

修士論文

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

大阪大学 大学院理学研究科 物理学専攻
辰巳凌平

2022年2月18日

概要

クォークからどのようにハドロンが作られているかを理解することは、ハドロン物理学の主要な目的の一つである。ハドロンの構造を理解の新たな知見を得るため、ハドロンを記述するための新しい有効自由度の性質を解明することが必要である。しかし、新しい有効自由度として考えられているダイクォーク相関は実験によって明らかになっていない。バリオン中の1つのクォークを u 、 d に比べ重いチャーム・クォークとすることで、残った2つの軽いクォーク間のダイクォーク相関を観測できる可能性がある。チャーム・バリオンの励起状態の包括的な測定によって、ダイクォーク相関の存在を明らかにできると期待されている。

我々は、大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験施設において、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、大強度かつ高分解能の π^- ビームを入射し、 $\pi^- + p \rightarrow Y_c^{*+} + D^{*-}$ 反応でチャーム・バリオンの励起状態 Y_c^{*+} を生成する。 D^{*-} の崩壊粒子である π 中間子と K 中間子を検出し、 D^{*-} の四元運動量を得ることで、質量欠損分光法により Y_c^{*+} の質量を測定する。 Y_c^{*+} の検出感度を高めるために、検出効率が高く、誤識別率の低い PID 検出器が要求される。我々は、4 GeV/c 以下の π/K の識別を行うために、低屈折率エアロゲルを用いた閾値型エアロゲル・チェレンコフ (AC) 粒子識別検出器を開発している。この運動量領域の π/K の識別を行うためには、屈折率 $n = 1.007$ のエアロゲルを使用する必要があり、低屈折率の輻射体から放出されるチェレンコフ光の光量は非常に小さく、効率よく光を集める必要がある。

本研究では、低屈折率エアロゲルの低い発光量の克服のために、光検出器として MPPC を用いた閾値型 AC 粒子識別検出器の開発を行った。チェレンコフ光は粒子の進行方向に対して前方に放出されるため、MPPC を入射粒子に対して正面に配置して直接検出すれば、十分な光量が得られると考えた。入射粒子に対して正面に配置することで、MPPC に直接粒子が入射する可能性が生じるが、複数の MPPC のヒット情報 (MPPC の多重度) を使うことで、チェレンコフ放射の有無の判断が可能である。加えて、MPPC の多重度の情報により、暗電流の影響も低減できる。基礎的な段階からの調査を行い、最初の検出器の評価においては、6 mm 角の MPPC を 9 個と屈折率 $n = 1.05$ のエアロゲルを用いた閾値型 AC 検出器の試作機を製作し、SPring-8 の LEPS ビームラインにおいて電子ビーム照射のテスト実験を行った。その結果、MPPC を用いた閾値型 AC 検出器では、MPPC の多重度を用いることで、チェレンコフ放射の有無及び暗電流の影響の低減が可能であることが分かった。しかし、MPPC の小さな受光面によって、十分な光量を得ることが難しく、十分な集光率を得るための技術開発が必要不可欠であることが分かった。

MPPC の受光面のサイズの問題を解決するため、MPPC の受光面が覆う狭い領域に光を集める集光用ライト・ガイドを考案した。本研究では、集光用ライト・ガイドとして、内側が鏡面反射のライト・コーンを使用し、効率的に受光面を覆える MPPC アレイを用いた。Geant4 によるシミュレーションでライト・コーンなどの検出器の形状の最適化を行い、実際に屈折率 $n = 1.007$ のエアロゲルを用いた試作機の製作した。SPring-8 の LEPS2 のビームラインにおいて電子ビームを照射し、性能評価を行った。また、試作機で得られた測定結果を Geant4 のシミュレーションで再現し、性能を詳しく分析した。さらに、シミュレーションによって、実際の運動量領域の π/K に対する性能を評価した。

シミュレーションの結果、現状の試作機では十分な要求性能を満たさないことが分かり、改良の必要があった。改良として、透過長 17.5 mm(波長 400 nm のとき) のエアロゲルを用い、ライト・コーンにより集光した光を 75 μm ピクセルピッチで 3 mm 角の 8 \times 8 の MPPC アレイで検出することで、低い発光量の克服を可能にした。実機の製作に向けて課題であった低発光量を克服する測定器技術を開発でき、運動量領域 2.0–4.0 GeV/ c において、要求性能を達成した。

目次

| | | |
|------------|-----------------------------------|-----------|
| 第1章 | 序論 | 10 |
| 1.1 | バリオンの構造 | 10 |
| 1.1.1 | チャーム・バリオンにおけるダイクオーク相関 | 10 |
| 1.2 | チャーム・バリオン分光実験 (J-PARC E50 実験) | 11 |
| 1.3 | 高運動量ビームライン | 13 |
| 1.4 | チャーム・バリオン・スペクトロメータ | 13 |
| 1.5 | 本研究の目的 | 14 |
| 第2章 | エアロゲル・チェレンコフ検出器 | 16 |
| 2.1 | チェレンコフ検出器 | 16 |
| 2.1.1 | チェレンコフ放射 | 16 |
| 2.1.2 | 閾値型チェレンコフ検出器 | 17 |
| 2.1.3 | 輻射体 | 18 |
| 2.2 | 検出器の基本デザイン | 18 |
| 2.2.1 | 検出器の役割と要求性能 | 18 |
| 2.2.2 | シリカ・エアロゲル | 18 |
| 2.2.3 | Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) | 19 |
| 2.2.4 | ライト・コーン | 21 |
| 第3章 | MPPC を用いたエアロゲル・チェレンコフ検出器 | 24 |
| 3.1 | 目的 | 24 |
| 3.2 | MPPC を用いた試作機の製作 | 24 |
| 3.2.1 | 反射材 | 24 |
| 3.2.2 | シリカエアロゲル | 24 |
| 3.2.3 | MPPC | 25 |
| 3.2.4 | 試作機のデザイン | 25 |
| 3.3 | SPring-8 LEPS における試作機の性能評価実験 | 27 |
| 3.3.1 | 性能評価実験の概要と目的 | 27 |
| 3.3.2 | セットアップ | 28 |
| 3.4 | 解析手法 | 29 |
| 3.5 | 結果と考察 | 30 |
| 3.5.1 | MPPC の多重度 | 30 |
| 3.5.2 | MPPC の多重度のオーバー電圧依存 | 30 |
| 3.5.3 | MPPC の多重度のビーム入射位置依存 | 31 |

| | | |
|------------|---------------------------------------|-----------|
| 3.5.4 | エアロゲルを除いての測定結果 | 33 |
| 3.5.5 | 検出効率 | 35 |
| 3.6 | Geant4でのシミュレーションによる試作機の再現 | 36 |
| 3.6.1 | エアロゲルのパラメータ | 36 |
| 3.6.2 | ナフロンに関するパラメータ | 37 |
| 3.6.3 | MPPCのパラメータ | 37 |
| 3.6.4 | 試作機を用いたテスト実験の再現 | 37 |
| 3.6.5 | 解析手法 | 38 |
| 3.6.6 | 結果と考察 | 39 |
| 第4章 | 集光用ライト・コーンを用いたAC検出器 | 49 |
| 4.1 | 集光用ライト・コーンを用いた試作機のデザイン | 49 |
| 4.1.1 | 集光用ライト・コーンのシミュレーションによる検討 | 49 |
| 4.1.2 | 集光用ライト・コーンのサイズの最適化 | 52 |
| 4.2 | 集光用ライト・コーンを用いた試作機の製作 | 54 |
| 4.2.1 | エアロゲル収納の箱 | 54 |
| 4.2.2 | エアロゲル | 55 |
| 4.2.3 | MPPC | 56 |
| 4.2.4 | ライト・コーン | 56 |
| 4.2.5 | 試作機の組み上げ | 56 |
| 4.3 | SPring-8 LEPS2における電子ビームを用いた試作機の性能評価実験 | 56 |
| 4.3.1 | 性能評価実験の概要と目的 | 56 |
| 4.3.2 | セットアップ | 59 |
| 4.4 | 解析手法 | 60 |
| 4.4.1 | トリガーカウンターのADCのカットによるイベント選択 | 60 |
| 4.4.2 | MPPCのTDCのカットによるイベント選択 | 61 |
| 4.4.3 | 光電子数を得るための較正 | 61 |
| 4.5 | 結果と考察 | 63 |
| 4.5.1 | MPPCの多重度と光電子数 | 63 |
| 4.5.2 | MPPCの多重度のオーバー電圧依存 | 64 |
| 4.5.3 | MPPCの多重度と光電子数のビーム入射位置依存 | 66 |
| 4.5.4 | エアロゲルを除いての測定結果 | 69 |
| 4.5.5 | 検出効率 | 71 |
| 4.6 | Geant4でのシミュレーションによる試作機の再現 | 72 |
| 4.6.1 | エアロゲルのパラメータ | 72 |
| 4.6.2 | ナフロンに関するパラメータ | 72 |
| 4.6.3 | ライト・コーンに関するパラメータ | 72 |
| 4.6.4 | 試作機を用いたテスト実験の再現 | 72 |
| 4.6.5 | 解析手法 | 73 |
| 4.6.6 | 結果と考察 | 74 |

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 第 5 章 | 実機に向けたシミュレーションと性能評価 | 80 |
| 5.1 | π 中間子と K 中間子におけるシミュレーション | 80 |
| 5.1.1 | ライト・コーンの長さの最適化 | 80 |
| 5.1.2 | 運動量毎のライト・コーンの性能 | 80 |
| 5.2 | シミュレーションによる AC 検出器の性能の見積もり | 81 |
| 5.3 | K 中間子による誤識別率の低減に対する改良 | 83 |
| 5.3.1 | MPPC の暗電流による影響の低減 | 83 |
| 5.3.2 | K 中間子の検出割合 | 85 |
| 5.4 | π 中間子の検出効率の向上に対する改良 | 85 |
| 5.4.1 | MPPC の改善 | 86 |
| 5.4.2 | MPPC 毎の π 中間子の検出効率 | 86 |
| 5.4.3 | エアロゲルの改善 | 87 |
| 5.4.4 | エアロゲルの透過長毎の π 中間子の検出効率 | 88 |
| 5.4.5 | シミュレーションにおける π 中間子と K 中間子の識別性能 | 89 |
| 第 6 章 | 本研究のまとめ | 90 |
| 付 録 A | 閾値型チェレンコフ粒子識別検出器による粒子識別 | 92 |

目 次

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | チャーム・バリオンの励起準位スペクトルの模式図 | 11 |
| 1.2 | チャーム・バリオンの生成反応 | 12 |
| 1.3 | 実験で得られると期待されるチャーム・バリオンの質量欠損スペクトル | 13 |
| 1.4 | チャーム・バリオン・スペクトロメータの概要図 | 14 |
| 2.1 | チェレンコフ放射の模式図 | 16 |
| 2.2 | 運動量 p と $1/\beta$ の関係 | 17 |
| 2.3 | $n = 1.05$ のエアロゲルの写真 | 19 |
| 2.4 | $n = 1.007$ のエアロゲルの写真 | 19 |
| 2.5 | PMT を用いた閾値型 AC 検出器と MPPC を用いた閾値型 AC 検出器の概要図 | 20 |
| 2.6 | S13360-6075PE の MPPC の構造を示す図面 | 22 |
| 2.7 | S13361-3050AE-08 の MPPC の写真と構造を示す図面 | 22 |
| 2.8 | S13360-6075PE の検出効率の波長依存と各特性のオーバー電圧依存 | 22 |
| 2.9 | S13361-3050AE-08 の検出効率の波長依存と各特性のオーバー電圧依存 | 23 |
| 2.10 | MPPC を用いた試作検出器 | 23 |
| 3.1 | 実験で用いた試作検出器 | 25 |
| 3.2 | MPPC の読み出し回路図 | 26 |
| 3.3 | 試作 AC 検出器の MPPC の配置 | 26 |
| 3.4 | SPring-8 の加速器群 | 27 |
| 3.5 | 実験セットアップの概略図 | 28 |
| 3.6 | ビームの通過位置 | 29 |
| 3.7 | MPPC の Leading TDC の分布 | 30 |
| 3.8 | MPPC の多重度のヒストグラム | 31 |
| 3.9 | 多重度のオーバー電圧 (V_{ov}) 依存 | 32 |
| 3.10 | 多重度のビーム通過位置依存 | 32 |
| 3.11 | 多重度の角度を持ったビームの通過位置依存 | 33 |
| 3.12 | 位置 4 にビームを入射したときの MPPC の多重度の分布 | 34 |
| 3.13 | 位置 4 での空箱での測定の各 MPPC のヒットの割合 | 34 |
| 3.14 | 検出効率と暗電流によるバックグラウンドの割合のオーバー電圧依存 | 35 |
| 3.15 | 検出効率のビームの通過位置依存 | 36 |
| 3.16 | Geant4 による試作検出器の再現 | 38 |
| 3.17 | 各 MPPC が信号を出した割合 | 39 |

| | |
|--|----|
| 3.18 各 MPPC へ入射する光のヒットパターン | 40 |
| 3.19 シミュレーションで再現した暗電流による多重度 | 40 |
| 3.20 MPPC の多重度のナフロン反射率依存 | 41 |
| 3.21 MPPC の多重度のエアロゲルの透過長依存 | 41 |
| 3.22 位置 4 にビームを入射したシミュレーションでのチェレンコフ光の各 MPPC への入射角度の分布 | 43 |
| 3.23 位置 4 にビームを入射したシミュレーションでの MPPC の多重度の分布 | 43 |
| 3.24 MPPC の多重度のオーバー電圧 (V_{ov}) 依存 | 44 |
| 3.25 MPPC の多重度のビーム通過位置依存 | 45 |
| 3.26 測定値とシミュレーションの MPPC 毎のヒットの割合 | 46 |
| 3.27 ビームの y 方向 (高さ方向) を 7 mm 下に下げたときの多重度のビーム通過 位置依存 | 47 |
| 3.28 位置 4 の 7 mm 下に電子が入射したときの各 MPPC のヒットの割合 | 48 |
| | |
| 4.1 Geant4 における集光用ライト・コーンを用いた閾値型 AC 検出器の構成 | 50 |
| 4.2 Geant4 を用いてシミュレーションした、集光用ライト・コーンを用いた閾 値型 AC 検出器に電子ビームを入射したときのチェレンコフ光の飛跡 | 51 |
| 4.3 ライト・コーンの出口で検出した光の MPPC への入射角度の分布 | 51 |
| 4.4 ライト・コーンでの鏡面反射の模式図 | 53 |
| 4.5 ライト・コーンでの鏡面反射の模式図 | 53 |
| 4.6 ライト・コーンの長さによる MPPC の多重度の変化 | 54 |
| 4.7 エアロゲル封入用のナフロン製の箱の写真 | 55 |
| 4.8 ライト・コーンの 3D モデルデータと製作したコーン (半分) の写真 | 57 |
| 4.9 反射材としてアルミナイズド・マイラーを付けたライト・コーンの写真 | 58 |
| 4.10 集光用ライト・コーンを用いた試作 AC 検出器の写真 | 58 |
| 4.11 実験セットアップの概略図 | 59 |
| 4.12 テスト実験でのビーム入射位置 | 60 |
| 4.13 トリガーカウンターである 30 mm× 30 mm のプラスチック・シンチレー タの ADC 分布 | 61 |
| 4.14 10 mm× 10 mm のプラスチック・シンチレータの ADC 分布 | 62 |
| 4.15 MPPC の Leading TDC の分布 | 62 |
| 4.16 MPPC の ADC 分布 | 63 |
| 4.17 MPPC で検出した光電子数の分布 | 64 |
| 4.18 検出器中心の位置 1 にビームを入射したときの MPPC の多重度の分布 | 65 |
| 4.19 図 4.15 の「Background」のイベントを選んだときの MPPC の多重度 | 65 |
| 4.20 MPPC の多重度のオーバー電圧 (V_{ov}) 依存 | 66 |
| 4.21 ビーム位置 1-5 のときの MPPC の多重度と光電子数 | 67 |
| 4.22 検出器中心から 10 mm 離れた位置にビームを入射したときの多重度と光電 子数 | 68 |
| 4.23 検出器中心から 20 mm 離れた位置にビームを入射したときの多重度と光電 子数 | 68 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.24 | 位置 1 でのナフロン箱の有無による MPPC の多重度の分布の違い | 69 |
| 4.25 | 位置 3 でのエアロゲルの有無による多重度の分布の違い | 70 |
| 4.26 | 各ビーム入射位置毎の、多重度に閾値を設定したときの閾値型 AC 検出器 としての検出効率 | 71 |
| 4.27 | ライト・コーン出口全体と MPPC 受光面でのヒットパターン | 73 |
| 4.28 | シミュレーションでの暗電流による多重度の再現 | 74 |
| 4.29 | MPPC の多重度のライト・コーンの反射率依存 | 75 |
| 4.30 | シミュレーションで位置 1 にビームを入射したときのエアロゲルの有無に よる MPPC の多重度の違い | 76 |
| 4.31 | シミュレーションで位置 3 にビームを入射したときのエアロゲルの有無に よる MPPC の多重度 | 76 |
| 4.32 | ライト・コーンのみの MPPC の多重度 | 78 |
| 4.33 | ビームの入射位置を変更した場合の MPPC の多重度と光電子数の比較 . . . | 79 |
| | | |
| 5.1 | π 中間子の場合のライト・コーンの長さの最適化 | 81 |
| 5.2 | ライト・コーンの長さを 5 mm から 120 mm に変えたときの運動量毎の多 重度の増加率 | 82 |
| 5.3 | π 中間子に対する運動量毎の MPPC の多重度 | 82 |
| 5.4 | K 中間子に対する運動量毎の MPPC の多重度 | 83 |
| 5.5 | π 中間子の運動量毎の検出効率 | 84 |
| 5.6 | K 中間子の運動量毎の検出効率 | 84 |
| 5.7 | 暗電流による影響を 1/3 に低減したときの K 中間子の運動量毎の検出効率 | 85 |
| 5.8 | 閾値 3 での MPPC 毎の π 中間子の検出効率 | 87 |
| 5.9 | 閾値 3 での S13361-3075AE-08 を用いたときのエアロゲルの透過長毎の π 中間子の検出効率 | 88 |
| 5.10 | 閾値 3 での S13361-6075AE-04 を用いたときのエアロゲルの透過長毎の π 中間子の検出効率 | 89 |
| | | |
| A.1 | シミュレーションから得られた TOF 検出器によって得られるマス・スクエ ア分布 | 93 |
| A.2 | 閾値型チェレンコフ粒子識別検出器に要求される性能を仮定したときのマ ス・スクエア分布 | 94 |

表 目 次

| | |
|--|----|
| 2.1 MPPC の基本情報 | 21 |
| 3.1 $n = 1.05$ のエアロゲルの特性 | 25 |
| 4.1 実験後に再測定した通称 $n = 1.007$ のエアロゲルの特性。 | 55 |
| 4.2 位置 1, 2, 3 での MPPC の多重度 | 77 |
| 5.1 MPPC アレイの基本情報 | 86 |

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が結合した複合粒子であり、低エネルギーにおける性質は構成子クォークモデルによって説明されている。構成子クォークモデルでは、バリオンは3つの構成子クォーク(これ以降クォークと記述)、メソンはクォークと反クォークで記述される。これまでに観測されている多くのバリオンでは、特に基底状態の性質が構成子クォーク・モデルでよく説明されている。しかし、一部のバリオンの励起状態やエキゾチック・ハドロンと呼ばれる状態の性質は従来の構成子クォークモデルで説明することが困難である。そのため、ハドロン励起状態の全体像を理解するための新たな知見が必要となっている。近年、これらの励起状態の研究から、構成子クォークの他に、ハドロン分子状態や2つのクォーク間の相関であるダイクォーク相関をハドロンを記述する有効自由度として取り入れる試みがなされている [1]。ダイクォーク相関を有効自由度とすることで、これまでに説明が困難であった励起状態のハドロンの性質が理解できる可能性があるが、ダイクォーク相関の存在は未だ実験的に実証されていない。

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る。バリオンでは3つのクォークが3対のダイクォーク相関を形成する。uクォークやdクォークのみからなる軽いバリオンの場合、3対のダイクォーク相関が縮退して分離できないため、単独のダイクォーク相関を調べるのが極めて困難である。一方、バリオン内の軽いクォーク1つを重いクォークに置き換えたバリオンの場合、運動学的にダイクォーク相関が分離するため、単独のダイクォーク相関を調べることができると考えられている。チャーム・バリオンはチャーム・クォーク(c)を持つバリオンであり、cクォークはu, dの構成子クォーク質量に比べて約5倍の有効質量を持っていたため、チャーム・バリオンではこのダイクォーク相関が顕在化すると考えられる。したがって、チャーム・バリオンの励起スペクトルを調べることによって、ダイクォーク相関の性質を明らかにできると期待される。

チャーム・バリオンでは、ダイクォーク相関とチャーム・クォークの相対運動状態である λ モードと、ダイクォーク相関の内部励起状態である ρ モードに励起状態が運動学的に分離し、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出現する。こ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ないとき、すなわち $m_Q = m_q$ のとき、(1.1) 式の値は1となるので、3つの軽いクォークからなるバリオンでは λ モードと ρ モードは縮退することがわかる。また重いクォークが他のクォークに比べ十分に重い時 ($m_Q \gg m_q$)、この励起状態のエネルギー比は、

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

となる。

さらに、カラー磁気相互作用はクォーク質量に反比例するため、1つの重いクォークが入ると、残りの2つの軽いクォーク間での相関が相対的に強くなる。図 1.1 に示すように、それぞれの励起モードに対応した励起状態が観測でき、生成率や崩壊率もダイクォーク相関の性質を反映すると考えられている。したがって、チャーム・バリオンの励起エネルギー、生成率や崩壊率を詳しく調べることで、ダイクォーク相関の性質を明らかにできると期待される。

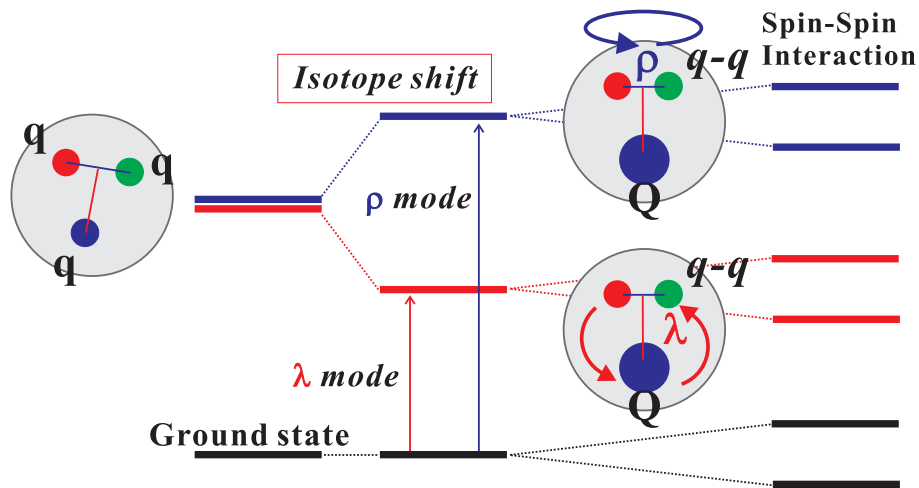


図 1.1: チャーム・バリオンの励起準位スペクトルの模式図 [2]。 λ モード以外に ρ モードと呼ばれるダイクォーク相関の励起状態に対応した準位がチャーム・バリオンの励起準位スペクトルに現れる。

1.2 チャーム・バリオン分光実験 (J-PARC E50 実験)

我々は茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 50 GeV 陽子シンクロトロン施設内のハドロン実験施設において、チャーム・バリオン分光実験 (J-PARC E50 実験) を計画している [3]。実験では高運動量の二次粒子ビームである π^- ビームを生成標的 (液体水素) に照射し、反応によって生成したチャーム・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、運動量 $20 \text{ GeV}/c$ の $\pi^- + p \rightarrow Y_c^{*+} + D^{*-}$ 反応によって生成する。図 1.2 に示すように、ビーム粒子である π^- と散乱粒子である D^{*-} を測定することで、質量欠損分光法によってチャームバリオン (Y_c^{*+}) の質量スペクトルを測定する。質量欠損分光法を用いると、生成した励起状態の崩壊先の終状態に依らず、基底状態から励起エネルギー 1 GeV 以上の高励起状態まで広い質量範囲のチャームバリオン励起状態を測定できる。したがって、チャーム・バリオンの励起状態の系統的な研究を行うことが可能である。

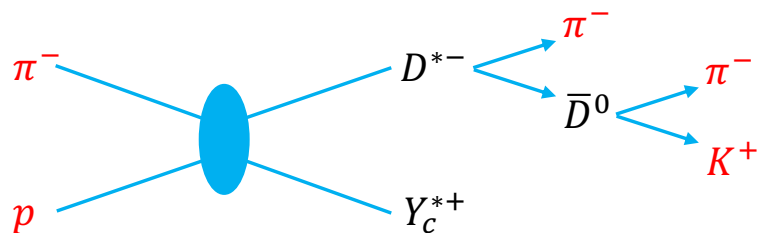


図 1.2: チャーム・バリオンの生成反応。終状態 (K^+, π^-, π^-) の 3 粒子を測定し、 D^{*-} の不変質量と四元運動量を得る。ビーム粒子である π^- と D^{*-} の四元運動量より、チャーム・バリオンの質量欠損を得る。

実験で測定する散乱粒子 D^{*-} の崩壊モードは、図 1.2 で示す $D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^-$ (分岐比 67.7%) と \bar{D}^0 の崩壊モード $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ (分岐比 3.89%) である。 D^{*-} の崩壊からの π^- と \bar{D}^0 の崩壊からの K^+ と π^- をスペクトロメータで検出することで、 D^{*-} を不変質量により同定し、その四元運動量を得る。実験に用いる磁気スペクトロメータであるチャーム・バリオン・スペクトロメータは、終状態の K^+, π^-, π^- の 3 粒子を効率よく検出できるように設計されている。ビーム粒子と D^{*-} の四元運動量からチャーム・バリオン (Y_c^{*+}) の質量欠損を求めることで、生成断面積 (生成率) を測定する。また、チャーム・バリオンの崩壊粒子の測定も同時に行うことにより崩壊分岐比が測定できる。これらのチャーム・バリオンの生成率と崩壊分岐比は内部のダイクォーク相関を強く反映していると考えられており、実験によってダイクォーク相関が明らかになると期待される。

図 1.3 が実験で得られると期待される質量欠損スペクトルである。この反応では相関する軽クォーク対とチャーム・クォークの間に角運動量が持ち込まれ易いため、 λ モードの状態が強く励起される。予想質量欠損スペクトルでは $\Lambda_c(2595)$ と $\Lambda_c(2625)$ 、 $\Lambda_c(2880)$ と $\Lambda_c(2940)$ を λ モードであると想定してシミュレーションを行った。このようなスペクトルを得ることで、ダイクォーク相関の存在の強い証拠となると期待される。

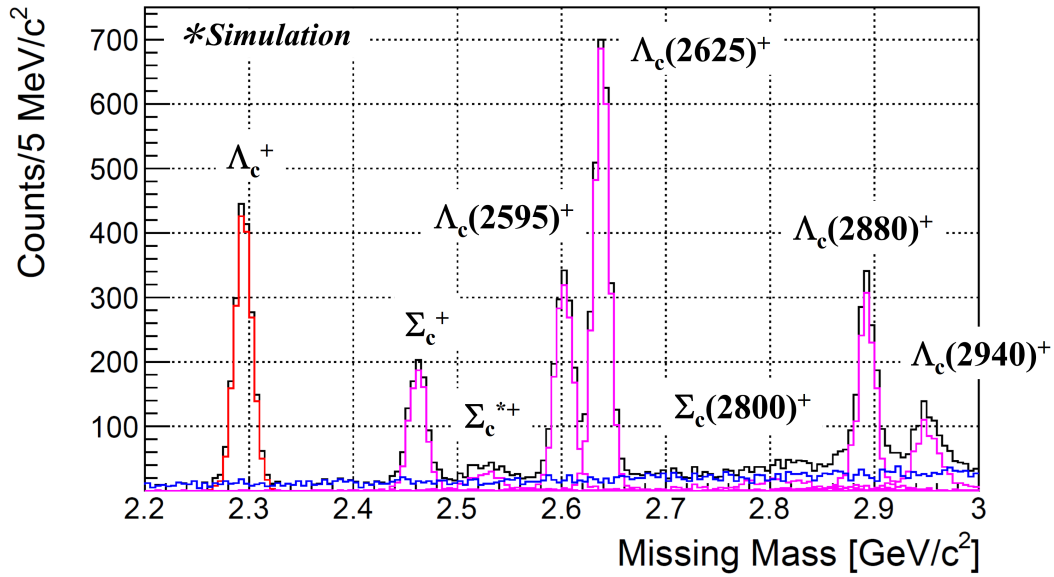


図 1.3: 実験で得られると期待されるチャーム・バリオンの質量欠損スペクトル。チャームバリオンの基底状態と励起状態をそれぞれ赤線と紫線で示す。青線がバックグラウンド事象である。

1.3 高運動量ビームライン

J-PARC ハドロン実験施設では新たに高運動量ビームラインが建設された。このビームラインは、既存のハドロン実験施設への一次陽子ビームラインの入射部から分岐している。一次ビームライン中を輸送される 30 GeV の陽子の一部を電磁石を用いて新設のビームラインに分岐する。また、分岐点に二次粒子生成標的を置くことで、20 GeV/c までの高運動量の二次粒子ビームの供給もできるように設計されており、これまで J-PARC ハドロン実験施設で使用されてきた 2 GeV/c を超える高い運動量を持つ二次粒子ビームを用いた実験を可能とする。

1.4 チャーム・バリオン・スペクトロメータ

チャーム・バリオン分光実験用に用いるスペクトロメータを図 1.4 に示す。質量欠損分光法を用いるためには、ビーム粒子と散乱粒子の両方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磁気スペクトロメータで構成されている。生成標的は、4 g/cm² の液体水素 (LH₂) である。標的は磁気スペクトロメータの入り口付近に設置し、検出器が覆うアクセプタンスが最大になるように設計されている。

高運動量ビームを用いた固定標的実験の場合、散乱粒子 (D^{*-}) の崩壊からの高運動量の粒子だけでなく、チャーム・バリオンからの崩壊粒子も前方に放出される。そのため、 D^{*-} と Y_c^{*+} の両方からの崩壊粒子を前方で効率良く測定するため、双極磁石システムを用いる。散乱粒子 D^{*-} の崩壊粒子である \bar{D}^0 からの高運動量の K^+ と π^- を標的の下流のシンチ

レーション・ファイバー検出器、磁石出口のドリフト・チェンバー、閾値型チェレンコフ粒子識別検出器とリングイメージ型チェレンコフ検出器によって測定する。ビーム粒子(π^-)の運動量が20 GeV/cのとき、 \bar{D}^0 の崩壊粒子である π^- と K^+ の運動量は2-16 GeV/cの運動量まで分布する。また D^{*-} の崩壊粒子である π^- の運動量は、 \bar{D}^0 への崩壊の Q 値が小さいために、2 GeV/c以下の低い運動量を持つ。 D^{*-} からの低運動量の π^- とチャーム・バリオンからの崩壊粒子を広い角度範囲で測定するため、磁石内部にもタイミングカウンターと飛跡検出器を設置する。

チャーム・バリオン・スペクトロメータ

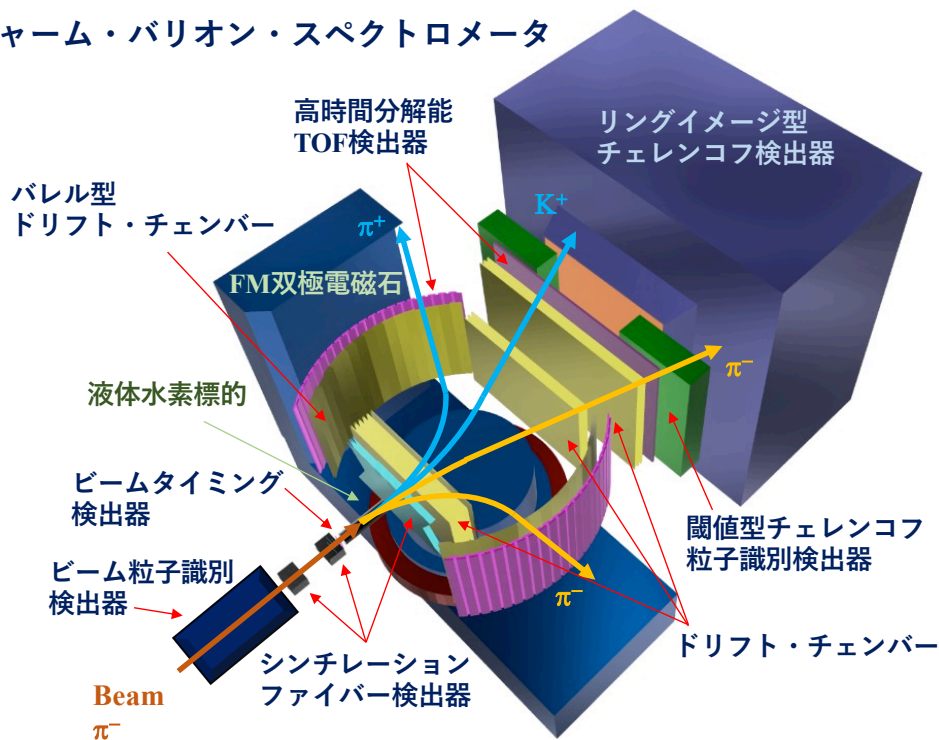


図 1.4: チャーム・バリオン・スペクトロメータの概要図。ビーム粒子測定用検出器群と散乱粒子測定用の磁気スペクトロメータで構成される。

1.5 本研究の目的

チャーム・バリオン・スペクトロメータの標的下流に置かれる粒子識別検出器は重要な検出器であり、チャーム・バリオンの観測感度に直接影響する。粒子識別検出器では、チャーム・バリオン生成における散乱粒子である π^- や K^+ の識別が必要である。粒子識別検出器の性能は、目的粒子に対する検出効率と、他の粒子を誤って目的の粒子としてし

まう誤識別の割合によって決まる。解析によって得られる励起スペクトルに影響を与える主な誤識別は、 π^+ や陽子 (p) を K^+ と識別してしまうものである。この誤識別が起こったとき、終状態が (π^+, π^-, π^-) や (p, π^-, π^-) となる事象をチャーム・バリオン生成の終状態と誤ると、励起スペクトルのバックグラウンドとして現れる。また、 K^+ の生成に比べて、 π^+ や p の生成はそれぞれ 15 倍と 25 倍程度多いため、誤識別があると、図 1.3 で示した予想質量欠損スペクトルのバックグラウンドは著しく増加し、生成量が少ない状態の観測が困難となる。そのため誤識別をできるだけ低減する必要がある。

運動量が高い領域での粒子識別はリングイメージ型チェレンコフ検出器 (RICH) を用いて行う。運動量が低くなると、磁場により散乱粒子の飛跡が大きく曲がるために、それらを RICH 検出器を用いて識別するためには、検出器の幅を大きくする必要がある。また、TOF (Time of Flight) 検出器を用いて、飛行時間測定によって粒子の識別ができる運動量は 2.0 GeV/ c 程度までである。RICH 検出器の幅の増大を抑え、TOF 検出器による識別が困難である運動量領域の粒子識別のために、エアロゲルを用いた閾値型チェレンコフ粒子識別検出器を用いる。本研究の目的は、2.0 GeV/ c から 4.0 GeV/ c の運動量領域での π 中間子と K 中間子の識別を行うエアロゲル・チェレンコフ粒子識別検出器の開発である。 π 中間子に対する検出効率が高く、 K 中間子に対する誤識別率を低くし、チャーム・バリオンの励起スペクトルに対して、バックグラウンドを十分少なくする識別性能を目標とする。付録 A に閾値型チェレンコフ粒子識別検出器による粒子識別のシミュレーションを記載する。

本稿の構成は以下のとおりである。2 章ではエアロゲル・チェレンコフ検出器について述べる。3 章では MPPC [4] を用いた試作機でのビームテストについて述べる。またこの測定結果を Geant4 [5–7] を用いたシミュレーションによって再現した。4 章では 3 章で再現したシミュレーションをもとに、試作機の改良を検討し、ライト・コーンによる集光を利用した試作機を製作し、ビームテストを行った。この測定結果に対しても Geant4 のシミュレーションによる再現を行った。5 章では 4 章で再現した試作機で、 π 中間子と K 中間子の識別の性能評価をシミュレーションにより行った。

第2章 エアロゲル・チェレンコフ検出器

2.1 チェレンコフ検出器

2.1.1 チェレンコフ放射

チェレンコフ放射とは、荷電粒子が物質中を通過するとき、その粒子の速度が物質中の光速を超えるときに光を放出することであり、その光をチェレンコフ光という。チェレンコフ放射が起こる荷電粒子の速さ β の条件は、輻射体の屈折率 n を用いて次のように書ける。

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

また、チェレンコフ光が放射される角度、チェレンコフ角 θ_c は、

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

となり、図 2.1 のようにこの角度を満たすようにコーン状に光が放出される。

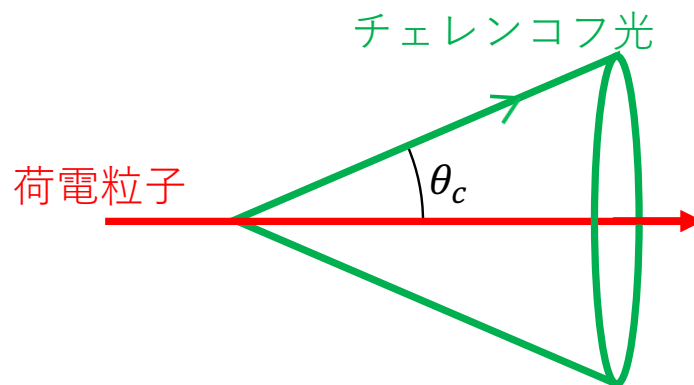


図 2.1: チェレンコフ放射の模式図。荷電粒子の飛跡に対して、チェレンコフ角 θ_c を持って光が放出される。

粒子の質量 m 、運動量 p と速さ β の関係は、

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\sqrt{(mc)^2 + p^2}}{p} \quad (2.3)$$

であるので、運動量 p と $1/\beta$ の関係をグラフにすると、図 2.2 に示す通りとなる。

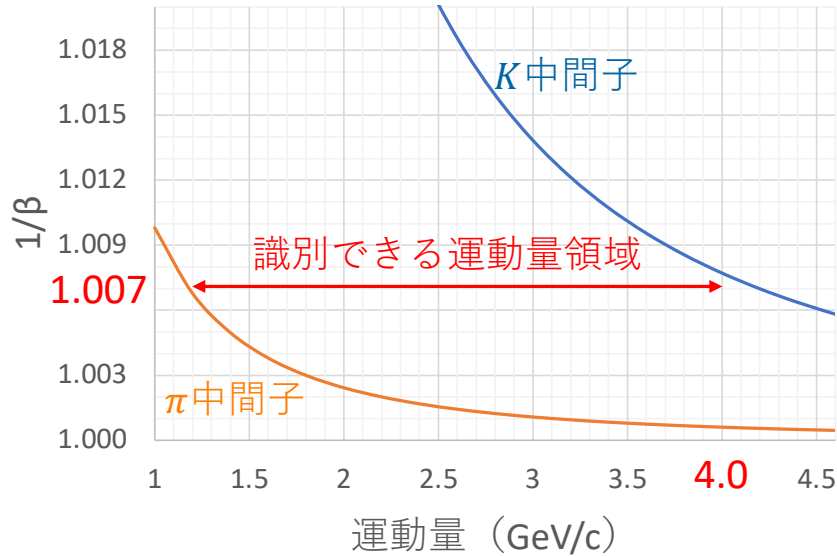


図 2.2: 運動量 p と $1/\beta$ の関係。 π 中間子と K 中間子の静止質量を用いて計算した。 $1/\beta$ より大きい屈折率を持つ輻射体を用いるとチェレンコフ放射が起こる。

単位長さの輻射体から放出されるチェレンコフ光の光子数 dN/dx は、

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi z^2 \alpha \int \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2} \quad (2.4)$$

と表される。ここで、 z は荷電粒子の電荷、 α は微細構造定数、 λ は光子 (チェレンコフ光) の波長である。高運動量の粒子を測定するために小さい屈折率の輻射体を使用すると、(2.4) 式からわかるように、チェレンコフ光の光量は減少する。

2.1.2 閾値型チェレンコフ検出器

チェレンコフ放射は速度に依存するため、粒子の速度を測定することができ、粒子識別検出器に利用できる。チェレンコフ検出器には閾値型とリングイメージ型があり、本研究では閾値型チェレンコフ検出器の開発を行った。閾値型チェレンコフ検出器では、ある閾値以上の速度を持つ粒子のみがチェレンコフ放射を起こす屈折率の輻射体を選ぶことで粒子識別を行う。粒子の $1/\beta$ より大きい屈折率を持つ輻射体を用いると、チェレンコフ放射

を起こすため、図 2.2 の π 中間子の曲線より上の屈折率を選ぶと π 中間子がチェレンコフ光を放出する。したがって、図 2.2 に示したように、 π 中間子の曲線より上、 K 中間子の曲線より下の運動量領域 (1.2–4.0 GeV/c) の粒子がチェレンコフ放射を起こす屈折率を持つ輻射体を用いると、2つの粒子の識別が可能である。

2.1.3 輻射体

閾値型チェレンコフ検出器の輻射体は、識別を行いたい粒子の運動量に適した屈折率を持つ必要がある。また放射された光が光検出器まで高い収集効率で到達するために、輻射体が高い透明度を持つことも必要である。輻射体としてよく用いられるものにガスやシリカ・エアロゲルがある。

本研究ではチェレンコフ検出器の輻射体としてシリカ・エアロゲルを使用する。シリカエアロゲルは二酸化ケイ素の3次元骨格と90%以上の空気で作られている非結晶質の物質である。シリカ・エアロゲルは透明度が高く気体と液体の中間の屈折率 ($n = 1.004\text{--}1.25$) を持つ。また、シリカエアロゲルは二酸化ケイ素と空気の割合によって、様々な値の屈折率を持ち、輻射体の屈折率を適切に選ぶ必要がある閾値型チェレンコフ検出器に適している。加えて、疎水性を持つエアロゲルが開発されており、大気中において簡易的な容器のみでも使用可能である。そのため実験で用いられる粒子識別検出器では、輻射体としてエアロゲルを用いたエアロゲル・チェレンコフ検出器 (AC 検出器) がよく利用されている。

2.2 検出器の基本デザイン

2.2.1 検出器の役割と要求性能

チャーム・バリオン分光実験 (J-PARC E50 実験) における閾値型チェレンコフ検出器は、チャーム・バリオン・スペクトロメータの一部として、磁気スペクトロメータの電磁石下流に設置され、散乱粒子の識別を行う。ミッシングマス法によってチャーム・バリオン Y_c^{*+} の質量を決定するために、 D^{*-} の最終的な崩壊先である π^- と K^+ の同定が必要である。閾値型チェレンコフ検出器には、TOF 検出器での識別が難しくなる 2.0 GeV/c から 4.0 GeV/c の運動量領域における π 中間子と K 中間子の高い精度での識別が要求される。チャーム・バリオンの検出感度を十分に高くするためには、 π 中間子の検出効率 95% 以上、 K 中間子による誤識別率 3% 以下を達成する必要がある。

2.2.2 シリカ・エアロゲル

本研究のエアロゲル・チェレンコフ検出器で輻射体として使用するシリカ・エアロゲルは、千葉大学大学院理学研究院の田端誠氏の研究グループに製造を依頼した。研究グループでは、透過長として 10 mm を超える透明度の高い低屈折率エアロゲルが製造可能である [8,9]。図 2.3 と 2.4 に屈折率 1.05 (透過長 43 mm) のクリアタイプ及び屈折率 1.007 (透過長 10 mm) のエアロゲルの写真を示す。

エアロゲル・チェレンコフ検出器で識別したい粒子は主に 2.0–4.0 GeV/c の π 中間子と K 中間子である。屈折率 $n = 1.007$ の輻射体を用いると、4 GeV/c 以下の K 中間子ではチェレンコフ放射が起こらず、 π 中間子では 1.2 GeV/c から放射が起こるため、チェレンコフ光の有無により、目的の運動量範囲 (2.0–4.0 GeV/c) の π 中間子と K 中間子の識別が

可能である。本研究では、4 GeV/cでの π 中間子の発光量が最大となる屈折率 $n = 1.007$ のエアロゲルを使用するが、(2.4)式から、典型的なエアロゲル(屈折率 $n = 1.05$)と低屈折率エアロゲル($n = 1.007$)を比較すると、単位長さあたり発生する光子数は約0.15倍になると見積もられる。そのため、典型的な閾値型エアロゲル・チェレンコフ検出器に比べ、この発光量の少なさを克服する測定器技術が必要となる。

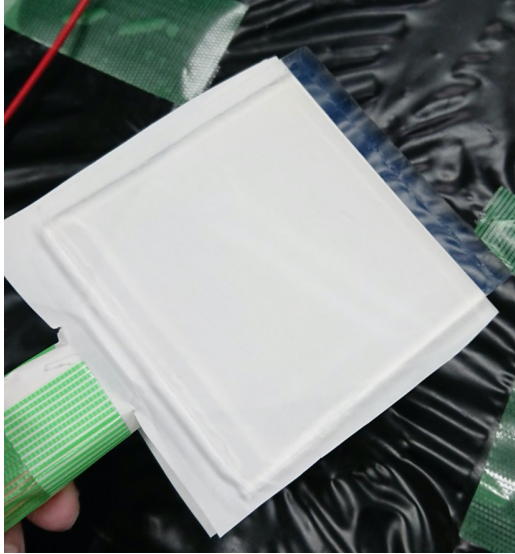


図 2.3: $n = 1.05$ (透過長 43 mm) のエアロゲルの写真。



図 2.4: $n = 1.007$ (透過長 10 mm) のエアロゲルの写真。

2.2.3 Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)

本研究で開発するエアロゲル・チェレンコフ検出器では、チェレンコフ光の読み出し用の光検出器として、浜松ホトニクス製のMPPC (Multi-Pixel Photon Counter) [4]を使用する。従来の閾値型エアロゲル・チェレンコフ検出器では、光検出器として光電子増倍管(PMT)が用いられる事が多かった。従来型の閾値型エアロゲル・チェレンコフ検出器では、図 2.5の左図のように、PMTを検出器側面に配置し、テフロンなどの反射材により反射されたチェレンコフ光を間接的に検出する。これは、荷電粒子がPMTを通過し、PMTの窓材のガラスから多くのチェレンコフ光が放出されるのを防ぐためである。間接的に集光する検出器の場合、屈折率 $n = 1.02$ – 1.10 程度のエアロゲルが用いられており、数100個から1000個を超える発光チェレンコフ光に対して数%の集光率であり、最終的に得られる光電子数は20–30個程度となる。一方で、低屈折率のエアロゲルでは発光量が一桁程度小さいため、従来型の検出器で用いられる間接光による集光は適さず、側面への

配置が必要な PMT を用いるのは困難であると考えられる。

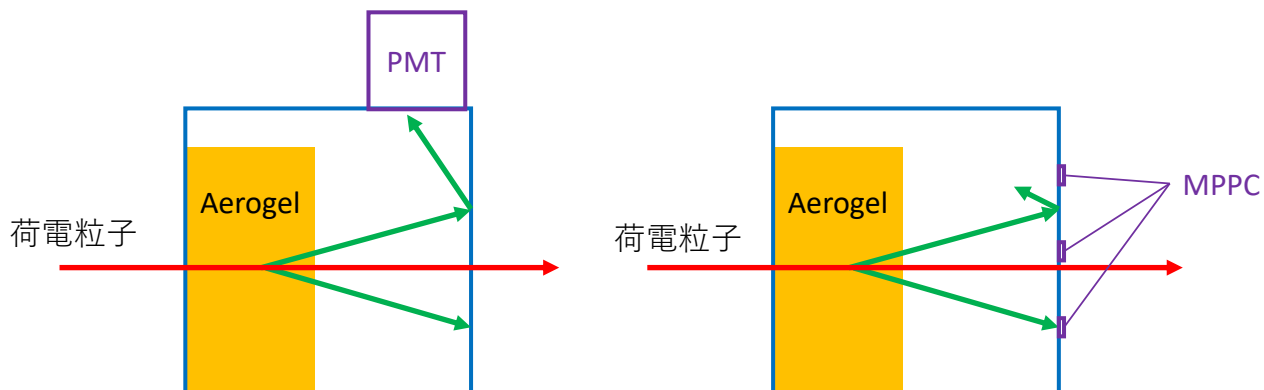


図 2.5: PMT を用いた閾値型 AC 検出器 (左) と MPPC を用いた閾値型 AC 検出器 (右) の概要図。

本研究では、この低い発光量を克服するために MPPC を用いた検出器をデザインした。チェレンコフ放射は粒子の進行方向に対して起こるため、図 2.5 の右図のように、複数個の MPPC あるいは MPPC アレイを検出器の正面に配置する。チェレンコフ放射を起こさない速度の荷電粒子が直接 MPPC を通過するとき、その影響は通過した 1 つの MPPC のみに限られ、他の MPPC では光は検出されない。一方、輻射体でチェレンコフ放射を起こした場合は、チェレンコフ光が広がるため複数の MPPC で検出される。このように、複数の MPPC のヒット情報 (MPPC の多重度) を利用することで、チェレンコフ放射の有無の区別が可能である。

他にも MPPC を用いるメリットはいくつかある。一つ目は、MPPC は PMT に比べて光子に対する検出効率が高く、低屈折率のエアロゲルからの少ない光子をより効率的に測定できる点である。二つ目は、チャーム・バリオン・スペクトロメータの電磁石の漏れ磁場の影響を回避できる点である。エアロゲル・チェレンコフ検出器は漏れ磁場中に置かれるため、PMT では磁場中で光電子の検出効率が減少してしまうが、MPPC は影響を受けないため、光電子数を維持できる。しかし、一方で、MPPC は受光面積が小さいというデメリットもあり、小さい受光面で効率よく光を検出できる MPPC の配置を考える必要がある。次の節で後述するライト・コーンによって、小さい受光面積を補うことを考案した。もう一つのデメリットは暗電流が多いという点であるが、これは MPPC の多重度を利用することで影響を低減することが可能と考えられる。

本研究では、浜松ホトニクス製の MPPC (S13360-6075PE [10]) を 9 個使用したエアロゲル・チェレンコフ検出器と MPPC アレイ (S13361-3050AE-08 [11]) を 1 つ使用したエアロゲル・チェレンコフ検出器を製作し、テスト実験を行った。S13360-6075PE と S13361-

3050AE-08の基本的情報を表 2.1 に示す。S13360-6075PE と S13361-3050AE-08 の構造図を、それぞれ図 2.6 と図 2.7 に示し、オーバー電圧 3 V のときの検出効率の波長依存性を、それぞれ図 2.8 と図 2.9 に示す。MPPC は信号が出始めるブレイクダウン電圧 (V_{br}) より高い電圧をかけて使用するものであり、オーバー電圧 (V_{ov}) とは、MPPC への印加電圧 (V_{op}) からブレイクダウン電圧を引いたものである。

$$V_{ov} = V_{op} - V_{br} \quad (2.5)$$

今後、MPPC の電圧設定の記述は、このオーバー電圧 (V_{ov}) を用いる。例えば、オーバー電圧 3 V の場合は、 $V_{ov} = +3$ V と記述する。

表 2.1: MPPC の基本情報

| | S13360-6075PE | S13361-3050AE-08 |
|---------|-----------------------|-----------------------|
| サイズ | 6 mm × 6 mm | 3 mm × 3 mm |
| ピクセルピッチ | 75 μ m | 50 μ m |
| タイプ | 表面実装型 | MPPC アレイ (8 × 8) |
| 窓材の材質 | エポキシ樹脂 ($n = 1.55$) | エポキシ樹脂 ($n = 1.55$) |
| 窓材の厚さ | 0.3 mm | 0.1 ± 0.05 mm |

2.2.4 ライト・コーン

本研究で開発を行った MPPC を用いたエアロゲル・チェレンコフ検出器では、MPPC を正面に配置することで、放出されるチェレンコフ光を効率的に測定することを目指す。読み出しチャンネル数の増大を抑制するために、少ない個数の MPPC で光の検出を目指す場合、MPPC が覆う面積領域は小さくなるため、チェレンコフ光を狭い空間領域に集め、より多くの光を検出する手法を用いた。効率的な集光のために、集光用ライト・コーンを用いた検出器を考案した。コーンの内面にアルミナイズド・マイラー等を貼り付け、鏡面反射を利用することによって、チェレンコフ光を集光する。

本研究では、ライト・コーンを用いない試作機 (図 2.10 の左図) とライト・コーンによる集光を利用した試作機 (図 2.10 の右図) でそれぞれ測定及びシミュレーションを併用して性能評価を行った。これらの試作機の製作、測定及び性能評価に関しては後の章で詳しく述べる。

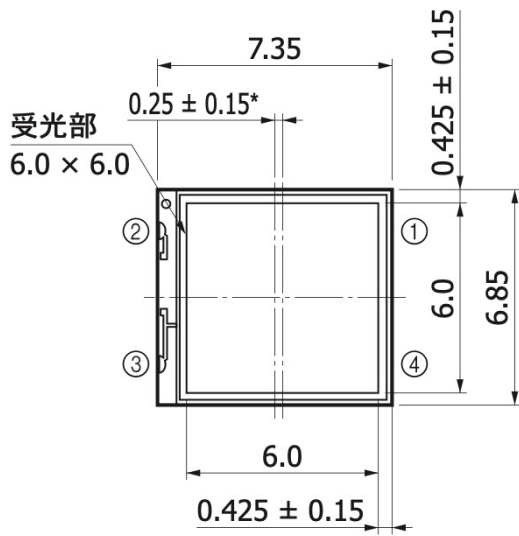


図 2.6: S13360-6075PE の MPPC の構造を示す図面 [10]。単位は mm。

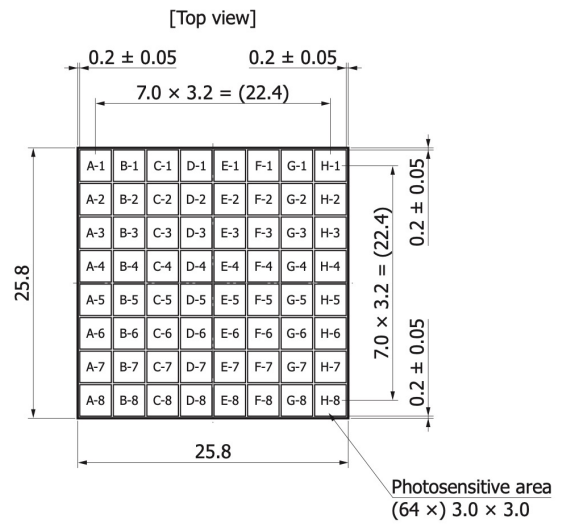


図 2.7: S13361-3050AE-08 の MPPC の構造を示す図面 [11]。単位は mm。

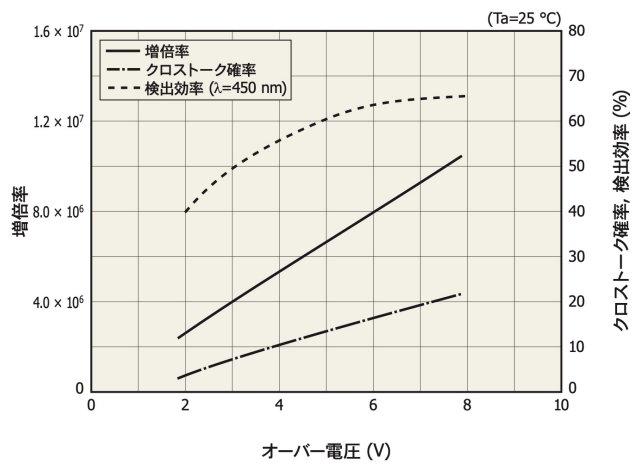
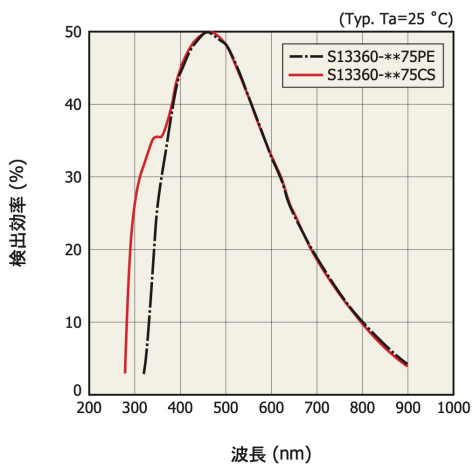


図 2.8: S13360-6075PE の検出効率の波長依存 (左) と各特性のオーバー電圧依存 (右) [10]。

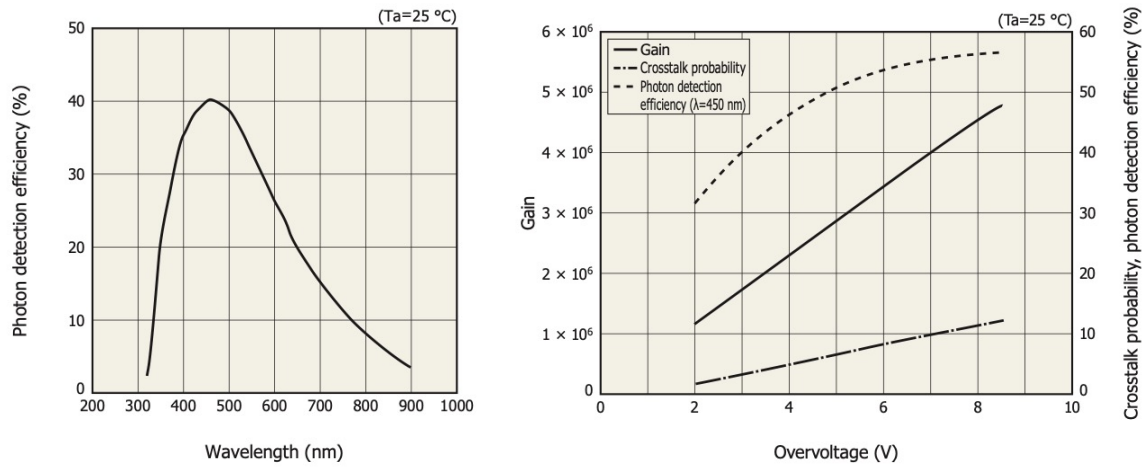


図 2.9: S13361-3050AE-08 の検出効率の波長依存 (左) と各特性のオーバー電圧依存 (右) [11]。

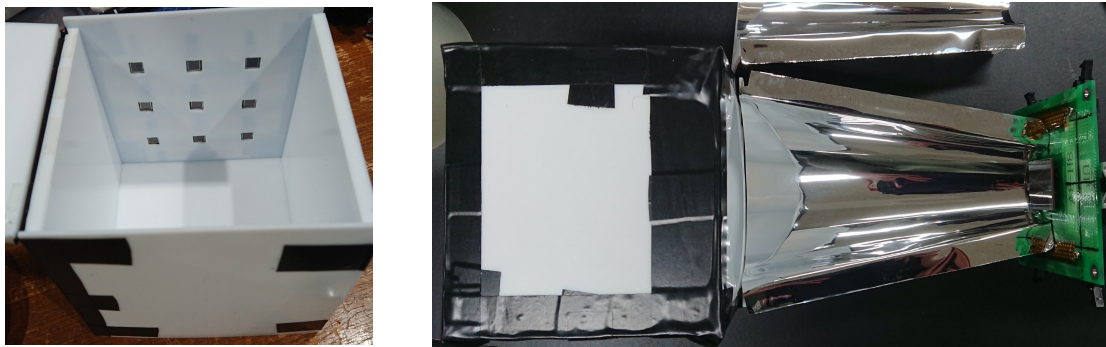


図 2.10: MPPC を用いた試作検出器。左図はライト・コーンを用いない試作機であり、検出器上面を開いている。右図はライト・コーンを用いた試作機であり、ライト・コーンの上半分を開いている。

第3章 MPPCを用いたエアロゲル・チェレンコフ検出器

3.1 目的

最初に、MPPCを用いた閾値型エアロゲル・チェレンコフ検出器が粒子識別検出器として十分に機能するかの調査を目的とした、試作機によるテスト実験を行った。複数のMPPC情報(MPPCの多重度)を利用することで、チェレンコフ光の有無の区別が可能であるかを調査する。さらにMPPCの多重度の情報の利用により、暗電流の影響がどの程度低減できるかの調査も合わせて行った。また、実機は標的下流側の散乱粒子を検出するため、粒子の通過位置に依らず検出効率が一定となるようにデザインする必要がある。受光面積が小さいMPPCを用いると、粒子の通過位置による影響が出る可能性があるため、粒子の通過位置の影響も調べた。

3.2 MPPCを用いた試作機の製作

3.2.1 反射材

本研究におけるエアロゲル・チェレンコフ検出器では、粒子の入射方向に放出されるチェレンコフ光を効率的に測定するため、MPPCを正面に配置する。加えて、従来の閾値型エアロゲル・チェレンコフ検出器と同様に検出器内壁での乱反射による集光も行った。本研究の試作機では、乱反射材としてフッ素樹脂であるナフロンを用いた。ナフロンはTOMBO No.9000-S [12]のナフロン板である。厚さ5 mmと2 mm(エアロゲル設置用の蓋部分)のナフロン板で箱を製作し、その箱の中にエアロゲルを配置することで、検出器内壁で乱反射したチェレンコフ光も合わせて測定した。製作したナフロンの箱を図3.1に示す。

3.2.2 シリカエアロゲル

MPPCを用いたエアロゲル・チェレンコフ検出器が閾値型の粒子識別検出器として機能するかを調べた。試作機では光量の多い屈折率 $n = 1.05$ の透明度の高いクリアタイプのシリカエアロゲルを使用した。厚さ1 cmのエアロゲルを5枚を使用し、粒子の入射方向に厚さ5 cmとした。使用した5枚のエアロゲルの製作時点での屈折率や透過長の情報を表3.1にまとめた。

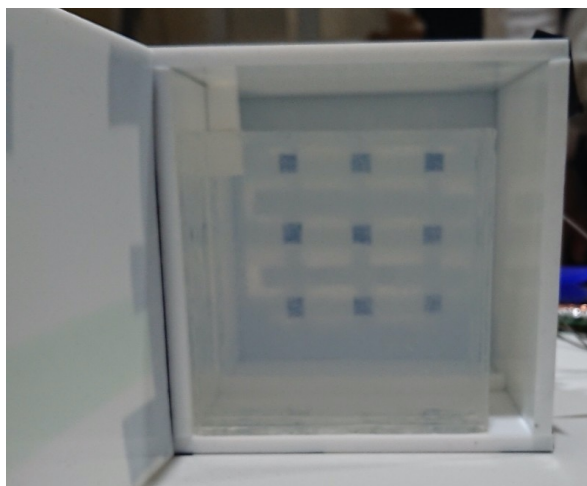


図 3.1: 実験で用いた試作検出器。箱部分はナフロンを使用している。奥に見える色の濃い小さな9つの四角い部分がMPPCである。箱の中には $n = 1.05$ のクリアタイプのエアロゲルが5枚 (厚さ 5 cm) 入っている。

表 3.1: $n = 1.05$ のエアロゲルの特性

| エアロゲルの個体番号 | 屈折率 | 透過長 [mm] (at 波長 400 nm) |
|------------|--------|-------------------------|
| PDR12-1b | 1.0486 | 42.6 |
| PDR12-2a | 1.0490 | 42.0 |
| PDR12-3b | 1.0487 | 42.6 |
| PDR12-4a | 1.0487 | 43.3 |
| PDR12-5c | 1.0487 | 42.7 |

3.2.3 MPPC

型番 S13360-6075PE の MPPC を 9 個使用した。9 個の MPPC を均等かつ対称になるように、MPPC の中心を 30 mm 離して正方形に設置した。3 つの MPPC が 1 つの基板に配置され、それぞれの MPPC からの信号を読み出す。この基板を 3 枚使うことで、9 個の MPPC を読み出した。図 3.2 に 1 つの MPPC に対する読み出し回路図を示す。この基板からの MPPC の信号は個別にアンプを通した後にディスクリミネータでデジタル信号にし、TDC 情報を取得した。

3.2.4 試作機のデザイン

ビームから見て正面に MPPC を配置するために、ナフロンで作った箱の正面に MPPC をはめ込む穴を開け、その穴から MPPC の受光面が覗く形とした。MPPC の受光面はナフロン板より、1 mm 程度奥側に配置されている。図 3.1 の厚さ 5 cm のエアロゲルの奥に見える 9 つの四角がそれぞれの MPPC である。MPPC の配置は図 3.3 のようにした。図 3.3 は粒子の入射方向から見た検出面の図であり、それぞれの MPPC には図の通り番号を割り振った。

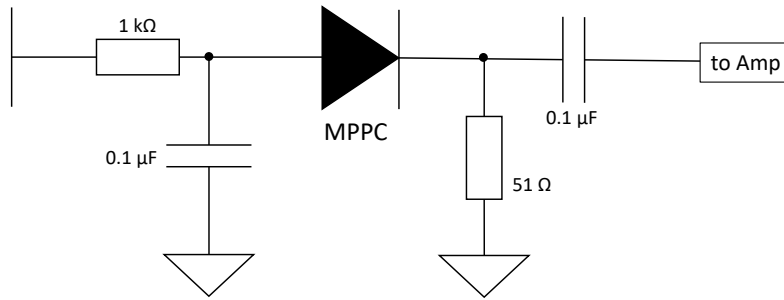


図 3.2: MPPC の読み出し回路図。

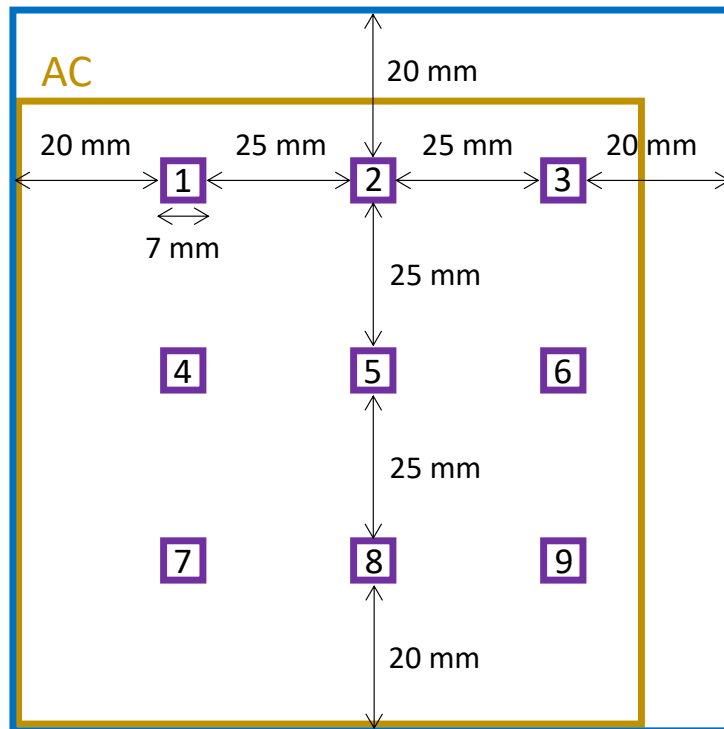


図 3.3: 試作 AC 検出器の MPPC の配置。ビームに乗って見た図。この図の紫の四角はそれぞれ MPPC であり、図に示すように MPPC に番号を割り振った。

テスト実験の際には、エアロゲルの位置を入射粒子の方向から見て左下に片寄せ、通過位置依存性を測定した。また試作検出器のナフロン箱はビーム方向に 11 cm の厚さで製作し、チェレンコフ光が広がりを持って検出面に到達するように、エアロゲルを箱の入射粒子方向の上流側に寄せて配置した。最上流でエアロゲルから発生したチェレンコフ光は半径 36.3 mm まで広がるため、図 3.3 の MPPC の配置から複数の MPPC において光が検出できると期待され、検出器中心に粒子が入射するとき、MPPC2, 4, 6, 8 の 4 つの MPPC で直接の光が検出される。

3.3 SPring-8 LEPS における試作機の性能評価実験

3.3.1 性能評価実験の概要と目的

2020 年 12 月に大型放射光施設である SPring-8 において電子または陽電子を用いた試作 AC 検出器のテスト実験を行った。実験は SPring-8 の LEPS ビームラインで行った。

SPring-8 の加速器の概要を図 3.4 に示す。SPring-8 は線形加速器、シンクロトロン、蓄積リングとニュースバルの 4 つの加速器で構成されている。蓄積リングは高輝度・硬 X 線の生成と利用を主目的とし、電子ビームをシンクロトロンで 8 GeV (80 億電子ボルト) まで加速し取り出し、蓄積リングの任意の場所に入射する。LEPS (Laser-Electron Photon at SPring-8) [14] では、蓄積リング内の 8 GeV の電子ビームに紫外レーザー光を入射し、逆コンプトン散乱を起こすことで、1.3–2.4 GeV/c の高エネルギー γ 線を生成する。本実験では、この γ 線を 1 mm 厚の鉛コンバーターに当て、発生した電子陽電子対を LEPS ビームラインに常設の電磁石によって曲げ、一方の電荷の粒子のみをテスト実験に用いた。

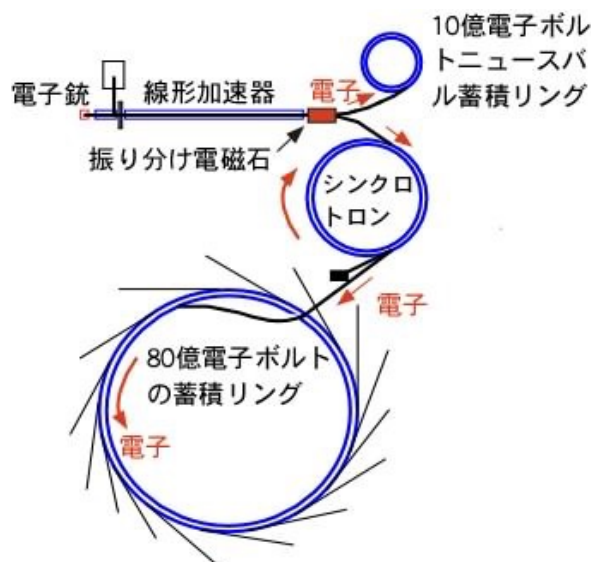


図 3.4: SPring-8 の加速器群 [13]。

3.3.2 セットアップ

実験ではMPPCを用いた試作AC検出器と、2台のトリガーカウンター(T1, T2)を用いた。全検出器をビームに沿って配置した。セットアップの概略図を図3.5に示す。試作AC検出器の前後に10 mm×10 mmのプラスチック・シンチレータを配置し、ビーム位置の決定やデータ取得のためのトリガー検出器として使用した。プラスチック・シンチレータは1.5 m程度離して設置し、試作AC検出器に垂直にビーム(電子または陽電子)が入射するようにした。MPPCからの信号はNIMモジュールのアンプ(ORTEC FTA820A)で増幅した。MPPCの信号に対するディスクリミネータの閾値は、MPPC毎の多少のゲイン違いもあり、 $V_{ov} = +3 V$ のときの0.3-0.5 p.e.の高さに設定した。各検出器のTDC情報の取得にはHUL High-Resolution TDC (HR-TDC) [15]を使用した。データ取得のトリガーは試作AC検出器の上流と下流のプラスチックシンチレータのコインシデンス事象で生成した。

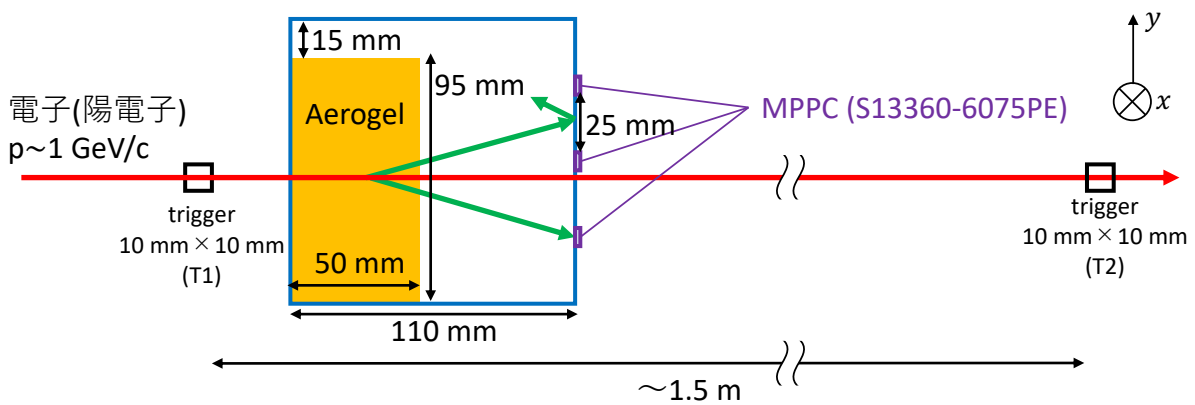


図 3.5: 実験セットアップの概略図。全検出器をビームに沿って配置し、試作AC検出器の前後に1.5 m離れたトリガー用のプラスチックシンチレータを配置した。

図3.6にビームの通過位置の測定を行った際に割り振ったビーム通過位置の番号を示す。実験ではビームが直接MPPCを通過するのを避ける条件で実施したため、図3.6の最も検出器中心に近い位置4では試作AC検出器の中心を避け、5 mm下とした。図3.6の左図はビームに乗って検出面を見たときの図であり、位置1-13ではビームを検出面に対して垂直に入射した。位置1-6と位置7-10の高さ方向の差は15 mmであり、他の位置についても同様に15 mmである。また図3.7の右図は検出器を上から見た図であり、位置14-16はビームに角度を持たせたときのビームの通過位置を示している。位置14-16のときのビームの高さは検出器中心より5 mm下で、中心(位置4)と同じ入射位置となる。位置14-16については、ビームが抜けた位置は、垂直に入射した場合の位置1-3に対応している。

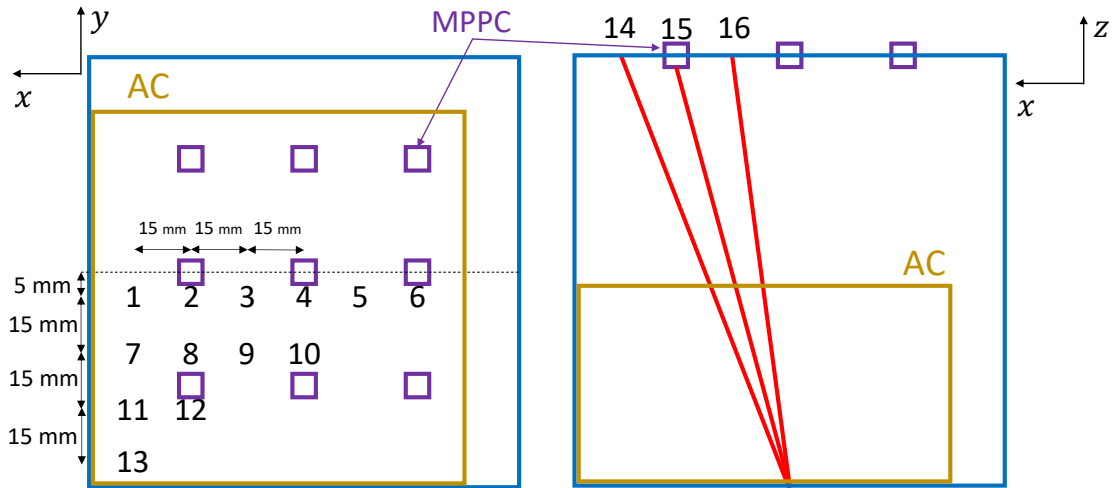


図 3.6: ビームの通過位置。左図はビームに乗って見た図。1-13 の位置に入射するとき、ビームは MPPC の面に垂直に入射した。右図は上から見た図。ビームに角度を持たせた 14-16 の測定を位置 1-6 と同じ高さである検出器中心より 5 mm 下にして行った。

3.4 解析手法

MPPC の多重度を用いて、測定の評価を行った。ここで多重度とは、1 粒子の通過によって同時に信号を出した MPPC の個数である。本実験では、MPPC を 9 個使用しているため、多重度の最大値は 9 である。

多重度の評価のために、まず TDC によるカットを行った。MPPC の Leading TDC の分布を図 3.7 に示す。図 3.7 において、177 ns から 187 ns に見られるピークがトリガーと同期した信号であるとして 10 ns の TDC 幅でカットし、MPPC がチェレンコフ光を検出した事象「Signal」とした。また同じ TDC 幅でピークからずれた部分 (190 ns から 200 ns) を暗電流によるバックグラウンド (Background) と仮定して解析を行った。9 個全ての MPPC で TDC の分布が同じ形状とチャンネル位置であったため、カットの条件も全ての MPPC で同じとした。イベント毎に 177 ns から 187 ns の 10 ns の時間幅の間に TDC の値を持つ MPPC の数を数え、MPPC の多重度とした。

多重度の閾値を設定し、閾値以上のイベント数の割合を検出効率とした。AC 検出器の多重度のヒストグラムに対して、定めた閾値より大きい多重度のイベントの数を N_{AC} とした。AC 検出器の前後に配置したカウンターによってトリガーされた全イベントをビームイベント数 (N_{Beam}) とすると、AC 検出器の検出効率 E は

$$E = \frac{N_{AC}}{N_{Beam}} \quad (3.1)$$

と定義される。この E を AC 検出器の性能評価に使用する。多重度の閾値は、暗電流などからのバックグラウンドの影響を十分に除去でき、検出効率が高くなるような値が望ましい。

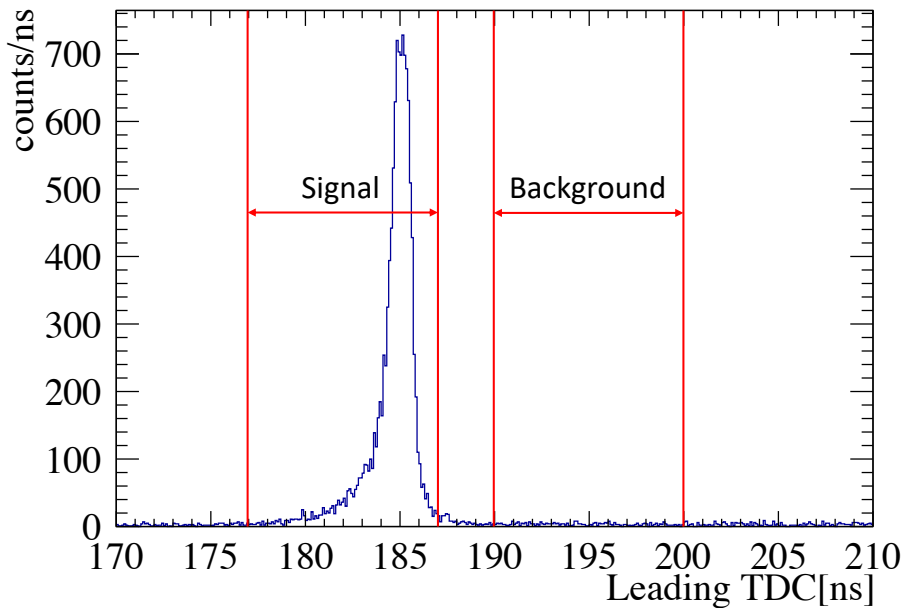


図 3.7: MPPC の Leading TDC の分布。177 ns から 187 ns のピークをトリガーと同期した信号 (Signal) であるとし、同じ幅でピークからずれた 190 ns から 200 ns を暗電流によるバックグラウンド (Background) として解析を行った。

3.5 結果と考察

3.5.1 MPPC の多重度

ビームの位置が図 3.6 の位置 4、オーバー電圧が 5.0 V のときの多重度を図 3.8 に示す。図 3.8 の左図は TDC カットを図 3.7 の「Signal」に選んだときの多重度である。分布を再現するガウス分布を仮定したフィットの結果、このときの多重度は 4.746 ± 0.011 であった。位置 4 にビームを入射したとき、チェレンコフ光の広がりを見ると、デザイン時の予想の通り最大で 4 つの MPPC に直接チェレンコフ光が入射している。多重度が 4.746 ± 0.011 であることから、直接のチェレンコフ光を検出する MPPC の他に、乱反射による光を検出した MPPC があると考えられる。一方で図 3.8 の右図は TDC カットを図 3.7 の「Background」に選んだときの暗電流による多重度で、完全なランダム事象であると仮定し、ポアソン分布でフィットを行った。フィットの結果、ポアソン分布の平均値は 0.197 ± 0.004 となった。暗電流による多重度 2 以上の割合は、およそ $1.00 \pm 0.07\%$ であり、複数のヒット情報を使用することで、この暗電流の影響は十分に低減できると考えられる。MPPC の暗電流の計数率はおよそ 1.3 MHz であり、10 ns の時間幅と 2 個以上の MPPC の多重度を用いて計算した割合 (1.4%) とほぼ一致する。

3.5.2 MPPC の多重度のオーバー電圧依存

ビームの位置を図 3.6 の位置 4 にして、MPPC への印加電圧を変化して測定を行った。図 3.9 に電圧毎の多重度の結果を示す。図 3.9 の横軸は印加電圧からブレイクダウン電圧

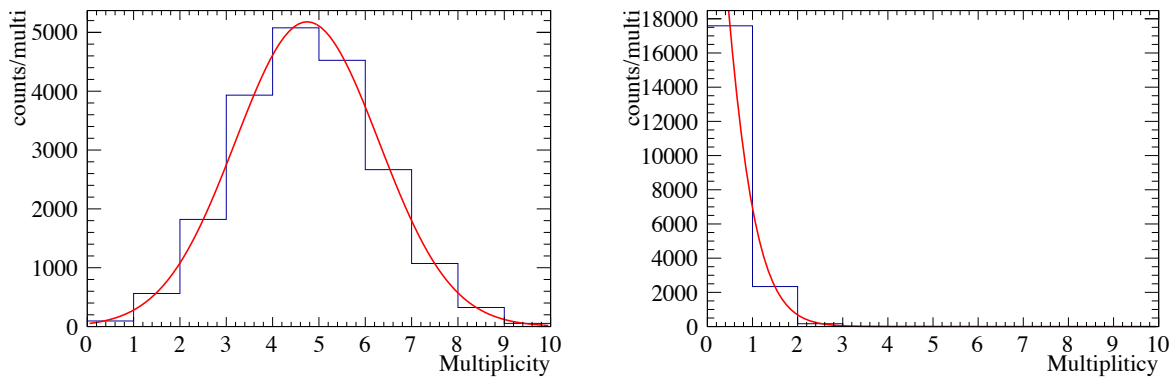


図 3.8: MPPC の多重度のヒストグラム。左図は図 3.7 の「Signal」に選んだときの多重度、右図は図 3.7 の「Background」に選んだときの多重度である。右図はガウス関数によるフィット、左図はポアソン分布によるフィットを行った。

を引き算したオーバー電圧 V_{ov} である。赤い点はビームによる信号があるとき (Signal) の多重度、黒い点は暗電流のみ (Background) による多重度である。 $V_{ov} = +4.5$ V あたりで MPPC の多重度は飽和しており、発生したチェレンコフ光が十分に検出できていると考えられる。また暗電流による多重度は、 $V_{ov} = +4.5$ V のとき 0.189 ± 0.005 で、 $V_{ov} = +6.0$ V のとき 0.205 ± 0.004 であり、印加電圧が高くなっても、大きく増加しなかった。後の測定では、十分に光が検出できると考えられる $V_{ov} = +5.0$ V の電圧をかけて測定を行った。

3.5.3 MPPC の多重度のビーム入射位置依存

MPPC の面に垂直に入射し、ビームの通過位置を変えたときの多重度の結果をまとめたものを図 3.10 に示す。位置 13 に入射したときの多重度の分布は、他の位置 1-12 のときの分布と大きく異なり、ガウス分布を仮定したフィットを行えなかったため、位置 13 における MPPC の多重度の値は平均値を用いた。位置 1-12 のうち、多重度が最大となったのは、位置 5 のときで多重度は 5.198 ± 0.009 、最小となったのは、位置 12 のときで多重度は 3.48 ± 0.02 であった。位置 7, 11, 12 などの箱の端の方にビームが入射するときの多重度は他の位置に比べて小さくなるのが分かった。これは MPPC の配置の問題で、ビームが端に入射するほど、散乱や乱反射の影響を受けない直接のチェレンコフ光が検出できる MPPC の数が少なくなるためであると考えられる。また、ナフロン反射率も MPPC の数の少なさを補えるほど十分ではないと考えられる。

ビームに角度を持たせて入射し、通過位置を変えたときの多重度の結果を図 3.11 に示す。比較のために位置 1, 2, 3 の場合の多重度の値も同時に示した。このときビームの高さ方向は位置 1-6 と同じく、検出器中心から 5 mm 下の位置である。図 3.11 から、MPPC の面に対して垂直に入射した場合と角度を持たせて入射した場合とでは多重度はほとんど変化しなかった。これは、MPPC の面に当たるチェレンコフ光の分布が、ビームを垂直に入射した場合と角度を持たせて入射した場合とで同程度の広がりになっているためだと考えられる。

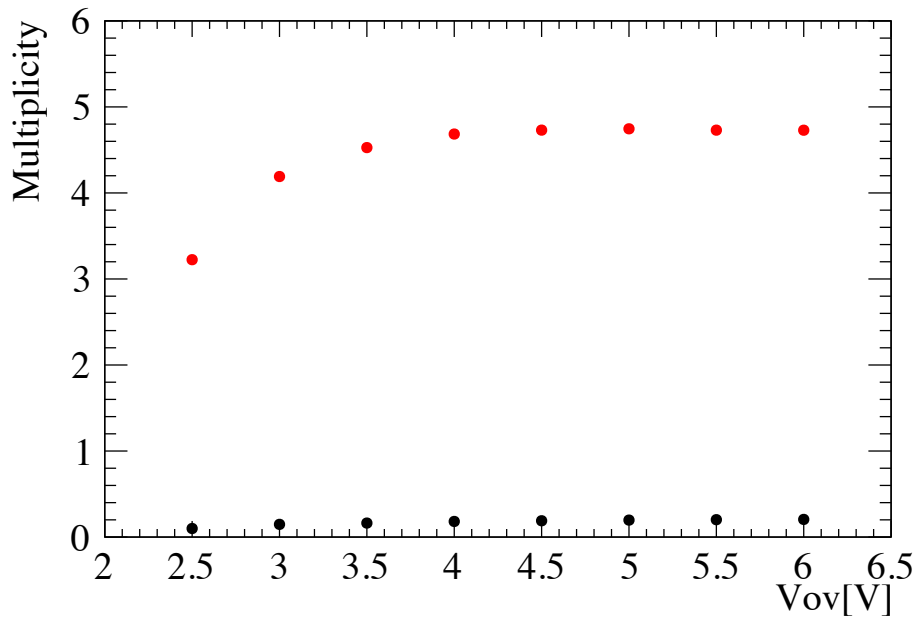


図 3.9: 多重度のオーバー電圧 (V_{ov}) 依存。赤点は図 3.7 の「Signal」に選んだときの多重度、黒点は図 3.7 の「Background」に選んだときの多重度である。

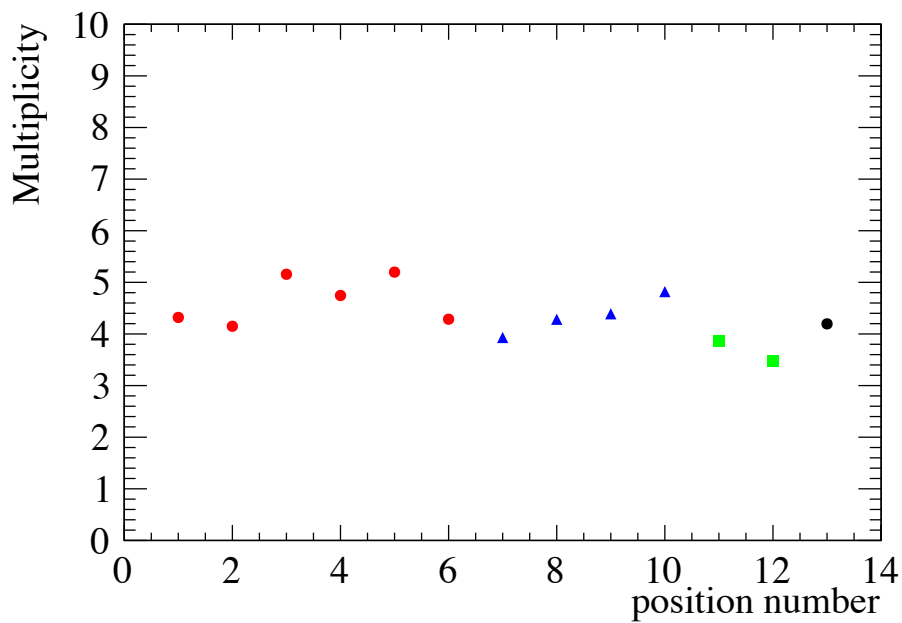


図 3.10: 多重度のビーム通過位置依存。赤の丸印は検出器中心より 5 mm 下、青の三角印は検出器中心より 20 mm 下、緑の四角印は検出器中心より 35 mm 下、黒の丸印は検出器中心より 50 mm 下に電子ビームが通過するときの多重度。

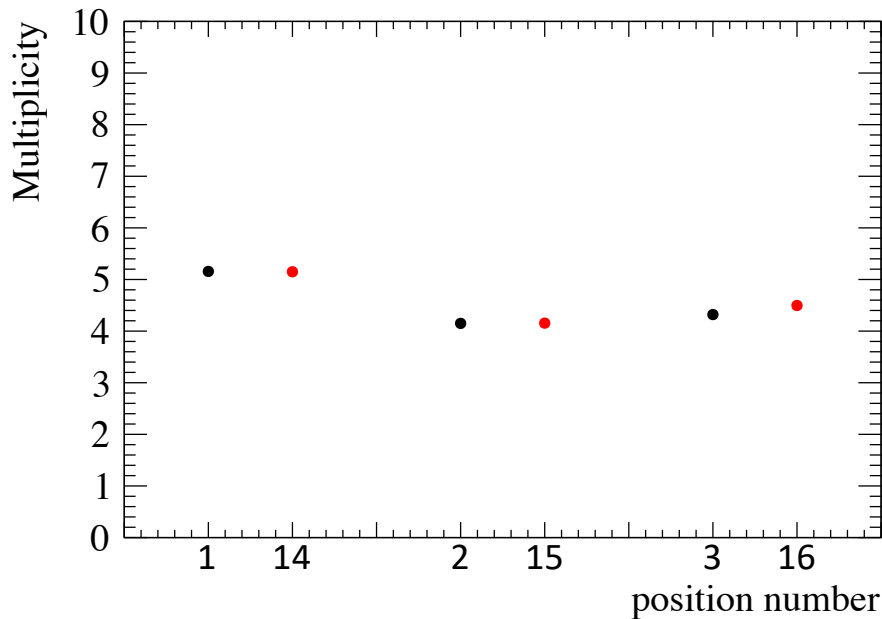


図 3.11: 多重度の角度を持ったビームの通過位置依存 (赤)。比較のために MPPC の面に垂直に入射した場合 (黒) も示している。

3.5.4 エアロゲルを除いての測定結果

図 3.12 に位置 4 のときのエアロゲルの有無による多重度のヒストグラムを示す。図 3.12 の左図はエアロゲルが厚さ 5 cm 入っている場合の多重度の分布であり、右図はエアロゲルがない場合の多重度の分布である。空箱のデータ取得の際、端に位置する MPPC1 が外れてしまい、図 3.12 のヒストグラムを作る解析には MPPC1 は使用していないため、暗電流による MPPC の多重度は小さくなる。(空箱は全ての測定の最後に実施。その他のデータ解析は全て MPPC1 を使用している。) 図 3.12 の右図のように、輻射体なしの空箱であったとしても、MPPC が暗電流以上に光を検出していることが分かる。空箱での多重度は 0.57 ± 0.07 であり、このときの暗電流による多重度 0.176 ± 0.006 に比べて大きい値となった。考えられる可能性としては、箱内部の空気からのチェレンコフ光やナフロン箱からのシンチレーション光があり、空気からのチェレンコフ光はその広がりを見ると MPPC5 で検出されるはずである。しかし図 3.13 に示す空箱での各 MPPC のヒットの割合では、全ての MPPC でヒットの割合がほぼ同じであり、MPPC5 でも空気からのチェレンコフ光の寄与は少ないと考えられる。MPPC5 が空気からのチェレンコフ光を検出していない可能性がある。詳しくはシミュレーションの節 3.6.6 で考察する。空箱において多重度が暗電流の影響以上に大きくなるのは、空気からのチェレンコフ光と、ナフロン箱からのチェレンコフ光及びシンチレーション光であると考えられる。

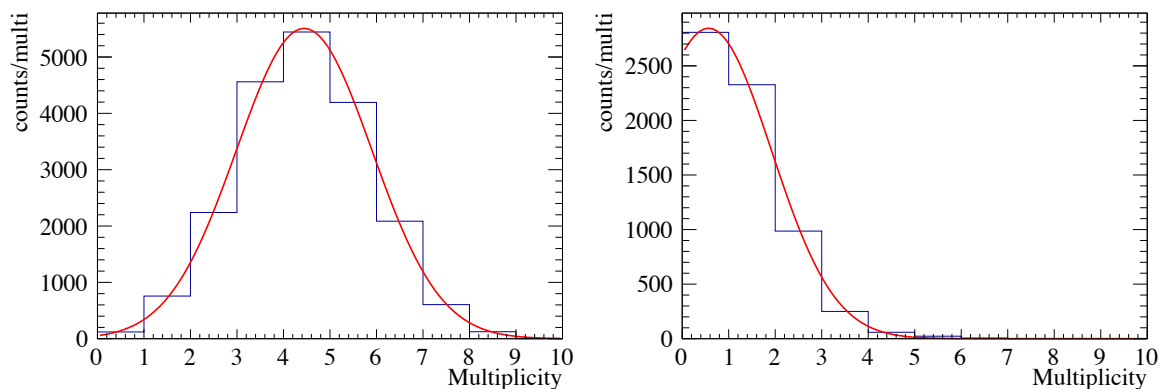


図 3.12: 位置 4 にビームを入射したときの MPPC の多重度の分布。左図は $n = 1.05$ のエアロゲル 5 cm を入れての測定、右図はエアロゲルなしでの測定。

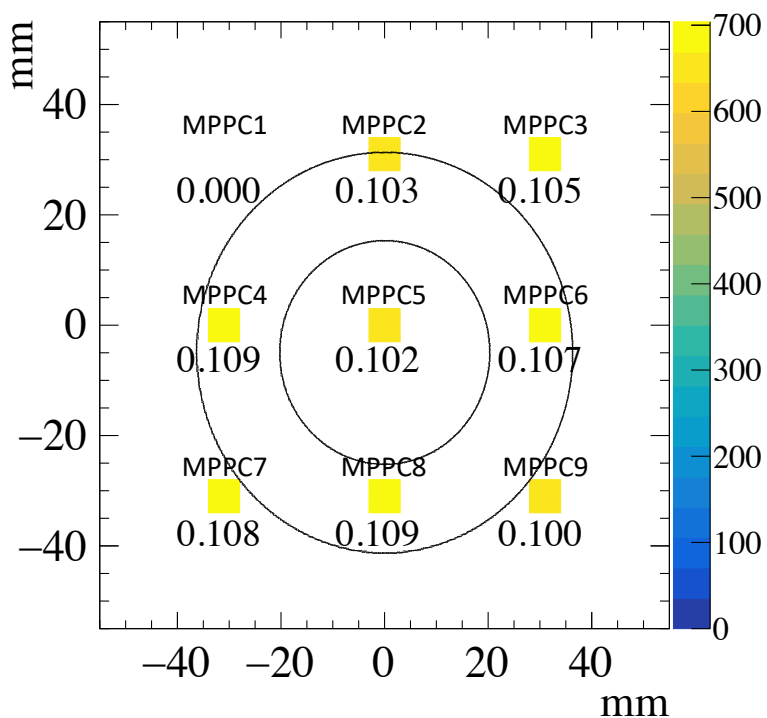


図 3.13: 位置 4 での空箱での測定の各 MPPC のヒットの割合。MPPC1 は空箱での実験時に外れたため、割合は 0 となっている。

3.5.5 検出効率

図 3.14 にオーバー電圧毎の検出効率を示す。図 3.14 の左図は図 3.7 の「Signal」に選んだとき、右図は図 3.7 の「Background」に選んだときの検出効率であり、赤の丸印は閾値 2 の検出効率、青の三角印は閾値 3 の検出効率である。印加電圧が大きくなるにつれて、暗電流による多重度の割合は若干増加となるが、 $V_{ov} = +5.0$ V 付近ではほとんど変わらない。 $V_{ov} = +5.0$ V で、位置 4 での AC 検出器としての検出効率は、閾値 2 で $96.74 \pm 0.13\%$ 、閾値 3 で $87.7 \pm 0.2\%$ となった。このとき、暗電流による MPPC の多重度が 2 以上の割合は $1.00 \pm 0.07\%$ 、3 以上の割合は $0.18 \pm 0.03\%$ であり、暗電流による MPPC の多重度は十分に小さいため、閾値 2 で十分に影響を低減できる。

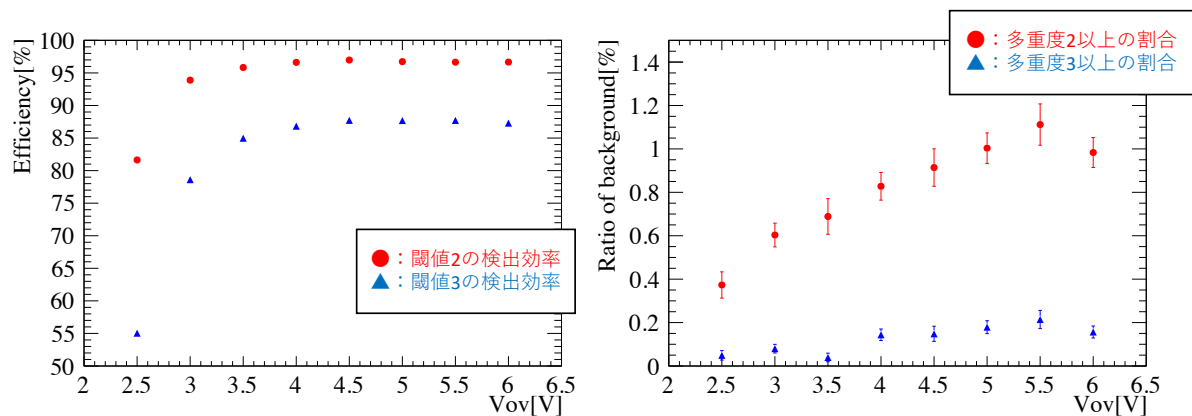


図 3.14: 検出効率 (左) と暗電流によるバックグラウンドの割合 (右) のオーバー電圧依存。赤の丸印は閾値 2 の検出効率 (左) または多重度 2 以上の割合 (右) であり、青の三角印は閾値 3 の検出効率 (左) または多重度 3 以上の割合 (右) である。

また図 3.15 には、ビーム通過位置毎の検出効率を示す。閾値 2 (閾値 3) で検出効率が最も高いのは、位置 3 (位置 5) のときであり検出効率は $98.82 \pm 0.08\%$ ($94.65 \pm 0.14\%$) であった。一方で閾値 2 (閾値 3) で検出効率が最も低かったのは、位置 12 のときであり検出効率は $85.5 \pm 0.5\%$ ($63.2 \pm 0.7\%$) であった。位置 12 は検出器の端であり、ビームが検出器の端に入射するほど、多重度が小さくなり、検出効率も低くなる。検出器中心に近い位置にビームが入射するときの検出効率は、検出効率 95% 以上を達成している。しかし、ビームの通過位置によって、検出効率が大きく異なり、検出器の端をビームが入射するとき、検出効率が大きく下がる。したがって、この試作機の光検出の方法は散乱粒子の識別を行う実機には向いていないことがわかった。

一方で、これらの多重度や閾値で選んだときの検出効率等の結果から、MPPC の多重度の情報を使用することで、チェレンコフ光の有無を判断する手法自体は適用可能であると考えられ、また MPPC の多重度の情報を使用することによって、暗電流の影響を低減

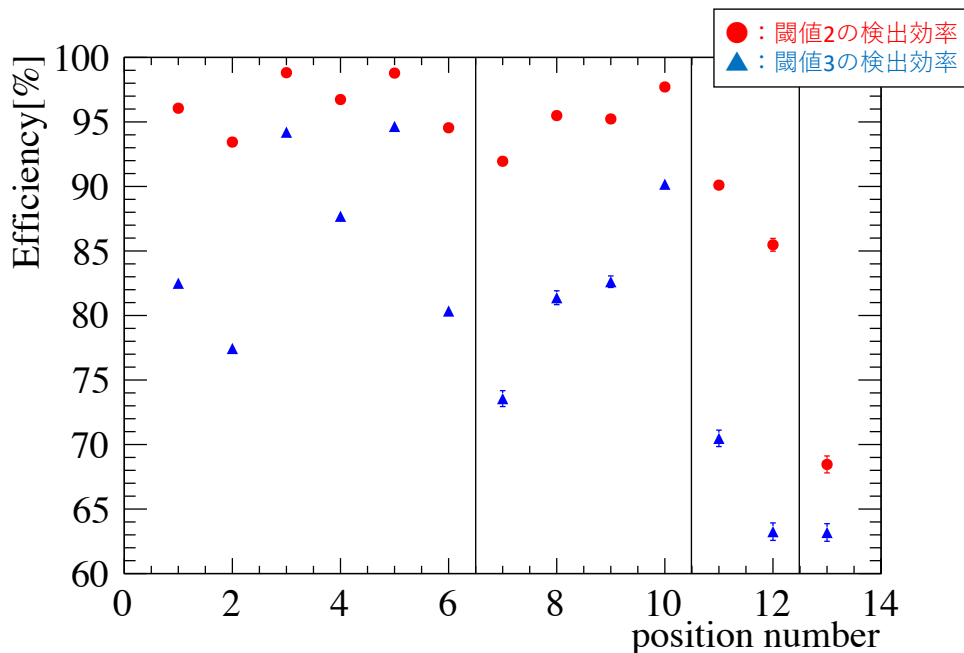


図 3.15: 検出効率のビームの通過位置依存。赤の丸印は閾値2の、青の三角印は閾値3のときの検出効率。

することは十分に可能であることが分かった。しかしながら、多重度の大きさが十分でないために、閾値型の粒子識別検出器の検出効率としてはまだ不十分である。また、粒子の通過位置によって検出効率が大きく変化してしまうことも課題である。これは、MPPCの小さな受光面積の影響で、十分な集光率を得ることができていないためである。さらに実機では、 $n = 1.007$ のエアロゲルを用いることを考えると、光量がこの実験に比べて15%程度まで減少し、多重度も小さくなることが予想される。そのため、検出器の構造にさらなる改良が必要であることが分かった。

3.6 Geant4でのシミュレーションによる試作機の再現

Geant4を用いたシミュレーションによって、試作機での測定結果の再現を試みた。シミュレーションを用いることで、検出したチェレンコフ光のMPPC内での入射位置やチェレンコフ光の経路など、実験では測定できない情報からも測定器性能の分析を行った。また、検出器の構造の改良点を考察した。

3.6.1 エアロゲルのパラメータ

エアロゲルのパラメータとしては屈折率は波長に依らず $n = 1.05$ を用いた。エアロゲルのサイズは実測値である $95 \text{ mm(縦)} \times 95 \text{ mm(横)} \times 50 \text{ mm(厚)}$ とした。また、透過長に関しては、多重度の透過長依存を調べる場合を除いて、表 3.1 に示した各エアロゲルの平均値、波長 400 nm で 42.6 mm を使用した。他の波長に関しては、波長の4乗に比例する波長依存を使用した。吸収長は、それぞれの波長で、透過長の1000倍として波長毎に与えた。

3.6.2 ナフロンに関するパラメータ

実験で用いた試作 AC 検出器は、乱反射を起こすためのナフロン箱にエアロゲルを入れた。エアロゲル中で散乱されたチェレンコフ光は、ナフロンで乱反射することにより MPPC で検出されるため、ナフロンの反射率も重要なパラメータである。ナフロンの光学的性質は測定していないため、ナフロンの反射率は実験の結果を再現する反射率をパラメータとして決定した。この際、反射率は波長 240 nm から 900 nm の範囲では波長に依らず一定とした。反射率の最適化では、 $V_{ov} = +5.0$ V で、ビーム通過位置が図 3.6 の位置 4 のときの MPPC の多重度と一致するように行った。そのときの反射率を本実験で用いたナフロンの反射率として、以降のシミュレーションで用いた。また、ナフロンは屈折率 $n = 1.35$ とし、吸収長を非常に短く設定したため、ナフロンでチェレンコフ放射が起きるが、ナフロン内で発生したチェレンコフ光は直ちに吸収される。ナフロンと他の物質との境界近くで発生したナフロンからのチェレンコフ光は、ナフロンに吸収されず、MPPC で検出される可能性がある。

3.6.3 MPPC のパラメータ

実験で用いた S13360-6075PE の特性を再現するように浜松ホトニクスのカタログから得られるパラメータを使用した。MPPC の検出効率に関しては、図 2.8 を用いた。 $V_{ov} = +3.0$ V のときの検出効率を波長 240 nm から 900 nm の範囲で、20 nm 毎に入力した。その他の電圧に関しては、図 2.8 の右図から各オーバー電圧での波長 450 nm の光の検出効率を用いて、検出効率が 450 nm の場合と同じ割合で、オーバー電圧に依存して増加するとした。表 2.1 から、窓材の屈折率 $n = 1.55$ 、厚さ 0.3 mm を使用し、窓材の実装も行った。

3.6.4 試作機を用いたテスト実験の再現

図 3.16 に Geant4 内に再現した AC 検出器を示す。試作 AC 検出器ではそれぞれの MPPC に受光面でない縁やナフロン箱との隙間があり、その部分では光は検出や反射も起こらないと考えられる。この縁や隙間に関しては、MPPC を実際よりも大きいサイズである 10 mm×10 mm で配置し、解析で受光面の領域である 6 mm×6 mm の位置に入った光のみを選ぶことにより、2 mm の隙間があるとして実装した。また、エアロゲルの配置に関しては、本実験の配置に合わせるため、上流側に寄せ、ビームから見て左下に合わせて配置を行った。

入射するビームの種類は電子とし、ビームの広がりには x 方向 (左右方向) にのみ 10 mm に一様に広がっているとした。これは実験において、 γ 線を鉛コンバーターに当て発生した電子の広がりには小さく、ビームとして用いた電子の広がりには磁石により水平に曲げたことにより生じたものであると考えたからである。そのため、 x 方向にはトリガーサイズである 10 mm の広がりを持つが、 y 方向には広がらないとした。加えて、 y 方向の広がりが大きくなるほど空気からのチェレンコフ光の MPPC5 への影響が大きくなるが、図 3.13 では MPPC5 のヒットの割合が小さいため、 y 方向の広がりは小さいと考えられる。測定の際のトリガーカウンターは十分に離れているため、ビームの立体角は十分に小さいので、シミュレーションでは電子は MPPC 面に対して垂直に入射するとした。電子の運動量は LEPS ビームラインの常設の電磁石の磁場設定から想定される 1 GeV/ c とした。

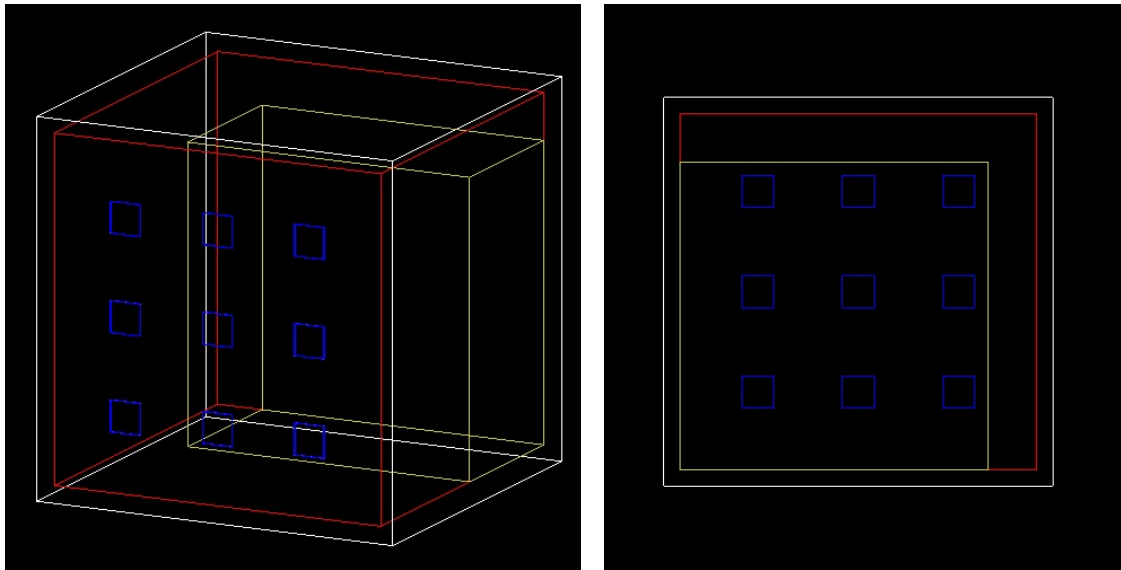


図 3.16: Geant4による試作検出器の再現。黄はエアロゲル、赤は空気、白はナフロン箱、青はMPPCである。右図はビームに乗って見たときの図である。

実際の測定におけるMPPC毎のヒットの割合を図3.17の右図に示す。図3.17は位置4にビームが入射したときであり、右図の2つのリングは、この位置をビームが通過したときに左図のようにエアロゲルの最上流と最下流で発生するチェレンコフ光の検出面での広がりを示すリングである。リングの広がりにはエアロゲルで発生したチェレンコフ光と、エアロゲルから空気($n = 1.000293$)に移るときの屈折を考慮して計算した。MPPC2はエアロゲルから発生したチェレンコフ光を直接受ける位置に配置しているにもかかわらず、光を検出する割合が非常に小さく、MPPC1, 3とほぼ同じ割合である。またMPPC7, 9では、エアロゲルから発生したチェレンコフ光を直接受けない位置にもかかわらず、光を検出する割合が大きい。原因としてはビームの位置が検出器の下側にシフトしていた可能性が考えられ、その場合MPPC2はリングから外れるためヒットの割合は小さくなり、MPPC7, 9ではリング内に入りヒットの割合は大きくなる。測定結果を再現するように、ビーム通過位置を下側にシフトさせたシミュレーションも行った。

3.6.5 解析手法

シミュレーションでは、光検出器に入射した光は全て検出するが、実際のMPPCでは、全ての光を検出することはできず、波長毎に検出効率が異なるため、検出した光のうち解析に用いる光の選択を行う必要がある。MPPCの波長毎の検出効率を図2.8から読み取り、シミュレーションでランダム生成した0-100%の値と比較することで、解析に用いる光を選択した。

先に述べたように、光を検出する構造物として、MPPC周辺の2 mmの隙間の効果を実装するため、実際の受光面の大きさである6 mm四方に対して、10 mm四方のMPPCを配置している。図3.18に10 mm×10 mmの領域での9個のMPPCそれぞれが検出した光のヒットパターンを示す。図3.18で赤で囲まれている部分が実際の受光面の大きさであるので、この内部に入っている光のみを計数する。1電子の通過によって、1つのMPPC

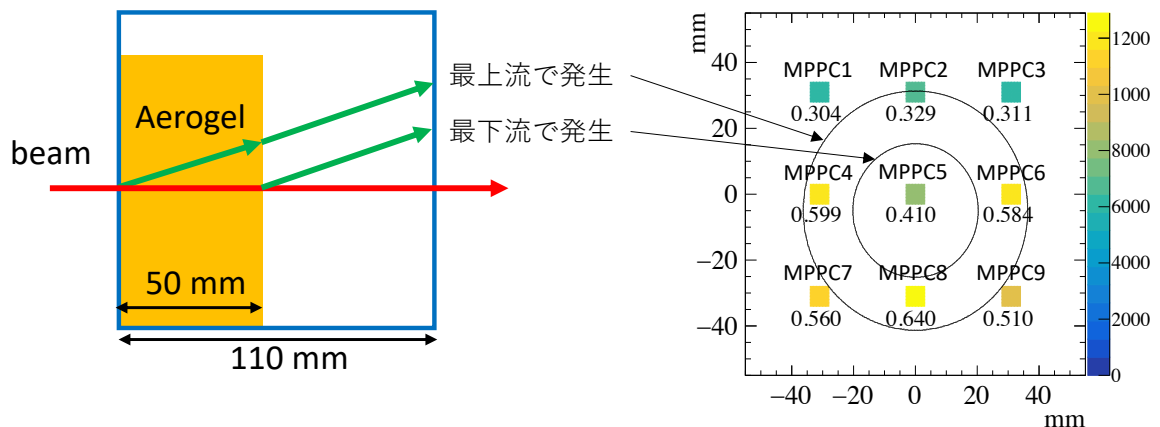


図 3.17: 各 MPPC が信号を出した割合 (右)。右図に示したリングは、左図のチェレンコフ光放出の模式図のようにエアロゲルの最上流及び最下流の位置で放出されたチェレンコフ光が MPPC の面に到達したときの広がりを示している。チェレンコフ光の到達位置は屈折率 $n = 1.05$ のエアロゲルから放出されるチェレンコフ角から求めた。光がエアロゲルから空気に移るときに屈折も考慮した (ここで空気の屈折率は $n = 1.000293$ とした)。

に複数の光子が入る場合があるが、多重度の評価においては、1つの MPPC に複数の光子が入った場合であっても、MPPC の多重度を 1 のみの増加として扱った。

多重度のヒストグラムを作る解析では暗電流の再現も行った。再現には実際の MPPC からの暗電流の結果を用いるため、図 3.7 の TDC のカットを「Background」に選び、各 MPPC の暗電流による信号を出す確率を求めた。シミュレーションでランダム生成した 0-100% の値と比較することで、暗電流による MPPC の多重度を求めた。この方法によって作った暗電流による多重度のヒストグラムを図 3.19 に示す。これは図 3.8 の右図の結果を再現している。

3.6.6 結果と考察

シミュレーションにおけるナフロン箱の反射率を最適化するため、MPPC の多重度の反射率依存を調べた。位置 4 に電子を入射したときの反射率毎の多重度の結果を図 3.20 に示す。実験で用いた試作機の位置 4 での多重度が 4.746 ± 0.011 であり、箱の反射率を 81.2% としたときの多重度は 4.746 ± 0.014 となり、測定結果と一致する。

また箱の反射率を 81.2% で固定し、エアロゲルの透過長を変えて、シミュレーションを行った。位置 4 に電子を入射したときのエアロゲルの透過長毎の MPPC の多重度の結果を図 3.21 に示す。この結果、透過長が長いほど、多重度が大きくなる傾向にはあるが、エアロゲルの厚さが 5 cm 程度であれば、透過長 35 mm から 42.6 mm の範囲では透過長の多重度への影響は非常に小さいことが分かった。この範囲で多重度が最大となったのは、透過長 39 mm のときの 4.754 ± 0.014 であり、最小になったのは、透過長 35 mm のときの 4.686 ± 0.014 であった。これらのシミュレーションの結果から、ナフロン箱の反射率は 81.2%、屈折率 $n = 1.05$ のエアロゲルの透過長は測定値と同じ 42.6 mm (波長 400 nm のとき) とした。

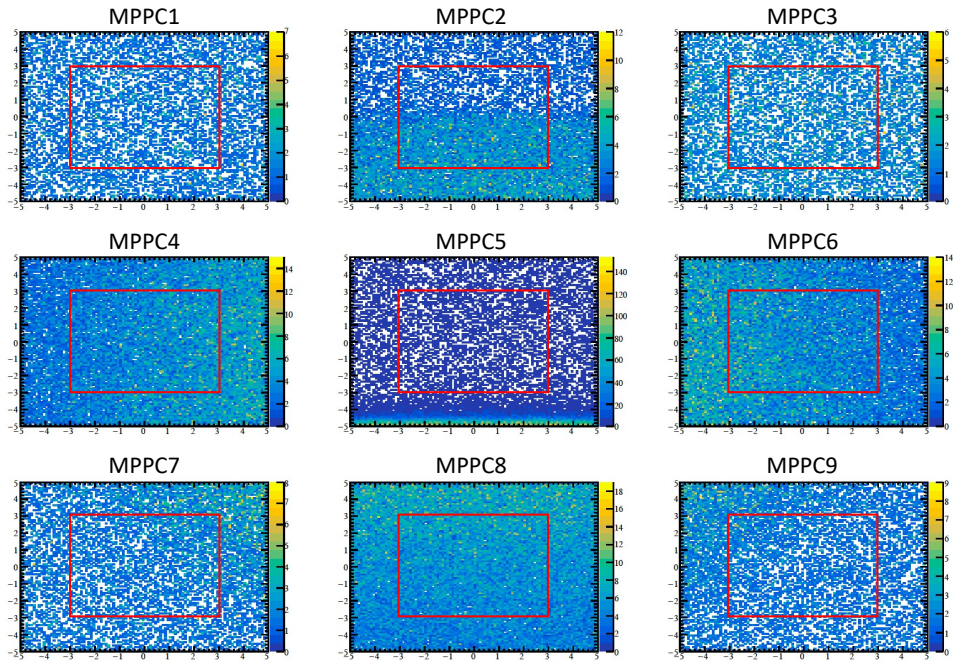


図 3.18: 各 MPPC へ入射する光のヒットパターン。図はそれぞれの MPPC 部分で 10 mm × 10 mm の領域に入射した光のヒットパターンであり、隙間の効果を実装するため赤で囲まれた実際の受光面 (6 mm × 6 mm の領域) よりも大きいサイズとしている。多重度のヒストグラムを作るときには受光面に入射した光のみを計数した。

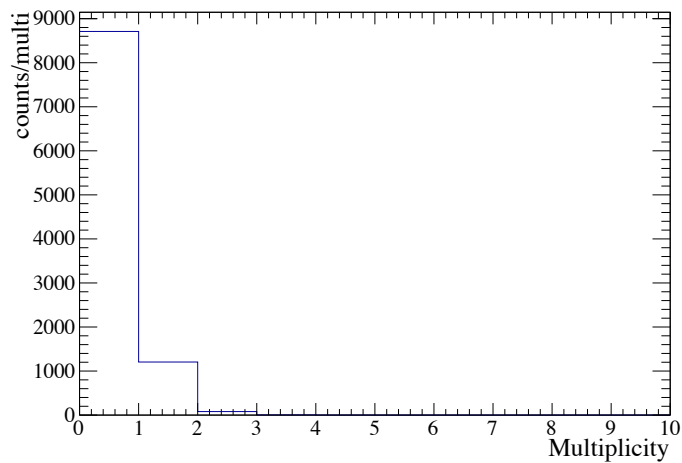


図 3.19: シミュレーションで再現した暗電流による多重度。

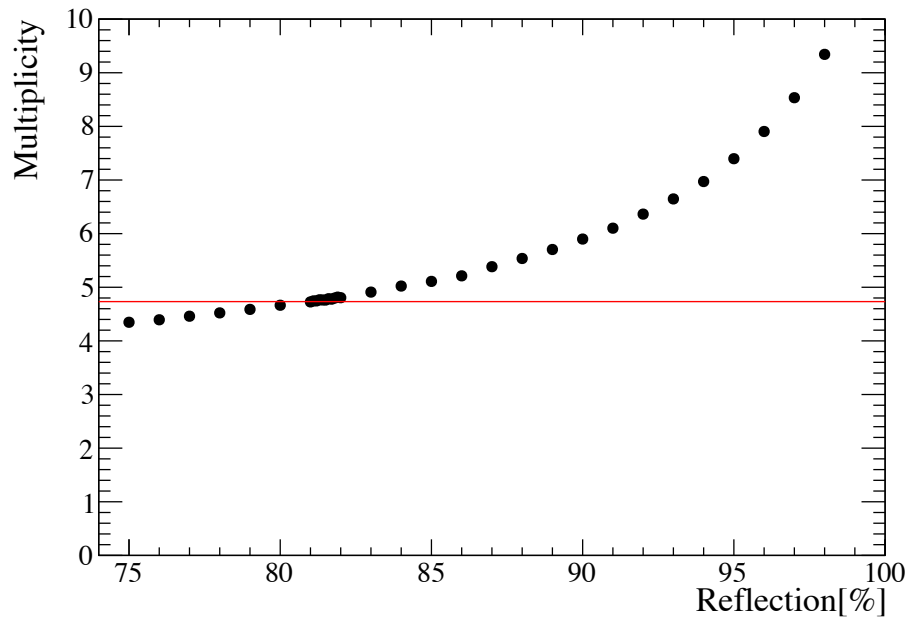


図 3.20: MPPC の多重度のナフロンの反射率依存。赤線は位置 4 における測定値。横軸はナフロンの反射率である。

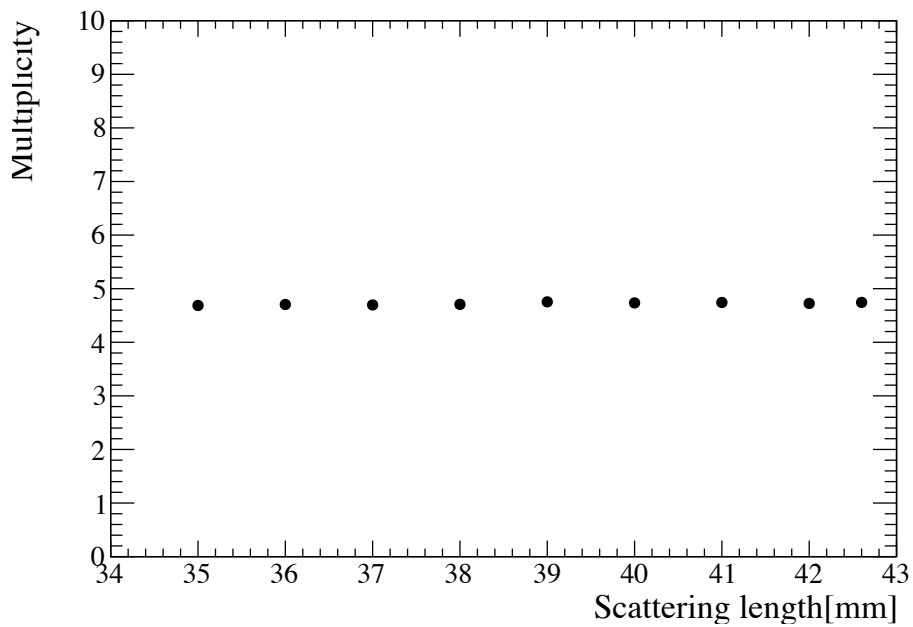


図 3.21: MPPC の多重度のエアロゲルの透過長依存。横軸はエアロゲルの波長 400 nm における透過長である。

シミュレーションでは検出した光子の MPPC への入射角度を得ることができる。この入射角度によって、検出した光がどのような経路で MPPC に到達したかをある程度分析できる。図 3.22 に各 MPPC の受光面部分で検出した光の MPPC への入射角度の分布を示す。 $n = 1.05$ の屈折率を持つエアロゲルから放出されるチェレンコフ光の角度は、 17.8° である。エアロゲルから放出された光は、空気を通り、MPPC の窓を通った後、MPPC 受光面で検出される。そのため、MPPC の受光面で検出した光の MPPC への入射角は、屈折の影響を受ける。屈折の影響は、スネルの法則によって計算できる。光が媒質 A から B に入射し、さらに媒質 B から C に入射するとき、媒質 A, B, C の絶対屈折率をそれぞれ n_A, n_B, n_C とし、それぞれの媒質での入射角あるいは屈折角を $\theta_A, \theta_B, \theta_C$ とすると、

$$n_A \sin \theta_A = n_B \sin \theta_B = n_C \sin \theta_C \implies \theta_C = \arcsin \left(\frac{n_A}{n_C} \sin \theta_A \right) \quad (3.2)$$

となる。最終的な検出角度である屈折角は、光を通った媒質のうち、最初と最後の媒質のみによって決まる。屈折率 $n = 1.05$ のエアロゲルからチェレンコフ角 17.8° で放出された光は、窓材の屈折率が $n = 1.55$ であることから屈折されて、 11.9° として検出される。シミュレーションから得られた入射角度分布から、MPPC2, 4, 6, 8 はエアロゲルからの散乱や反射の影響を受けていない直接的なチェレンコフ光を主に検出していることが分かる。MPPC7, 9 も少量ではあるがエアロゲルからの直接光を検出している。直接チェレンコフ光に対する特定の角度以外の角度で検出された光は、エアロゲルでの散乱やナフロン箱での乱反射された後に検出された光であると考えられる。

本実験及びシミュレーションでは、電子ビームを用いているため、空気でもチェレンコフ放射が起きる。空気からのチェレンコフ角は 1.39° であり、窓材に入射する際の屈折の結果、入射角 0.89° で MPPC で検出される。ただし、空気の屈折率は $n = 1.000293$ としている。また MPPC に直接電子ビームが当たったときは、窓材の屈折率に依存した角度 49.8° のチェレンコフ光が検出される。図 3.22 は位置 4 に電子が入射したときの結果であり、この位置では空気からのチェレンコフ光の広がり十分でなく、電子が MPPC に直接入射もしないため、これらの角度でのピークは見られない。

図 3.23 に位置 4 にビームを入射したときの多重度の結果を示す。図 3.23 の左図は 5 cm 厚のエアロゲルを用いたときのシミュレーションで得られた多重度であり、右図はエアロゲルがないときの多重度である。左図の多重度の値は実験を再現するようにナフロンの反射率を決定しているため、測定値とよく一致している。しかし、右図のエアロゲルなしの空箱でのシミュレーション結果は、ナフロン箱からのシンチレーション光の影響を考慮していないため、測定結果 (図 3.12 右) の MPPC の多重度との間に差が生じる。空箱でのシミュレーションの MPPC の多重度 0.284 ± 0.006 に対し、暗電流による多重度は 0.192 ± 0.005 であり、この差は箱内で散乱したチェレンコフ光が MPPC で検出された分であると考えられる。また実測値とシミュレーションでの MPPC の多重度はそれぞれ 0.57 ± 0.07 と 0.284 ± 0.006 であり、この差は空気やナフロンからのチェレンコフ光の他に、シミュレーションでは考慮していないナフロン箱からのシンチレーション光の影響であると考えられる。

MPPC の多重度のオーバー電圧依存の結果を図 3.24 に示す。赤点が測定値で、青点が Geant4 によるシミュレーションの結果得られた値である。図 3.24 から、シミュレーション

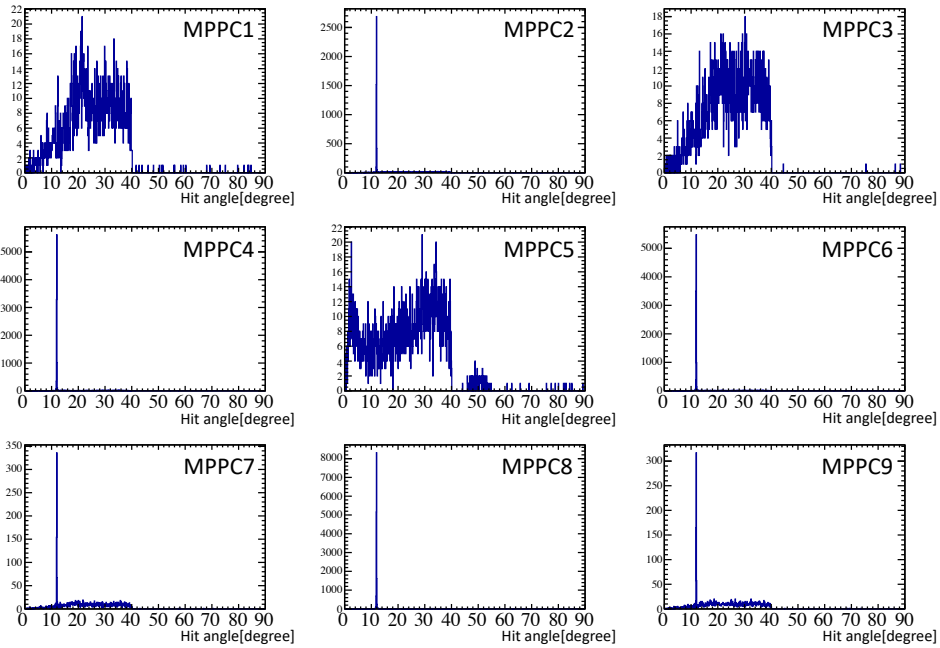


図 3.22: 位置 4 にビームを入射したシミュレーションでのチェレンコフ光の各 MPPC への入射角度の分布。この図の各 MPPC の配置はビームに乗って見たものであり、それぞれの MPPC の位置は図 3.3 と対応している。

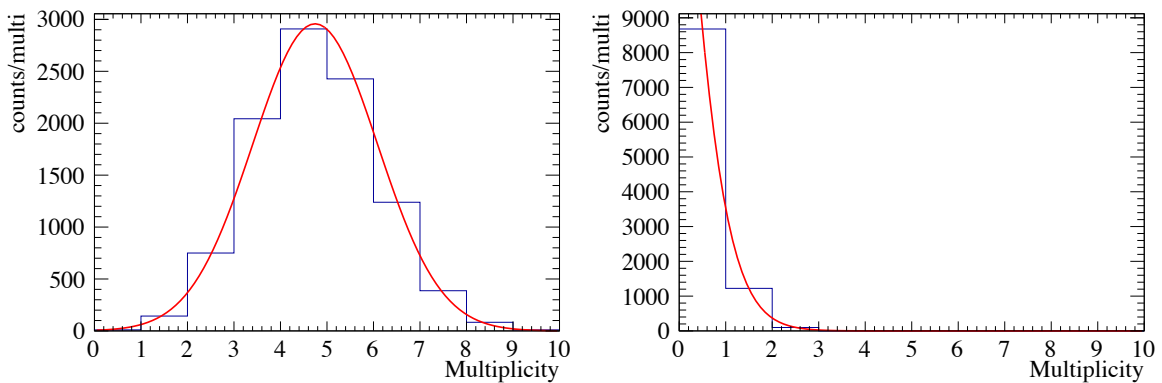


図 3.23: 位置 4 にビームを入射したシミュレーションでの MPPC の多重度の分布。左図は $n = 1.05$ のエアロゲル 5 cm を入れているシミュレーション、右図はエアロゲルなしでのシミュレーション。

ンによって、オーバー電圧依存性は十分に再現されている。シミュレーションとの差異がある $V_{ov} = +2.5 \text{ V}$ については、MPPC ゲインの電圧依存性によって信号がディスクリミネータの閾値よりも小さくなり、一部のゲインが低めの MPPC で光子を検出できなかったためであると考えられる。

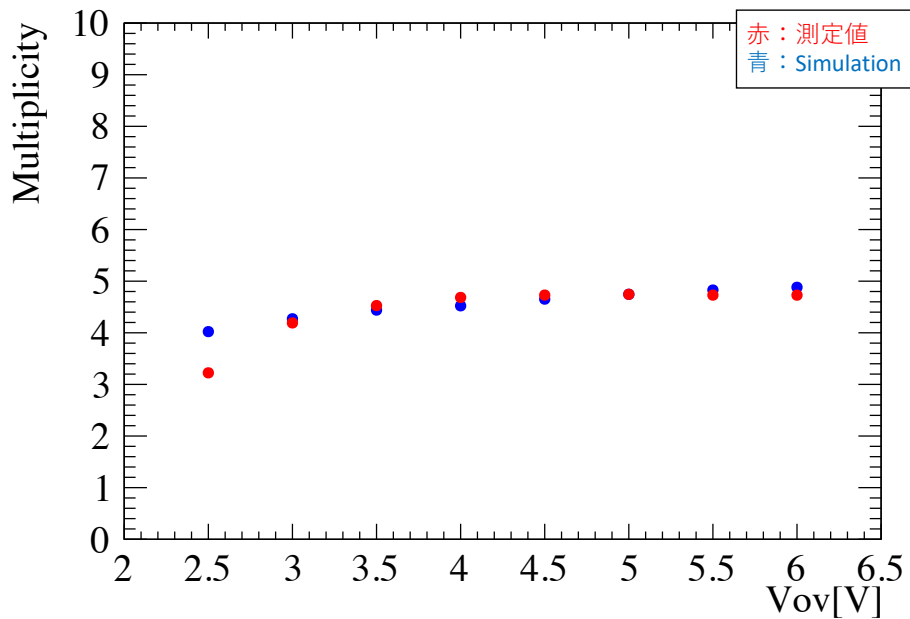


図 3.24: MPPC の多重度のオーバー電圧 (V_{ov}) 依存。赤点は図 3.7 の「Signal」に選んだときの多重度 (測定値)、青点は Geant4 のシミュレーションにより得られた多重度。

MPPC の多重度のビーム通過位置依存の結果を図 3.25 に示す。赤が測定値で、青が Geant4 によるシミュレーションの結果得られた値である。また、丸印は検出器中心から 5 mm 下の位置 1-6、三角印は検出器中心から 20 mm 下の位置 7-10、四角印は検出器中心より 35 mm 下の位置 11, 12、白丸印は検出器中心より 50 mm 下の位置 13 にビームを通過させた場合の MPPC の多重度を示す。位置 13 は、シミュレーションでは他の位置と同じような分布が得られたため、ガウス分布を仮定したフィットにより多重度を求めた。測定値を見ると、位置 3, 5 の多重度の値は位置 4 より大きく、位置 2, 6 の多重度の値は位置 4 より小さいという結果になっている。一方で、シミュレーションの値では、ビームの高さが同じ位置の結果の中 (位置 1-6) では、位置 4 から離れるほど多重度は小さくなるという結果になった。

位置 4 での各 MPPC のヒットの割合を図 3.26 に示す。図 3.26 の左図はビームを位置 4 に入射したときの測定結果であり、右図は位置 4 にビームを入射したときのシミュレー

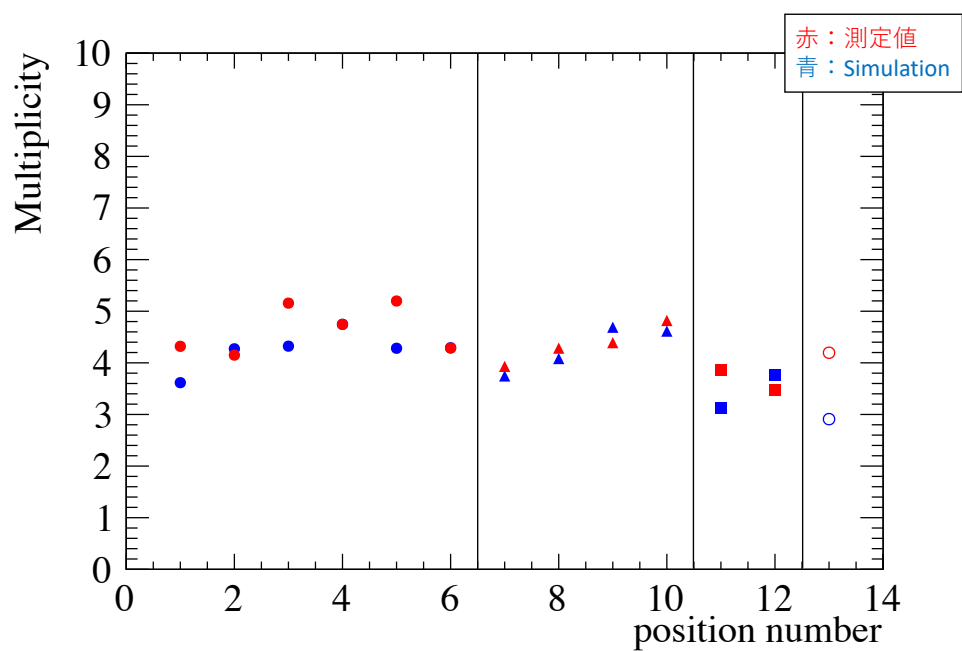


図 3.25: MPPC の多重度のビーム通過位置依存。丸印は検出器中心より 5 mm 下、三角印は検出器中心より 20 mm 下、四角印は検出器中心より 35 mm 下、白丸印は検出器中心より 50 mm 下に電子ビームが通過するときの多重度。赤の点は測定値であり、青の点は Geant4 のシミュレーションにより得られた値である。

シミュレーションの結果である。これらを比較すると、MPPC2とMPPC5の2つのMPPCで異なる。MPPC2は、測定ではヒットの割合が低く、直接のチェレンコフ光を検出していないと考えられるが、シミュレーションでは直接のチェレンコフ光を検出し、ヒットの割合が実測値に比べて高くなっている。またMPPC7及びMPPC9においても、測定値とシミュレーションでヒットの割合に差が見られる。これらの理由として、ビームの通過位置が検出器に対して下側にシフトしている可能性が考えられるため、ビーム位置を変更したシミュレーションの分析を行った。またMPPC5の割合が大きくなっているが、空箱の場合(図 3.13)では他のMPPCの割合と変わらないため、ナフロンからのシンチレーション光や空気からのチェレンコフ光であるとは考えにくい。MPPC5に関しては、ビーム位置の変更による影響も踏まえて分析を行った。

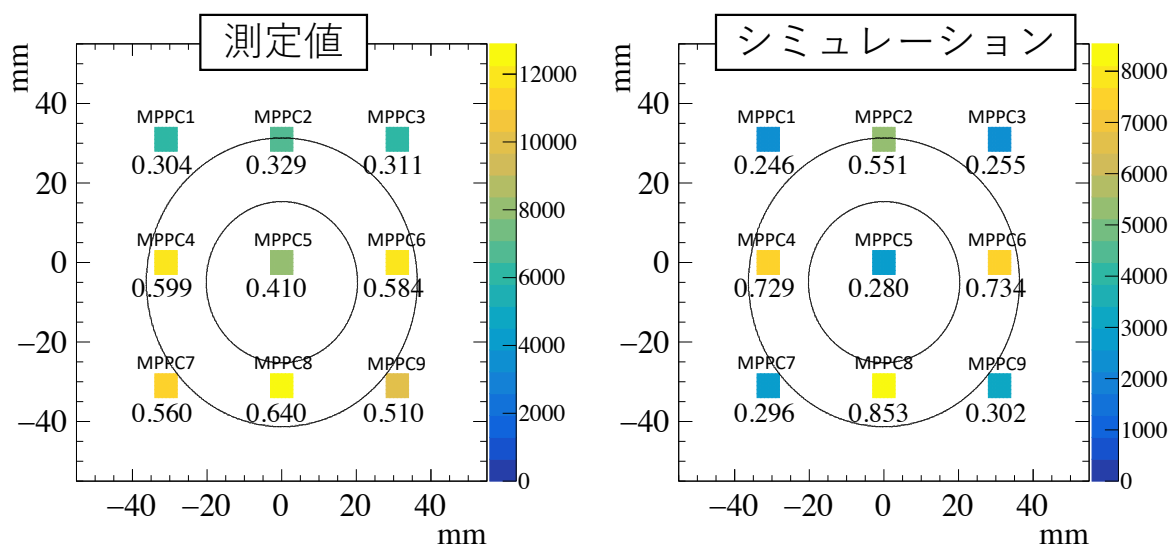


図 3.26: 測定値 (左) とシミュレーション (右) の MPPC 毎のヒットの割合。ビームは位置 4 に入射した。z 軸は MPPC が信号を出したイベント数である。

ビーム位置の影響を見るため、MPPC2 にエアロゲルからの直接のチェレンコフ光が入射しない位置へのビームの入射をシミュレーションで行った。位置 1-6 では検出器中心から下に 5 mm の位置をビームが通ると考えていたが、さらに下向きに 7 mm (検出器中心から下に 12 mm) の位置を通るとしてシミュレーションを行なった。位置 7-10、位置 11、12、位置 13 についても同様にそれぞれ 7 mm ずれているとし、それぞれ検出器中心から 27 mm 下、42 mm 下、57 mm 下の高さにビームを入射した。ビームの位置を変えることによって、位置 4 での多重度の値も変わったため、再度ナフロンの反射率を変えて多重度を再現するように変更した。変更後のナフロンの反射率は 83.2% である。このナフロンの反射率を固定した条件にて、MPPC の多重度のビームの通過位置依存の結果を図 3.27 に

示す。ビーム位置の下方へのずれは、位置 13 の結果に影響を及ぼし、シミュレーションにおいても位置 13 の MPPC の多重度の分布は、他の位置での分布と異なり、ガウス分布によるフィットが適用できなかったため、平均から多重度を求めた。下方へのずれによってビーム位置が検出器中心から 57 mm 下になると、この高さにはエアロゲルは存在しておらず、ナフロン箱を通過していることになるため、位置 13 の測定値の多重度の分布が他の分布と異なっていたことが説明できる。ビームがエアロゲルを通過していない位置 13 では、測定値とシミュレーションの値に大きな差があるが、他の位置においてはビーム位置を検出器に対して下側にシフトすることで、測定結果を高い精度で再現できた。測定の際に測量値よりも 7 mm 程度、検出器の位置のずれが生じていた可能性が考察される。この原因は、検出器を設置する際の基準線のずれが主に影響したものと考えられる。

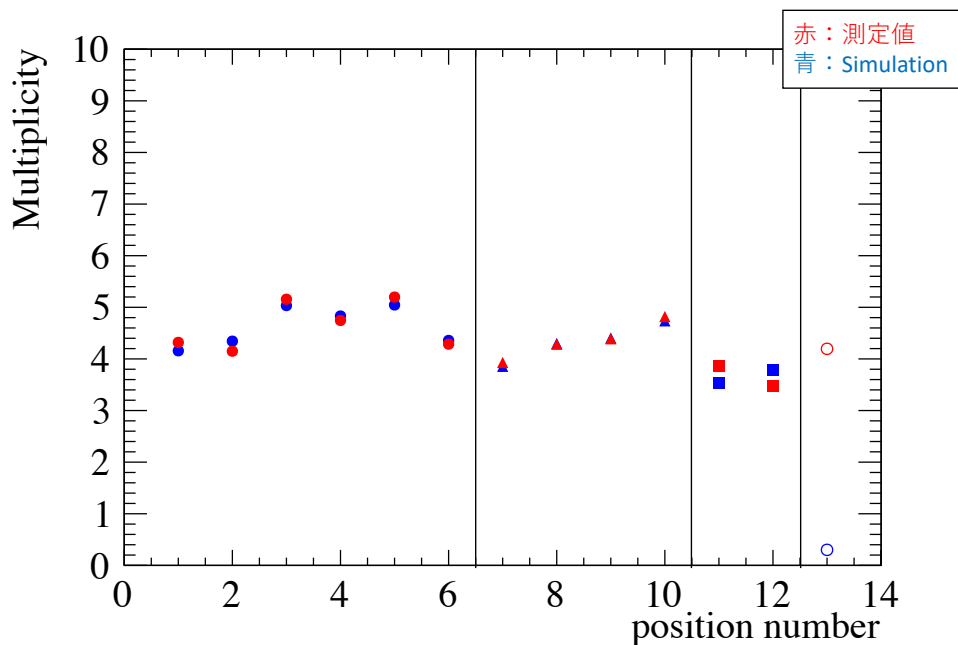


図 3.27: ビームの y 方向 (高さ方向) を 7 mm 下に下げたときの多重度のビーム通過位置依存。赤の点は測定値であり、青の点は Geant4 のシミュレーションにより得られた値である。

一方で、この場合の位置 4 の 7 mm 下にビームが入射したとしても、図 3.26 の測定結果の MPPC5 のヒットの割合はシミュレーションと実測値で差異が生じた。このときの各 MPPC のヒットの割合を図 3.28 に示す。シミュレーションではビームの y 方向の広がりはないとしたが、 y 方向の広がりがあったと考え、エアロゲルからのチェレンコフ光が直接到達する領域が広がる。しかし、ビームの y 方向の中心が検出器中心に対して

12 mm 下である場合、10 mm の広がりを考えても、MPPC5 でエアロゲルからの直接光は検出されない。さらにビームの入射位置を下側にすると、MPPC5 でエアロゲルからの直接光を検出するようになるが、MPPC8 で検出される割合が減少し、両方のヒットの割合を同時に再現することはできなかった。MPPC5 以外の再現性は良いため、 y 方向の広がりには十分に小さいものと考えられる。

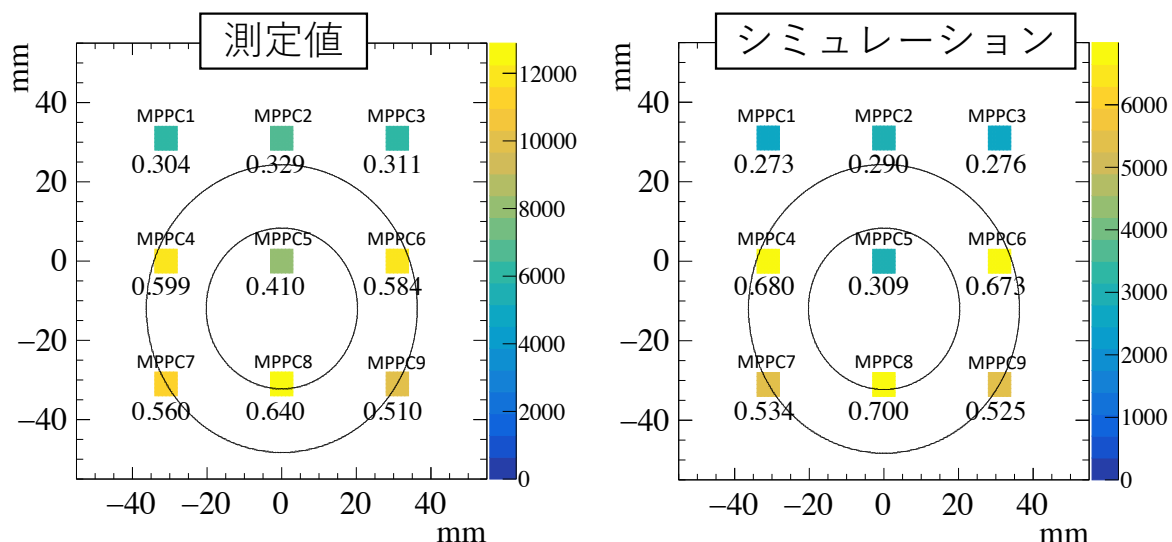


図 3.28: 位置 4 の 7 mm 下に電子が入射したときの各 MPPC のヒットの割合 (右)。左図は測定値の MPPC 毎のヒットの割合である。右図の円の中心は検出器中心の 12 mm 下である。

ビーム中心を調整し、位置 4 の多重度を再現するようなナフロン反射率を用いることで、ビームの通過位置依存性を再現することができた。シミュレーションと実測値とのずれは 10% 以内であることが分かった。次章において、このシミュレーションコードを用いて、より高い検出効率をもつ検出器をデザインした。

第4章 集光用ライト・コーンを用いた AC 検出器

4.1 集光用ライト・コーンを用いた試作機のデザイン

4.1.1 集光用ライト・コーンのシミュレーションによる検討

前章の結果より、複数の MPPC のヒット情報である MPPC の多重度を使用することで、イベント毎のチェレンコフ光の発生の有無の区別と、暗電流による影響の低減が可能であると分かったが、実機で $n = 1.007$ のエアロゲルを使用することを考えると、閾値型 AC 検出器に MPPC を用いるためには、光量を得るための集光方法の開発が必要不可欠であることが分かった。集光率を向上するために、集光用のライト・コーンを用いチェレンコフ光を MPPC 上に集める検出器構造を考案した。更に MPPC アレイを用いることで、MPPC を隙間少なく配置でき、これによってライト・コーン出口での検出面の不感領域を小さくできる。

この方式の試作機を開発を行うために、Geant4 を用いたシミュレーションによる集光用ライト・コーンを用いた AC 検出器のデザインを最初に行った。ライト・コーンによる集光の効果が最大となるように、ライト・コーンのサイズを決定した。Geant4 内で製作した検出器を図 4.1 に示す。Geant4 でのライト・コーンを用いた AC 検出器では、ライト・コーンの出口の全面が検出面であるとし、解析上は実際に使用が想定される MPPC の光電面サイズの位置で検出された光子のみが検出されるとして評価を行った。

シミュレーションを行う際のパラメータとして、箱は前章のナフロン箱と同じ特性を使用し反射率は 83.2% とした。エアロゲルに関しては、屈折率 $n = 1.007$ 、ビーム方向の厚さは 10 cm とした。さらに、透過長は波長 400 nm の光に対して 10 mm (仕様値) とし、波長の 4 乗に比例する波長依存性を仮定した。吸収長については各波長での透過長の 1000 倍とした。MPPC は後述のテスト実験で使用するものと同じ S13361-3050AE-08 とし、図 2.9 から各オーバー電圧における検出効率を読み取り、シミュレーションのパラメータとして設定した。また図 2.7 と表 2.1 から、MPPC のアレイの大きさと受光面の大きさを決め、MPPC の窓材に関しては屈折率 $n = 1.55$ 、厚さ 0.1 mm とした。ライト・コーンのパラメータに関しては、次の節で述べるが、鏡面反射の初期値として、波長に依らない 90% の反射率とした。

入射するビームは 0.1 GeV/c の電子で、発生位置は 80 mm×80 mm の領域において一様分布とし、MPPC 面に対して垂直に入射させた。電子を 1 粒子入射させたときの様子を図 4.2 に示す。検出器を通過している赤い線 (負の電荷を持つ荷電粒子の色) が電子であ

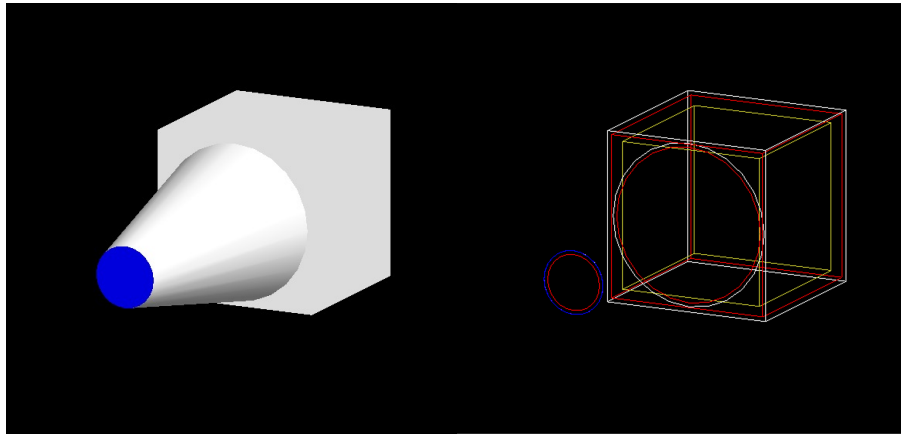


図 4.1: Geant4 における集光用ライト・コーンを用いた閾値型 AC 検出器の構成。エアロゲルの厚さは 10 cm、図の例ではライト・コーンの長さは 160 mm である。右図では、箱内のエアロゲル (黄線) やコーンの入り口 (赤線が内径)、出口の輪郭 (赤線が内径) 等を表示している。

り、そこから発生している緑の線 (中性粒子の色) がチェレンコフ光である。ライト・コーン部分で鏡面反射している様子を観測できる。

シミュレーションでは、発生したチェレンコフ光の経路を、光子の MPPC への入射角度から考察可能である。図 4.3 はコーンの出口全体で検出した光子の MPPC への入射角度分布である。このシミュレーションにおいて、チェレンコフ放射を起こす媒質としては、空気、エアロゲル、エポキシ樹脂 (MPPC の窓材) が考えられる。これらの媒質の屈折率は、それぞれ $n = 1.000293$ 、 $n = 1.007$ 、 $n = 1.55$ であり、ここから計算できるチェレンコフ角はそれぞれ 1.39° 、 6.76° 、 49.8° である。これらのチェレンコフ光は検出されるとき、MPPC の窓での屈折の影響を受け、その屈折の結果、MPPC への入射角度はそれぞれ 0.89° 、 4.39° 、 49.8° となると計算される。図 4.3 で見られる 4.4° 、 49.8° のピークはそれぞれエアロゲル、エポキシ樹脂 (MPPC の窓材) からの直接のチェレンコフ光であると考えられる。空気からのチェレンコフ光は少ないため、 0.89° 付近にピークは見られなかった。

さらに、図 4.3 では 10.4° から 18.0° にかけて連続的な構造がある。これはライト・コーンでの鏡面反射の影響を受けたチェレンコフ光であると考えられる。図 4.4、図 4.5 にライト・コーンでの鏡面反射の模式図を示す。これらの図では、ライト・コーンの中心を通るような断面での反射の様子であり、図 4.4 は荷電粒子の上方に放出されたチェレンコフ光がライト・コーンの上側で反射されたとき、図 4.5 は下方に放出されたチェレンコフ光がライト・コーン上側で反射されたときの図である。図 4.4、図 4.5 において、 α はライト・コーンへの入射角度、 β はライト・コーンの形状によって決まるライト・コーンの角度、 θ は MPPC の検出面への入射角度である。ただし、実際の MPPC への入射角度は、最終的に MPPC の窓材での屈折の影響を受ける。また、ライト・コーンの入口と出口の直径をそれぞれ R_{ent} 、 R_{ext} とし、ライト・コーンの長さを z とすると、ライト・コーンの角度 β は、

$$\tan \beta = \frac{(R_{ent} - R_{ext})/2}{z} \quad (4.1)$$

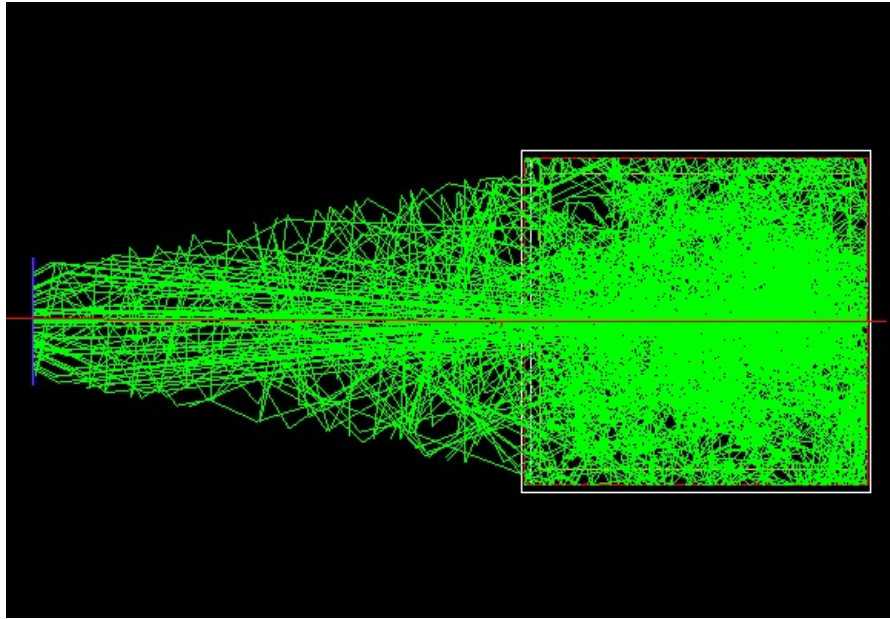


図 4.2: Geant4 を用いてシミュレーションした、集光用ライト・コーンを用いた閾値型 AC 検出器に電子が入射したときのチェレンコフ光の飛跡。AC 検出器を通過している赤い線が電子、電子の軌跡から発生している緑の線がチェレンコフ光である。

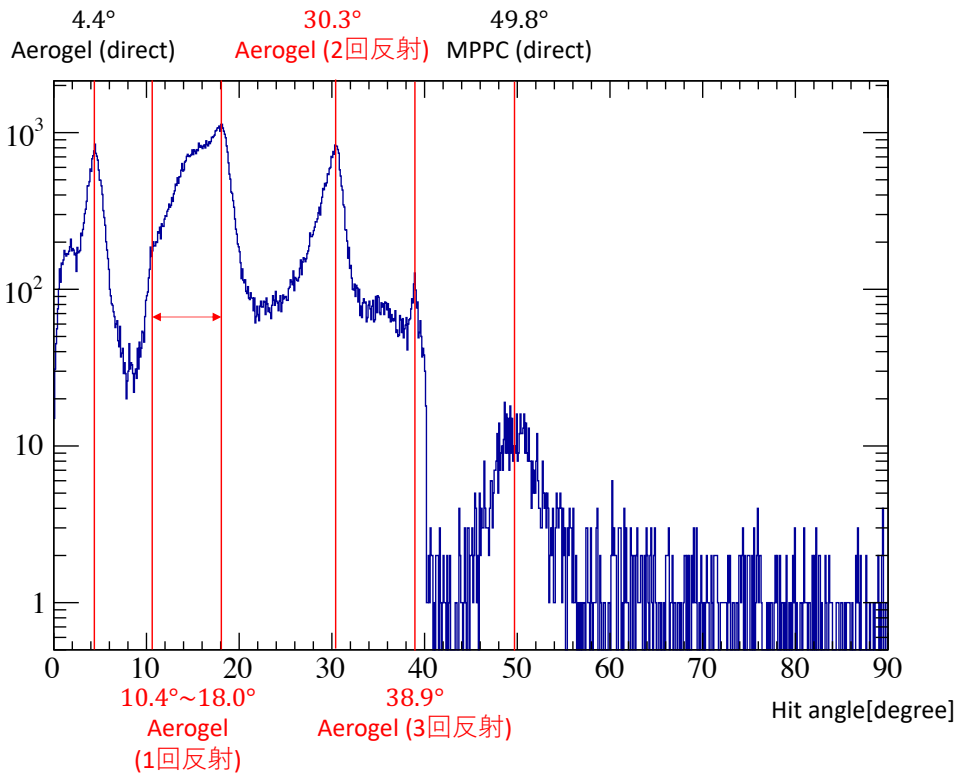


図 4.3: ライト・コーンの出口で検出した光の MPPC への入射角度の分布。ライト・コーンの長さ 160 mm のときの結果である。

である。図 4.4 のとき、光の MPPC への入射角度 θ は、

$$\theta = 2\beta + \alpha \quad (4.2)$$

であり、図 4.5 のとき、光の MPPC への入射角度 θ は、

$$\theta = 2\beta - \alpha \quad (4.3)$$

である。 $R_{ent} = 100$ mm、 $R_{ext} = 36$ mm、 $z = 160$ mm のとき、 $\beta = 11.3^\circ$ である。また $n = 1.007$ のエアロゲルから放出されたチェレンコフ角 6.76° の光は、空気に出る際に屈折の影響を受け屈折角 6.81° となり、この角度でライト・コーンに入射するので、 $\alpha = 6.81^\circ$ である。この結果、ライト・コーンによって反射されると、(4.2) 式より 29.4° 、(4.3) 式より 15.8° となると計算される。これらの角度は検出される直前に MPPC の窓材による屈折の影響を受けてそれぞれ 18.5° 、 10.1° となる。これらの角度は、図 4.3 に見られる 10.4° から 18.0° の構造と一致する。このライト・コーンでの反射はコーンの中心を通らないような面でも起こり、この 2 つの角度の間のイベントはそのような鏡面反射が起こったものであると考えられる。さらに、図 4.4 の反射では多数回の反射が起こりやすいため、図 4.4 のように反射され 29.4° になった光が再度ライト・コーンで反射された場合 (ライト・コーンで 2 回反射した場合)、MPPC への入射角度は 30.6° になり、3 回反射した場合の MPPC への入射角度は 38.5° になる。これは図 4.3 に見られる 30.3° と 38.9° と一致すると考えられ、2 回反射や 3 回反射された後に検出された光があることを示している。図 4.3 から、検出される光のほとんどは、エアロゲルからの直接のチェレンコフ光と、ライト・コーンで鏡面反射された光であり、散乱やナフロンでの乱反射された光は非常に少ないと分かった。

4.1.2 集光用ライト・コーンのサイズの最適化

集光用ライト・コーンのサイズの最適化を行う。ライト・コーンの特徴付けるパラメータとして、コーンの入口、出口の直径 (内径) とコーンの長さがある。コーンの入口と出口のサイズは、試作機で用いるナフロン箱 (前章の実験で用いたもの) と MPPC (S13361-3050AE-08) のサイズによって決定した。コーンの入口は、箱内のエアロゲルからのチェレンコフ光がコーン内に全て入るようになるため、箱の一辺 11 cm より小さい内径 10 cm にした。コーンの出口は、一辺 25.8 mm の MPPC アレイの対角線の長さに対応する内径 36 mm にした。

ライト・コーンの長さの最適化は Geant4 によるシミュレーションを用いて行った。実際にはコーン内には空気が含まれるが、コーンの長さを変えると、ビーム方向の空気の厚さが厚くなる。ビームとして電子を用いるため、空気でもチェレンコフ放射を起こす。エアロゲルからの光のみによる多重度を比較するため、空気の屈折率を $n = 1$ にし、チェレンコフ光が出ないようにした。

ライト・コーンの長さ毎の多重度は図 4.6 のようになった。図 4.6 の左図はコーンの長さを 10 mm から 1000 mm まで変化させたときの結果である。右図はコーンの長さが 10 mm から 200 mm の範囲の結果を拡大したものである。ライト・コーンが短いときは、集光の効果がないため多重度は低い。一方で、長さ 100 mm を超えたあたりで、およそ多重度の大きさは飽和する。これはライト・コーンがある長さ以上になると、ライト・コー

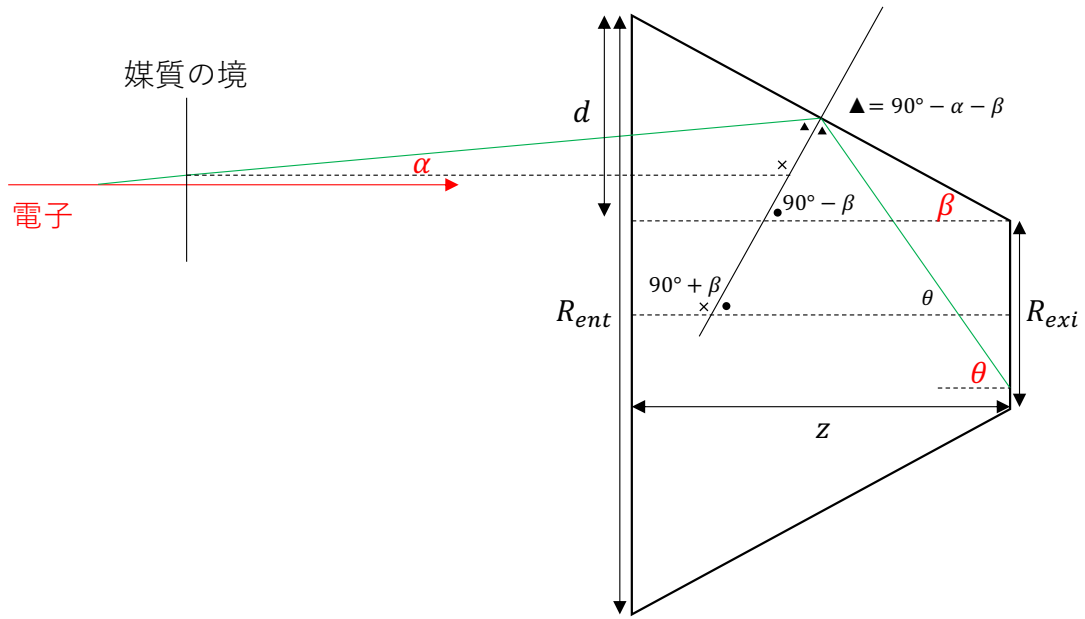


図 4.4: ライト・コーンでの鏡面反射の模式図。荷電粒子の飛跡の上方に放出されたチェレンコフ光がライト・コーンの上側で反射されたとき。

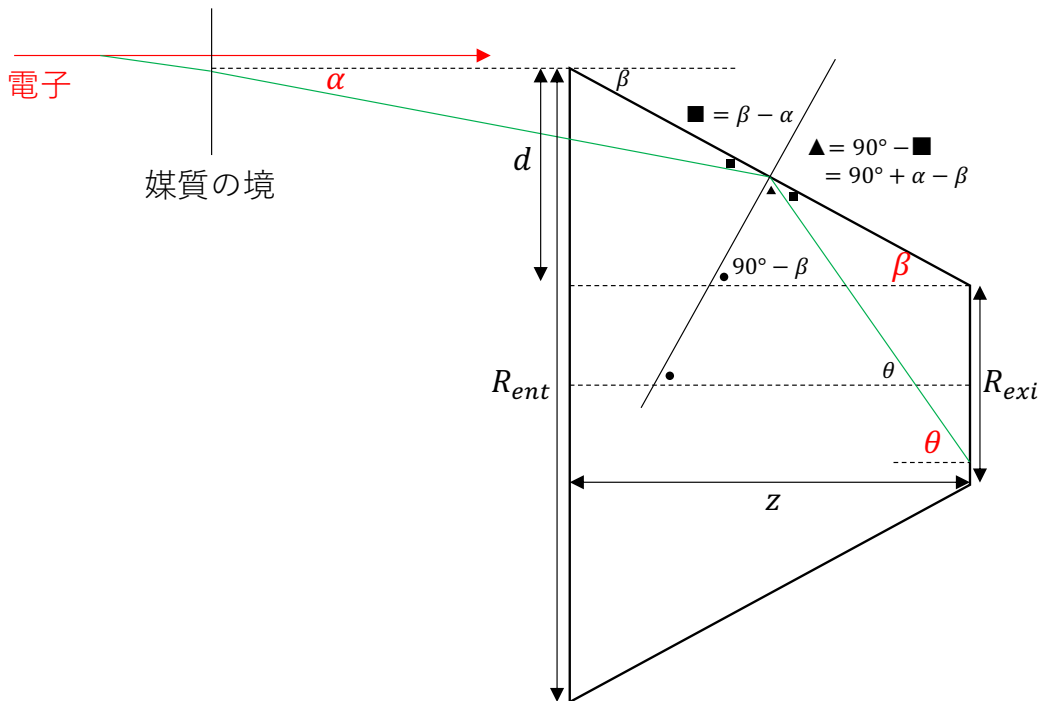


図 4.5: ライト・コーンでの鏡面反射の模式図。荷電粒子の飛跡の下方に放出されたチェレンコフ光がライト・コーンの上側で反射されたとき。

ンに入った光はほぼ全てライト・コーンの出口に到達し、検出される光子数はエアロゲルで発生した数によって決まるからである。さらに長くすると、多重度は減少していく。これはライト・コーンが長くなるにつれ、光子がライト・コーン出口に到達するまでに反射する回数が増加するためである。図 4.6 の結果で、MPPC の多重度が最大となるのは、ライト・コーンの長さが 120 mm のときであった。しかし、ライト・コーンの製作時点で行ったシミュレーション (3 章の受光面の再現や反射率等のパラメータの最適化が不十分) では、ライト・コーンの長さが 160 mm のときに MPPC の多重度が最大であったため、本実験で用いる試作検出器のライト・コーンの長さは 160 mm として製作した。現在の条件でのシミュレーションでは、ライト・コーンの長さが 120 mm と 160 mm の場合において、MPPC の多重度はそれぞれ 6.36 ± 0.03 と 6.31 ± 0.03 であり、検出器性能の評価には実質的には影響しない差であった。

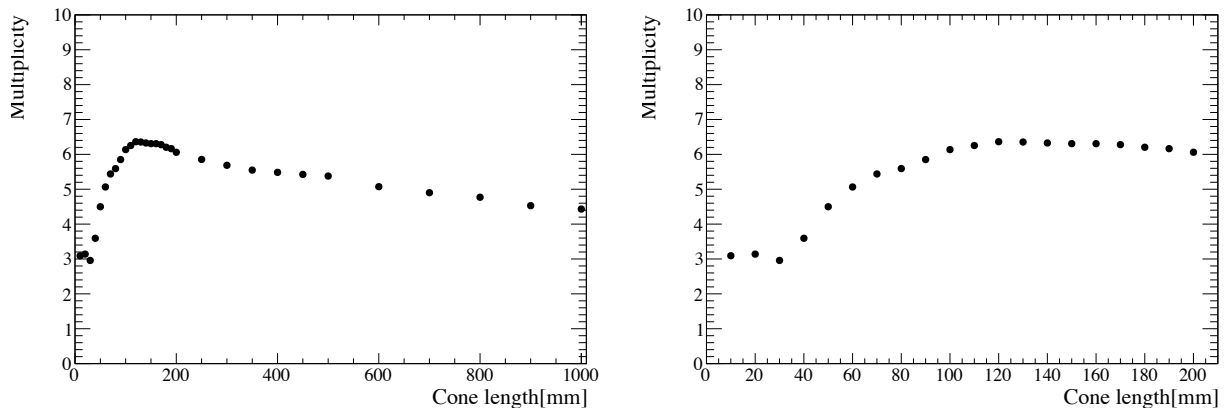


図 4.6: ライト・コーンの長さによる MPPC の多重度の変化。左図はコーンの長さの変化範囲は 10 mm から 1000 mm、右図は 10 mm から 200 mm であり、右図は左図の一部を拡大したものである。ライト・コーンの長さが 120 mm を超えると、多重度の飽和が見られる。

4.2 集光用ライト・コーンを用いた試作機の製作

4.2.1 エアロゲル収納の箱

エアロゲル収納のための箱としては、前章の 2020 年 12 月のテスト実験に用いたナフロンシートで製作したものを再利用した。前回の実験では、箱正面に光検出器である MPPC を直接設置していたが、この実験では箱正面にライト・コーンを付ける。図 4.7 は箱に開けたライト・コーン取り付け部分である。

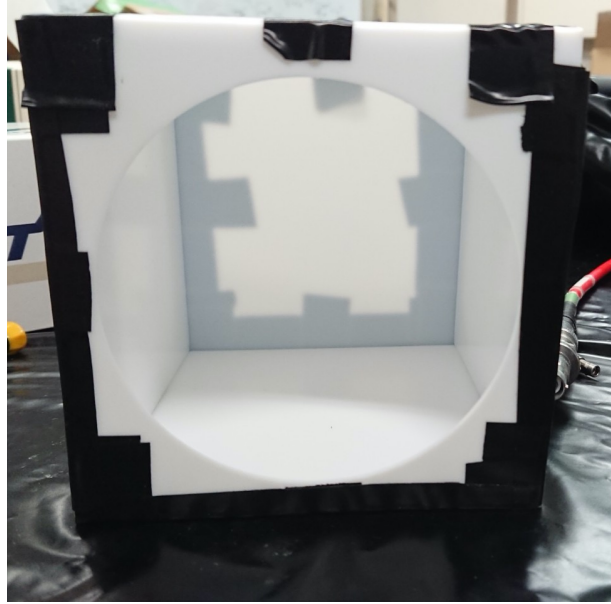


図 4.7: エアロゲル封入用のナフロン製の箱の写真。

4.2.2 エアロゲル

実験では、J-PARC E50 実験で使用を予定している屈折率 $n = 1.007$ の低屈折率エアロゲルを用いた。このエアロゲルは製造時は屈折率が $n = 1.007$ であったが、製造上の理由により時間経過によって収縮を起こしてサイズが 100 mm 角から 90 mm 角になり、実験時には屈折率が増加していた。また、エアロゲルの透過長が短くなり、透明度が低下している可能性もあった。そこで、テスト実験後に使用したエアロゲルの屈折率を再測定した。表 4.1 に再測定したエアロゲルの屈折率と透過長を示す。この収縮は製作後 1 年をかけて進行し、テスト実験時には収縮は停止している。

表 4.1: 実験後に再測定した通称 $n = 1.007$ のエアロゲルの特性。

| エアロゲル個体番号 | 屈折率 | 透過長 [mm] (at 波長 400 nm) |
|-----------|--------|-------------------------|
| CBS2-3a | 1.0087 | 9 |
| CBS2-3b | 1.0084 | 9 |
| CBS2-4a | 1.0083 | 9 |
| CBS2-4b | 1.0084 | 10 |
| CBS2-5a | 1.0084 | 9 |
| CBS2-9b | 1.0092 | 9 |

4.2.3 MPPC

ライト・コーン出口でのMPPCの有感領域の比率を高くするため、MPPC間の隙間が小さいMPPCアレイを用いた。実験で用いたMPPCアレイの型番はS13361-3050AE-08である。このMPPCは1つのMPPCのサイズが3 mm×3 mmの8×8のアレイであり、それぞれのMPPC同士の隙間は0.2 mmである。

4.2.4 ライト・コーン

コーン製作に当たっては3Dプリンター(武藤工業社製MF-2500EP [16])を用いた。造形に用いた材料はPLA(ポリ乳酸)である。PLAは植物由来の樹脂で、熱変性が小さく、造形がしやすい材料である。ただし、PLAは湿気を吸いやすく表面が硬いので、造形後に表面を磨いてアルミニウム反射膜を蒸着するなどの加工に向かない。そこでコーン内面に鏡面反射のためのアルミナイズド・マイラーを貼り付けた。3Dプリンターでの造形のためのモデルデータを3D CADを用いて製作した。3D CADで作ったモデルデータを図4.8に示す。ライト・コーンは半分ずつ製作し、内側にアルミナイズド・マイラーを貼った後に組み立てて、コーン状にする。ライト・コーン同士を繋ぐ部分、コーン入り口で箱と繋ぐ部分、出口でMPPC基板と繋ぐ部分にはそれぞれ縁を付けた。このモデルデータを用いて、実際に造形したコーンの写真も図4.8に示している。

図4.9はライト・コーンを組み上げたものである。図4.9では出口部分にMPPCアレイを配置していて、アルミナイズドマイラでの、1回反射と2回反射の像を確認することができる。2つのコーンを合わせた際の接合部分やアルミナイズド・マイラをテープで貼っている部分など、理想的な鏡面反射を起こすのが困難な部分が存在するため、テスト実験によって評価を行う必要がある。

4.2.5 試作機の組み上げ

製作したナフロンの箱、MPPCアレイ、集光用ライト・コーン、低屈折率エアロゲルを組み合わせて、試作AC検出器を製作した。図4.10の左図はナフロンの箱に屈折率 $n = 1.007$ のエアロゲルを6枚(全体の厚さ10.5 cm)入れた写真である。 $n = 1.007$ のエアロゲルは製造時点では、サイズが10 cm×10 cmであり、実験で用いたナフロン箱はこの大きさでのエアロゲルに合わせて製作した。しかし、経年変化によってエアロゲルが1割程縮んだために、図4.10で見られるようにエアロゲルの大きさに対して箱の隙間が大きくなってしまった。図4.10の右図では、箱、エアロゲル、MPPCアレイ、ライト・コーンを組み上げたものであり、この試作AC検出器のビーム試験と性能評価を行った。

4.3 SPring-8 LEPS2における電子ビームを用いた試作機の性能評価実験

4.3.1 性能評価実験の概要と目的

2021年11月に大型放射光施設、SPring-8で電子または陽電子ビームを用いた試作AC検出器のテスト実験を行った。本実験はSPring-8のLEPS2のビームラインで行った。前章と同様に、SPring-8の電子ビームにレーザー光を入射し、逆コンプトン散乱で高エネ

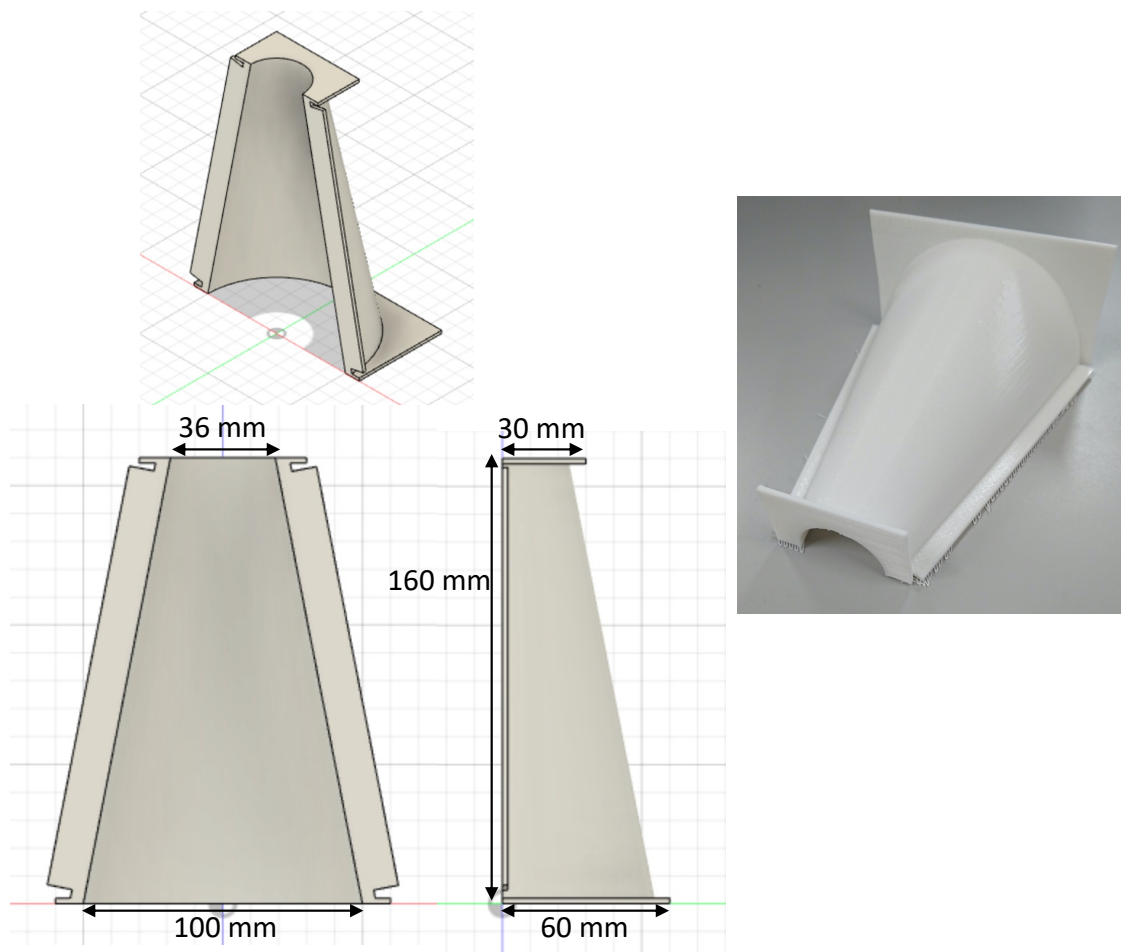


図 4.8: ライト・コーンの 3D モデルデータ (左) と製作したコーン (半分) の写真 (右)。Geant4 を用いて決定したライト・コーンのパラメータを用い、3D CAD でモデルデータを作成し、3D プリンターを使用し造形した。厚みは 5 mm で製作した。

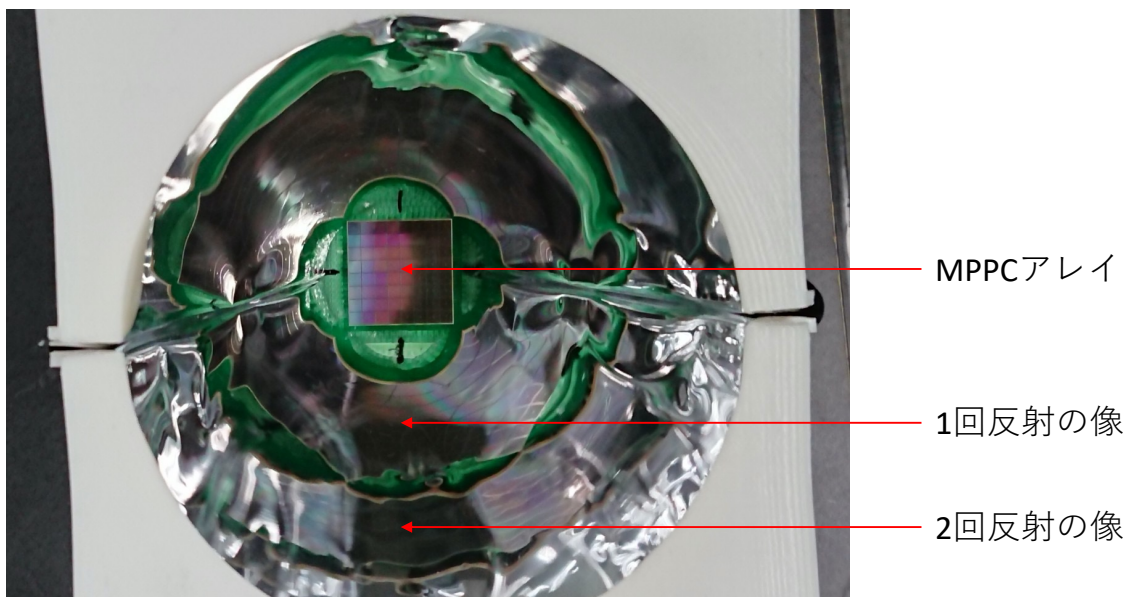


図 4.9: 反射材としてアルミナイズド・マイラーを付けたライト・コーンの写真。奥に見える正方形は MPPC アレイである。アルミナイズド・マイラによる 1 回反射と 2 回反射の像が確認できる。



図 4.10: 集光用ライト・コーンを用いた試作 AC 検出器の写真。左の写真はナフロン箱にエアロゲルが入っている様子。右の写真は組み上げた試作 AC 検出器を横から見たものである。

ルギーの γ 線を生成し、この γ 線を 1 mm 厚の鉛コンバーターに当て、電子・陽電子対を生成した。コンバーター直後の永久磁石を用いて、この電子か陽電子のうち一方を試作 AC 検出器の方向に曲げることにより取り出し、試作 AC 検出器に当てて、ビーム試験を行った。

4.3.2 セットアップ

実験では試作 AC 検出器の他に、4 台のトリガーカウンター (T1, T2, T3, T4) を用いた。セットアップの概要図を図 4.11 に示す。試作 AC 検出器の前後に 30 mm×30 mm のプラスチック・シンチレータ (T1, T2) と 10 mm×10 mm のプラスチック・シンチレータ (T3, T4) をトリガー用検出器として配置した。データ取得のトリガーは T1 と T2 のコインシデンス事象で生成した。10 mm×10 mm のプラスチック・シンチレータは、ビームの入射位置を絞った解析をする際に使用した。解析の詳細については次の節で述べる。プラスチック・シンチレータの QDC 情報の取得には波形情報を読み出せる Flash ADC である DRS4 モジュール [17] を、TDC 情報の取得には HUL HR TDC を使用した。MPPC アレイの QDC と TDC 情報の取得には NIM-EASIROC モジュール [18] を使用した。NIM-EASIROC による MPPC の信号の閾値設定は $V_{ov} = +3$ V において 0.5 p.e. とした。

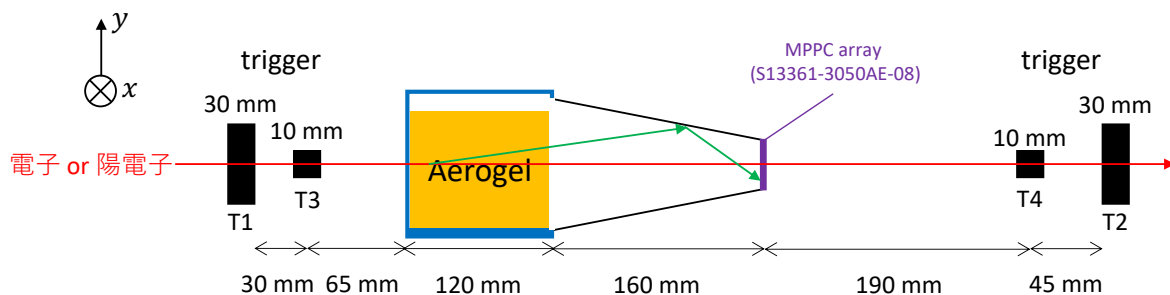


図 4.11: 実験セットアップの概略図。横から見た図。試作 AC 検出器の前後にトリガー用検出器として、30 mm×30 mm のプラスチック・シンチレータ (T1, T2) と 10 mm×10 mm のプラスチック・シンチレータ (T3, T4) をそれぞれ配置した。データ取得のトリガーは 30 mm×30 mm のプラスチック・シンチレータ (T1, T2) のコインシデンス事象で生成した。

実験ではビームの入射位置を変えて測定を行なった。ビームの入射位置に対して、図 4.12 のように番号を割り振った。位置 1 は検出器中心であり、位置 2-5 は中心からそれぞれ 10 mm、20 mm、28 mm、30 mm 離れた位置である (位置 4 以外はビームから見て左方向にずらしている)。位置 6-8 は位置 2 と同様に中心から 10 mm 離れた位置であるが、ずらす方向を変えたもので、位置 9-11 は位置 3 と同様に中心から 20 mm 離れた位置であるが、ずらす方向を変えたものである。最も中心から離れている位置 5 (中心から 30 mm

離れている) の場合に、トリガーカウンターの大きさ (30 mm) を考慮しても、ビームの端は中心から 45 mm となり、トリガーカウンターを通過した荷電粒子は全てエアロゲル内 (半幅 45 mm) を通過する。

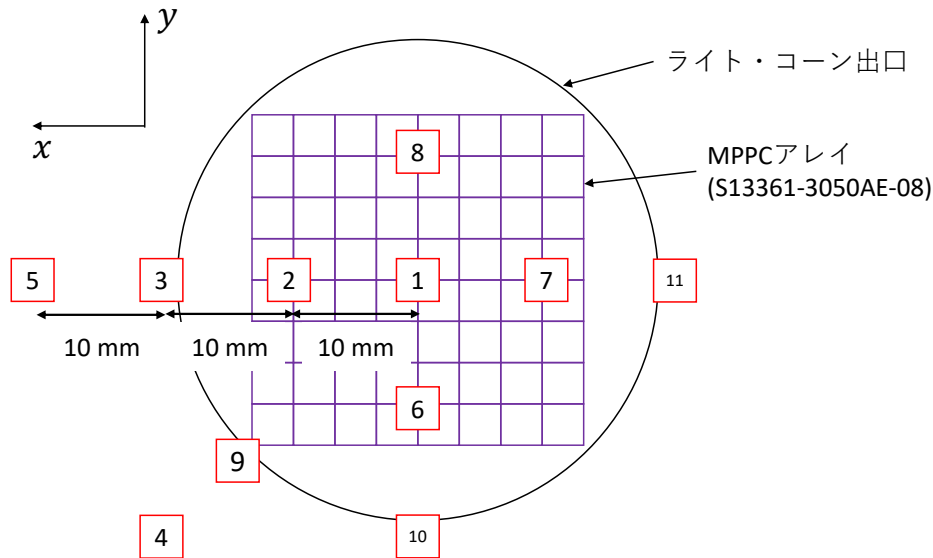


図 4.12: テスト実験でのビーム入射位置。ビームに乗って MPPC の面を見た図。位置 2-5 は中心からそれぞれ 10 mm、20 mm、28 mm、30 mm 離れた位置。位置 6-9 は位置 2 と、位置 10, 11 は位置 3 と同じ距離中心から離れている。

4.4 解析手法

4.4.1 トリガーカウンターの ADC のカットによるイベント選択

実験においては、トリガーを生成しているプラスチック・シンチレータの ADC による事象選択を行い、ビーム粒子が通過した最小電離損失の事象を解析した。30 mm×30 mm のプラスチック・シンチレータの ADC 分布を図 4.13 に示す。図 4.13 の左図は上流側のプラスチック・シンチレータ (T1) の ADC 分布であり、右図は下流側のプラスチック・シンチレータ (T2) の ADC 分布である。2つのピークが見られる下流側の 30 mm×30 mm カウンター (T2) では ADC の値が 120 ch より大きいことを要求した。これは、AC 検出器を通過したビームが電子または陽電子であることを保証するためである。例えば、電子が上流のカウンターを通過したときに γ 線を放出し、その γ 線を下流のカウンターで検出したということが起きた場合、チェレンコフ放射を起こさないイベントが発生してしまう可能性がある。T2 の ADC が小さい方のピークでは、このようなイベントを含んで

いると考えたため、この実験の解析ではADCが大きい方のピークを選択する。上流側の30 mm×30 mm カウンター (T1) ではイベントの選択は行わなかった。

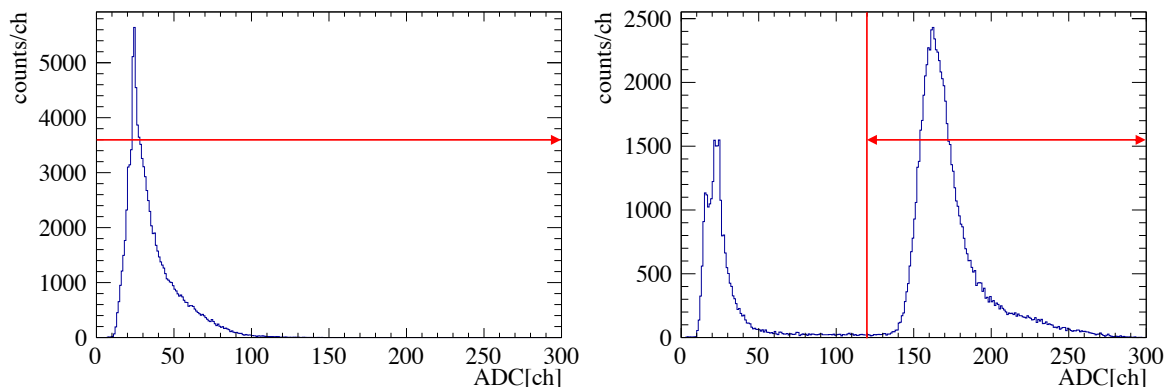


図 4.13: トリガーカウンターである 30 mm× 30 mm のプラスチック・シンチレータの ADC 分布。左図は上流側 (T1)、右図は下流側 (T2) の ADC 分布。図には解析で要求した ADC の範囲を矢印で示している。

解析でビームの入射位置をさらに絞るために 10 mm×10 mm のプラスチック・シンチレータの ADC による事象選択も行った。10 mm× 10 mm のプラスチック・シンチレータ (T3, T4) の ADC 分布を図 4.14 に示す。ビームの入射位置を 10 mm×10 mm の範囲に絞った解析をする際、上流側のカウンター (T3) で ADC の値が 300 ch より大きく、かつ下流側のカウンター (T4) で ADC の値が 160 ch より大きいことを要求した。これは 10 mm×10 mm のカウンターを電子または陽電子が通過したことを保証するためである。

4.4.2 MPPC の TDC のカットによるイベント選択

前章と同様の MPPC 多重度を用いて評価を行った。使用した MPPC アレイは 64 チャンネルあるため、多重度の最大値は 64 である。多重度を求めるために、前章と同様に TDC によるカットを行った。MPPC の Leading TDC の分布を図 4.15 に示す。図 4.15 において、170 ns から 200 ns に見られるピークがトリガーと同期した事象であると考え、図中の 30 ns の TDC 幅でカットした。TDC ピークに 2 成分あるのは、1 光電子と 2 光電子以上の信号に閾値をかける際に、タイミングがずれたためである。また同じ TDC 幅でピークからずれた部分 (210 ns から 240 ns) を暗電流によるバックグラウンドの評価に用いた。

4.4.3 光電子数を得るための較正

実験では MPPC の ADC も取得しているため、多重度に加えて、光電子数によっても測定の評価を行う。TDC のカットを行っていない状態での ADC の分布を図 4.16 に示す。図 4.16 の「pedestal」のチャンネル数 (CH_{pedestal}) と 1 光電子 ($CH_{1\text{p.e.}}$) のチャンネル数を

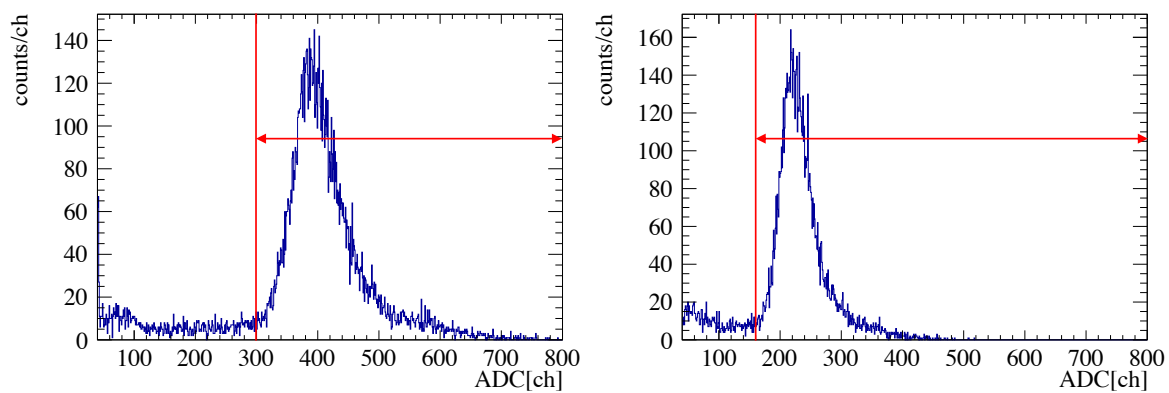


図 4.14: トリガーカウンターである 10 mm× 10 mm のプラスチック・シンチレータの ADC 分布。左図は上流側 (T3)、右図は下流側 (T4) の ADC 分布。図には 10 mm×10 mm の範囲のビームの入射位置を選択する解析で要求した ADC の範囲を矢印で示している。

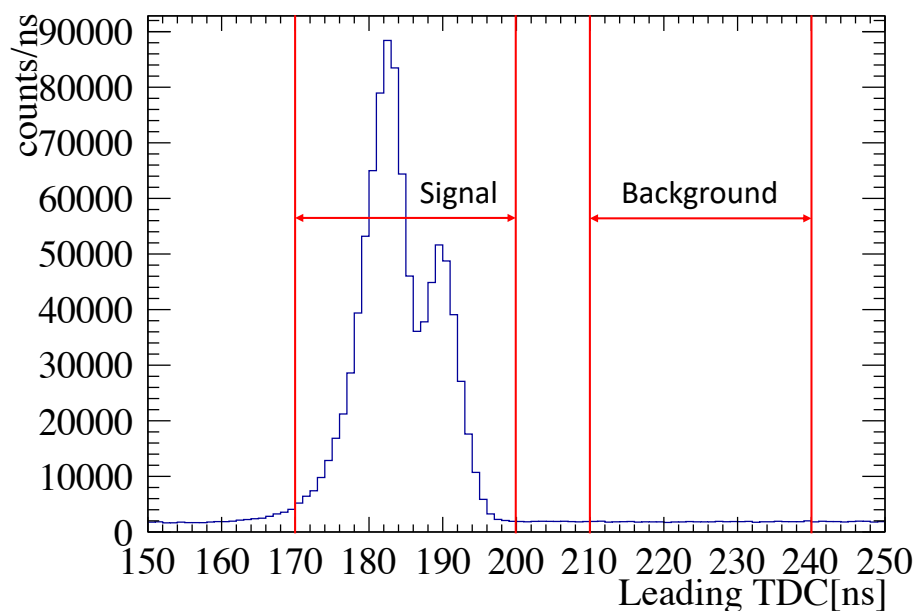


図 4.15: MPPC の Leading TDC の分布。64 チャンネルある MPPC 全て合わせたもの。

求めた。ここから、

$$G = CH_{1\text{p.e.}} - CH_{\text{pedestal}} \quad (4.4)$$

のようにゲイン (G) を求めた。各 ADC のチャンネル数 (CH_{ADC}) を以下のようにゲインを用いて光電子数 ($N_{\text{p.e.}}$) に変換した。

$$N_{\text{p.e.}} = \frac{CH_{ADC} - CH_{\text{pedestal}}}{G} \quad (4.5)$$

TDC によるカットを行い「Signal」を選んだ後、(4.5) 式を用いて、ADC 分布から変換した光電子数の分布を図 4.17 に示す。

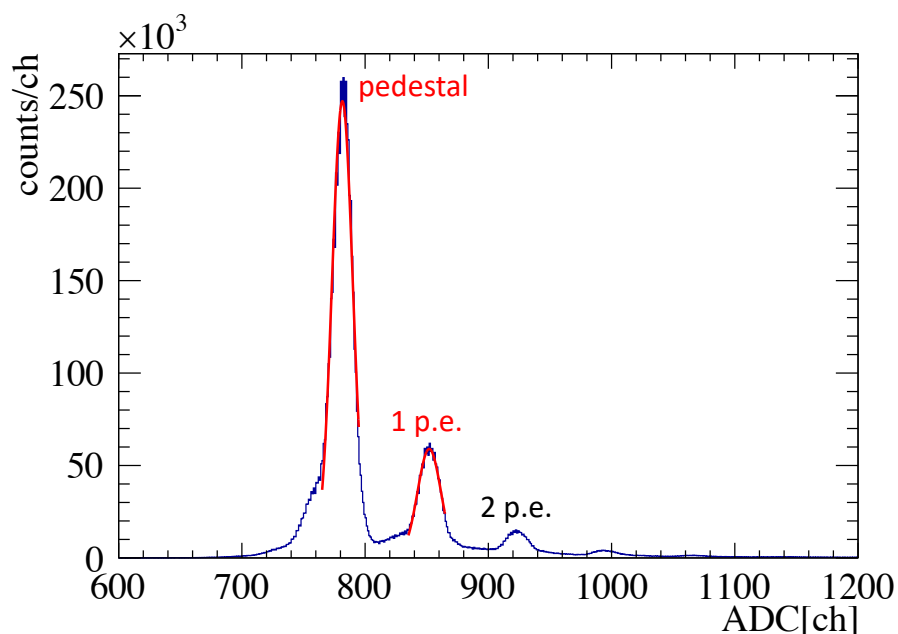


図 4.16: MPPC の ADC 分布。ADC が小さい方からペDESTAL、1 光電子、2 光電子に対応するピークとなっている。

4.5 結果と考察

4.5.1 MPPC の多重度と光電子数

ビームの入射位置が図 4.12 の位置 1 (検出器中心)、MPPC のオーバー電圧が 5.0 V のときの MPPC の多重度を図 4.18 に示す。図 4.18 の左図は 30 mm×30 mm のカウンターをトリガーにしたときの MPPC の多重度であり、右図は 10 mm×10 mm のカウンターのヒットを更に要求したときの MPPC の多重度の結果である。MPPC アレイのサイズは

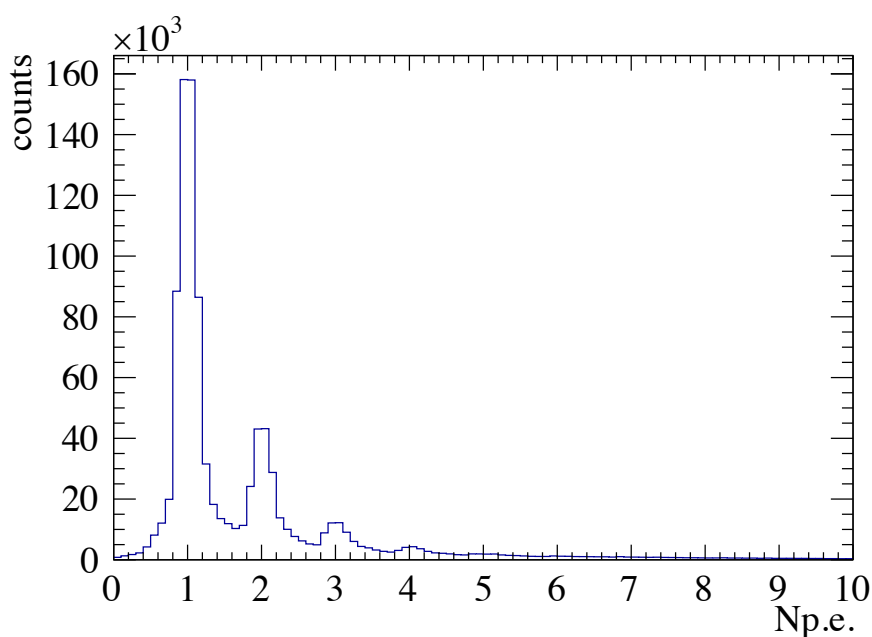


図 4.17: MPPC で検出した光電子数の分布。横軸は光電子 (photo electron; p.e.) の数である。MPPC の全ての光電子数の分布を重ねた。

25.8 mm×25.8 mm であるため、10 mm×10 mm のカウンターへの通過を要求した場合は必ず MPPC アレイを通過するが、30 mm×30 mm のカウンターをトリガーにした場合は MPPC アレイを通過しないイベントも含む。多重度の分布を見ると、ポアソン分布では説明できないような多重度が大きい側にテールを引いたような形をしている。これは、始めからビームとして飛来した 2 粒子や、トリガーカウンターの物質でビーム粒子から制動放射した γ 線が生成した電子・陽電子が、同時にエアロゲルに入ったものである可能性がある。このため、多重度の値は平均値ではなく、テールの影響を受けていないと考えられるピークの値をガウス関数によるフィットで求めた。30 mm×30 mm のときの多重度は 9.36 ± 0.01 、10 mm×10 mm のときの多重度は 9.01 ± 0.03 であった。ビームの通過面積を変えると、MPPC の多重度のビームの入射位置依存が大きい場合には、トリガーカウンターの条件によって多重度の値が異なる可能性が考えられていたが、実際には多重度の値や分布に大きな違いは見られないため、以下の解析では、10 mm×10 mm のカウンターへのヒットを要求したイベントを用いることにした。

トリガーと同期していない暗電流による図 4.15 の「Background」のイベントを選んだときの多重度を図 4.19 に示す。図 4.19 の多重度はポアソン分布によるフィットの結果、MPPC の多重度は 0.753 ± 0.003 となった。

4.5.2 MPPC の多重度のオーバー電圧依存

ビームの入射位置を図 4.12 の位置 1 (検出器中心) に固定し、MPPC への印加電圧を変化させて測定を行なった。その結果を図 4.20 に示す。図 4.20 の横軸は印加電圧とブレイクダウン電圧の差であるオーバー電圧 (V_{ov}) であり、縦軸は MPPC の多重度である。赤い

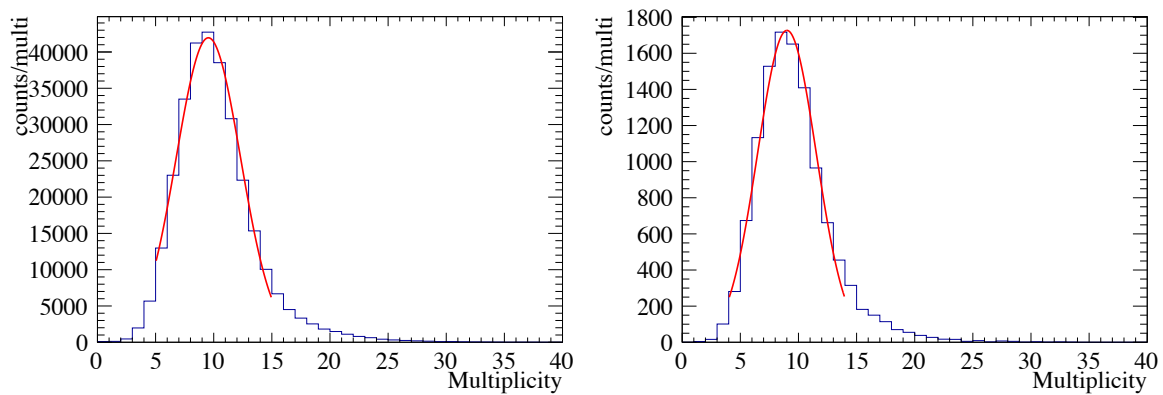


図 4.18: 検出器中心の位置 1 にビームを入射したときの MPPC の多重度の分布。左図は 30 mm×30 mm のカウンターをトリガーにしたときの MPPC の多重度であり、右図は 10 mm×10 mm のカウンターへのヒットを更に要求したときの MPPC の多重度である。

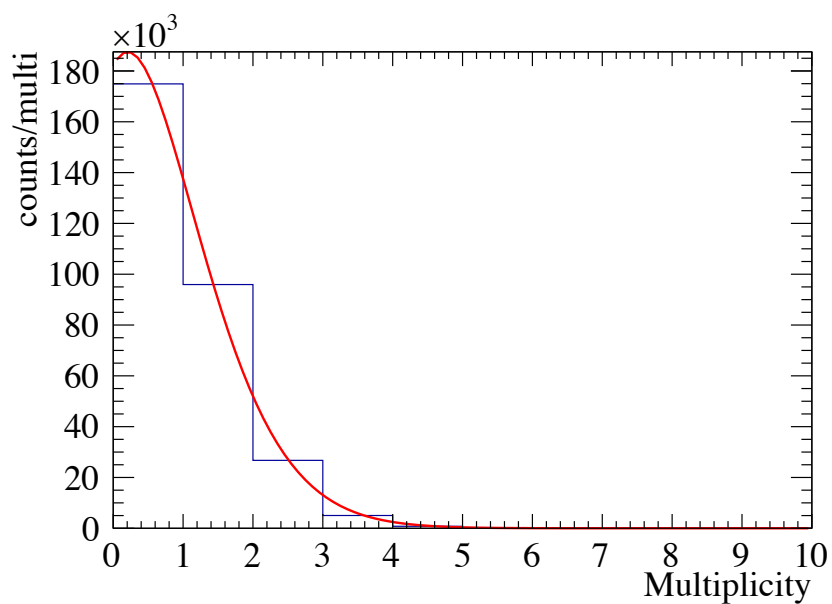


図 4.19: 図 4.15 の「Background」のイベントを選んだときの MPPC の多重度。

点は図 4.15 の「Signal」を選んだときの多重度、黒い点は図 4.15 の「Background」を選んだときの多重度である。オーバー電圧が大きいほど図 4.15 の「Signal」を選んだときの多重度は大きくなるが、同時に暗電流による多重度も大きくなる。 $V_{ov} = +4.0$ V のときの MPPC の多重度が 5.02 ± 0.02 であるのに対し、 $V_{ov} = +5.0, +6.0$ V のときの多重度はそれぞれ 9.01 ± 0.03 と 9.91 ± 0.04 であり、電圧変化による MPPC の多重度の増加の割合が小さくなっているため、 $V_{ov} = +5.0$ V でおよそ飽和していると考えられる。後の測定では、 $V_{ov} = +5.0$ V の電圧を用いた。

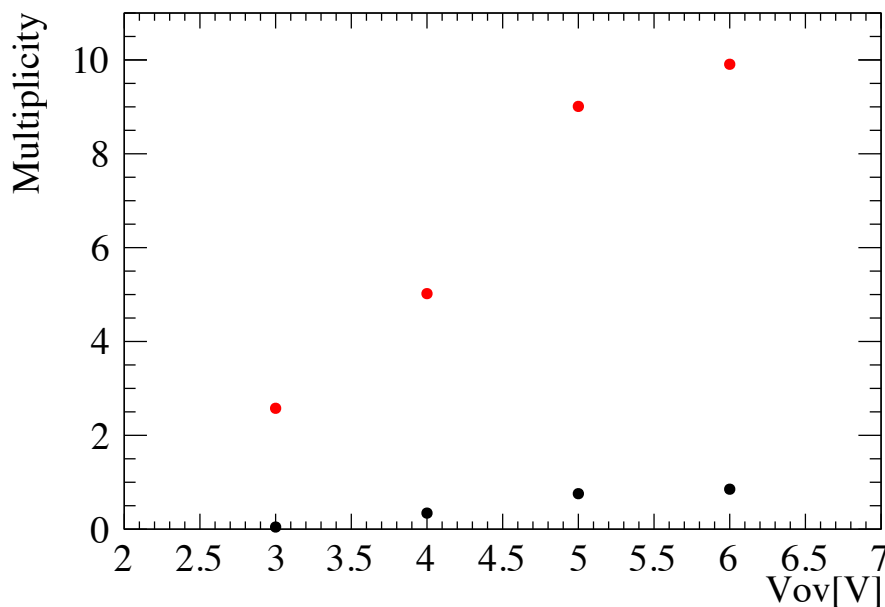


図 4.20: MPPC の多重度のオーバー電圧 (V_{ov}) 依存。赤は図 4.15 の「Signal」を選んだときの多重度、黒は図 4.15 の「Background」を選んだときの多重度である。

4.5.3 MPPC の多重度と光電子数のビーム入射位置依存

図 4.12 に示したビームの入射位置毎の測定を行なった。まず中心からの距離による MPPC の多重度と光電子数の変化を調べた。この結果を図 4.21 に示す。ビームの入射位置を図 4.12 の位置 1-5 まで変化させたときの結果である。位置 1-5 はそれぞれ検出器中心から 0 mm、10 mm、20 mm、28 mm、30 mm 離れた位置である。図 4.21 の左図は位置による多重度をそれぞれ示しているが、位置 2 が最大で多重度は 9.68 ± 0.04 、位置 4 が最小で多重度は 8.60 ± 0.11 となっており、多重度はビームの入射位置に依存して 1 程度変動するが、位置依存は小さいと考えられる。一方で、図 4.21 の右図はビーム入射位置

毎の光電子数をそれぞれ示しており、位置 1, 2 で光電子数はそれぞれ 16.66 ± 0.08 p.e. と 17.76 ± 0.12 p.e. であり、位置 3 の光電子数 11.94 ± 0.08 p.e. と比較すると大きい。位置 1, 2 のときはビームが MPPC に入射し、位置 3-5 のときは MPPC には入射しないので、光電子数の違いは MPPC に直接当たることによる窓材からのチェレンコフ光の検出及び、MPPC 中での電離による信号の増加 (光電子起因ではない) が原因であると考えられる。

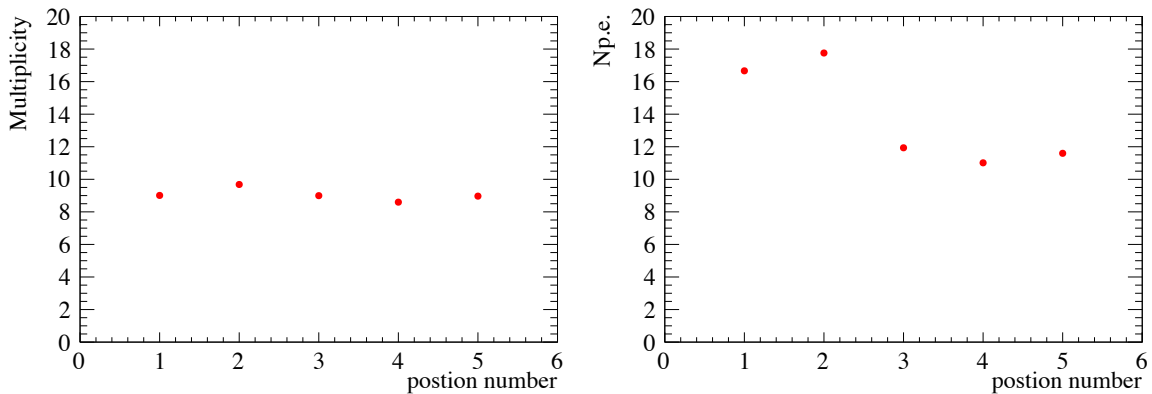


図 4.21: ビーム位置 1-5 のときの MPPC の多重度 (左) と光電子数 (右)。ビーム位置 1-5 はそれぞれ検出器中心から 0 mm、10 mm、20 mm、28 mm、30 mm 離れた位置である。位置 1, 2 はビームが MPPC に直接入射する位置である。

次に中心からの距離が同じで、ライト・コーンの円周方向にビーム入射位置が移動したときの多重度と光電子数の変化を調べた。検出器中心から 10 mm 離れた位置にビームを入射したときの結果を図 4.22 に示す。これらの位置は中心からの距離は同じだが、ビームの広がり x 方向と y 方向で異なるため違いが生じる可能性がある。また、ライト・コーンの構造の点においても左右部分に半分ずつ製作したライト・コーンの接合部分があるため、ライト・コーンの左右と上下では状態が異なる。そのため中心からの距離が 10 mm のときの結果は、位置 2 と 7、6 と 8 がそれぞれ対称になることが期待される。しかし、アルミナイズド・マイラーの貼り方によっては、対象にならない可能性もある。図 4.22 から、位置 2 と 7 の多重度はそれぞれ 9.68 ± 0.04 と 9.64 ± 0.04 であり、これらはほぼ一致しているといえる。位置 6 と 8 の多重度はそれぞれ 9.60 ± 0.04 と 9.62 ± 0.07 であるため、これらもほぼ一致していると考えられる。中心からの距離が 10 mm のとき、どの位置においても多重度は近い値となった。しかし、光電子数については対称にならず、位置 6 では 17.64 ± 0.11 p.e. で、位置 8 では 15.7 ± 0.3 p.e. となり、2 p.e. 程度の差が見られた。

また、検出器中心から 20 mm 離れた位置でも同様に円周方向の位置を変えた測定を行った。その結果を図 4.23 に示す。このとき、位置 3 と 11 が対称になると考えられ、その多重度はそれぞれ 9.00 ± 0.04 と 9.12 ± 0.04 であり、光電子数はそれぞれ 11.9 ± 0.08 p.e. と

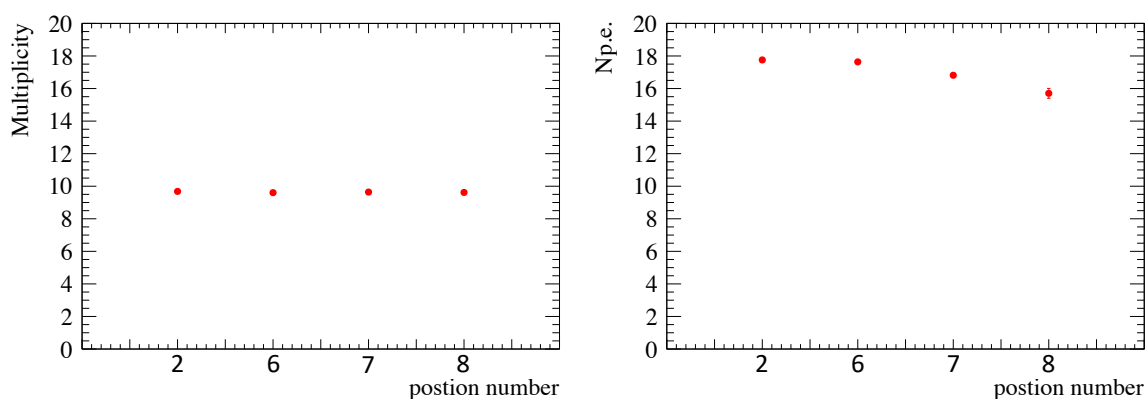


図 4.22: 検出器中心から 10 mm 離れた位置にビームを入射したときの多重度 (左) と光電子数 (右)。

12.1 ± 0.08 p.e. であり、ほぼ対称な結果となった。検出器中心から 20 mm 離れた位置での 4 つの測定点のうち位置 3 で多重度、光電子数共に最小になった。一方で位置 9 のときが多重度と光電子数の値が最大となり、その値はそれぞれ 10.03 ± 0.09 と 13.61 ± 0.16 p.e. となった。検出器中心から 20 mm 離れた位置をビームが入射するとき、多重度は最大で 1.0 ± 0.1 の差があり、光電子数は最大で 4.5 ± 0.2 p.e. の差があった。光電子数に関してはビームの入射位置による差が大きく、理由の理解が簡単ではないため、更なる調査が必要である。一方で、多重度に関してはビームの入射位置による差が小さいという結果が得られた。

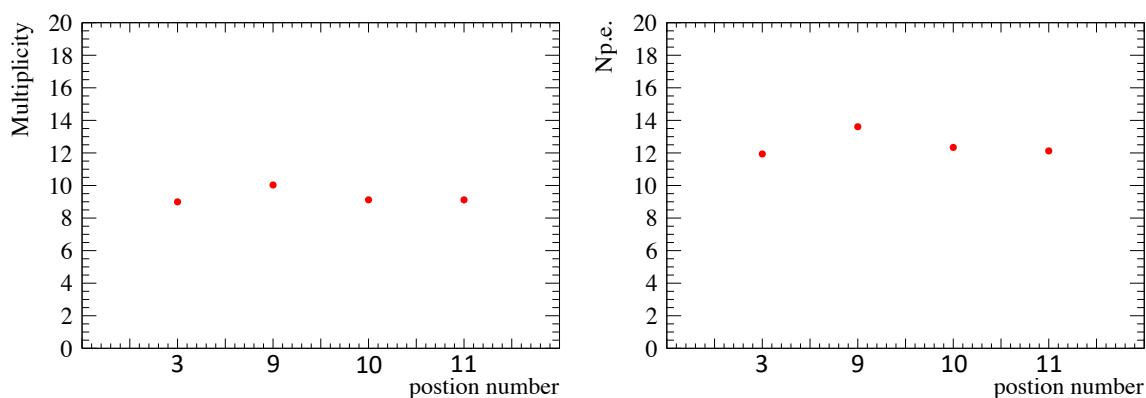


図 4.23: 検出器中心から 20 mm 離れた位置にビームを入射したときの多重度 (左) と光電子数 (右)。

ライト・コーンを用いた AC 検出器の場合、ビームの入射位置を変えての測定の結果から、多重度に関してはビームの位置によらずほぼ一定であることがわかった。これはビームの入射位置により多重度が大きく異なっていた前章の試作機と比べ大きく改善した点であり、散乱粒子識別のための実機に適した性能であると考えられる。

4.5.4 エアロゲルを除いての測定結果

図 4.24 にビーム入射位置が位置 1 のときの、ナフロン箱の有無による多重度のヒストグラムを比較する。ナフロン箱からエアロゲルを取り除くと、エアロゲルからのチェレンコフ放射の寄与はなくなるが、箱内の空気によってチェレンコフ放射が起こるようになる。ライト・コーン内部からのみの影響を調べるためには、箱自体を取り除いたライト・コーンのみでの測定を行う必要があった。図 4.24 の左図は位置 1 にビームを入射したときの空箱での MPPC の多重度の分布であり、右図はライト・コーンのみでの多重度の分布である。ビーム入射位置が位置 1 でエアロゲルがあるときの分布は図 4.18 の右図であり、そのときの多重度は 9.01 ± 0.03 であった。図 4.24 の左図のエアロゲルがない場合の多重度は 6.04 ± 0.03 であり、右図のライト・コーンのみでのときの多重度は 3.33 ± 0.03 であった。この結果から、エアロゲルなしの場合でも MPPC が光を検出していることが分かる。

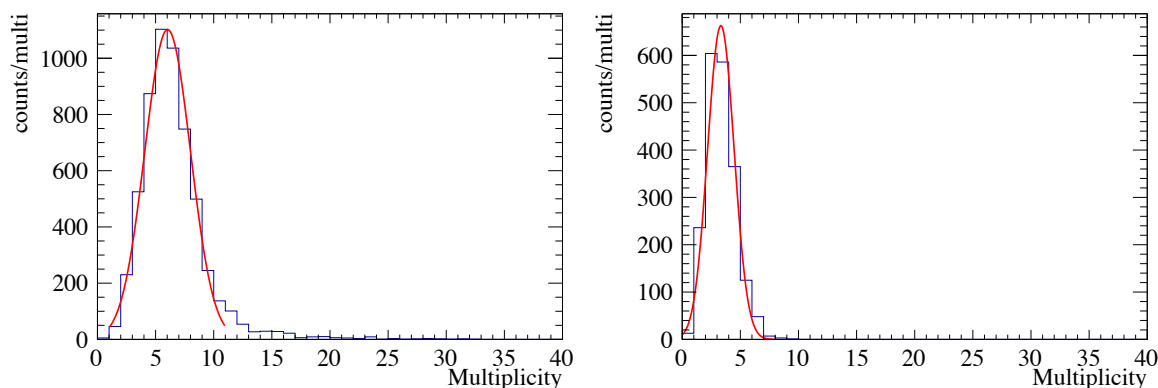


図 4.24: 位置 1 でのナフロン箱の有無による MPPC の多重度の分布の違い。左図はエアロゲルなし、ナフロン箱とライト・コーンありのときの多重度、右図はライト・コーンのみで測定したときの多重度である。

ライト・コーンのみでのときの多重度 3.33 ± 0.03 は、MPPC の窓材とライト・コーン内部の空気からのチェレンコフ光と、MPPC 受光面の電離によるものであると考えられる。直接ビームが入射した MPPC は、ビームの直接入射の影響で MPPC 中での電離又は MPPC の窓材からのチェレンコフ光を検出する可能性があり、更に広がり小さい空気からの

チェレンコフ光を検出する可能性もあるため、高確率で多重度1だけ余分な寄与があると考えられる。また、ライト・コーン内の空気からのチェレンコフ光は最大で半径3.9 mmまで広がるため、ビームが直接入射しないMPPCでも光が検出されると考えられる。

エアロゲルが入っていない箱ありでのMPPCの多重度 6.04 ± 0.03 は、ライト・コーンのみのMPPCの多重度より大きくなっていった。箱内部の空気からのチェレンコフ光は半径6.5 mmまで広がるため、ライト・コーン内の空気からのチェレンコフ光を検出したMPPCとは別のMPPCで検出され、多重度の増加に寄与すると考えられる。しかし、ライト・コーンの長さ160 mmと箱の厚さ110 mmを考慮すると、箱内部の空気からのチェレンコフ光以上に光を検出していると考えられ、これはナフロンからのチェレンコフ光及びシンチレーション光の寄与の可能性がある。

ビームが直接MPPCに入射しない位置3でのエアロゲルの有無による多重度のヒストグラムを図4.25に示す。図4.25の左図はエアロゲルを入れた検出器、右図はエアロゲルを除いた検出器の位置3にビームを入射したときのMPPCの多重度の分布である。位置3では箱内のエアロゲルの有無による測定のみを行い、ライト・コーンのみによる測定は行っていない。図4.25からMPPCの多重度をそれぞれ求めると、エアロゲルがあるときは 9.00 ± 0.04 であり、ないときは 2.89 ± 0.04 であった。エアロゲルがないときのMPPCの多重度は、ナフロンからのチェレンコフ光及びシンチレーション光と、箱及びライト・コーン内部の空気からのチェレンコフ光によるものであると考えられ、位置1の場合とはMPPCへのビームの直接入射がないことのみ異なる。MPPCへの直接ビームが入射することの寄与は最大で1と考えると、位置1での空箱(図4.24左図)の結果と矛盾する結果となった。詳しくはシミュレーションの節4.6.6で考察する。

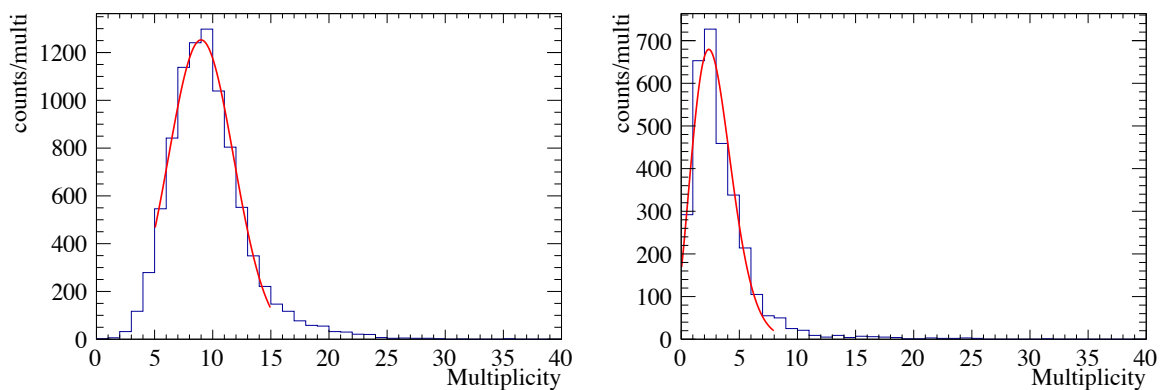


図 4.25: 位置3でのエアロゲルの有無による多重度の分布の違い。左図はエアロゲルがあるときの多重度の分布、右図はエアロゲルを除いた箱があるときの多重度の分布である。右図の空箱の場合の分布はポアソン分布を仮定したフィットを行った。

4.5.5 検出効率

図 4.26 にビーム入射位置毎の AC 検出器としての検出効率の結果を示す。図 4.26 の黒い点は多重度 3 以上を要求した閾値 3 での検出効率であり、赤い点は閾値 4、青い点は閾値 5、緑の点は閾値 6 での検出効率である。暗電流による影響のみを考慮して閾値を設定する場合には、図 4.19 より、閾値は 4 で暗電流による影響は十分に除去できる。図 4.26 から、閾値 4 の設定でも $97.5 \pm 0.3\%$ 以上と高い検出効率となった。テスト実験ではビームとして電子または陽電子を用いたため、ライト・コーン内の空気でチェレンコフ放射を起こすので、実機で π 中間子を用いる場合に比べて多重度が大きくなる。このため、検出効率を高く評価している可能性がある。また、空気からのチェレンコフ光の影響で、 K 中間子を用いた場合に暗電流以上の多重度となると、誤検出を防ぐために、閾値を高く設定する必要があり、 π 中間子の検出効率の低下を生じさせてしまう可能性がある。しかし、電子または陽電子を用いた場合の検出効率は、95% 以上であり、 π 中間子を用いた場合でも目標性能の達成が期待される。ライト・コーンと MPPC アレイを用いることにより、低屈折率のエアロゲルからの少ないチェレンコフ光を効率よく集光でき、実機の製作に向けた最大の課題であった低い発光量を補う測定器技術を開発できた。

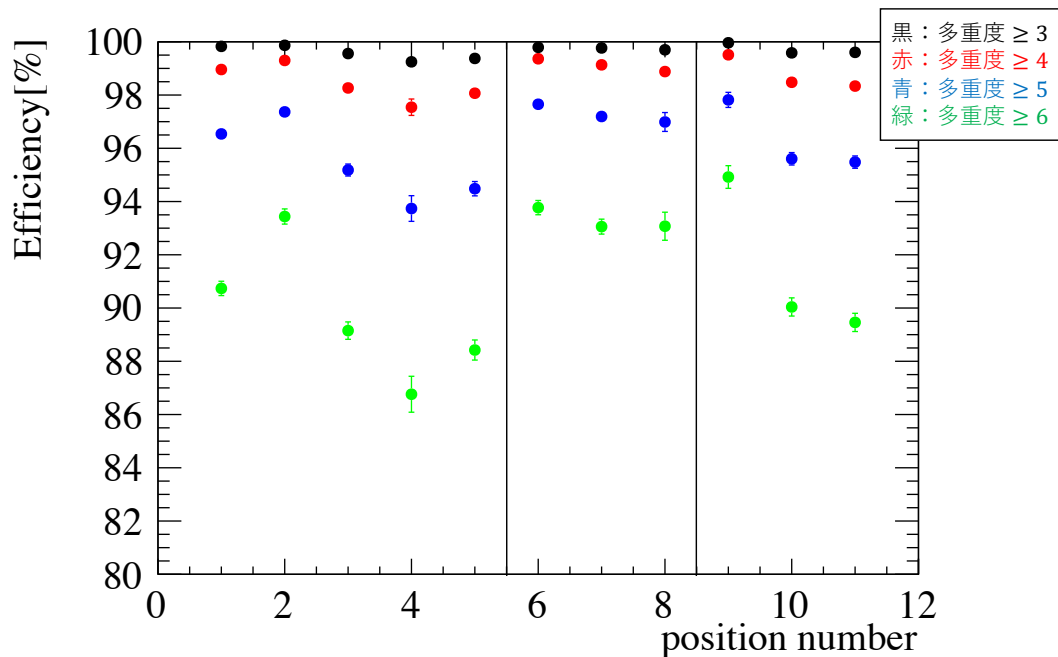


図 4.26: 各ビーム入射位置毎の、多重度に閾値を設定したときの閾値型 AC 検出器としての検出効率。黒の点は MPPC の多重度 3 以上、赤の点は多重度 4 以上、青の点は多重度 5 以上、緑の点は多重度 6 以上の割合である。

4.6 Geant4でのシミュレーションによる試作機の再現

ライト・コーンやエアロゲルの特性の最適化を行うため、Geant4でのシミュレーションによる試作機の再現を行う。試作機の再現を行うことで、実機の製作に向けた π 中間子や K 中間子でのMPPCの多重度や検出効率を見積もった。

4.6.1 エアロゲルのパラメータ

エアロゲルのパラメータとしては、サイズ、屈折率、透過長、吸収長を考慮した。エアロゲルサイズは90 mm(縦) × 90 mm(横) × 105 mm(厚)とした。屈折率は波長に依らず一定とし、 $n = 1.0086$ を用いた。透過長に関しては、表 4.1 から波長400 nmで9.0–9.5 mmの間で、実験の結果を再現するようなパラメータとして最適値を決定した。他の波長に関しては、波長の4乗に比例する波長依存を使用した。吸収長は、それぞれの波長で、透過長の1000倍として波長毎に与えた。

4.6.2 ナフロンに関するパラメータ

実験にはエアロゲルを入れるためにナフロンを箱を用いたが、これは前章で使用したナフロンと同じものである。試作AC検出器では、ナフロンによる乱反射が起こればと考えられ、シミュレーションでの反射率のパラメータは、前章のシミュレーションによる再現最適化した波長240–900 nmで83.2%とした。また、前章のシミュレーションと同様、ナフロンの屈折率 $n = 1.35$ 、吸収長を非常に短くと設定した。そのため、ナフロンでチェレンコフ放射は起きるが、ナフロン内で発生したチェレンコフ光は直ちに吸収され、他の物質との境界付近で発生したナフロンからのチェレンコフ光は、ナフロンに吸収されず、MPPCで検出される可能性がある。

4.6.3 ライト・コーンに関するパラメータ

ライト・コーンのサイズは、実際に製作したライト・コーンに合わせて、入口及び出口の内径はそれぞれ36 mmと100 mmとし、長さは160 mmとした。ライト・コーンの内部にはアルミナイズド・マイラーを貼っており、鏡面反射が起こればと考えられる。使用したアルミナイズド・マイラーの光学的性質の測定は行っていないため、ライト・コーン(アルミナイズド・マイラー)の反射率はこの実験の結果を再現するように最適値を決定した。この際、反射率は波長240 nmから900 nmの範囲では波長に依らず一定とした。また、ライト・コーンの屈折率を $n = 1.48$ と設定し、吸収長はナフロンするときと同様に非常に短くとした。そのため、ライト・コーンと空気の境界付近で発生したチェレンコフ光がMPPCで検出される可能性がある。

4.6.4 試作機を用いたテスト実験の再現

試作機のライト・コーン出口の中心にMPPCアレイを配置し、その周りは基板が剥き出しの状態に配置している。そのため試作機のライト・コーン出口に到達した光のうち、MPPC受光面に入った光は検出するが、それ以外の部分に到達した光が再度MPPC受光面に入ることはほぼ起こればと考えられる。したがって、シミュレーションではライト・コーン出口の受光面以外の部分に到達した光に関しては、その時点で基板に吸収され

るとした。

入射するビームは運動量 $0.1 \text{ GeV}/c$ の電子とし、ビームの広がり x 方向 (左右方向) にのみ 10 mm に一様に広がっているとした。これは前章と同様、ビームとして用いた電子の広がり y 方向は磁石により曲げられることによって生じたものであると考えたからである。そのため、 x 方向にはトリガーサイズである 10 mm の広がりを持つが、 y 方向には広がらないとした。また、ビームの入射角度に関しては、図 4.11 から $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ トリガーは 535 mm 離れており、ビームの角度は 1.1° 以下となるため、このシミュレーションではビームに角度を持たせず、MPPC 面に対して垂直に入射した。

4.6.5 解析手法

シミュレーションでは、発生したチェレンコフ光を検出する仮想的な構造物として、出口全体を覆ったものを配置している。この出口全体で検出した光のうち、実際の MPPC の受光面がある領域で検出した光のみを解析によって選択して、多重度等の算出に用いた。図 4.27 の左図に出口全体で検出した光のヒットパターンを示す。この図において赤で囲まれている部分に MPPC アレイがある。MPPC アレイ内の MPPC 同士の間隔も考慮し、実際に解析に用いた光のヒットパターンを図 4.27 の右図に示す。多重度の評価では、1 電子の通過によって 1 つの MPPC に複数の光子が入った場合であっても、MPPC の多重度を 1 のみの増加として扱った。

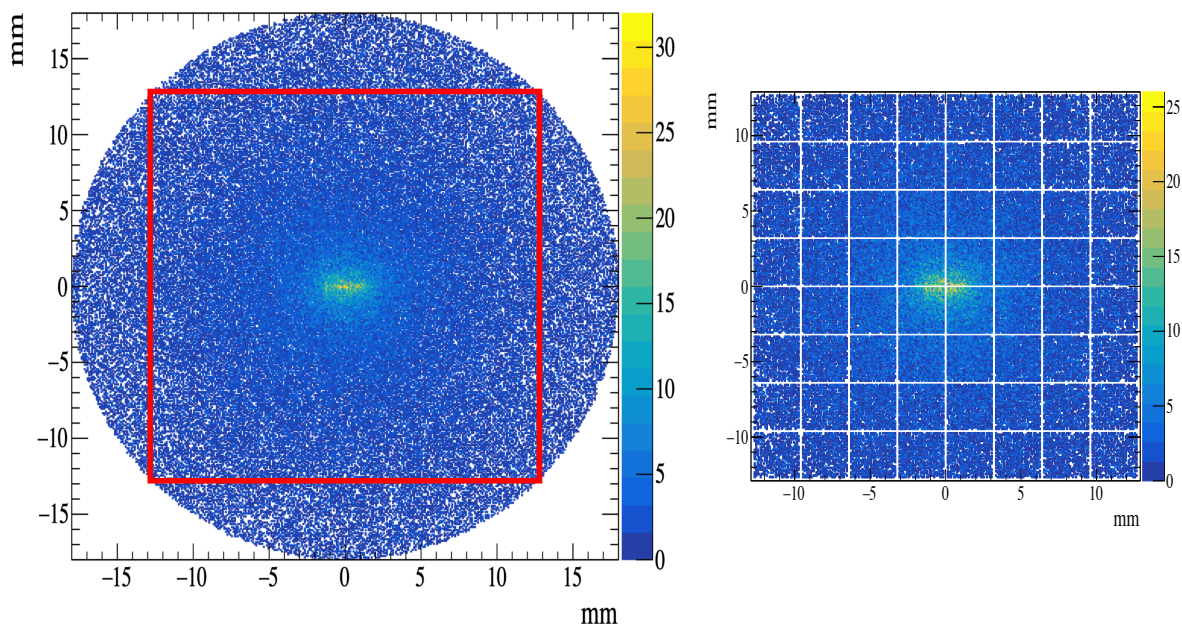


図 4.27: ライト・コーン出口全体 (左) と MPPC 受光面 (右) でのヒットパターン。

MPPCの多重度及び光電子数のヒストグラムを作る解析では暗電流の再現も行った。測定値の各MPPC毎の暗電流により信号を出す確率と、シミュレーションでランダム生成した0-100%の値を比較することで、暗電流を検出する割合を求めた。この方法によって作った暗電流による多重度のヒストグラムを図4.28に示す。これは図4.19の結果を再現している。

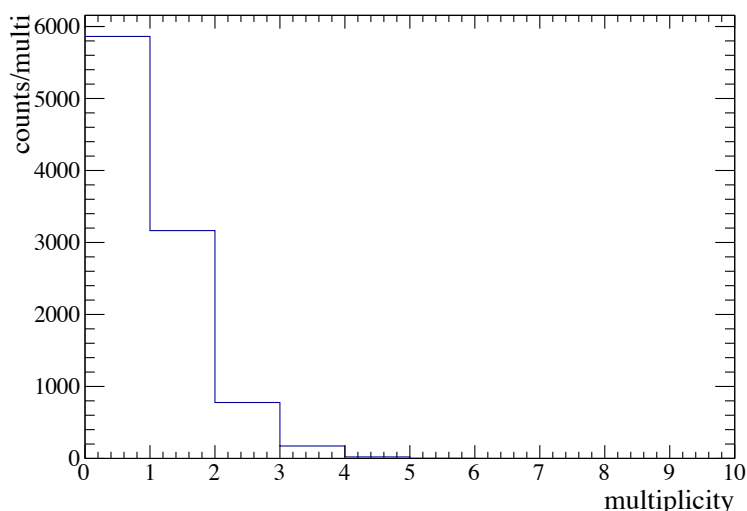


図 4.28: シミュレーションでの暗電流による多重度の再現。

4.6.6 結果と考察

シミュレーションにおけるライト・コーン(アルミナイズド・マイラー)の反射率を最適化するため、ライト・コーンの反射率を変えてのシミュレーションを行った。最適化は、MPPCにビームが直接入射したときの影響を除くため、ビームがMPPCに直接ヒットしない位置3でのMPPCの多重度の結果を用いて行った。図4.29にMPPCの多重度のライト・コーンの反射率依存を示す。図4.29の左図は波長400nmの光に対するエアロゲルの透過長を9.0mmとしてシミュレーションを行った結果であり、反射率94%でMPPCの多重度は 8.99 ± 0.03 となり、位置3での測定値 9.00 ± 0.04 と一致した。

しかし、アルミナイズド・マイラーの反射率として94%は高過ぎると思え、エアロゲルの透過長を変えてシミュレーションを行い、再度ライト・コーンの反射率の最適化を行った。波長400nmのときエアロゲルの透過長9.5mmとした場合のMPPC多重度の反射率依存を図4.29の右図に示す。位置3での測定値を最も再現するのは、反射率92.5%のときであり、MPPCの多重度は 9.01 ± 0.04 であった。エアロゲルの透過長が9.5mm(波長400nmのとき)、ライト・コーンの反射率が92.5%の組み合わせが、測定値をよく再現するパラメータであるとして後のシミュレーションに用いた。

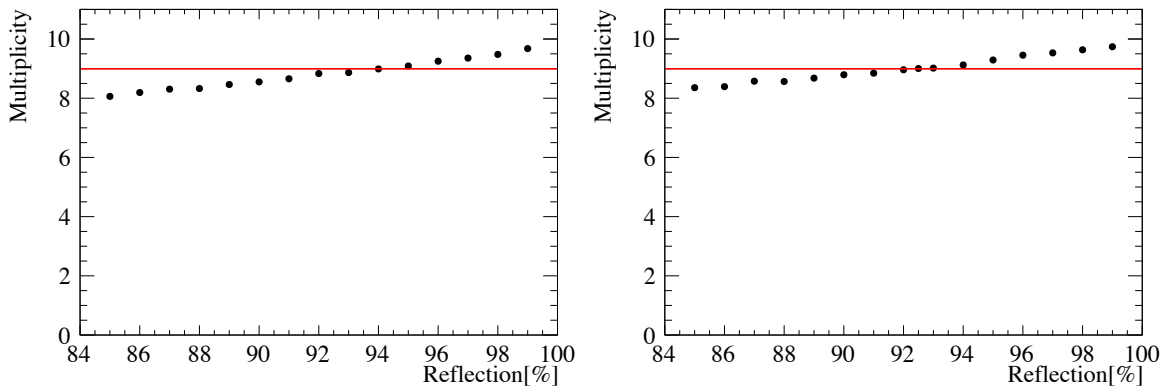


図 4.29: MPPC の多重度のライト・コーンの反射率依存。左図はエアロゲルの透過長が 9.0 mm のとき、右図は 9.5 mm のときである。

最適化した条件において行ったシミュレーションの結果を図 4.30 と図 4.31 に示す。図 4.30 の左図は MPPC アレイにビームが入射する位置 1 にビームを入射し、エアロゲルがあるときの MPPC の多重度、右図はエアロゲルがない場合の多重度の分布である。図 4.31 の左図は MPPC アレイにビームが入射しない位置 3 にビームを入射し、エアロゲルがあるときの MPPC の多重度、右図はエアロゲルがない場合の多重度の分布である。位置 1, 2, 3 での測定とシミュレーションによる MPPC の多重度を表 4.2 に示す。位置 3 にビームが入射する場合、このときのエアロゲルがある場合の結果を再現するようにパラメータの調整を行ったため、測定値とシミュレーションの値はほぼ一致しているが、エアロゲルを取り除いた場合には測定値とシミュレーションの値に差が生じた。この差はシミュレーションで考慮していないナフロンからのシンチレーション光による寄与の可能性がある。位置 2 にビームが入射する場合も、エアロゲルがある場合の結果はよく再現されているが、空箱では測定値とシミュレーションの値に位置 3 以上に差が生じている。シミュレーションでは、ナフロンからのシンチレーション光に加えて、MPPC へ粒子が入射することによる MPPC 中の電離の影響も考慮していない。位置 2 では MPPC へ直接ビームが入射する場合があり、電離が起きた場合には多重度の増加に寄与するため、この差は電離による影響であると推測される。位置 1 にビームが入射する場合、エアロゲルがある場合の結果は測定値とシミュレーションで、10 % で一致した。エアロゲルがないときに関しては、測定値 6.04 ± 0.03 に対して、シミュレーションでは 3.52 ± 0.02 であり、2 つの値に大きな差があった。位置 1 と位置 2 では MPPC にビームが直接入射するなど、測定の条件はほぼ同じであるため、位置 1 での測定値とシミュレーションの差は、ナフロンからのシンチレーション光及び MPPC 中の電離のみでは説明できない。位置 1 での大きな差は、原因不明のため、今後の調査が必要である。また、今後の調査において、シンチレーション光を区別するためには、光を吸収するシート等をビーム入射側の内壁に設置する必要がある。また、箱で発生したシンチレーション光は、エアロゲルを入れると散乱によって MPPC へ到達する数が少なくなるため、影響は無視できる考えられる。

図 4.30 と図 4.31 の右図はエアロゲルを除いたシミュレーションであり、箱とライト・コーン内の空気の影響を受けている。ライト・コーンからの影響のみを調べるため、箱

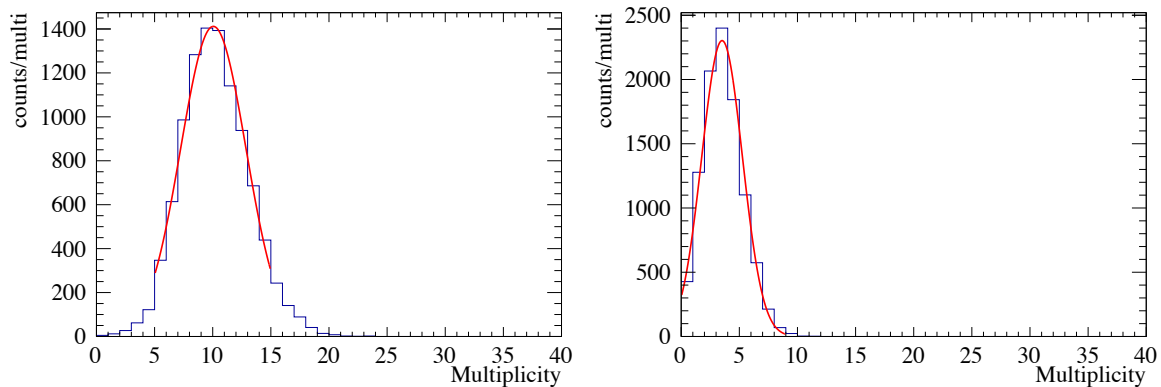


図 4.30: シミュレーションで位置 1 にビームを入射したときのエアロゲルの有無による MPPC の多重度の違い。左図はエアロゲルがあるときの多重度であり、右図はエアロゲルがないときの多重度である。

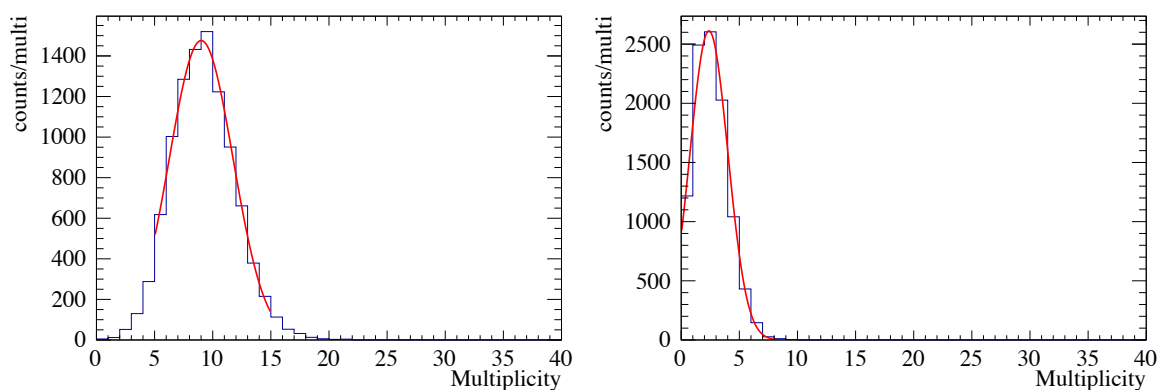


図 4.31: シミュレーションで位置 3 にビームを入射したときのエアロゲルの有無による MPPC の多重度。左図はエアロゲルがあるときの多重度であり、右図はエアロゲルがないときの多重度である。左図のエアロゲルがあるときの MPPC の多重度の測定値を、パラメータ再現に用いた。

表 4.2: 位置 1, 2, 3 での MPPC の多重度

| 条件 | 測定値 | シミュレーション |
|--------------------|-----------------|------------------|
| 位置 1、エアロゲル+ライト・コーン | 9.01 ± 0.03 | 10.05 ± 0.04 |
| 位置 1、箱+ライト・コーン | 6.04 ± 0.03 | 3.52 ± 0.02 |
| 位置 1、ライト・コーンのみ | 3.33 ± 0.03 | 2.32 ± 0.02 |
| 位置 2、エアロゲル+ライト・コーン | 9.68 ± 0.04 | 9.62 ± 0.03 |
| 位置 2、箱+ライト・コーン | 3.61 ± 0.04 | 2.90 ± 0.02 |
| 位置 2、ライト・コーンのみ | – | 1.94 ± 0.02 |
| 位置 3、エアロゲル+ライト・コーン | 9.00 ± 0.04 | 9.00 ± 0.04 |
| 位置 3、箱+ライト・コーン | 2.89 ± 0.04 | 2.41 ± 0.02 |
| 位置 3、ライト・コーンのみ | – | 1.56 ± 0.03 |

内を真空にし、チェレンコフ放射が起こらないようにしてシミュレーションをした。ライト・コーンのみとした場合の位置 1 及び位置 3 での MPPC の多重度の分布を図 4.32 に示し、位置 1-3 での MPPC 多重度の値を表 4.2 に示す。位置 2, 3 におけるライト・コーンのみの測定は行なっていないため、表 4.2 の位置 2, 3、ライト・コーンのみの測定値はない。図 4.32 の左図は位置 1 に、右図は位置 3 に箱内でチェレンコフ放射が起きない条件でビームを入射した場合の MPPC の多重度である。ライト・コーンだけのシミュレーションの結果の分析から、MPPC の多重度のほとんどは空気からのチェレンコフ光と暗電流によるものであることが分かった。検出器中心に近い方が多重度が大きくなっているのは、空気からのチェレンコフ光は広がり小さいために、位置 1 ではほとんどの光が鏡面反射せずに直接 MPPC に検出されるからである。位置 1 におけるライト・コーンだけのときの測定値とシミュレーションでの MPPC の多重度はそれぞれ 3.33 ± 0.03 と 2.32 ± 0.02 であり、測定値の方が大きくなっている。シミュレーションでは MPPC の受光面の電離を考慮していない点で実際の測定とは異なっている。シミュレーションの結果では、空気からのチェレンコフ光の寄与は小さく、MPPC にビームが直接入射しても窓材からのチェレンコフ光はほぼ発生しないことが分かった。そのため、ライト・コーンだけの測定値とシミュレーションの差は、MPPC 中の電離によるものであると考えられるが、その寄与は 1 未満であるため、2 つの値の差は完全には説明できない。位置 1 でのライト・コーンだけの測定値とシミュレーションの差の原因も不明な点があるため、これらのエアロゲルなしのデータに関しては今後の調査が必要である。

電子の入射位置を変化させてのシミュレーションを行った。電子の入射位置毎の MPPC の多重度の結果を図 4.33 に示す。図 4.33 より、位置 1, 4 ではシミュレーションと測定値の MPPC の多重度に差が見られるが、10% の範囲内で再現した。位置 3 及び位置 9-11 は検出器中心からの距離が 20 mm であり、鏡面反射の仕方は対称であるが、位置 9 のみ MPPC アレイの頂点付近に入射位置がくるため、位置 3, 10, 11 よりもライト・コーンに近い MPPC が多くなるため、MPPC にチェレンコフ光が多く入射する。シミュレーションで、位置 9 の MPPC の多重度が、位置 3, 10, 11 に比べて大きくなるのが再現されている。シミュレーションによって、ライト・コーンによる集光と MPPC アレイを利用し

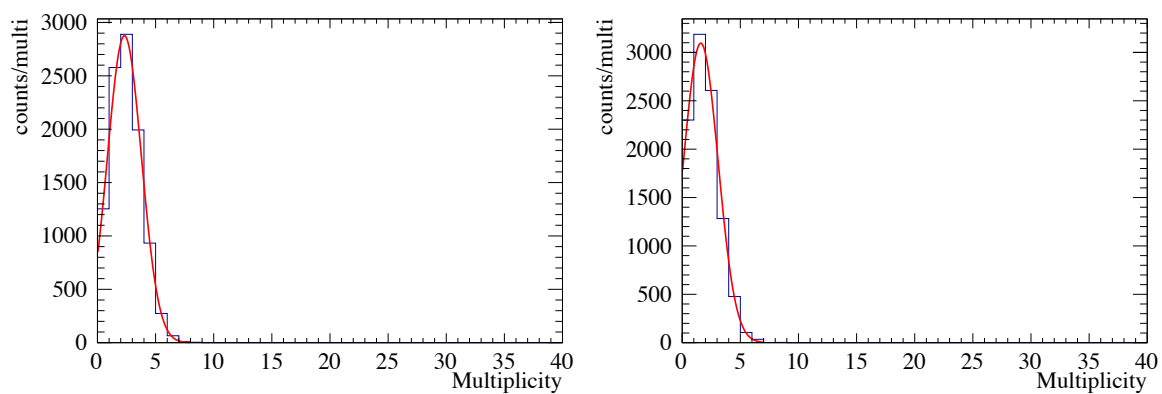


図 4.32: ライト・コーンのみの MPPC の多重度。左図は位置 1 に、右図は位置 3 にビームを入射したもの。

た試作 AC 検出器の MPPC の多重度と、その位置依存性を十分に再現することができた。試作 AC 検出器で得られたデータを用いて最適化したシミュレーション・コードによって、次章では π 中間子と K 中間子に関する性能を見積もる。

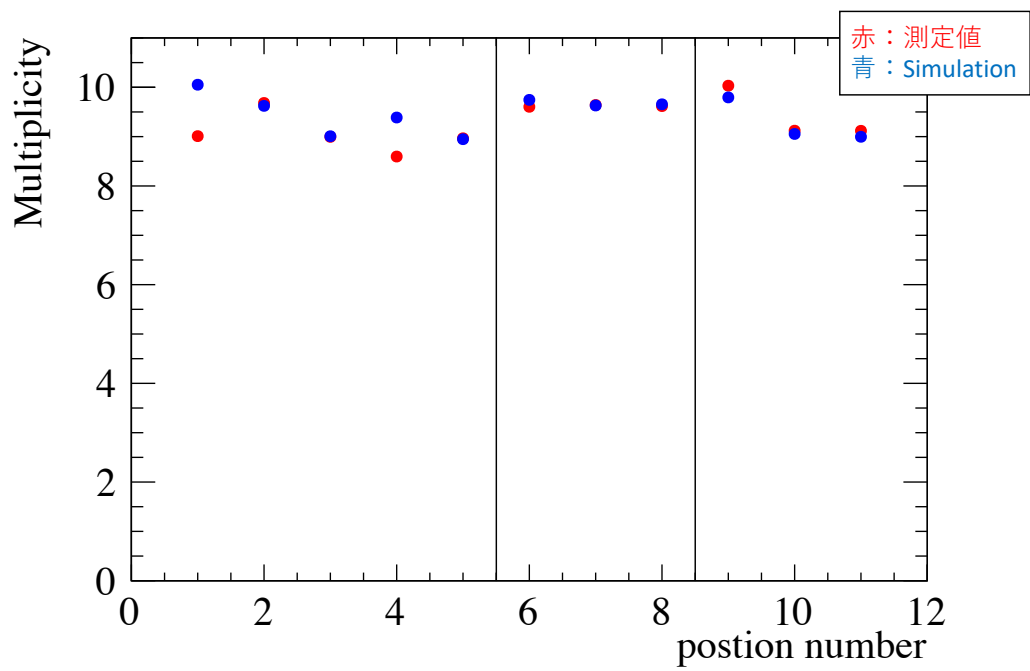


図 4.33: ビームの入射位置を変更した場合の MPPC の多重度 (左) と光電子数 (右) の比較。赤の点が測定値、青の点がシミュレーションで得られた値。

第5章 実機に向けたシミュレーションと性能評価

5.1 π 中間子と K 中間子におけるシミュレーション

実機の製作に向け、Geant4で再現した試作AC検出器によって、シミュレーションで π 中間子と K 中間子の検出効率を見積もった。前章で再現したライト・コーンによる集光とMPPCアレイを利用した閾値型エアロゲル・チェレンコフ検出器を用いてシミュレーションを行う。エアロゲルの屈折率に関しては、実機で使用予定の $n = 1.007$ とした。入射する粒子は $1.2 \text{ GeV}/c$ から $4.0 \text{ GeV}/c$ の π 中間子または K 中間子とした。実機において、散乱してきた π 中間子と K 中間子は検出器に対して垂直のみでなく、若干の角度をもって入射してくるため、入射角度は実際の実験で想定されている検出器に対して 0° から 5° となるように、発生地点で粒子が持つ角度を 0° から 5° で一様に分布するとした。エアロゲルの大きさが $90 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 四方であり、入射粒子が全てエアロゲルを通過するようにするため、粒子の入射位置は検出器中心から $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 四方に一様に分布するとした。また、 π 中間子と K 中間子の電離による δ -rayの影響も考慮した。崩壊による影響が十分に小さいため、シミュレーション上は粒子の崩壊が起こらないと仮定した。

5.1.1 ライト・コーンの長さの最適化

実機で用いる屈折率 $n = 1.007$ のエアロゲルを用いると、 $1.2 \text{ GeV}/c$ から $4.0 \text{ GeV}/c$ の運動量領域で π 中間子と K 中間子の識別が可能である。実機で主に識別する運動量領域は 2.0 – $4.0 \text{ GeV}/c$ であるため、運動量 $2.0 \text{ GeV}/c$ のときと $4.0 \text{ GeV}/c$ の π 中間子を用いてライト・コーンの長さの最適化を行った。その結果を図5.1に示す。図5.1の左図は運動量 $2.0 \text{ GeV}/c$ の π 中間子、右図は運動量 $4.0 \text{ GeV}/c$ の π 中間子でのシミュレーションで得られたライト・コーンの長さ毎のMPPCの多重度である。運動量 $2.0 \text{ GeV}/c$ の場合と $4.0 \text{ GeV}/c$ の場合の両方で、MPPCの多重度が最大となるライト・コーンの長さは 120 mm であり、このときのMPPCの多重度はそれぞれ 4.73 ± 0.02 と 6.15 ± 0.03 であった。したがって、最適なライト・コーンの長さはMPPCの多重度が最大となる 120 mm とした。

5.1.2 運動量毎のライト・コーンの性能

運動量 $1.2 \text{ GeV}/c$ から $4.0 \text{ GeV}/c$ の π 中間子の通過によって、屈折率 $n = 1.007$ のエアロゲルからチェレンコフ光が放射されるが、粒子の運動量が異なるとき、チェレンコフ角の大きさも異なる。運動量が変わることで、ライト・コーンへの入射角度が変わるため、粒子の運動量毎にライト・コーンによる収率がどのように変化するかを調べた。

$4.0 \text{ GeV}/c$ の運動量の π 中間子でのライト・コーンの長さの最適化の結果である 120 mm

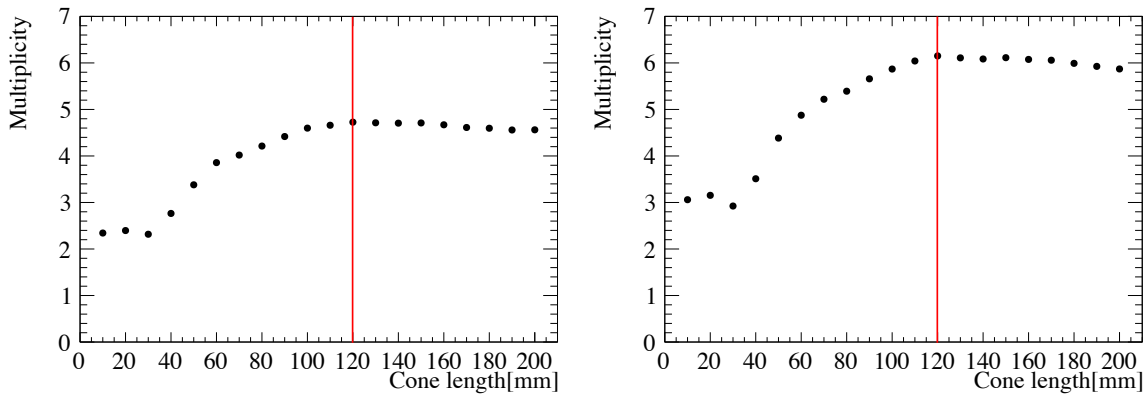


図 5.1: π 中間子の場合のライト・コーンの長さの最適化。左図は運動量 2.0 GeV/c の π 中間子、右図は運動量 4.0 GeV/c の π 中間子でのシミュレーション。

の場合と、ライト・コーンの効果がほぼ無視できる 5 mm のコーン長でのシミュレーションを各運動量で行い、ライト・コーンによって MPPC の多重度が増加する割合を調べた。ライト・コーンの長さを 5 mm から 120 mm に変えたときの増加の割合を図 5.2 に示す。運動量 2.0–4.0 GeV/c の範囲では、ライト・コーンの長さを 5 mm から 120 mm に変えたとき、ライト・コーンの集光の効果による MPPC の多重度は約 2.2 倍でほぼ一定になった。一方、運動量 1.2 GeV/c から 1.5 GeV/c では増加率は 2 倍を切る。

5.2 シミュレーションによる AC 検出器の性能の見積もり

π 中間子に対する運動量毎の MPPC の多重度を図 5.3 に示す。MPPC の多重度は運動量が大きくなると増加するが、これは発生光子数が増加するからである。また、 K 中間子に対する運動量毎の MPPC の多重度を図 5.4 に示す。 K 中間子による MPPC の多重度は、暗電流による影響を考慮した場合、運動量 4.0 GeV/c のとき 0.88 ± 0.01 であった。暗電流による影響を考慮しない、運動量 4.0 GeV/c の K 中間子の通過のみによる MPPC の多重度は、 0.16 ± 0.01 であり、 K 中間子の多重度のほとんどが MPPC の暗電流による影響であると分かった。他の運動量に関しても、暗電流による影響がほとんどなため、多重度の分布はほぼ同じになった。なお、暗電流がない場合における K 中間子の MPPC の多重度は、 K 中間子が MPPC に直接入射し、窓から発生したチェレンコフ光と、 K 中間子が物質を電離することによって δ -ray を放出し、その δ -ray により発生したチェレンコフ光によるものであると考える。

運動量毎の π 中間子の検出効率を図 5.5 に示す。また図 5.6 には K 中間子を検出する割合を示す。図 5.5 と図 5.6 において、赤の丸印は多重度 2 以上の割合、青の三角印は多重度 3 以上の割合、緑の四角印は多重度 4 以上の割合、白の丸印は多重度 5 以上の割合である。多重度 2 以上を要求したときの π 中間子の検出率は、運動量 4.0 GeV/c のとき $97.5 \pm 0.2\%$ であり、運動量 2.1 GeV/c のとき $95.2 \pm 0.2\%$ であり、これより低い運動量では目標性能の 95% を下回る。一方で多重度 2 の閾値の場合、 K 中間子の検出率が 13% を超えており、 K 中間子のイベントを十分な精度で排除できない。 K 中間子の誤識別率 3% 以下の目標を達成するためには、多重度 3 以上での K 中間子の検出率はおよそ 3% である

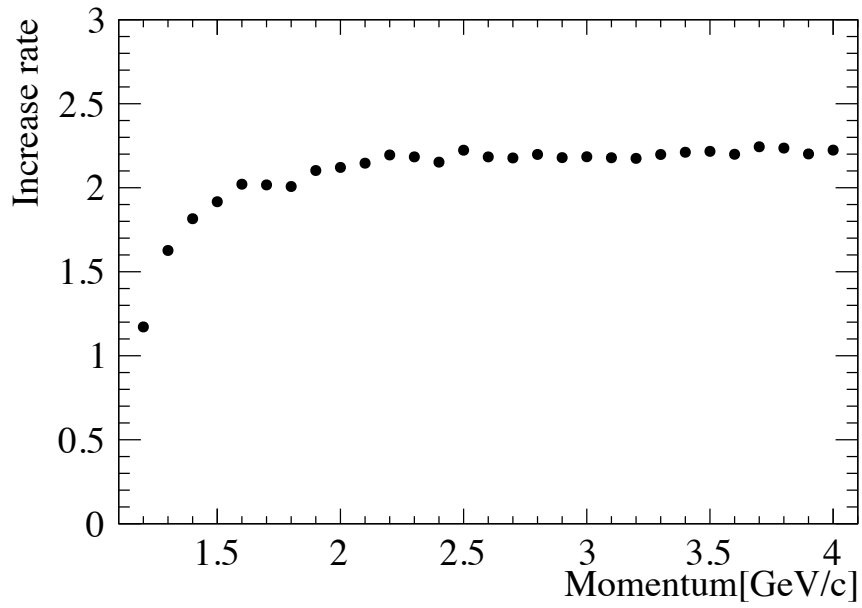


図 5.2: ライト・コーンの長さを 5 mm から 120 mm に変えたときの運動量毎の多重度の増加率。集光の効果がほぼ無い 5 mm 長のライト・コーンと最適化した 120 mm の長さのライト・コーンの多重度の増加率を運動量ごとに比較した。

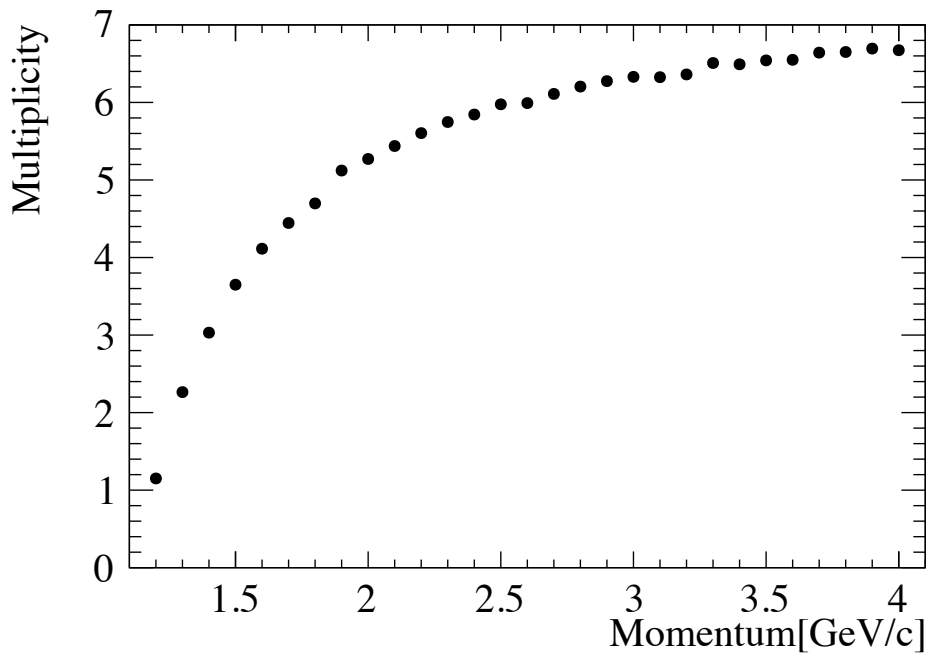


図 5.3: π 中間子に対する運動量毎の MPPC の多重度。

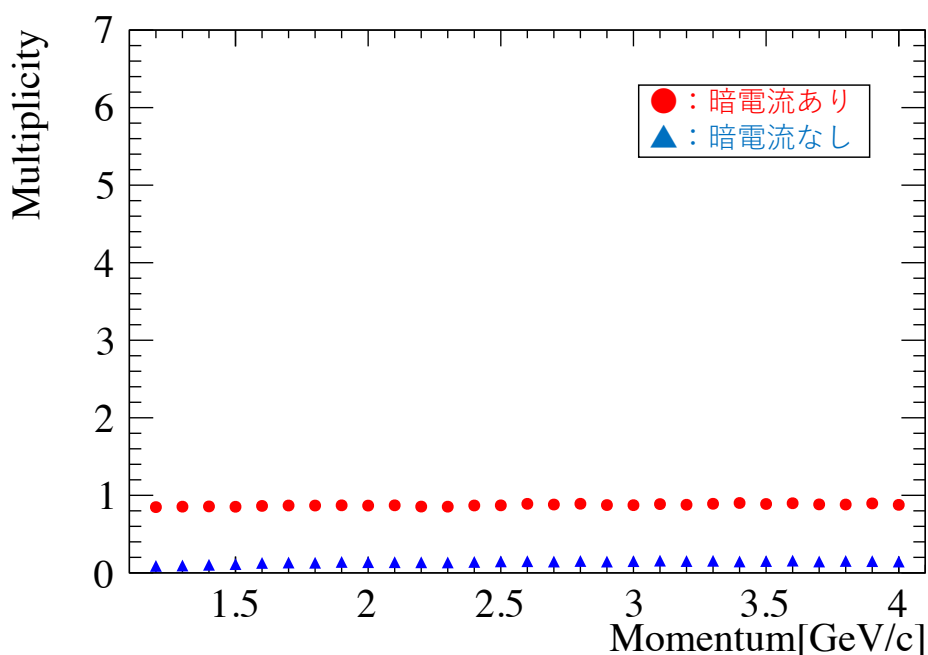


図 5.4: K 中間子に対する運動量毎の MPPC の多重度。

ことから、閾値を 3 以上に設定する必要があるが、閾値 3 では運動量 $4.0 \text{ GeV}/c$ の π 中間子の検出効率は $93.4 \pm 0.2\%$ であり、目標性能の 95% を下回る。閾値を更に大きく設定すると、 K 中間子のイベントは 1% 以下にできるが、 π 中間子の検出効率が更に大きく低下する。この試作機では、どの運動量に対しても、目標の性能である π 中間子の検出効率 95% 以上、 K 中間子による誤識別率 3% 以下を達成できないため、実機の製作に向けて更なる改良が必要である。

5.3 K 中間子による誤識別率の低減に対する改良

5.3.1 MPPC の暗電流による影響の低減

図 5.5 から分かるように、閾値が大きくなると、 π 中間子の検出効率が大きく下がり、目標性能を達成することが困難になる。したがって、閾値の設定値を小さくするための改良が必要である。閾値は K 中間子の検出を十分に少なくする値と設定しているため、 K 中間子の通過による MPPC の多重度を小さくすることが重要である。図 5.4 から、 K 中間子による MPPC の多重度は、ほとんどが MPPC の暗電流の影響であるため、暗電流による影響を小さくする必要がある。図 4.15 の「Signal」の TDC 分布は二山になっており、NIM-EASIROC モジュールを使用した際に、1 光電子と 2 光電子以上の信号に閾値をかける際のタイミングの変化 (time walk) が原因である。そのため、TDC のカット幅を 30 ns と広く取る必要があった。これは閾値設定の調整不足によるものであり、実機でのデータ取得の際は、調整と time walk 補正によって細いピークにすることができ、TDC のカット幅を 10 ns 程度にすることが可能であると考えられる。これにより、暗電流による影響が大きい K 中間子の MPPC の多重度を小さくすることが可能となり、低い閾値で K 中間

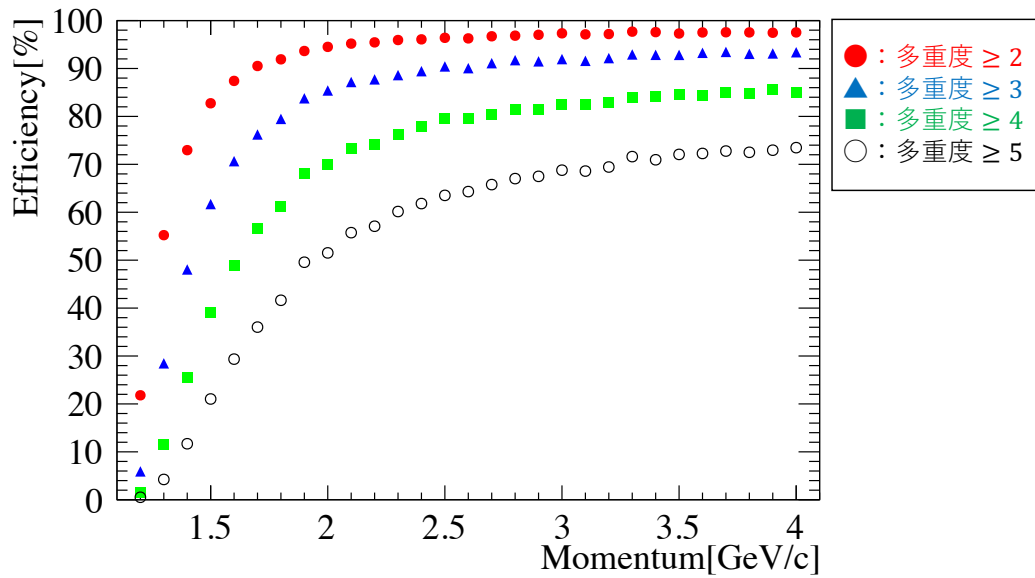


図 5.5: π 中間子の運動量毎の検出効率。赤の丸印は多重度 2 以上の割合、青の三角印は多重度 3 以上の割合、緑の四角印は多重度 4 以上の割合、白の丸印は多重度 5 以上の割合である。

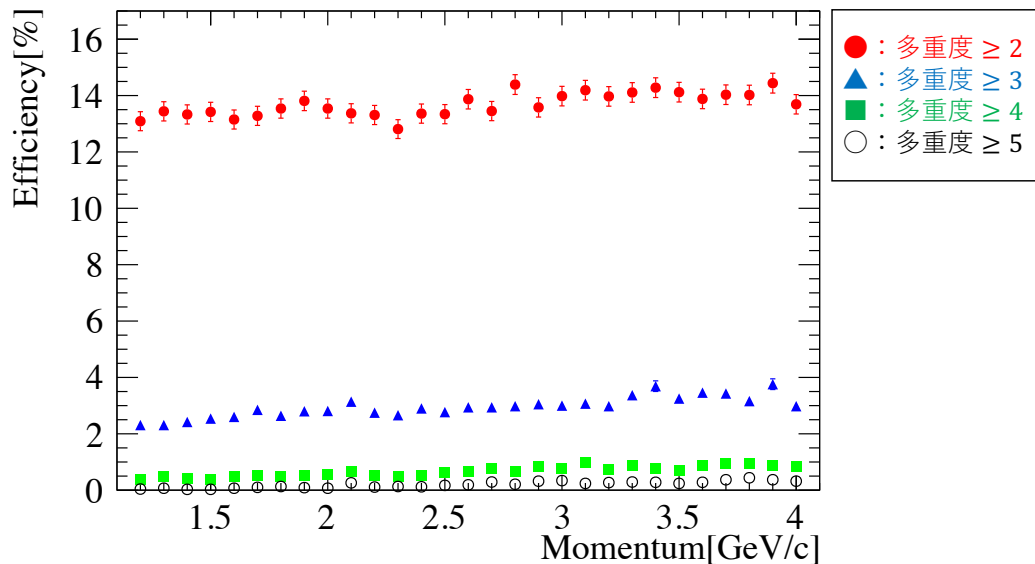


図 5.6: K 中間子の運動量毎の検出効率。赤の丸印は多重度 2 以上の割合、青の三角印は多重度 3 以上の割合、緑の四角印は多重度 4 以上の割合、白の丸印は多重度 5 以上の割合である。

子による誤識別率を下げることを期待できる。

5.3.2 K 中間子の検出割合

シミュレーションで、S13361-3050AE-08 の MPPC アレイを用いた場合、TDC のカット幅を 30 ns から 10 ns にできたと仮定し、暗電流による影響が図 4.19 の 1/3 倍になるとした。この場合における K 中間子の検出率を図 5.7 に示す。図 5.7 の赤の丸印は多重度 2 以上の割合、青の三角印は多重度 3 以上の割合である。図 5.7 から、暗電流の影響を 1/3 にできれば、多重度 2 以上とした K 中間子の検出率は 3–4% であり、多重度 3 以上のときの検出効率は 1% 以下になると分かった。閾値 2 では、 K 中間子の誤識別率が目標より 1% 程高くなるが、これを許容すると、暗電流の影響を低減することのみで、図 5.5 から 2.1–4.0 GeV/ c の運動量領域で π 中間子の検出効率 95% 以上を達成できると分かった。 K 中間子の誤識別率を更に低くしたい場合や、暗電流の影響が実際には 1/3 倍にならない場合などは閾値を 3 に設定する必要があるが、このとき π 中間子の検出効率は、運動量 4.0 GeV/ c で $93.4 \pm 0.2\%$ であり、全ての運動量で 95% を下回る。

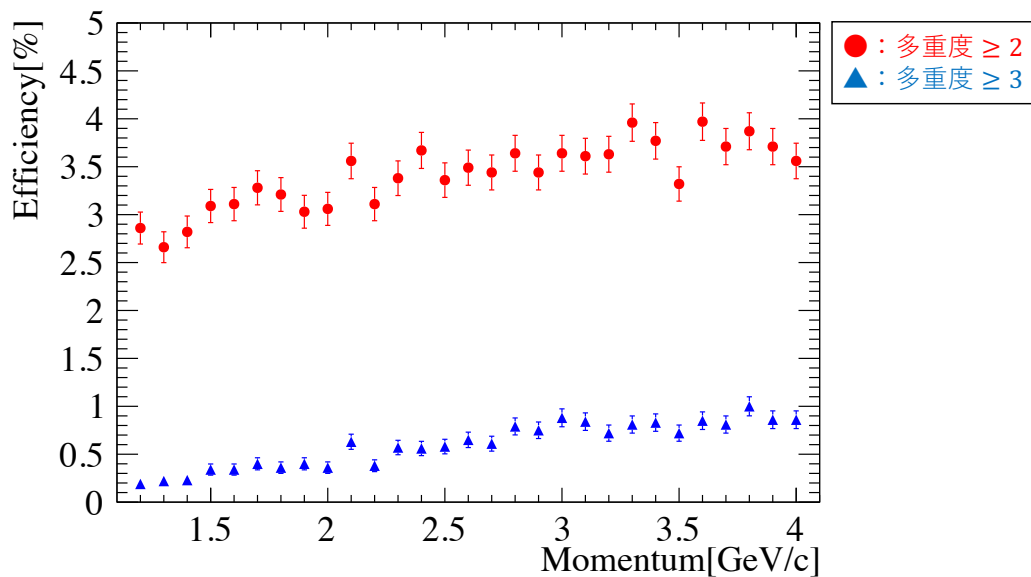


図 5.7: 暗電流による影響を 1/3 に低減したときの K 中間子の運動量毎の検出効率。赤の丸印は多重度 2 以上の割合、青の三角印は多重度 3 以上の割合である。

5.4 π 中間子の検出効率の向上に対する改良

前節の結果から、閾値 3 で K 中間子による誤識別は十分に小さくできると分かったが、試作 AC 検出器の性能では、閾値 3 での π 中間子の検出効率は目標性能の 95% を下回る。

そのため、 π 中間子の検出効率を向上させるための改良が必要であり、より検出効率の高いMPPCの使用と、より透明度の高いエアロゲルの使用を考案する。

5.4.1 MPPCの改善

前章及び前節の実験、シミュレーションで用いたMPPCアレイは型番がS13361-3050AE-08である。これは1つのMPPCのピクセルピッチが $50\ \mu\text{m}$ である。ピクセルピッチが大きいくほど、1つのMPPC内での不感領域が小さくなるため、MPPCの検出効率は高くなる。更に、 4×4 のMPPCアレイ(S13361-6075AE-04)を用いることで、アレイ上のMPPC間の不感領域を減らすことができる。市販は行われていないが、特注品としてピクセルピッチが $75\ \mu\text{m}$ のMPPCアレイのS13361-6075AE-04やS13361-3075AE-08の製造が可能である[19]ため、このMPPCを用いることによって更なる検出効率の向上が期待される。これらのMPPCアレイの違いを表5.1に示す。ピクセルピッチが $75\ \mu\text{m}$ の検出効率やオーバー電圧毎の特性は図2.8であり、 $V_{ov} = +5.0\ \text{V}$ での使用の場合、ピクセルピッチが $50\ \mu\text{m}$ のもの1.2倍の検出効率となる。暗電流に関しては、S13361-6075AE-04はS13361-6075PE(図3.8の右図)と同じであると仮定した。また、TDCカットの幅を $10\ \text{ns}$ にできるとし、 $3\ \text{mm}$ 角の 8×8 のアレイの暗電流による影響が図4.19の $1/3$ 倍になると仮定した。

表 5.1: MPPCアレイの基本情報

| | S13361-3050AE-08 | S13361-6075AE-04 | S13361-3075AE-08 |
|----------|------------------|------------------|------------------|
| MPPCのサイズ | 3 mm×3 mm | 6 mm×6 mm | 3 mm×3 mm |
| ピクセルピッチ | 50 μm | 75 μm | 75 μm |
| アレイ構成 | 8 × 8 | 4×4 | 8 × 8 |

5.4.2 MPPC毎の π 中間子の検出効率

ピクセルピッチが $75\ \mu\text{m}$ のMPPCアレイは特注品として製造できるため、まずはMPPCとしてピクセルピッチが $75\ \mu\text{m}$ のMPPCの検出効率を用いたシミュレーションを行った。図5.8にMPPCの種類別に、閾値3での π 中間子の検出効率を運動量毎に示す。MPPCの暗電流の影響はMPPCの種類によらず、ほぼ同じであるため、閾値3で K 中間子の誤識別率3%以下という要求を達成できている。図5.8の黒の丸印は試作AC検出器で用いたMPPCアレイであるS13361-3050AE-08であり、赤の三角印はS13361-6075AE-04、青の四角印はS13361-3075AE-08の結果である。図5.8から、 $75\ \mu\text{m}$ ピクセルピッチの検出効率の高いMPPCを用いることで、より高い検出効率を得られることが分かった。ピクセルピッチ $50\ \mu\text{m}$ のMPPCアレイを用いた場合の閾値3での検出効率は、運動量 $4.0\ \text{GeV}/c$ で $93.4 \pm 0.2\%$ であったが、S13361-6075AE-04を用いたとき、運動量 $4.0\ \text{GeV}/c$ の π 中

中間子の検出効率は $94.8 \pm 0.2\%$ であり、目標性能の π 中間子の検出効率 95% は達成しないが、近づいたといえる。一方で、ピクセルピッチ $75 \mu\text{m}$ 、 8×8 の MPPC アレイである S13361-3075AE-08 を用いると、運動量 $4.0 \text{ GeV}/c$ の π 中間子の検出効率は $95.2 \pm 0.2\%$ となり、この運動量では目標性能を達成した。しかし、 $3.8 \text{ GeV}/c$ 以下の運動量では 95% を下回るため、限られた運動量領域のみでの達成となった。MPPC の検出効率が同じであっても、 4×4 の S13361-6075AE-04 と 8×8 の S13361-3075AE-08 で π 中間子の検出率が変わるのは、 4×4 の場合は 2 光電子以上検出する MPPC が増加するため、多重度としては小さくなるからである。 4×4 の MPPC アレイ (S13361-6075AE-04) は、MPPC 間の不感領域が少ないが、多重度を閾値とする場合には、チャンネルが多い MPPC アレイの方が有利であると分かった。運動量 $2.0 \text{ GeV}/c$ 以上の π 中間子で目標の 95% 以上の検出効率を達成するためには、更に光を効率的に MPPC 上に集める必要があると分かった。

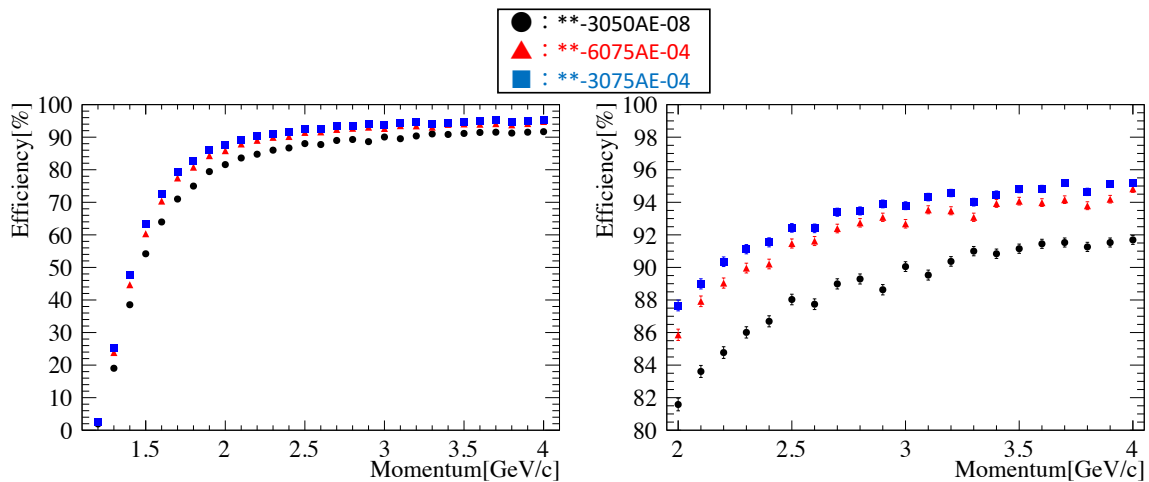


図 5.8: 閾値 3 での MPPC 毎の π 中間子の検出効率。黒の丸印は S13361-3050AE-08、赤の三角印は S13361-6075AE-04、青の四角印は S13361-3075AE-08 である。左図は運動量 $1.2\text{--}4.0 \text{ GeV}/c$ の領域の検出効率であり、右図は $2.0 \text{ GeV}/c$ 以上の領域を拡大したものである。

5.4.3 エアロゲルの改善

MPPC で検出する光子の大部分はライト・コーンに直接入った光子であることが分かっている。そのため、エアロゲルの透過長が長くなることで検出効率が向上すると期待される。目標の粒子識別の性能を得るため、エアロゲルの透過長を変えてのシミュレーションを行った。エアロゲルの製造の改善により、透過長が長く、透明度の高いエアロゲルの使用が可能となっている。現在、使用可能な屈折率 $n = 1.007$ のエアロゲルとして、波長 400 nm で透過長が $17\text{--}18 \text{ mm}$ のものがあるため、透過長 17.5 mm を仮定したシミュレ

ションを行った。他の波長では、波長の4乗に比例する波長依存とした。

5.4.4 エアロゲルの透過長毎の π 中間子の検出効率

透明度の高いエアロゲルの使用を想定したシミュレーションを行った。MPPCはS13361-3075AE-08(ピクセルピッチ $75\ \mu\text{m}$) を用い、TDC カットの幅は $10\ \text{ns}$ とし、閾値は3に設定する。シミュレーションの結果、 K 中間子によるMPPCの多重度は、主には暗電流によるMPPCの多重度であるため、エアロゲルの透過長が長くなった場合であっても透過長が $9.5\ \text{mm}$ のときと同様に、閾値3で K 中間子による誤識別率はおよそ1%以下となり、目標性能の誤識別率3%以下が達成できる。閾値3での π 中間子の検出効率を図5.9に示す。図5.9の黒の三角印は波長 $400\ \text{nm}$ のときの透過長 $9.5\ \text{mm}$ 、赤の丸印は透過長 $17.5\ \text{mm}$ である。透過長 $17.5\ \text{mm}$ の場合、運動量 $4.0\ \text{GeV}/c$ の π 中間子の検出効率は $97.8 \pm 0.1\%$ となった。目標性能である検出効率95%以上を達成できる下限の運動量は $2.0\ \text{GeV}/c$ の $95.0 \pm 0.2\%$ であった。チャンネル数を減らす点も考慮し、 4×4 のアレイであるS13361-6076AE-04でのシミュレーションを行った結果が図5.10である。図5.10の黒の三角印は波長 $400\ \text{nm}$ のときの透過長 $9.5\ \text{mm}$ 、赤の丸印は透過長 $17.5\ \text{mm}$ である。このMPPCアレイを用いると、 $2.1\text{--}4.0\ \text{GeV}/c$ の運動量領域で、 π 中間子の検出効率が95%以上となった。

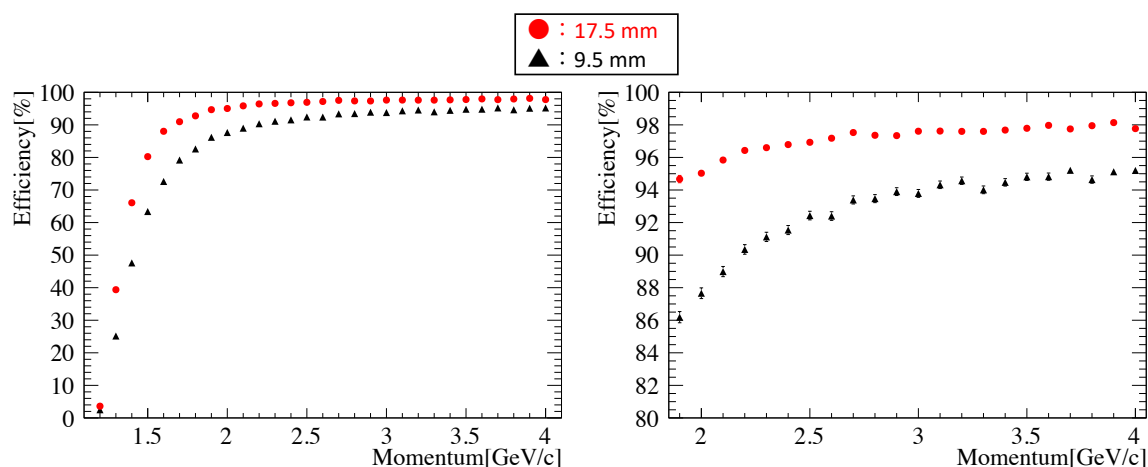


図 5.9: 閾値3でのS13361-3075AE-08を用いたときのエアロゲルの透過長毎の π 中間子の検出効率。黒の三角印は波長 $400\ \text{nm}$ のとき透過長 $9.5\ \text{mm}$ 、赤の丸印は透過長 $17.5\ \text{mm}$ である。左図は運動量 $1.2\text{--}4.0\ \text{GeV}/c$ の領域の検出効率であり、右図は $1.9\ \text{GeV}/c$ 以上の領域を拡大したものである。

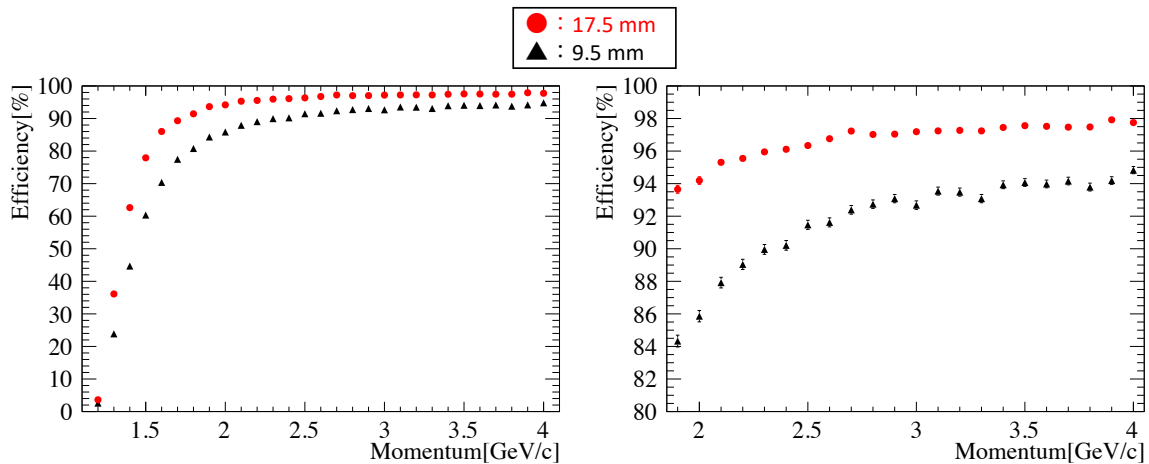


図 5.10: 閾値3でのS13361-6075AE-04を用いたときのエアロゲルの透過長毎の π 中間子の検出効率。黒の三角印は波長400 nmのとき透過長9.5 mm、赤の丸印は透過長17.5 mmである。左図は運動量1.2–4.0 GeV/cの領域の検出効率であり、右図は1.9 GeV/c以上の領域を拡大したものである。

5.4.5 シミュレーションにおける π 中間子と K 中間子の識別性能

現状の試作機で用いたMPPCとエアロゲルでは、実機として利用するための粒子識別検出器としての十分な性能が得られなかった。シミュレーション結果によると、 K 中間子による誤識別率を低くするためには、暗電流によるMPPCの多重度を小さくすることが不可欠であり、そのためにtime-walk補正によって1–2 ns(σ)の時間分解能を得ることで、TDCの分布で選択する時間幅を10 nsにする必要があることが分かった。 π 中間子の検出効率を向上するためには、ピクセルピッチ75 μm の検出効率の高いMPPCと透明度の高いエアロゲルの使用が必要である。MPPCとして75 μm ピクセルピッチの8 \times 8のアレイを用い、透過長が17.5 mmのエアロゲルであれば2.0 GeV/cから4.0 GeV/cまでの運動量領域で目標精度での粒子識別が可能となる。

第6章 本研究のまとめ

本研究では、チャーム・バリオン分光実験用の粒子識別検出器として閾値型エアロゲル・チェレンコフ検出器の開発を行った。主に π^+ を K^+ と誤認識することがチャーム・バリオン励起スペクトルのバックグラウンドとなるため、粒子識別の識別性能はチャーム・バリオンの励起状態の検出感度に直接影響する。閾値型のエアロゲル・チェレンコフ検出器は4.0 GeV/c以下の π 中間子と K 中間子の識別を行う。そのために、輻射体であるエアロゲルは $n = 1.007$ の低屈折率のものを使用するが、閾値型エアロゲル・チェレンコフ検出器として発光量の少なさが課題となるため、少ない発光量でも π 中間子の検出効率が高く、 K 中間子の誤識別率が低い検出器の開発を行った。

閾値型エアロゲル・チェレンコフ検出器の目標としている性能は、2.0–4.0 GeV/cでの π 中間子と K 中間子で、 π 中間子の検出効率95%以上かつ K 中間子を π 中間子として誤識別する割合を3%以下とすることである。この性能に必要な検出器の形状を決定し、識別に用いるMPPCの多重度での閾値の解析方法を確立した。また性能の目標達成のために必要なMPPCの種類を選定し、エアロゲルの透明度の条件を確定した。

π 中間子と K 中間子の識別効率を見積もるためにGeant4を用いたシミュレーションを行った。そのためにMPPCを用いた試作機の製作と性能評価、及び、Geant4で試作機の再現を行った。SPring-8のLEPSビームラインにおいて、電子または陽電子によるビームテスト実験を行った。この実験において、MPPCの多重度を用いることによるチェレンコフ放射の有無の判断と暗電流の影響の低減が可能であることが分かった。試作機の再現を行い、ナフロン反射率を最適化した。再現されたシミュレーションを用い、課題であった光量の少なさを克服するためのライト・コーンによる集光方法を考案した。

テスト実験で評価を行うためのライト・コーンを用いた試作機の製作を行った。ライト・コーンを用いた試作機はSPring-8のLEPS2のビームラインに設置し、電子または陽電子によるビームテスト実験を行った。実験結果として、最大の課題であった低屈折率エアロゲルによる発光量の少なさをライト・コーンによって克服できることが分かった。ライト・コーンを用いた試作機の再現もGeant4で行い、ライト・コーンの反射材であるアルミナイズド・マイラの反射率の最適化を行った。

2つの実験で最適化したパラメータを用い、 π 中間子と K 中間子による識別効率のシミュレーションを行った。このシミュレーションでは運動量1.2 GeV/cから4.0 GeV/cまでの領域での識別効率を評価した。実験で用いた3 mm角の8×8のアレイであるS13361-3050AE-08を使用した場合、検出効率が足りず、また暗電流による影響によって、 K 中間子の多重度も大きくなることが分かった。 K 中間子による誤識別率を小さくするためには、閾値をより高く設定する必要があると、閾値が高くなると π 中間子の検出効率が減少する。そのために、実験で用いた試作AC検出器に対して更なる改良が必要なが分かった。

Time-walk 補正によって 1–2 ns (σ) の時間分解能を得ることで、TDC の分布で選択する時間幅を 10 ns にできれば、暗電流の影響が小さくなり、閾値を低く設定することで K 中間子の誤識別を 3 % 以下にできると分かった。 π 中間子の検出効率を高くするには、検出効率の高い 75 μm ピクセルの MPPC の使用し、光子の検出効率を向上する方法がある。75 μm ピクセルの MPPC アレイを用いることで、 π 中間子の検出効率を増加させることは可能であるが、4.0 GeV/ c 周辺の運動量が高い領域でのみの目標性能達成であった。更に検出効率を上げるために、透明度の高いエアロゲルの使用を想定したシミュレーションを行った。エアロゲルの透過長を長くしたシミュレーションの結果、透過長が 17.5 mm (波長 400 nm のとき) のエアロゲルの使用で、2.0 GeV/ c から 4.0 GeV/ c までの運動量領域において、目標性能の 95% 以上の検出効率を達成すると期待される。

付録 A 閾値型チェレンコフ粒子識別検出器による粒子識別

チャーム・バリオン・スペクトロメータでは、散乱粒子の粒子識別を運動量が高い粒子から、リングイメージ型チェレンコフ検出器 (RICH)、閾値型チェレンコフ粒子識別検出器と飛行時間 (Time of Flight, TOF) 検出器を用いて行う。閾値型チェレンコフ粒子識別検出器を用いる運動量領域は 2.0–4.0 GeV/c である。散乱粒子の粒子識別においては、閾値型チェレンコフ粒子識別検出器による π 中間子と K 中間子の判別と、TOF 検出器で測定した飛行時間と磁気スペクトロメータの運動量測定によって計算したマス・スクエア分布 [$M^2 = (p/\beta)^2(1 - \beta^2)$] を合わせて行う。図 A.1 は、TOF 検出器によって得られるマス・スクエア分布のシミュレーション結果である。TOF 検出器と閾値型チェレンコフ粒子識別検出両方を通過した粒子の分布を示した。飛行時間測定の時間分解能は 100 ps (σ) とし、散乱粒子はハドロン生成コードを利用してシミュレーションを行った。それぞれのピークには正負両方の電荷の粒子が含まれ、電荷の識別は磁気スペクトロメータにおける飛跡によって行う。図 A.1(a) では、4 GeV/c 以下の散乱粒子の分布を黒線で、2.0 GeV/c 以下の分布を赤線で示している。2 GeV/c 以下では、飛行時間のみで π 中間子、 K 中間子、陽子を十分な精度で識別できることが分かる。両方の分布で π 中間子、 K 中間子、陽子に由来するピークを観測できるが、高い運動量の散乱粒子を含めたときのピーク周辺に裾がある分布になっている。図 A.1(b) はマス・スクエア分布と散乱粒子の運動量の相関であり、高運動量になるにつれて分布の重なりが大きくなっている。このマス・スクエア分布の裾にあたる部分が、識別が困難である 2.0–4.0 GeV/c の散乱粒子である。図 A.1(c) は 2.0 GeV/c 以下の散乱粒子のマス・スクエア分布で、 π 中間子と K 中間子を問題無く識別することができる。図 A.1(d) は 2.0–4.0 GeV/c の領域のみの分布であり、 π 中間子と K 中間子の分布が大きく重なり識別が困難であることが分かる。一方で、4.0 GeV/c 以下の陽子又は反陽子については、TOF 検出器のみで十分に識別することができる。

図 A.2 は閾値型チェレンコフ粒子識別検出器に要求される π 中間子に対する検出効率 95% と K 中間子に対する誤識別率を 3% と仮定したときのマス・スクエア分布である (陽子/反陽子についても 3% を仮定)。図 A.2(a) は図 A.1(d) と同じく、TOF 検出器によって得られる 2.0–4.0 GeV/c の運動量領域のみのマス・スクエア分布である。図 A.2(a) に対して、閾値型チェレンコフ粒子識別検出器で、 K 中間子であるとして粒子識別した場合の分布が図 A.2(b) であり、 π 中間子であるとして粒子識別した場合の分布が図 A.2(c) である。図 A.2(b) において、 K 中間子は 97% の検出効率で識別でき、3% が図 A.2(c) の π 中間子の分布に混入する。一方で、 π 中間子は 95% の検出効率で識別され、図 A.2(b) の K 中間子の分布において 5% が混入し、 K 中間子に対する数の割合は 10% 程度となる。

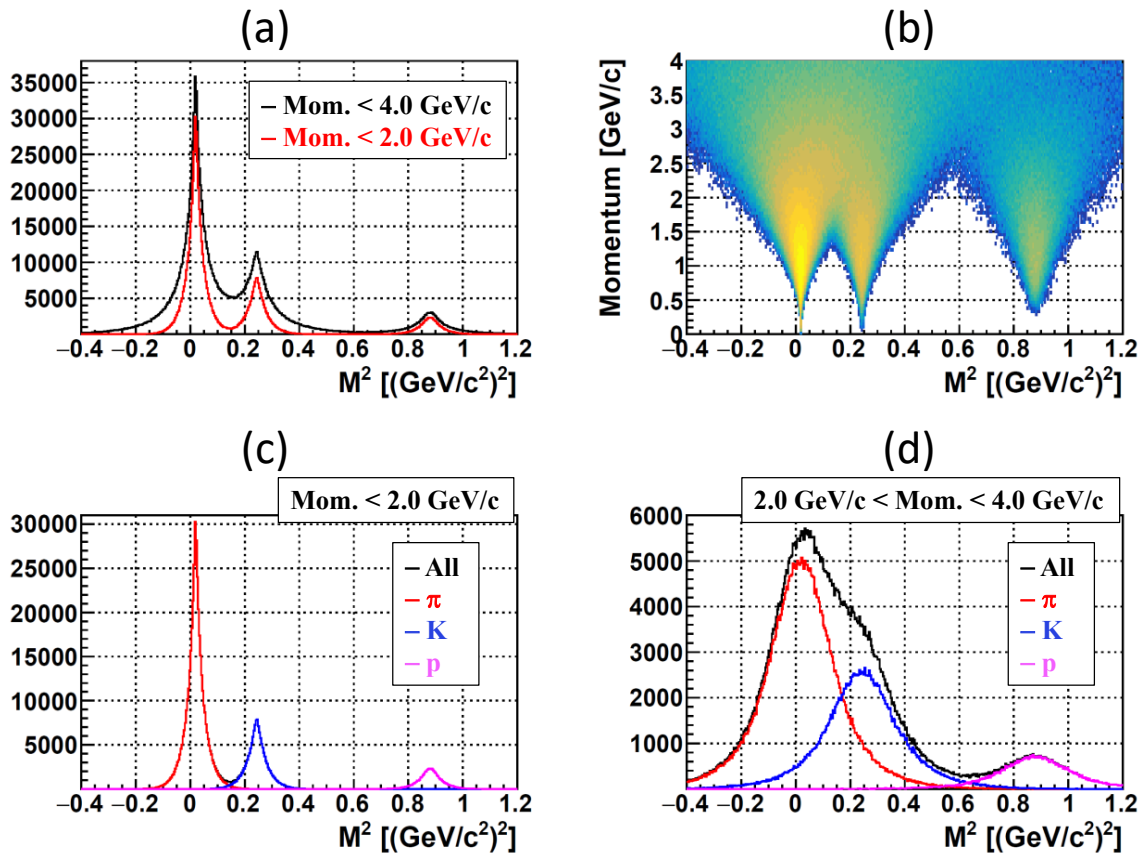


図 A.1: シミュレーションから得られた TOF 検出器によって得られるマス・スクエア分布。(a) は TOF 検出器による飛行時間測定 (時間分解能は $100 \text{ ps}(\sigma)$) で得られるマス・スクエア分布。黒線が $4 \text{ GeV}/c$ 以下の粒子の場合で、飛行時間測定で識別が十分にできる $2.0 \text{ GeV}/c$ の分布を赤線で示す。(b) はマス・スクエア分布と散乱粒子の運動量の相関。(c) は $2.0 \text{ GeV}/c$ 以下の粒子のマス・スクエア分布であり、(d) は $2.0\text{--}4.0 \text{ GeV}/c$ の領域のみの分布である。それぞれのピークには正負両方の電荷の粒子が含まれる。

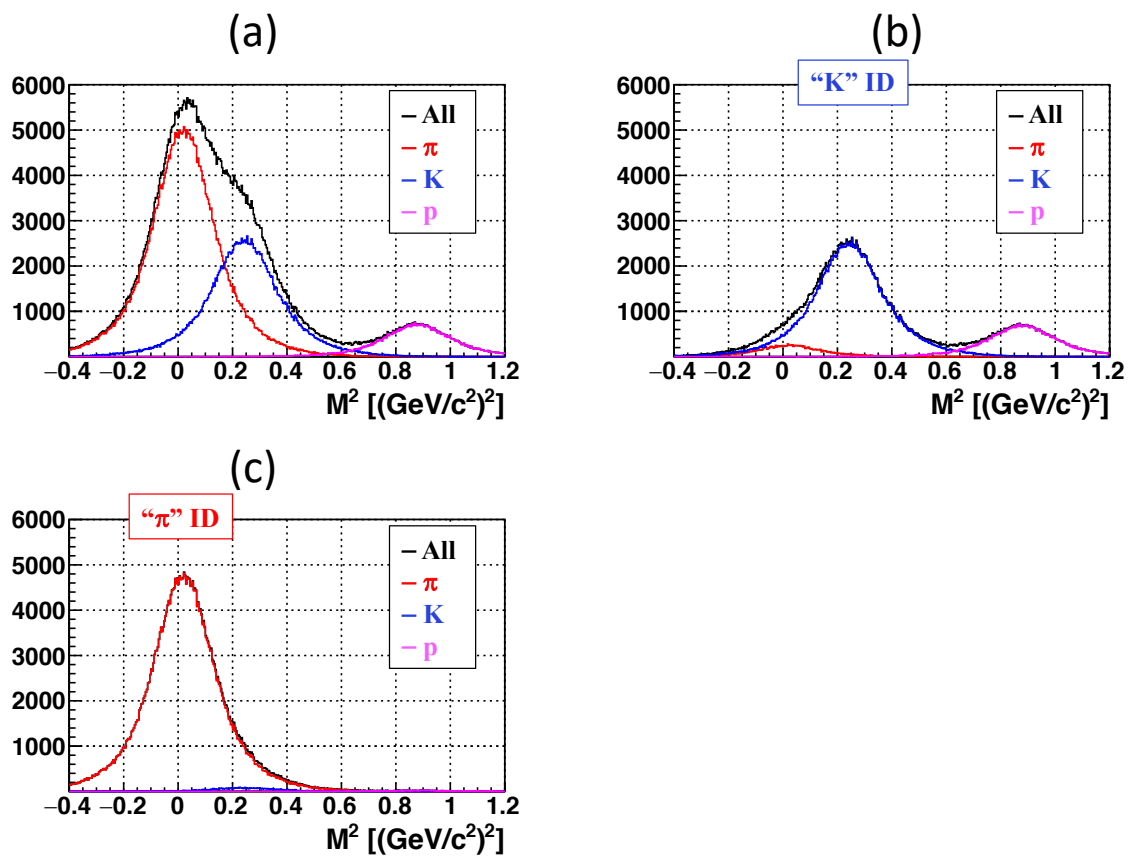


図 A.2: 閾値型チェレンコフ粒子識別検出器に要求される性能を仮定したときのマス・スクエア分布。(a) は 2.0–4.0 GeV/c の運動量領域のみのマス・スクエア分布である。閾値型チェレンコフ粒子識別検出器で光子が検出された事象、すなわち π 中間子であるとして粒子識別した場合の分布が (c) となり、(b) は検出器で光子が検出されなかった事象、すなわち K 中間子であるとして粒子識別した場合の分布である。それぞれの散乱粒子の誤識別の割合を十分に低くできていることが分かる。

謝辞

本研究及び本論文執筆にあたり、多くの方々にお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。初めに指導教員である阪口篤志教授には、毎週のミーティングで研究に関する多くの助言を頂きました。また発表、修士論文の内容や文章の較正など何度も見ていただきました。ありがとうございました。大阪大学核物理研究センターの白鳥昂太郎助教には、テスト実験、解析、発表及び修士論文執筆など手厚く指導をしていただきました。お忙しい中、テスト実験や文章の較正など夜遅くまで付き合ってください、本当に感謝しております。大阪大学核物理研究センターの野海博之教授には、このような研究の機会を頂いたことに深く感謝を申し上げます。また、川畑貴裕教授を始めとする川畑研究室の先生方、スタッフの方々には、学部生の頃から大変お世話になりました。誠にありがとうございました。

千葉大学大学院理学研究院の田端誠氏の研究グループの方々には、シリカ・エアロゲルの製造をしていただき、大変感謝しております。また、テスト実験のためビームを利用させていただきました LEPS グループの皆様にお礼を申し上げます。

同じ研究室のハイパーグループの先輩方にも大変お世話になりました。中田さんには、プログラミングのことをいろいろと教えていただきました。赤石さんには、解析方法やシミュレーションの分からない部分を丁寧に教えていただきました。同グループの同期の木村祐太君とは学部1年生のときから大学生活を通して仲良くしていただき、楽しく研究を進めることができました。また、ハイパーグループの後輩の徳田恵君、戸田匡哉君にはテスト実験の際に手伝ってもらい、良い実験データを取ることができました。同じ研究室の同期の大上能弘君、大谷優里花さん、原田卓明君、福留美樹さん、山本朝陽君、吉田朋美さんには親しくしていただき、とても楽しい研究室生活を送ることができました。本当に多くの方にお世話になりました。

最後に、大学院まで行かせていただいた両親に深く感謝します。

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/pac_1301/pdf/P50_2012-19.pdf
- [4] 浜松ホトニクス株式会社, 技術資料/MPPC,
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd9008j.pdf
- [5] S. Agostinelliet *et al.*, "Geant4 A Simulation Toolkit", Nuclear Instruments and Methods A 506 (2003) 250–303.
- [6] J. Allison *et al.*, "Geant4 developments and applications", IEEE Trans on Nuclear Science 53 No. 1 (2006) 270–278.
- [7] J. Allison *et al.*, "Recent developments in Geant4", Nuclear Instruments and Methods A 835 (2016) 186–225.
- [8] M.Tabata, "エアロゲルの開発と応用", <http://www.jahep.org/hepnews/2019/19-4-3-aerogel.pdf>
- [9] M. Tabata *et al.*, "Hydrophobic silica aerogel production at KEK", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 668 (2012) 64-70.
- [10] 浜松ホトニクス株式会社, MPPC arrays S13360 series,
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf
- [11] 浜松ホトニクス株式会社, MPPC arrays S13361-3050 series,
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13361-3050_series_kapd1054e.pdf
- [12] ニチアス/ナフロン PTFE シート,
<https://www.nichias.co.jp/products/product/fluorine/fluorine/seat01.html>
- [13] SPring-8/実験施設/加速器,
http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/facilities/accelerators/

- [14] LEPS – Laser Electron Photon Experiment at SPring-8,
<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-b/>
- [15] Hadron Universal Logic Module, <http://openit.kek.jp/project/HUL/HUL>
- [16] 武藤工業株式会社/3D プリンタ, <https://www.mutoh.co.jp/3d/mf-2500ep.html>
- [17] T. N. Tomonori *et al.*, “ Development of a FPGA-based high resolution TDC using Xilinx Spartan-6 ”, Annual Report 2016.
- [18] 汎用 MPPC 読み出しモジュール, <https://openit.kek.jp/project/MPPC-Readout-Module/public/MPPC-Readout-Module>
- [19] 浜松ホトニクス株式会社, private continuation
- [20] 小林和矢, ” Σp 散乱実験用エアロゲルチェレンコフ検出器の開発”, 2016 年度大阪大学理学研究科修士論文.
- [21] 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.
- [22] 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.