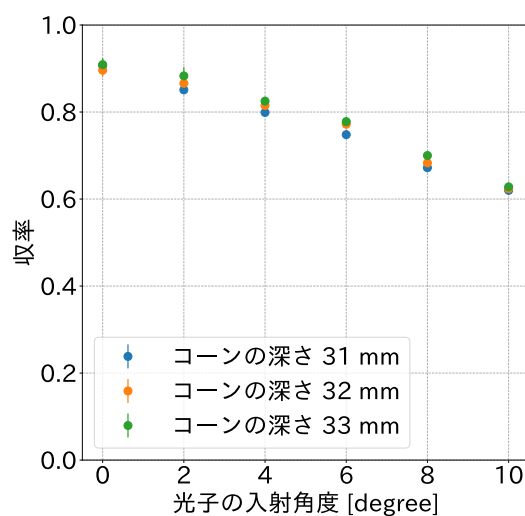


図 3.7: 30 mm コーン的光子の入射角度に対する収率。

3.2 実験概要

2022 年 6 月にプロトタイプ検出器のテスト実験を東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) の GeV ガンマ照射室において行った。運動量 $0.8 \text{ GeV}/c$ の陽電子が屈折率 1.04 のエアロゲルを通過した際に発生するチェレンコフ光を、球面鏡で反射させコーン型ライトガイドと MPPC を並べた検出面で測定した。

3.3 実験セットアップ

図 3.8 に実験セットアップの概略図を示す。 $0.8 \text{ GeV}/c$ の陽電子をビームとして用いた。T1、T2 はトリガー検出器として使用したプラスチック・シンチレータで、どちらも $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ である。輻射体として表 3.1 に示す 3 つのエアロゲルを並べて使用した。エアロゲルの中心から 1500 mm 離れたところに九面鏡を設置し、ビームに対して 21.4° 傾けた方向に 1500 mm 離して設置した。鏡はエアロゲルを設置する場所にレーザーを置き、鉛直・水平方向の光が鏡の中心にあたり検出面の中心に反射するようにアライメントを行った。また、T1 以外はチェレンコフ光以外を遮断するために遮光シートで覆った。

3.4 解析と結果

3.4.1 光量の評価

今回の解析では、発生光子数ではなく何個の MPPC に光子が入ったかを表す Multiplicity で光量の評価を行った。

3.4.2 暗電流の評価

表 3.1: 使用したエアロゲルのパラメータ

型番	屈折率	厚さ (mm)	波長 400 nm に対する透過長 (mm)
TSA9-3	1.0400	20.7	54
TSA10-3	1.0395	10.8	55
TSA9-4	1.0397	21.0	58

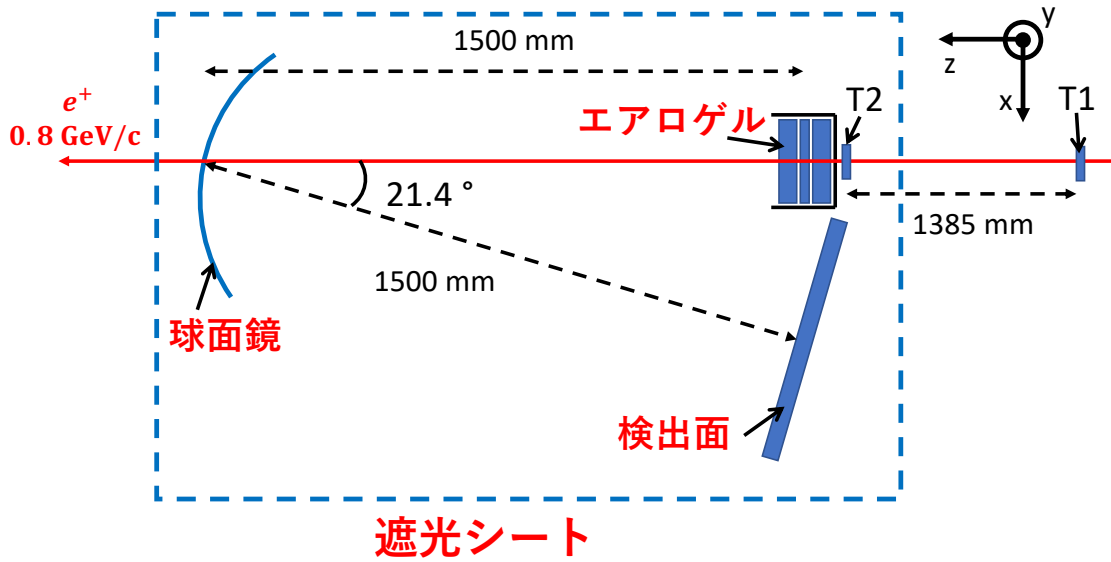


図 3.8: 実験セットアップを上から見た場合の概略図。

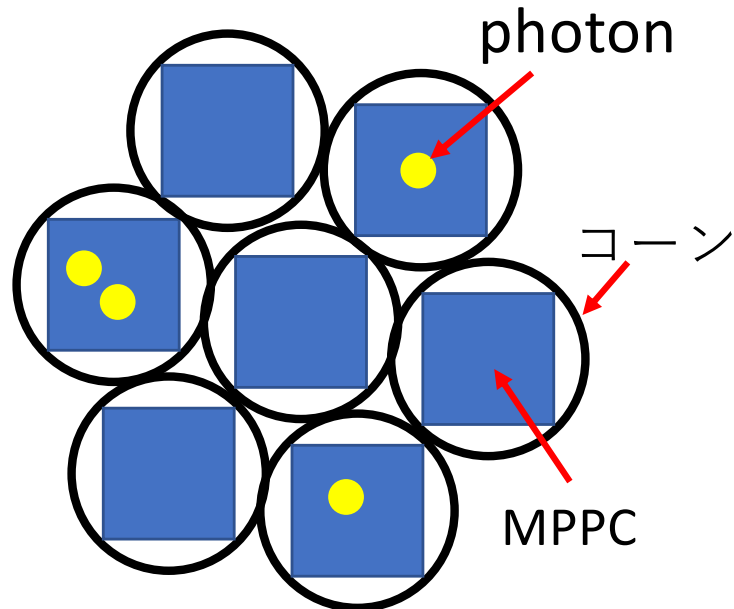


図 3.9: Multiplicity の概念図。Multiplicity は Photon を検出した MPPC の数であるため、この図の場合光子数は 4 だが Multiplicity は 3 となる。

第4章 GEANT4シミュレーションによる実機の粒子識別性能評価

4.1 Geant4シミュレーションによるテスト実験の再現

製作したコーン型ライトガイドの集光性能を確認するため、Geant4シミュレーションによるプロトタイプ検出器の再現を行った。コーン型ライトガイドの集光性能を確認することで、実機のシミュレーションにおいてより正確なシミュレーションを行うことができる。

4.1.1 ジオメトリ

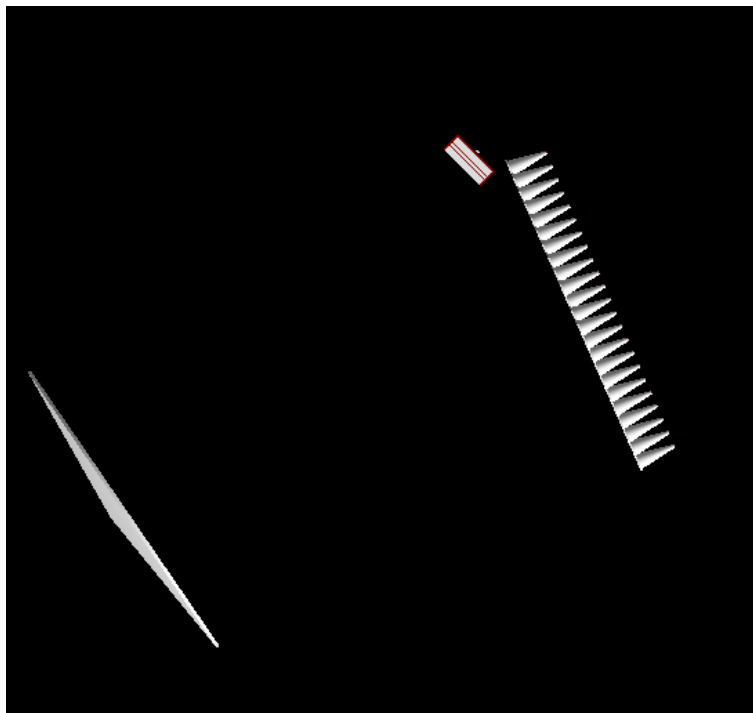


図 4.1: テスト実験再現用シミュレーションのセットアップ。上から見た図。

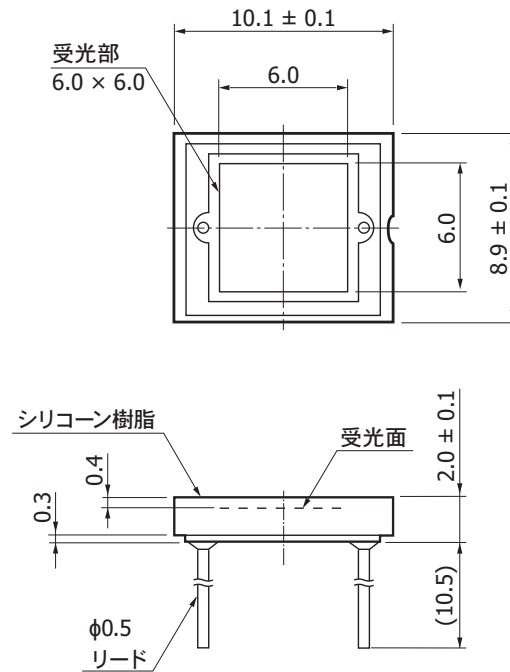


図 4.2: 使用した MPPC の構造。

4.1.2 エアロゲル

エアロゲルはサイズ、屈折率、透過長、吸収長、をパラメータとして考慮した。また、テスト実験で使用した3つのエアロゲルの個体差も考慮してパラメータの設定を行った。表にシミュレーションで使用した各エアロゲルのパラメータを示す。屈折率は波長に依らず一定とし、透過長はレイリー散乱の波長の4乗に比例する関係を考慮した。吸収長は全てのエアロゲルで波長に依らず 5500 nm とし、縦横のサイズは全て 146 mm × 146 mm とした。

4.1.3 球面鏡

球面鏡は、曲率半径 2982mm、外径は 1009 mm × 1009 mm とした。反射率は、図を参考に波長依存性を考慮して設定した。

4.1.4 MPPC

MPPC は図を参考に、受光面を 6 mm(縦) × 6 mm(横) × 1.3 mm(厚さ) のシリコンとし、受光面の上に窓材として厚さ 4 mm のシリコンを設定した。受光面のシリコンは屈折率 1.41、吸収長

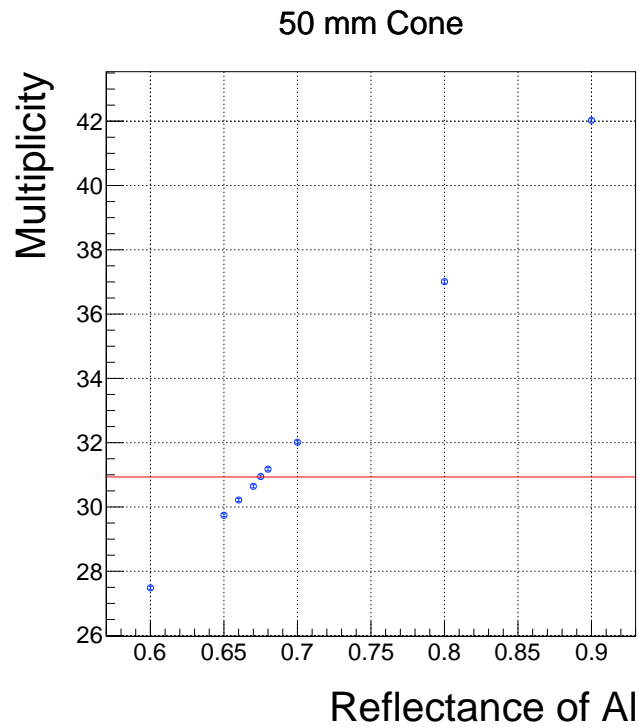


図 4.3: 50 mm コーンの場合の、コーン反射面の反射率に対する Multiplicity の変化。赤のラインが実験値の値。反射率を 0.675 とすることで実験値を再現できる。

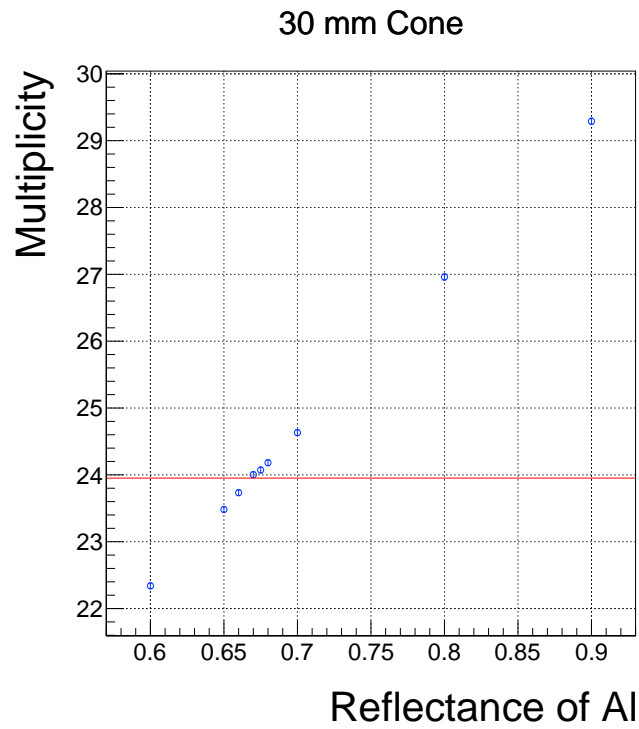


図 4.4: 30 mm コーンの場合の、コーン反射面の反射率に対する Multiplicity の変化。赤のラインが実験値の値。反射率を 0.67 とすることで実験値を再現できる。

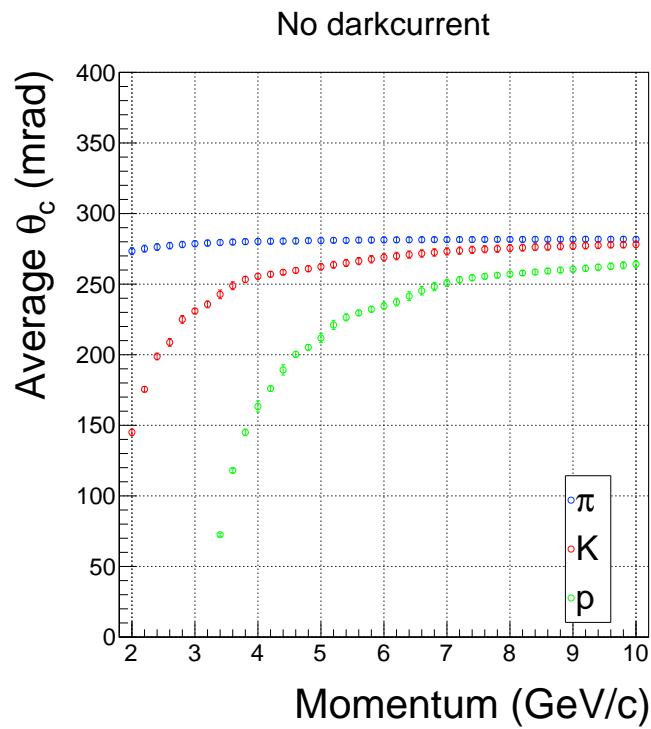


図 4.5: 暗電流を考慮しない場合の運動量毎のチェレンコフ角分布。青い点が π 、赤い点がK、緑の点がpを示す。エラーバーはチェレンコフ角の分布をガウスフィットした際の 1σ (角度分解能)としている。

4.1.5 コーン型ライトガイド

4.2 Geant4 シミュレーションによる実機シミュレーション

4.3 解析と結果

第5章 まとめ

参考文献

- [1] M. Anselmino *et al.*, Rev. Mod. Phys. 65, 1199 (1993).
- [2] K. Shirotori *et al.*, “Charmed Baryon Spectroscopy Experiment at J-PARC“, JPS Conf. Proc. 8 022012 (2015).
- [3] H. Noumi *et al.*, J-PARC P50 proposal,
<http://www.j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac1301/pdf/P502012-19.pdf>
- [4] 山我拓巳, “チャームバリオン分光実験用粒子識別検出器の設計“, 2013 年度大阪大学理学研究科修士論文.
- [5] 赤石貴也, “チャームバリオン分光実験用ビームタイミング検出器の開発“, 2018 年度大阪大学理学研究科修士論文.
- [6] 辰巳凌平, “低屈折率エアロゲルを用いた閾値型のエアロゲル・チェレンコフ粒子識別検出器の性能評価“, 2022 年度大阪大学理学研究科修士論文.
- [7] 国際商事株式会社, 技術資料