

# 修士論文

## MARQスペクトロメータで用いる 閾値型エアロゲルチェレンコフ検出器の開発



京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室  
原子核・ハドロン物理学研究室

堀 祐輔

2026年1月23日



## 概要

物質の階層構造においてハドロンは素粒子であるクォークとグルーオンから作られる、最も原始的な内部構造を持つ粒子であり、その構造の理解は物質の成り立ちを解き明かす上で重要である。多彩なハドロンの構造を説明する理論に構成子クォークモデルがある。構成子クォークモデルは基底状態のハドロンをよく記述する一方で、構成子クォークモデルで予想されているにもかかわらず実際に見つかっていない励起状態や、逆に構成子クォークモデルで説明できない励起状態が存在するなどの問題がある。これらを解決する理論モデルの一つにダイクォークモデルがある。ダイクォークモデルではハドロン内のクォーク対が励起状態を説明する有効自由度になっていると考えられているがその存在を裏付ける実験結果は得られていない。

J-PARC E50 実験は、J-PARC ハドロン実験施設で現在建設中の新たなビームラインである  $\pi 20$  ビームラインと新たな汎用スペクトロメータである MARQ スペクトロメータを用いた、総称「MARQ 実験」と呼ばれる実験の一つで、重いクォーク ( $c$  クォーク) を 1 つ含むバリオンの励起状態の精密分光を行うことで、その生成比からダイクォーク相関の検証を行う実験である。実験では液体水素標的に  $20 \text{ GeV}/c$  の  $\pi^-$  ビームを入射し、 $\pi^- + p \rightarrow Y_c^{*+} + D^{*-}$  反応を用いて励起状態のチャームバリオン ( $Y_c^{*+}$ ) を生成する。チャームバリオンの質量スペクトルの測定は、ビーム粒子及びチャームバリオンと同時に生成される  $D^{*-}$  の崩壊後粒子である  $\pi$  中間子と  $K$  中間子の運動量を測定することで欠損質量法を用いて行う。そのため  $\pi$  中間子と  $K$  中間子を識別する粒子識別検出器が必要である。

実験で使用する MARQ スペクトロメータを構成する各種検出器のうち、運動量  $2\text{-}4 \text{ GeV}/c$  までの散乱  $\pi$  中間子と  $K$  中間子の粒子識別を行うのが閾値型エアロゲルチェレンコフ検出器 (thAC) である。thAC はチェレンコフ光を用いて粒子識別を行う。屈折率  $1.007$  のエアロゲルを輻射体とし、運動量  $2\text{-}4 \text{ GeV}/c$  の領域の  $\pi$  中間子はチェレンコフ光を発生し、 $K$  中間子はチェレンコフ光を発生しないことを利用して、チェレンコフ光の有無で  $\pi$  中間子と  $K$  中間子の粒子識別を行う。しかし、屈折率の小さい輻射体では放出されるチェレンコフ光子数が少量である。そのため thAC の実用化に向けては微量の光子を効率良く検出する仕組みが重要である。また要求性能は  $\pi$  中間子の検出効率  $95\%$  以上、 $K$  中間子の誤識別割合  $3\%$  以下である。

先行研究ではエアロゲルとシリコン半導体光検出器である Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) アレイ、発生したチェレンコフ光を光検出器へ導く円錐型の集光器を用いた試作機が製作された。エアロゲルで発生したチェレンコフ光を集光器によって MPPC へ導き、MPPC で光子を検出することで効率の良い集光機構を目指した。またチェレンコフ光は 1 粒子の入射に対して複数放射されるため、64 個の MPPC が一体となった MPPC アレイを用いることで、光子を検出した MPPC の個数 (=多重度) を用いて MPPC の暗電流バックグラウンドの影響を低減する手法が確立された。しかし先行研究の試作機では  $\pi$  中間子と  $K$  中間子の識別に十分な光子検出効率を得ることができなかった。

そこで本研究では、エアロゲルの透過長と MPPC の光子検出効率を改善した試作機を製作し、その性能を SPring-8/LEPS2 ビームラインの陽電子ビームを用いて評価した。その結果、先行研究よりも光子検出効率が改善し、Time walk 補正を用いた解析で暗電流ノイズによるバックグラウンドの低減も実現した。

さらに実験で得られた検出光子数やバックグラウンドのデータをもとに Geant4 シミュレーションを用いて  $\pi$  中間子と  $K$  中間子の識別性能を評価し、現状の試作機で少なくとも運動量  $3\text{-}4 \text{ GeV}/c$  において目標性能を達成できることを示した。

また更なる光子検出効率改善のためにシミュレーションで集光器デザインの再検討を行い、集光器の出口を MPPC の形状に合わせた四角錐型の集光器を用いることで、運動量  $2\text{-}4 \text{ GeV}/c$  と運用予定のすべての運動量領域において目標性能を達成する試作機デザインを決定することができた。

最後に実機設計に向けて試作機を複数セグメント並べて大型化した検出器の識別能力の粒子入射位置に対する一様性についてのシミュレーションを行い、粒子の入射位置によって  $\pi$  中間子と  $K$  中間子の識別の MPPC の光子検出多重度の閾値を変更することにより大型化した場合でも目標性能を達成できる見込みがあることを示した。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>9</b>
1.1	ハドロンの構造	9
1.1.1	ハドロン	9
1.1.2	構成子クォークモデル	9
1.1.3	ダイクォークモデル	9
1.2	チャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験)	10
1.3	J-PARC $\pi$ 20 ビームラインと MARQ スペクトロメーター	11
1.3.1	J-PARC ハドロン実験施設	11
1.3.2	ハドロン実験施設拡張計画と $\pi$ 20 ビームライン	12
1.3.3	MARQ スペクトロメーター	13
1.4	閾値型エアロゲルチェレンコフ検出器 (thAC)	14
1.5	本研究の目的	14
<b>第 2 章</b>	<b>閾値型エアロゲルチェレンコフ検出器</b>	<b>16</b>
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	16
2.2	基本デザイン	17
2.3	検出器要素	18
2.3.1	シリカ・エアロゲル	19
2.3.2	半導体光検出器 (MPPC)	20
2.3.3	集光器	22
2.3.4	エアロゲルケース	23
2.4	要求性能	24
2.5	先行研究の結果	26
<b>第 3 章</b>	<b>SPring-8 LEPS2 ビームラインにおける性能評価試験</b>	<b>28</b>
3.1	性能評価試験の目的と概要	28
3.2	SPring-8	28
3.3	LEPS2 ビームライン	29
3.4	実験セットアップ	29
3.4.1	thAC	30
3.4.2	ビームファイバートラッカー (BFT)	31
3.4.3	NIM-EASIROC	31
3.4.4	AMANEQ HR-TDC	32
3.5	解析手法	33
3.5.1	BFT 及びプラスチックシンチレータを用いたイベントセレクト	33
3.5.2	MPPC のタイミング情報の Time walk 補正	34

3.5.3	MPPC のタイミング情報を用いたイベントセレクト	37
3.6	結果と考察	40
3.6.1	MPPC の多重度分布	40
3.6.2	MPPC のオーバー電圧依存性	41
3.6.3	エアロゲルを除いた場合の測定結果	42
3.6.4	陽電子の検出効率	43
<b>第 4 章</b>	<b>シミュレーションによる試作機の性能評価</b>	<b>45</b>
4.1	シミュレーションの目的	45
4.1.1	Geant4	45
4.2	テスト実験の再現	45
4.2.1	エアロゲル	46
4.2.2	ナフロン	46
4.2.3	集光器	46
4.2.4	MPPC	47
4.2.5	陽電子ビーム	47
4.3	解析手法	48
4.4	結果と考察	49
4.5	シミュレーションによる $\pi$ 中間子及び $K$ 中間子の識別能力の評価	51
4.5.1	評価の方法	52
4.5.2	$\pi$ 中間子に対する検出効率	52
4.5.3	$K$ 中間子に対する誤検出割合	54
4.5.4	考察	57
<b>第 5 章</b>	<b>実機設計に向けたシミュレーションと性能評価</b>	<b>58</b>
5.1	集光器デザインの再検討	58
5.1.1	検討した集光器のデザイン	58
5.1.2	評価方法	60
5.1.3	集光器タイプ A の長さの最適化	60
5.1.4	集光器タイプ B の長さの最適化	62
5.1.5	集光器タイプ C の長さの最適化	63
5.1.6	集光器の性能比較	65
5.2	集光器タイプ C に変更した場合の試作機の性能評価	65
5.3	thAC の複数セグメント化	67
5.3.1	検討した複数セグメント thAC の全体デザイン	67
5.3.2	エアロゲル	68
5.3.3	集光器	68
5.3.4	MPPC	69
5.4	複数セグメント thAC の性能評価	69
5.4.1	評価方法	69
5.4.2	横方向のスキャン (入射粒子が $\pi^+$ の場合)	71
5.4.3	横方向のスキャン (入射粒子が $K^+$ の場合)	72
5.4.4	斜め方向のスキャン (入射粒子が $\pi^+$ の場合)	73
5.4.5	斜め方向のスキャン (入射粒子が $K^+$ の場合)	74
5.5	複数セグメント thAC に関するまとめ	75
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>77</b>
6.1	本研究のまとめ	77

6.2	今後の課題と展望	77
付録A	複数セグメント thAC の運動量 4 GeV/c の粒子を用いたスキャン	80
A.1	横方向のスキャン (入射粒子が $\pi^+$ の場合)	80
A.2	横方向のスキャン (入射粒子が $K^+$ の場合)	81
A.3	斜め方向のスキャン (入射粒子が $\pi^+$ の場合)	81
A.4	斜め方向のスキャン (入射粒子が $K^+$ の場合)	82
A.5	運動量 4 GeV/c の粒子に対する検出器の性能のまとめ	83
付録B	J-PARC 高運動量ビームラインにおける $\pi$ 中間子及び陽子混合ビームを用いた検出器の性能評価実験	84
B.1	性能評価試験の概要	84
B.2	T106 テスト実験	84
B.3	実験セットアップ	86
B.4	解析手法	87
B.4.1	信号タイミングの時間原点の補正	87
B.4.2	BFT 及びプラスチックシンチレータを用いたイベントセレクト	90
B.4.3	MPPC のタイミング情報の Time walk 補正	91
B.4.4	MPPC のタイミング情報を用いたイベントセレクト	92
B.5	結果と考察	93
B.5.1	運動量 5 GeV/c の $\pi$ 中間子及び陽子の混合比の算出	93
B.5.2	暗電流による多重度分布	94
B.5.3	考察・まとめ	95

# 目次

1.1	チャームバリオンの励起スペクトルの模式図	10
1.2	チャームバリオンの生成反応の模式図	11
1.3	実験で得られると予想される質量スペクトル	11
1.4	現在のハドロン実験施設の概観	12
1.5	拡張後のハドロン実験施設の概観	13
1.6	MARQ スペクトロメータの概観	14
2.1	チェレンコフ放射の模式図	16
2.2	$\pi$ 中間子と $K$ 中間子について運動量毎の $1/\beta$	17
2.3	thAC の概観	18
2.4	シミュレーションで得られた多重度の分布	18
2.5	使用したエアロゲル	19
2.6	使用した MPPC	20
2.7	MPPC の構造の概念図	21
2.8	使用した MPPC の光子検出効率の波長依存性	21
2.9	使用した MPPC の光子検出効率のオーバー電圧依存性	21
2.10	集光器のモデルデータおよび実物 (半分) の写真	22
2.11	使用したアルミナイズドマイラーの反射率の波長依存性	23
2.12	使用したナフロン製のエアロゲルケース	24
2.13	TOF 検出器から得られるマススクエアと散乱粒子の運動量の相関	24
2.14	運動量 2-4 GeV/c の散乱粒子に対するマススクエアの分布	25
2.15	TOF 検出器によるマススクエア分布に thAC による粒子識別を課した場合の分布	25
2.16	先行研究で得られた陽電子入射による多重度分布と暗電流による多重度分布	26
2.17	先行研究で得られたシミュレーションによる試作機の運動量毎の $\pi$ 中間子の検出効率	27
2.18	先行研究で得られたシミュレーションによる試作機の運動量毎の $K$ 中間子の誤識別割合	27
3.1	SPring-8 の加速器構成	29
3.2	実験セットアップの模式図	30
3.3	実験で用いた thAC の試作機	30
3.4	ビームファイバトラッカー (BFT)	31
3.5	NIM-EASIROC	32
3.6	AMANEQ	33
3.7	プラスシンチレータ (T2、T3) のヒットタイミング分布	34
3.8	TOT(Time Over Threshold) と Time walk の概念図	35
3.9	MPPC の TOT と leading TDC の相関	36
3.10	Time walk に対する補正関数	36
3.11	Time walk 補正後の MPPC の TOT と leading TDC の相関	37

3.12	Time walk 補正前後の MPPC の leading TDC の分布	37
3.13	陽電子イベントに対する time window ごとの多重度分布	38
3.14	暗電流に対する time window ごとの多重度分布	38
3.15	選択した leading TDC の time window の範囲	39
3.16	MPPC の TOT 分布	39
3.17	選択したイベント	40
3.18	テスト実験時の SPring-8 のバンチ構造 (B モード)	40
3.19	陽電子の入射に対する MPPC の多重度分布	41
3.20	MPPC の暗電流による多重度分布	41
3.21	MPPC の多重度分布のオーバー電圧依存性	42
3.22	MPPC の多重度分布のオーバー電圧依存性 (拡大)	42
3.23	エアロゲルを除いた場合の MPPC の多重度分布	43
3.24	エアロゲルおよびエアロゲルケースを除いた場合の MPPC の多重度分布	43
3.25	多重度閾値ごとの陽電子の検出効率	44
3.26	多重度閾値ごとの暗電流による誤検出割合	44
4.1	シミュレーションで再現した thAC	46
4.2	テスト実験時の陽電子ビーム角度の分布	47
4.3	再現した thAC に陽電子ビームを入射した時の様子	48
4.4	シミュレーションで得られた MPPC 受光面でのヒット分布	49
4.5	再現した暗電流による多重度分布	49
4.6	シミュレーションによる陽電子入射時の光子の MPPC への入射角度の分布	50
4.7	シミュレーションで得られた陽電子による多重度分布	51
4.8	光子検出効率を 0.89 とした場合にシミュレーションで得られた陽電子による多重度分布	51
4.9	シミュレーションによる光子検出効率を調整した場合の多重度の変化	51
4.10	シミュレーションによる 4 GeV/c の $\pi^+$ 中間子入射時の光子の MPPC への入射角度の分布	53
4.11	シミュレーションによる 4 GeV/c の $\pi^+$ 中間子入射に対する多重度分布	53
4.12	シミュレーションによる運動量毎の $\pi^+$ 中間子の検出効率	54
4.13	シミュレーションによる 4 GeV/c の $K^+$ 中間子入射時の光子の MPPC への入射角度の分布	55
4.14	シミュレーションによる 4 GeV/c の $K^+$ 中間子入射に対する多重度分布	56
4.15	シミュレーションによる運動量毎の $K^+$ 中間子の誤識別割合	56
4.16	MPPC の暗電流レートの温度依存性	57
5.1	現行の集光器の出口部分と MPPC の覆う領域	58
5.2	集光器タイプ A の模式図	59
5.3	集光器タイプ B の模式図	59
5.4	集光器タイプ C の模式図	59
5.5	シミュレーションによる集光器タイプ A、長さ 120 mm の場合の MPPC への光子の入射角度の分布	61
5.6	シミュレーションによる集光器タイプ A での多重度の集光器長さ依存性	61
5.7	シミュレーションによる集光器タイプ B、長さ 260 mm の場合の MPPC への光子の入射角度の分布	62
5.8	シミュレーションによる集光器タイプ B での多重度の集光器長さ依存性	63
5.9	シミュレーションによる集光器タイプ C、長さ 270 mm の場合の MPPC への光子の入射角度の分布	64
5.10	シミュレーションによる集光器タイプ C での多重度の集光器長さ依存性	64
5.11	シミュレーションによる集光器タイプごとの多重度の集光器長さ依存性の比較	65
5.12	シミュレーションによる試作機の集光器タイプを C とした場合の運動量毎の $\pi^+$ 中間子の検出効率	66
5.13	シミュレーションによる試作機の集光器タイプを C とした場合の運動量毎の $K^+$ 中間子の誤識別割合	67

5.14 シミュレーションで作成した複数セグメント thAC	68
5.15 9つの MPPC の ID	69
5.16 横方向のスキャン位置	70
5.17 斜め方向のスキャン位置	71
5.18 シミュレーションによる 2 GeV/c の $\pi^+$ 中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の $\pi^+$ 中間子の検出効率	72
5.19 シミュレーションによる 2 GeV/c の $K^+$ 中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の $K^+$ 中間子の誤検出割合	73
5.20 シミュレーションによる 2 GeV/c の $\pi^+$ 中間子を入射して斜め方向のスキャンを行った場合の $\pi^+$ 中間子の検出効率	74
5.21 シミュレーションによる 2 GeV/c の $K^+$ 中間子を入射して斜め方向のスキャンを行った場合の $K^+$ 中間子の誤検出割合	75
5.22 複数セグメント thAC において多重度評価に用いる MPPC の個数と多重度の閾値の組み合わせを入射位置ごとに色分けしたもの (入射粒子の運動量が 2 GeV/c の場合)	76
5.23 実機における集光器配置の改善案	76
5.24 実機における集光器形状の改善案	76
A.1 シミュレーションによる 4 GeV/c の $\pi^+$ 中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の $\pi^+$ 中間子の検出効率	80
A.2 シミュレーションによる 4 GeV/c の $K^+$ 中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の $K^+$ 中間子の誤検出割合	81
A.3 シミュレーションによる 4 GeV/c の $\pi^+$ 中間子を入射して斜め方向のスキャンを行った場合の $\pi^+$ 中間子の検出効率	82
A.4 シミュレーションによる 4 GeV/c の $K^+$ 中間子を入射して斜め方向のスキャンを行った場合の $K^+$ 中間子の誤検出割合	82
A.5 複数セグメント thAC において多重度評価に用いる MPPC の個数と多重度の閾値の組み合わせを入射位置ごとに色分けしたもの (入射粒子の運動量が 4 GeV/c の場合)	83
B.1 J-PARC 高運動量ビームラインの模式図	85
B.2 ランバートソン磁石の模式図	85
B.3 シミュレーションによる運動量毎の 2 次粒子強度	85
B.4 $\pi$ 中間子と陽子について運動量毎の $1/\beta$	86
B.5 T106 実験セットアップの模式図	87
B.6 T1 の両端のヒットタイミングの平均値と T1 両端で得た信号幅の和の相関	88
B.7 T1 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端の leading TDC の平均値と T1 両端で得た TOT の和の相関	88
B.8 T1 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端のヒットタイミングの平均値と T1 両端で得た信号幅の和の相関	89
B.9 T1、T2 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端の leading TDC の平均値と T2 両端で得た TOT の和の相関	89
B.10 T1、T2 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端の leading TDC の平均値と T1 両端で得た TOT の和の相関	89
B.11 T1、T2 に対する Time walk 補正後 T1 と T2 の時間差の分布	90
B.12 T3 の leading TDC の分布	90
B.13 MPPC の leading TDC と TOT の相関	91
B.14 1つの MPPC チャンネルに対する leading TDC と TOT の相関に対する補正関数	91

B.15 Time walk 補正後の MPPC の leading TDC と TOT の相関 . . . . .	92
B.16 Time walk 補正後の MPPC の leading TDC . . . . .	93
B.17 MPPC の TOT 分布 . . . . .	93
B.18 運動量 5 GeV/c の $\pi$ 中間子及び陽子に対する多重度分布 . . . . .	94
B.19 暗電流による多重度分布 . . . . .	95

# 表目次

2.1	エアロゲルの仕様	20
2.2	MPPC の仕様	21
2.3	集光器の仕様	23
3.1	time window 10 ns(A) での多重度閾値ごとの陽電子の検出効率	38
3.2	time window 15 ns(B) での多重度閾値ごとの陽電子の検出効率	38
4.1	4 GeV/c の $\pi$ 中間子の検出効率の先行研究の試作機との比較	54

# 第1章 序論

## 1.1 ハドロンの構造

### 1.1.1 ハドロン

物質の階層構造において、クォークは内部構造を持たない最小の単位の粒子であると考えられている。また標準模型で強い相互作用を伝達する粒子をグルーオンと呼ぶ。ハドロンはそのクォークとグルーオンから構成される粒子であり、内部構造を持つ粒子としては最も基本的な単位である。すなわち、ハドロンの内部構造について理解することはより複雑な構造を持つ物質の起源を理解するための初段として重要である。QCD(Quantum Chromodynamics: 量子色力学)においてハドロンはカラーをもたないことが要求される。そのため赤 (R)、青 (B)、緑 (G) の3つのクォークの組み合わせまたはカラーと反カラーのクォークの組み合わせによってハドロンが作られる。ハドロンのうち3つのクォークによる複合粒子をバリオン、クォークと反クォークによる複合粒子をメソンと呼ぶ。またクォークを4つ以上持つエキゾチックハドロンと呼ばれるハドロンも存在すると考えられている。

### 1.1.2 構成子クォークモデル

多彩なハドロンの構造を説明する理論モデルの一つに構成子クォークモデルがある。構成子クォークモデルにおいては、裸のクォークがグルーオンやクォーク反クォーク対をまとめて準粒子(構成子クォーク)となり、それらが強い相互作用によって結合したものがハドロンであると説明される。例えば、ハドロンの代表的な粒子である陽子は  $938 \text{ MeV}/c^2$  の質量をもつが、これは陽子を構成するクォークであるアップ (u) クォーク2つとダウン (d) クォーク1つがそれぞれ約  $300 \text{ MeV}/c^2$  を担う構成子クォークであると考えられている。つまり、一般的に知られているヒッグス場によって与えられる u,d クォークの質量である数  $\text{MeV}/c^2$  だけでなくカイラル対称性の破れなどによって獲得する質量の足し合わせとして考えることで陽子の質量を理解することができる。構成子クォークモデルは特に基底状態のハドロンの性質をよく説明している。一方で、構成子クォークモデルはバリオンの一部の励起状態の説明が困難であったり、構成子クォークモデルが予言するすべての励起状態が観測されていない、といったの問題点もある。そのため、ハドロンの構造を理解するためにはハドロン内部でどのような有効自由度のダイナミクスが働いているのかをより追及する必要であると考えられている。

### 1.1.3 ダイクォークモデル

ハドロン内部を記述するため、有効自由度としてダイクォーク相関を取り入れたダイクォークモデルがある [1]。ダイクォークモデルとはバリオン中でクォーク対が有効自由度になっているとするモデルである。バリオン内部では3つのクォーク同士のペアがダイクォーク相関として働いていると考えられている。そのため陽子や中性子のような、質量がほとんど同じである u クォークや d クォークのみからなるバリオン中においてはダイクォーク相関は縮退しており観測は困難である。一方で、これらのクォークのうち1つのみを c クォークのような重いクォークに置き換えると軽クォーク同士の相関と重い c クォークが運動学的に分離されるため、チャームバリオンにおいてはダイクォークの相関が顕わになると期待される。1つのモードは軽クォーク間の相対的運動状態である  $\rho$  モードで、もう1つが軽クォーク対と重いクォーク間の相対的運動状態である  $\lambda$  モードである。励起状態のエネルギー比は式 (1.1) で表せる。

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

ここで  $m_Q$  及び  $m_q$  はそれぞれ重いクォーク、軽いクォークの構成子クォーク質量である。ここで  $m_Q \simeq m_q$ 、つまり構成子クォークが軽クォークのみからなる場合この比は1となり縮退することが分かる。また  $m_Q \gg m_q$ 、すなわち c クォークのような u, d クォークに比べて重いクォークの質量が無限大になる極限ではエネルギー比は式 (1.2) となる。

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

そのためチャームバリオンの励起スペクトルはこの2つの励起モードを反映したものになると考えられる (図 1.1)[2]。さらにチャームバリオンの生成率や崩壊過程もダイクォーク相関を反映すると考えられている。このようにチャームバリオンの系統的な研究によりハドロン内部におけるダイクォーク相関の働きを明らかにすることができると期待される。

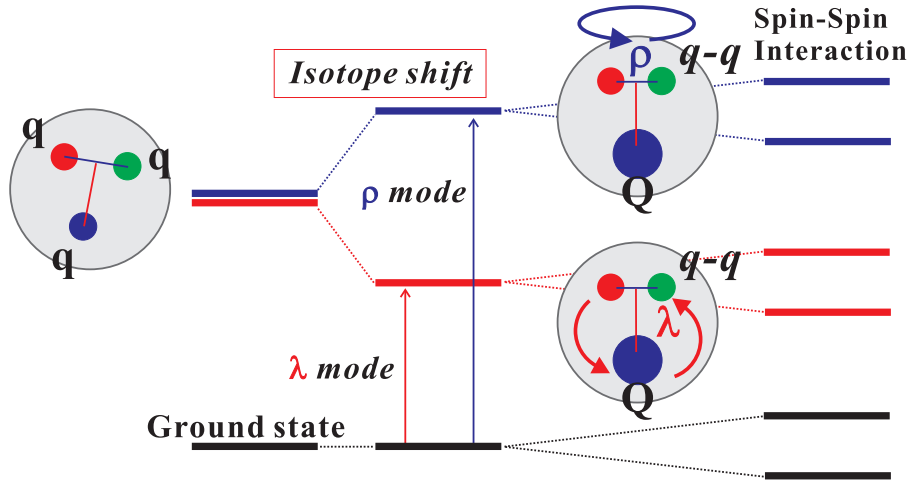


図 1.1: チャームバリオンの励起スペクトルの模式図。励起モードの違いにより、励起状態のスペクトルにダイクォーク相関を反映した状態が現れる [2]。

## 1.2 チャームバリオ分光実験 (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: Japan Proton Accelerator Research Complex) のハドロン実験施設においてチャームバリオ分光実験 (J-PARC E50 実験) を計画している。この実験では以下の反応を用いてチャームバリオンを生成する [3]。



ここで  $\pi^-$  は新たに建設中のビームラインである  $\pi 20$  ビームラインから供給される 20 GeV/c の  $\pi$  中間子ビーム、p はビームライン上に置かれる液体水素標的である。さらにこの反応で生成される  $D^{*-}$  は式 (1.4), 式 (1.5) のように崩壊する (図 1.2)。



ビーム粒子  $\pi^-$  及び  $D^{*-}$  からの崩壊粒子 ( $K, \pi$ ) を検出して 4 元運動量を得ることにより欠損質量法を用いてチャームバリオン ( $Y_c^{*+}$ ) の質量スペクトルを得ることができる。予想される質量スペクトルを図 1.3 に示す。質量スペクトルから得られる生成率やチャームバリオンからの崩壊粒子の測定から求められる崩壊分岐比はダイクォーク相関を反映していると考えられている。これらが実際に観測されればダイクォーク相関の強い証拠となる。

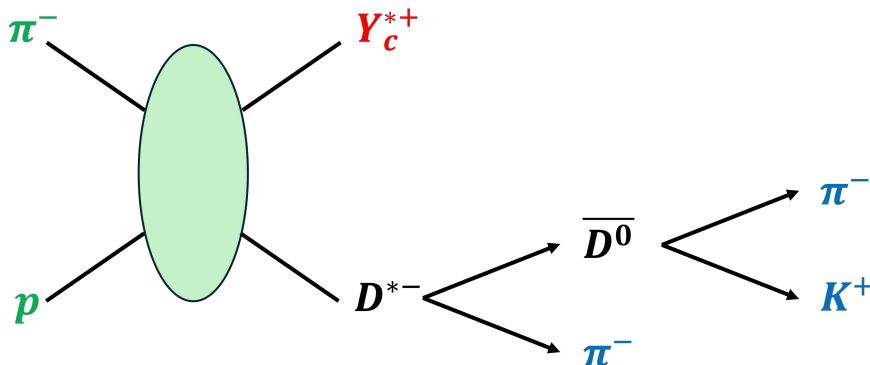


図 1.2: チャームバリオンの生成反応の模式図。ビーム粒子用検出器で測定する粒子及び標的を緑色で、散乱粒子用検出器で測定する粒子を青色で示した。

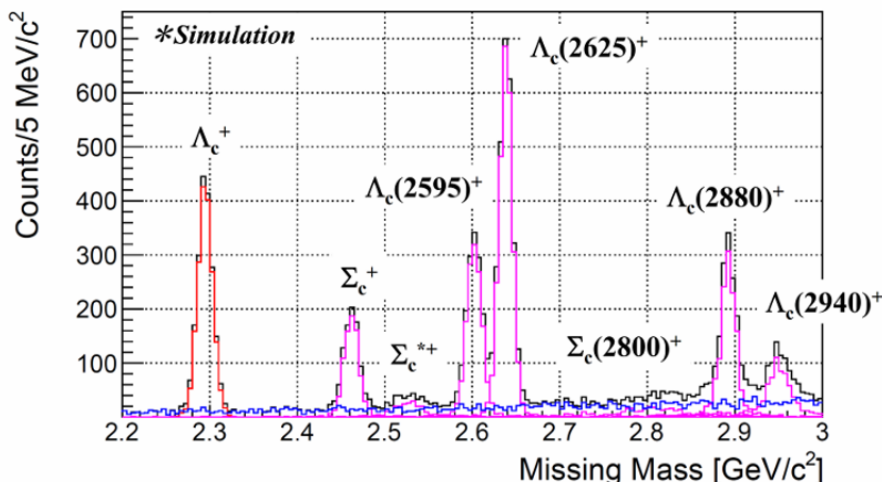


図 1.3: 実験で得られると予想される質量スペクトル。チャームバリオンの基底状態を赤色で、励起状態をピンク色で、バックグラウンド事象を青色で示した。

## 1.3 J-PARC $\pi 20$ ビームラインと MARQ スペクトロメーター

### 1.3.1 J-PARC ハドロン実験施設

J-PARC の加速器は 400 MeV までの加速を担う線形加速器 (LINIAC)、3 GeV/c までの加速を担うシンクロトロン (RCS)、30 GeV/c までの加速を担うシンクロトロン (MR) の 3 つから構成される。J-PARC の MR で加速された陽子は J-PARC 内の各実験施設へ輸送される。

J-PARC の実験施設の 1 つであるハドロン実験施設の現在の概観を図 1.4 に示す。ハドロン実験施設には T1 と呼ばれる金標的があり、加速した陽子を照射することで  $K^\pm, K^0, \pi^\pm$  といった 2 次粒子を生成する。これらの 2 次粒子はハドロン実験施設内の様々なビームラインに輸送される。2 GeV/c までの運動量の 2 次粒子を利用できる

K1.8、K1.8 ビームラインから分岐した 1.0 GeV/c までの運動量の 2 次粒子を利用できる K1.8BR ビームライン、大強度の中性  $K$  中間子を利用できる KL ビームライン、メインリングからの約 30 GeV/c の 1 次陽子の一部をそのまま利用する高運動量ビームライン、高運動量ビームラインから分岐した、8 GeV/c までの陽子を利用できる COMET ビームラインがある。これらの多様なビームラインを用いてハドロン、ハイパー核、フレーバー物理のような様々な実験が行われている。

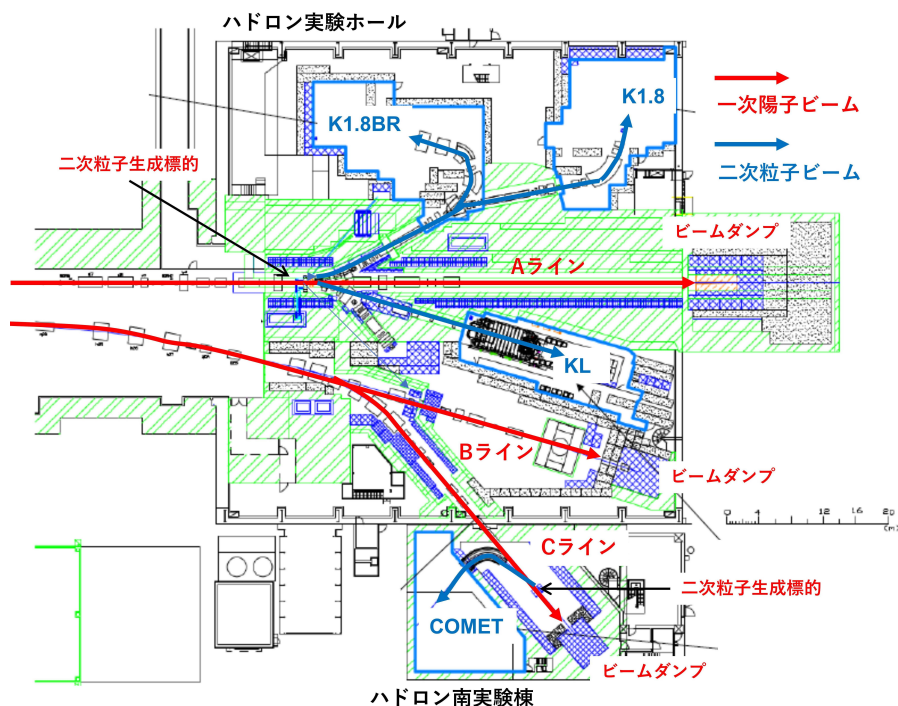


図 1.4: 現在のハドロン実験施設の概観 [4]。

### 1.3.2 ハドロン実験施設拡張計画と $\pi 20$ ビームライン

現在、ハドロン実験施設を拡張する計画が進められている。拡張後のハドロン実験施設の概観を図 1.5 に示す。現在設置されている 2 次粒子生成標的 (T1) の下流にさらに生成標的 (T2) を設置し、既存のビームラインと異なる特徴を持つビームラインを建設する予定である。また現状のハドロン実験施設のビームラインでは 2 GeV/c 以上の 2 次粒子を供給することはできない。そこで拡張計画と並行して、高運動量ビームラインの分岐部分にも新たに 2 次粒子生成標的を設置し、20 GeV/c までの高運動量の 2 次粒子を供給することを目指しており、このビームラインを  $\pi 20$  ビームラインと呼ぶ。 $\pi 20$  ビームラインではこれまで J-PARC で行うことのできなかつた、チャームバリオンや複数のストレンジクォークを持つグザイバリオン、オメガバリオンの生成が可能となる。また  $\pi 20$  ビームラインには静電セパレータのような粒子弁別機能が無いため生成された 2 次粒子は粒子識別されことなくそのまま輸送される。

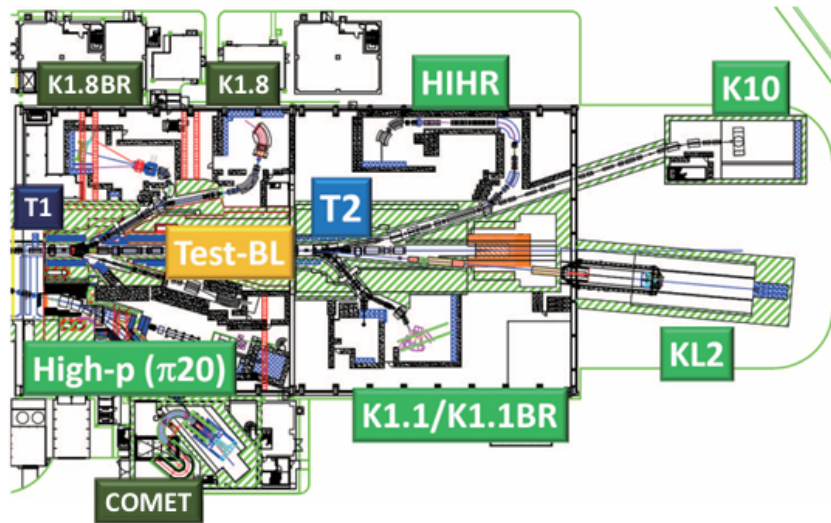


図 1.5: 拡張後のハドロン実験施設の概観 [5]。HIHR、K10、K1.1/K1.1BR、KL2 ビームラインといった多岐にわたる特徴を持ったビームラインが新設される予定である。

### 1.3.3 MARQ スペクトロメータ

$\pi 20$  ビームラインの建設に併せて、当該ビームラインでの様々な実験で汎用的に用いる MARQ(Multi-purpose Analyzer for Resonance and Quark dynamics in hadrons and hadronic systems) スペクトロメータと呼ばれる新たなスペクトロメータが建設中である。MARQ スペクトロメータの概観を図 1.6 に示す。例えばチャームバリオン分光実験においては欠損質量法を用いるためビーム粒子、散乱粒子の両方を測定する必要がある。そのため MARQ スペクトロメータはターゲット上流のビーム粒子測定用の検出器群と下流の散乱粒子測定用の検出器群から構成される。上流のビーム測定用の検出器としてはビームタイミングを検出する T0 検出器 [6]、ビーム粒子の粒子識別を行うビームリングイメージングチェレンコフ検出器 (Beam-RICH)[7]、ビームの飛跡検出を行うビームファイバートラッカー検出器 (BFT)[8] がある。チャームバリオン分光実験ではターゲットとして厚さ  $4 \text{ g/cm}^2$  の液体水素標的を用いる。下流の散乱粒子の測定の検出器としては、散乱粒子の飛跡検出のためのシンチレーションファイバートラッカー、ドリフトチェンバー(DC) がある。さらに後方には Multi-gap RPC(Resistive Plate Chamber) が設置され、粒子の飛行時間 (TOF:Time Of Flight) を計測することで飛跡検出器によって得られる運動量の情報と組み合わせて主に  $2 \text{ GeV}/c$  以下の運動量の粒子の粒子識別を行う。運動量  $2 \text{ GeV}/c$  以上の粒子は閾値型エアロゲルチェレンコフ検出器 (thAC:threshold type Aerogel Cherenkov detector) およびリングイメージングチェレンコフ検出器 (RICH:Ring Imaging Cherenkov detector) によって粒子識別を行う。粒子識別検出器の性能はチャームバリオンの励起スペクトルの信号とバックグラウンド比に直接影響するため重要である。

さらに MARQ スペクトロメータではデータ収集系として連続読み出し型のデータ収集システム (Streaming DAQ) を用いる。従来のデータ収集系では目的の反応に対応する情報を検出器から受け取ったときのみトリガーを発行し、データ収集を行う方法が主流であった。一方 Streaming DAQ では検出器からのアナログ信号をデジタル信号に変換しすべての情報を一度コンピュータに送り、コンピュータ上で後からフィルターをかけることにより目的のイベントを抽出する。そのため Streaming DAQ を採用にすることによりデータ収集の高速化と同時に複数の目的を持った測定を行うことができ、異なる種類のビームが同時に輸送されてくる  $\pi 20$  ビームラインや多様な反応を同時に測定できる MARQ スペクトロメータの特徴を生かすことができる。

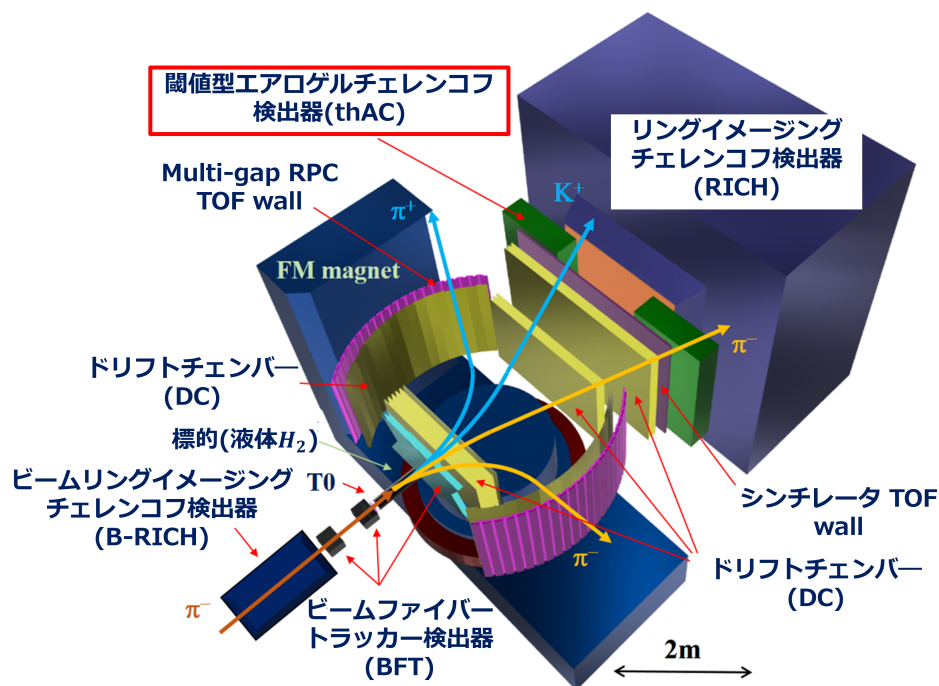


図 1.6: MARQ スペクトロメータの概観

## 1.4 閾値型エアロゲルチェレンコフ検出器 (thAC)

MARQ スペクトロメータの散乱粒子測定用の検出器の 1 つである thAC(threshold type Aerogel Cherenkov detector) は主に運動量 2-4 GeV/c の散乱  $\pi$  中間子及び  $K$  中間子を識別する粒子識別検出器である。thAC は MARQ スペクトロメータの下流側、TOF 検出器と RICH の間に設置される。ビーム軸方向に対して左右 2 機に分かれて設置され、サイズは 1 機あたり高さ約 1.5 m、横幅約 1 m である。運動量 2 GeV/c 以上の粒子の識別を担う検出器には他にリングイメージングチェレンコフ検出器 (RICH) がある。しかし運動量の低い粒子は FM 磁石の磁場により飛跡が大きく曲がるため RICH のみで粒子識別を行う場合 RICH の横幅のサイズ大きくする必要があるのである。thAC は RICH のサイズを抑えるとともに TOF 検出器で粒子識別の難しい運動量領域の粒子識別を行う検出器として重要な役割を持つ検出器である。

thAC ではチェレンコフ光を用いて粒子識別を行う。運動量 2-4 GeV/c の領域において  $\pi$  中間子の入射に対してはチェレンコフ光を発生させ、 $K$  中間子の入射に対してはチェレンコフ光を発生させない屈折率の小さい輻射体を利用することでチェレンコフ光の有無を用いて識別する。目標とする識別性能は  $\pi$  中間子に対する検出効率 95%以上と  $K$  中間子の誤識別確率 3%以下である。

## 1.5 本研究の目的

本研究では MARQ スペクトロメータの散乱粒子測定用の検出器の一つである thAC(threshold type Aerogel Cherenkov detector) 試作機の性能評価及び実機的设计を行う。先行研究において約 11 cm×11 cm の thAC の試作機が製作された [9]。輻射体として低屈折率のエアロゲルを利用し、少ない光量を補うためコーン型の集光器が設計された。またチェレンコフ光を検出する光検出器として半導体光検出器である SiPM の Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) アレイを用いた。そして 1 GeV/c の電子ビームを用いた性能評価試験を行い、1 粒子の通過に対して同時に光子を検出した MPPC のチャンネル数の合計 (=多重度) を用いることで、チェレンコフ光を伴うイ

ベントと暗電流によるノイズを区別する手法が確立された。一方で先行研究で製作された試作機ではシミュレーションにより、目標とする  $\pi$  中間子と  $K$  中間子識別性能に達さないということも分かった。

先行研究の結果を踏まえて本研究の目的は大きく分けて2つある。1つ目はより透過長の長いエアロゲル及び光子検出効率の高い MPPC を用いることにより、試作機の性能を向上させることである。2つ目は実機製作に向けて集光器設計の最適化及び大型化のためのシミュレーションを行うことである。

本論文では第2章で thAC の検出器デザインや構成要素、目標性能などの検出器の基本的な情報について説明する。第3章では SPring-8 での 1 GeV/ $c$  陽電子ビームを用いた試作機の性能評価の結果について述べ、第4章でシミュレーションによるテスト実験の再現を行い、テスト実験の結果の妥当性と新型試作機の  $\pi$  中間子及び  $K$  中間子に対する性能評価の結果について述べる。そして第5章でシミュレーションによる集光器の設計の最適化および大型化した検出器の性能評価を行い、第6章で本論文の結論を述べる。

## 第2章 閾値型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 (Cherenkov radiation) とは、荷電粒子が物質中を通過する際に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。チェレンコフ光の放射条件は物質の屈折率  $n$ 、荷電粒子の速度  $v$ 、光速  $c$ 、荷電粒子の速度と光速の比  $\beta$  を用いて式 (2.1) で表せる。

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

またチェレンコフ光は粒子の進行方向に対して放射状に放出され、その放出角度をチェレンコフ角という。チェレンコフ角  $\theta_c$  と粒子の速度  $\beta$  や屈折率  $n$  の関係は式 (2.2) で表せる (図 2.1)。

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

本研究で開発する検出器では放射状に同時に放出される複数の光子を検出することによって光検出器である SiPM(MPPC) の熱的ノイズである暗電流とチェレンコフ光を伴うイベントの識別を行う。物質の単位長さあたり、チェレンコフ光の単位波長あたりに放出される光子数は (2.3) で表せる。

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

ここで  $z$  は荷電粒子の電荷、 $\alpha (= e^2/\hbar c)$  は微細構造定数、 $\lambda$  は放出されるチェレンコフ光の波長である。

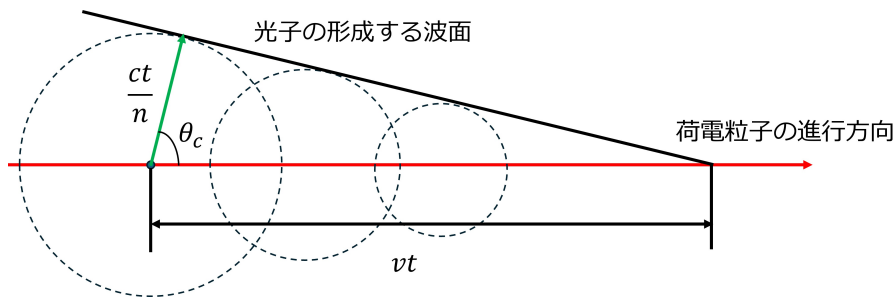


図 2.1: チェレンコフ放射の模式図

#### 2.1.2 閾値型チェレンコフ検出器

粒子の速度  $\beta$  は運動量  $p$  と粒子の質量  $m$  と (2.4) の関係にある。

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\sqrt{(mc^2)^2 + p^2}}{p} \quad (2.4)$$

thAC で識別したい  $\pi$  中間子と  $K$  中間子について式 (2.4) を運動量毎にプロットしたものを図 2.2 に示す。仮に同じ運動量の  $\pi$  中間子と  $K$  中間子が物質中を通過した場合、より質量の小さい  $\pi$  中間子のみが式 (2.1) を満たす。

す屈折率  $n$  が存在する、すなわち検出器を通過した際に  $\pi$  中間子のみがチェレンコフ光を発生し、 $K$  中間子ではチェレンコフ光が発生しないという差を利用することで粒子識別を行うことが可能である。このようにチェレンコフ光の有無により粒子識別を行う検出器を閾値型チェレンコフ検出器と呼ぶ。

本研究では主に 2-4 GeV/c の運動領域の  $\pi$  中間子と  $K$  中間子を識別するため、その領域において  $\pi$  中間子のみがチェレンコフ光を発生する輻射体としては屈折率  $n=1.007$  程度の物質が必要となる。

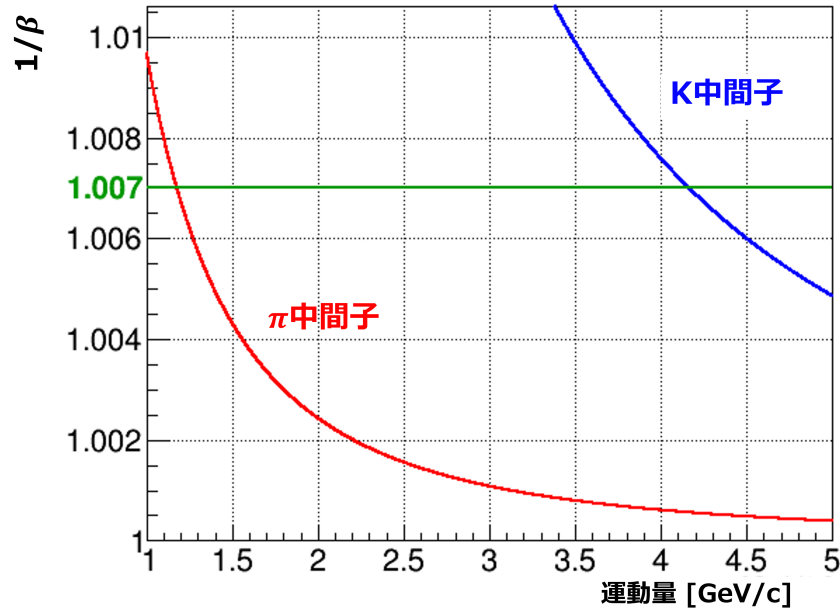


図 2.2:  $\pi$  中間子と  $K$  中間子について運動量毎の  $1/\beta$ 。それぞれの粒子の質量は静止質量を用いた。式 (2.1) より屈折率 1.007 の物質中では緑で表示した線以下の  $1/\beta$  をもつ粒子がチェレンコフ放射を起こす。

## 2.2 基本デザイン

検出器の概観を図 2.3 に示す。本研究ではチェレンコフ光の輻射体として屈折率の小さい、すなわち発光量の小さいエアロゲルを使用する。また読み出しチャンネルの増加を抑えるために、使用する MPPC の個数を最低限に抑えたい。そのため MPPC の受光面積の小ささをカバーし、発生した光子を効率よく少数の MPPC に導く機構が重要になる。これを担うのが集光器である。輻射体であるエアロゲルに入射した粒子で発生したチェレンコフ光は直接または集光器によって反射して光検出器である MPPC へ導かれ、縦 8 個  $\times$  横 8 個の合計 64 個がアレイとなった MPPC のいずれかのセグメントで検出される。1 粒子の入射に対してチェレンコフ光子は複数放射されるため複数の MPPC が同時に光子を検出することになる。一方でチェレンコフ光を発生させない粒子が通過した場合、MPPC から受け取る信号の主たるものは熱的なキャリアの発生による暗電流である。これは確率的に起こるため複数の MPPC で同時に暗電流によるパルスを検出する確率は小さい。

図 2.4 にチェレンコフ光を発生させる粒子 ( $\pi$  中間子: 運動量 4 GeV/c) と発生させない粒子 ( $K$  中間子: 運動量 4 GeV/c) が通過した場合の多重度 (=1 粒子の検出器への入射に対して、信号を出力した MPPC のチャンネル数の合計) の分布を示す [9]。このシミュレーションでは屈折率 1.007、透過長 17.5 mm のエアロゲルを用い、ピクセルピッチ 75  $\mu\text{m}$  の MPPC の光子検出効率を仮定している。赤線で示したヒストグラムが  $\pi$  中間子による分布、青線で示したヒストグラムが  $K$  中間子による分布である。本検出器では 2 粒子を識別するためにこの多重度の情報を用いる。例えば図 2.4 のように多重度に閾値を設け、閾値以上の多重度を持つ粒子を  $\pi$  中間子、閾値未満の多重度を持つ粒子を  $K$  中間子と判定する。 $\pi$  中間子の検出効率は  $\pi$  中間子の通過に対してこの多重度閾値以上の

多重度を得られる割合で決定される。また暗電流やビーム入射によるその他のバックグラウンドなどによる多重度が多重度閾値を超えてしまう割合が  $K$  中間子を  $\pi$  中間子と誤識別してしまう割合となる。そのためバックグラウンド、特に暗電流によるパルスのレートを低減させること、エアロゲルで発生したチェレンコフ光を効率的に検出することで識別能力が向上する。

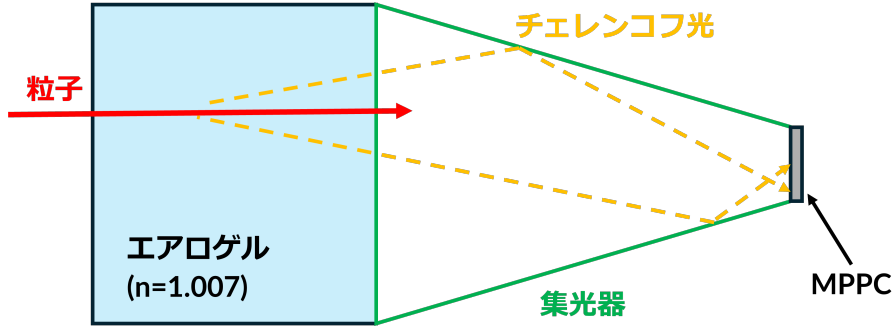


図 2.3: thAC の概観。エアロゲルに入射した粒子により発生したチェレンコフ光を集光器によって MPPC アレイに導いて検出する。

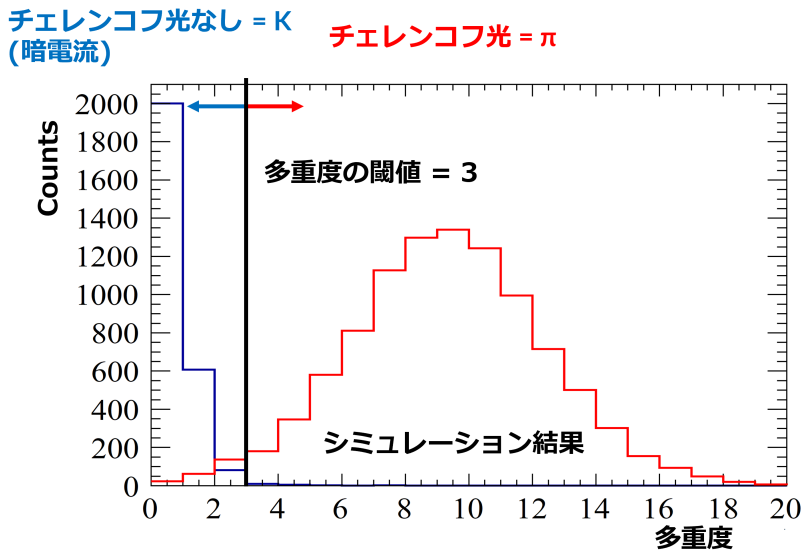


図 2.4: シミュレーションで得られた多重度の分布 [9]。入射粒子は  $4 \text{ GeV}/c$  の  $\pi$  中間子及び  $K$  中間子とした。

## 2.3 検出器要素

thAC の検出器を構成する各構成要素について説明する。集光器およびエアロゲルケースは先行研究と同じものを用いた。先行研究との比較対象はエアロゲル及び SiPM 光検出器 (MPPC) である。エアロゲルは透過長が  $10 \text{ mm}$  から  $20 \text{ mm}$  に改良し、MPPC はピクセルピッチが  $50 \mu\text{m}$  のものから、より光子検出効率の高いピクセルピッチ  $75 \mu\text{m}$  のものに変更した。エアロゲル及び SiPM 光検出器 (MPPC) の詳細についてはそれぞれ 2.3.1 節および 2.3.2 節で述べ、先行研究との性能比較のための実験の詳細は第 3 章で述べる。

### 2.3.1 シリカ・エアロゲル

2.1.2 節で述べた通り、2-4 GeV/c の運動領域の  $\pi$  中間子と  $K$  中間子を識別するには屈折率  $n=1.007$  と、屈折率の小さい輻射体が必要となる。またチェレンコフ検出器に用いる輻射体の要求する要素として物質の透過長がある。式 (2.3) からわかるように屈折率の小さい物質中ではチェレンコフ光の光子数が減少する。したがって微量の光子を高効率で検出するためには輻射体自身が高い透過長を持っていることも重要になる。一般にチェレンコフ検出器において低屈折率を求めて採用される輻射体にガスやシリカ・エアロゲルがある。シリカ・エアロゲルは二酸化ケイ素の 3 次元骨格と 90 % 以上の空気で構成されている非結晶質の物質である。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屈折率を調整できるほか、現在では疎水性を持つものも開発されており、ガスと異なり密封性の高くない容器でも使用可能である。以上の点を踏まえて、本研究ではチェレンコフ検出器の輻射体としてシリカ・エアロゲルを用いる。

先行研究においては輻射体のエアロゲルとして屈折率 1.0086、波長 400 nm の光に対する透過長が 9 mm のものを用いて性能評価が行われた。その結果、透過長 9 mm ではエアロゲル中での光子の損失が大きく、要求する粒子識別能力を達成できず、シミュレーションにより要求性能を達成するためには透過長 17.5 mm 以上のエアロゲルが必要であることが分かった。

そこで本研究では、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よって新たに開発された、波長 405 nm の光に対する屈折率 1.007、400 nm の光に対する透過長 20 mm のエアロゲルを使用した (図 2.5)[12]。本研究で用いたエアロゲルの仕様を表 2.1 に示す [11]。実験ではこの 5 枚を厚さ方向に重ねて使用し、厚さ約 100 mm のエアロゲルとして使用した。

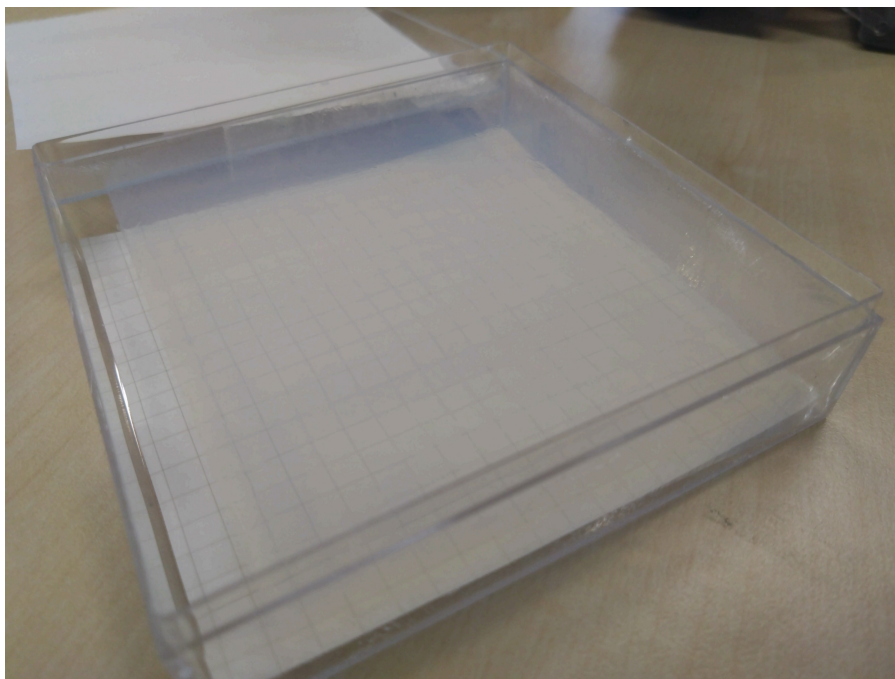


図 2.5: 使用したエアロゲル (屈折率  $n=1.007$ , 透過長 20 mm)

表 2.1: エアロゲルの仕様

ID	屈折率	透過長 [mm]	幅 [mm]	厚さ [mm]
TSA21-3b	1.0072	18	89	19.6
TSA23-1b	1.0073	18	89	20.0
TSA24-1a	1.0068	20	92	20.3
TSA24-1b	1.0068	20	92	20.3
TSA24-2b	1.0070	20	92	19.7

### 2.3.2 半導体光検出器 (MPPC)

本研究ではエアロゲルで発生したチェレンコフ光を検出する SiPM 光検出器として浜松ホトニクス製の半導体光検出器である MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) アレイ、S13361-3075AE-08(図 2.6) を用いた [13]。先行研究で用いた S13361-3050AE-08 よりもさらに光子検出効率の良い MPPC であり本研究での検出器改良のポイントの 1 つである。これらの光検出器の仕様について表 2.2 に示す。また MPPC の光子検出効率の波長依存性を図 2.8 に、MPPC のオーバー電圧依存性を図 2.9 に示す [13]。ただし光子検出効率は温度 25 °C、オーバー電圧 3 V、波長 450 nm の光に対する値である。

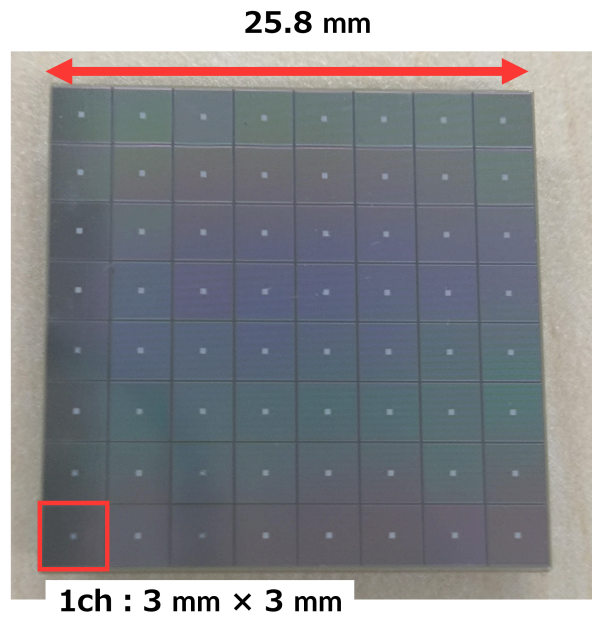


図 2.6: 使用した MPPC(S13361-3075AE-08)

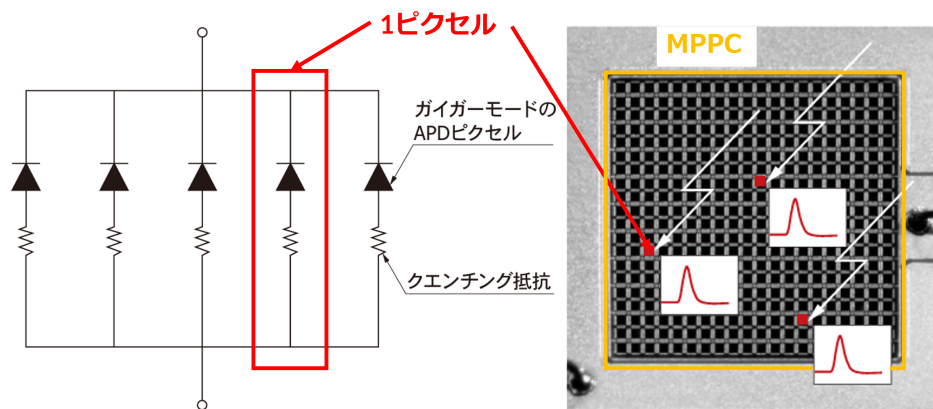


図 2.7: MPPC の構造の概念図 [14]

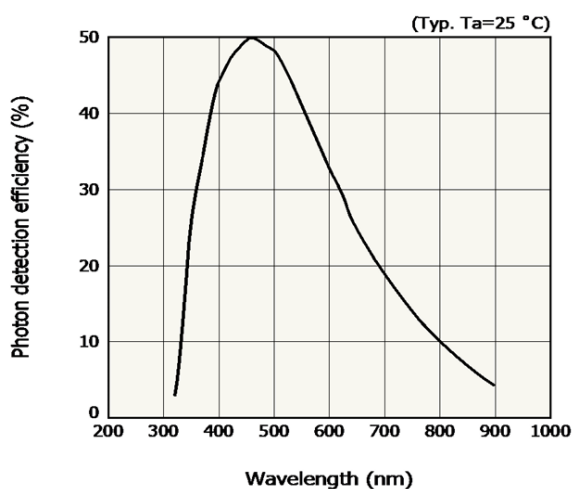


図 2.8: 使用した (MPPCS13361-3075AE-08) の光子検出効率の波長依存性 [13]

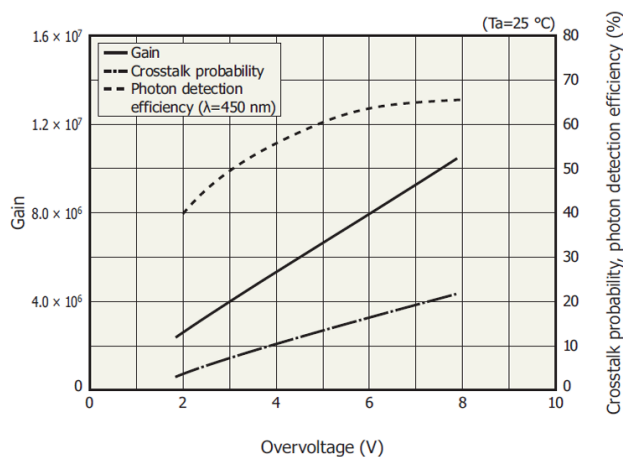


図 2.9: 使用した (MPPCS13361-3075AE-08) の光子検出効率のオーバー電圧依存性 [13]

表 2.2: MPPC の仕様

	S13361-3050AE-08	S13361-3075AE-08
チャンネル数	64 ch(8×8)	
光子検出有効領域 (/1 チャンネル)	3.0 mm×3.0 mm	
ピクセルピッチ	50 μm	75 μm
充填率	74%	82%
窓材の材質	エポキシ樹脂	
窓材の屈折率	1.55	
光子検出効率 ( $V_{ov} = 3.0 \text{ V}$ )	40%	50%
暗電流レート ( $V_{ov} = 3.0 \text{ V}$ )	500 kcps	

他によく用いられる光子検出器としてPMT(光電子増倍管)がある。しかし、MARQ スペクトロメータの構成要素にはFM 双極電磁石があり、一連の検出器群は磁場中で動作することが求められるため磁気耐性のないPMT

は用いることが難しい。一方で MPPC の特長として 30-60 V の低電圧で動作すること、増倍率の高さ、狭い間隔で多チャンネル化が可能であること、磁気耐性の高さなどがある。

MPPC の構造を図 2.7 に示す [14]。MPPC はガイガーモード APD とクエンチング抵抗を 1 つのセットとした SPAD が複数ピクセル配列されている。検出器にブレイクダウン電圧を超える電圧を印加すると光が入射した際に素子固有の飽和出力が発生する。MPPC に対してブレイクダウン電圧を超えて印加する電圧のことをオーバー電圧 ( $V_{ov}$ ) と呼ぶ。MPPC の光子検出効率はこのオーバー電圧に依存し、オーバー電圧が大きいほど光子検出効率は良い。一方でオーバー電圧の増加に伴って、暗電流レートやクロストーク確率も増加する。これらの増加はチェレンコフ光による粒子識別において識別能力を大きく下げる原因になるため適切なオーバー電圧を選択する必要がある。

また MPPC の特徴量の一つにピクセルピッチがある。MPPC では各ピクセルにおいて光子を検出した際にパルスを出力する。ピクセルピッチを大きくすることで検出面に対するピクセルの充填率を高めることができ、光子検出効率が上がる。一方で 1 ピクセルに複数の光子が入射した場合も 1 光子の場合と同じパルスを出力するため、入射光子数が多い場合には出力の線形性悪化の原因となる場合があるが本研究で用いる輻射体は発生光子数が少ないためこの影響は小さいと考えられる。先行研究で用いていたピクセルピッチ 50  $\mu\text{m}$  の MPPC を、本研究ではピクセルピッチ 75  $\mu\text{m}$  の MPPC に変更した。これにより波長 450 nm の光に対する光子検出効率は MPPC に印加するオーバー電圧を 3.0 V とした場合で約 1.3 倍になる。

### 2.3.3 集光器

使用した集光器を図 2.10 に示す。これは先行研究において製作された集光器と同一である。外枠は 3D プリンターを用いて作成されており、材質は PLA(ポリ乳酸)である。また集光器の内側には鏡面反射材としてアルミナイズドマイラーを貼り付けた。アルミナイズドマイラーの波長ごとの反射率については図 2.11 に示す [15]。また集光器の仕様を表 2.3 に示す。

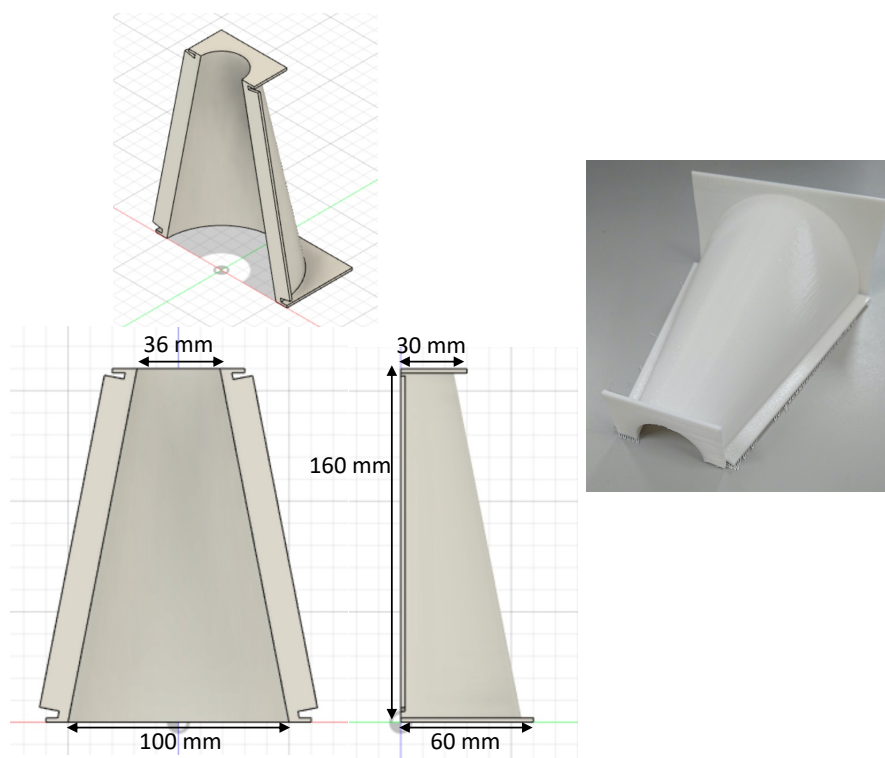


図 2.10: 先行研究で設計された集光器 [9]。3D モデルデータ (左) は 3D CAD を用いて制作された。本体は 3D プリンターを用いて制作され、半円のコーン (右) を 2 つ繋げ合わせて円錐型のコーンにした。

表 2.3: 集光器の仕様

集光器	
コーン長さ	160 mm
コーン直径 (入り口側)	100 mm
コーン直径 (出口側)	36 mm
コーン厚さ	5 mm
材質	PLA(ポリ乳酸)

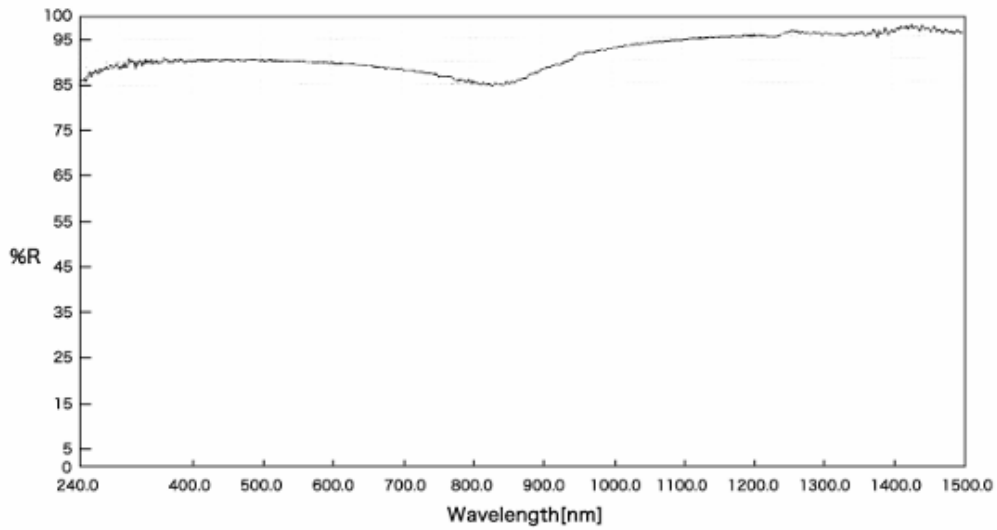


図 2.11: 使用したアルミナイズドマイラーの反射率の波長依存性 [15]

#### 2.3.4 エアロゲルケース

エアロゲルケースはナフロン (TOMBO No.9000-S) の板を加工して製作した、立方体状のエアロゲル封入用のケースである。ナフロンはニチアス株式会社が製造しているフッ素樹脂である [17]。これも先行研究で製作されたものと同一のものを用いた。エアロゲルで発生した光子の一部はナフロンの内壁で乱反射し、MPPCで検出される。使用したナフロン板の厚さは5 mm で、粒子が入射する検出器正面のみ厚さ2 mm のナフロン板を使用している。図 2.12 に実際に使用したエアロゲルケースを示す。

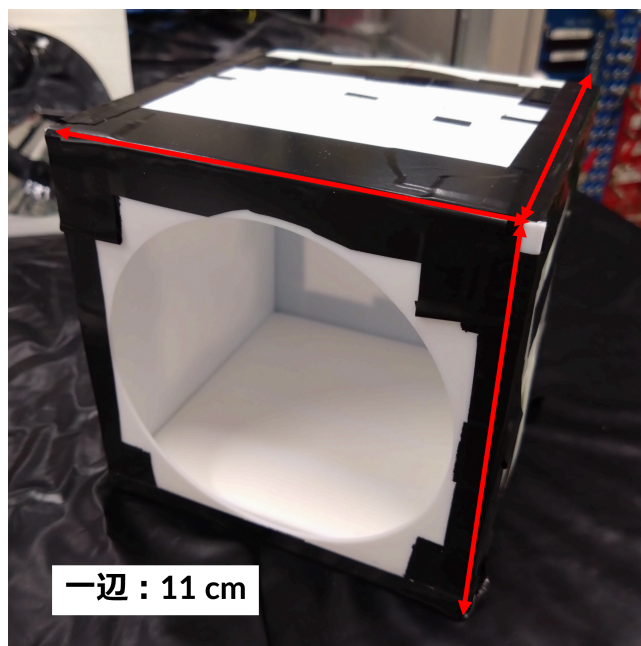


図 2.12: 使用したナフロン製のエアロゲルケース。写真前方に見える円形の穴が集光器の内径と一致しており、実際にはケースと集光器を接続して使用する。

## 2.4 要求性能

運動量が 2-4 GeV/c の粒子識別は TOF 検出器および thAC の情報を用いて行う。図 2.13 にシミュレーションによる、MARQ スペクトロメータで採用予定の TOF 検出器から得られる飛行時間とスペクトロメータから得られる運動量を用いて計算できる質量  $M$  の 2 乗 (マススクエア) ( $M^2 = (p/\beta)^2(1 - \beta^2)$ ) と散乱粒子の運動量の相関の分布を示す [9]。

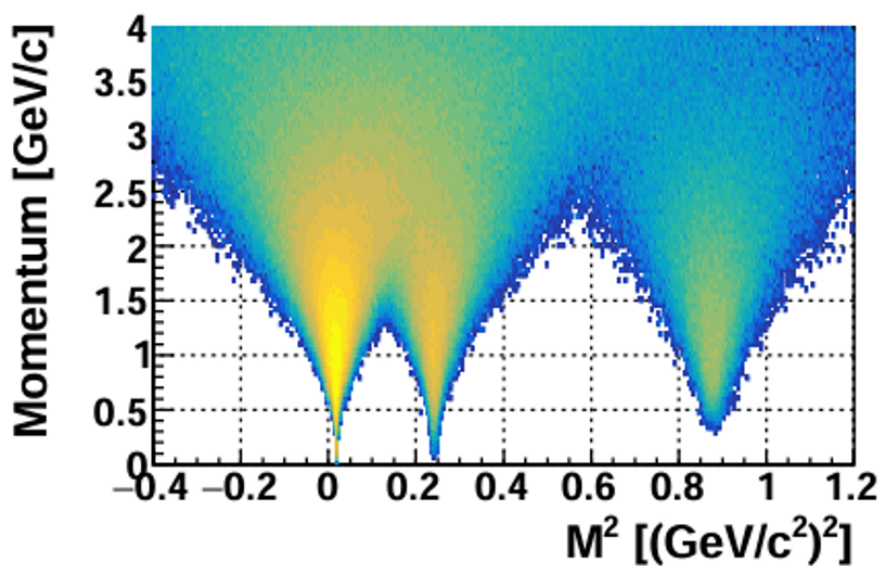


図 2.13: TOF 検出器から得られるマススクエアと散乱粒子の運動量の相関

TOF 検出器の時間分解能は 100 ps を仮定し、散乱粒子はハドロン生成コードの JAM を利用した [10]。それぞ

れの分布は電荷の区別なく、正負両方の粒子を含んでいる。2 GeV/c 以下の粒子については TOF 検出器によって  $\pi$  中間子、 $K$  中間子、陽子を識別することが可能である。しかし、より高運動量の粒子においてはそれぞれの分布の重なりが大きくなり、4 GeV/c 以下においては陽子 (反陽子) と  $\pi$  中間子、 $K$  中間子のみが TOF 検出器によって識別できる。

図 2.14 に運動量 2-4 GeV/c の散乱粒子のマススクエア分布を示す。この領域では  $\pi$  中間子による分布と  $K$  中間子による分布が大きく重なっていることが分かる。目標とする thAC の識別性能である  $\pi$  中間子の検出効率 95%、 $K$  中間子の誤検出確率 3%を設定し、図 2.14 のマススクエア分布に対して thAC で  $\pi$  中間子と判定することを要求した場合の分布を図 2.15 左に、 $K$  中間子と判定することを要求した場合の分布を図 2.15 右に示す。この時  $K$  中間子の検出効率は 97%となり、残りの 3%が  $\pi$  中間子の分布に混入する。また  $\pi$  中間子の検出効率は 95%となり、残りの 5%は  $K$  中間子の分布に混入する。このとき数としては  $K$  中間子に対して約 10%の  $\pi$  中間子が混入する。

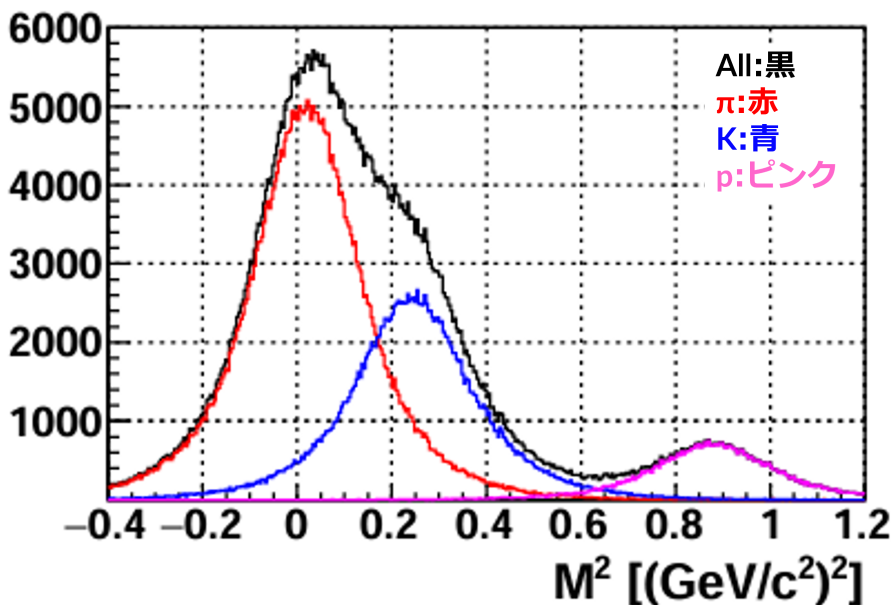


図 2.14: 運動量 2-4 GeV/c の散乱粒子に対するマススクエアの分布。赤線が  $\pi$  中間子による分布、青線が  $K$  中間子による分布、ピンクの線が陽子/反陽子による分布、黒線がすべての粒子の分布の重ね合わせによる分布である。

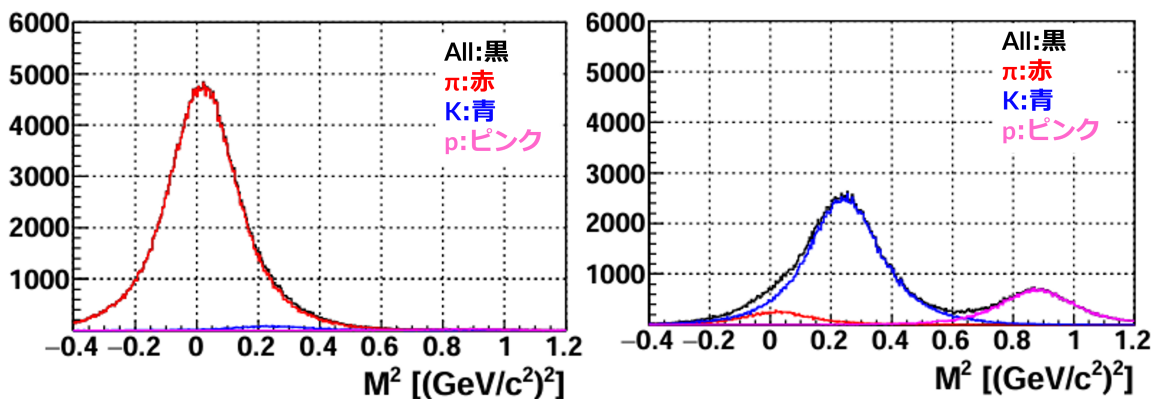


図 2.15: 図 2.14 のマススクエア分布に対して thAC で  $\pi$  中間子と判定することを要求した場合の分布 (左) と  $K$  中間子と判定することを要求した場合の分布 (右)。

## 2.5 先行研究の結果

先行研究ではピクセルピッチ  $50 \mu\text{m}$  ピッチの MPPC(S13361-3050AE-08)、及び 5 枚の平均の屈折率が 1.0086、波長  $400 \text{ nm}$  の光に対する透過長が  $9.2 \text{ mm}$  のエアロゲルを用いて thAC 試作機を製作した [9]。2021 年 12 月に大型放射光施設である、SPring-8 の LEPS2 ビームラインで電子・陽電子を用いた試作機の性能評価実験が実施された。図 2.16 左に先行研究で得られた電子または陽電子通過のタイミングでイベント選択を行って得られた MPPC の多重度の分布を、図 2.16 右に粒子が通過していないタイミングを選択して得られた多重度の分布、すなわち暗電流パルスによる多重度の分布を示す。それぞれのイベント選択のための time window は  $30 \text{ ns}$  である。電子または陽電子が通過した場合の分布のピークをガウス分布の期待値で評価し  $9.01 \pm 0.01$  と得られた。また暗電流による分布をポアソン分布の期待値で評価し  $0.753 \pm 0.03$  となった。

さらにこの多重度ピークを再現するように Geant4 シミュレーション上で試作機を再現し、 $\pi$  中間子と  $K$  中間子の入射に対する性能評価を行った。シミュレーションから得られた運動量毎の  $\pi$  中間子に対する検出効率と  $K$  中間子の誤識別割合をそれぞれ図 2.17 と図 2.18 に示す。多重度 2 以上を要求した場合運動量  $2.1 \text{ GeV}/c$  の  $\pi$  中間子に対して検出効率が  $95.2 \pm 0.2\%$  となりそれ以上の運動量の  $\pi$  中間子に対しては目標とする検出効率を達成する。一方で多重度 2 以上を要求した場合には  $K$  中間子に対する誤識別割合が 13% 以上となり要求性能に達さない。多重度 3 以上を要求した場合には  $K$  中間子に対する誤識別割合は 3% 程度となるが、逆に  $\pi$  中間子に対する検出効率は運動量  $4.0 \text{ GeV}/c$  においても  $93.4 \pm 0.2\%$  となり要求性能を下回ってしまい、実機製作に向けてさらなる改良が必要であることがわかった。改良方法としてシミュレーションで以下の 3 つの改善点が検討された。

- 透過長  $17.5 \text{ mm}$  以上を持つエアロゲルを用いること
- より光子検出効率の良い、ピクセルピッチ  $75 \mu\text{m}$  の MPPC(S13361-3075AE-08) を用いること
- Time walk 補正によりイベント選択の time window を  $10 \text{ ns}$  まで削減し、暗電流の影響を低減すること

そのため本研究ではこれらの改善を実際に行ったうえで再度試作機のテスト実験を行い、先行研究で検討した性能向上が見込めるかを調査した。

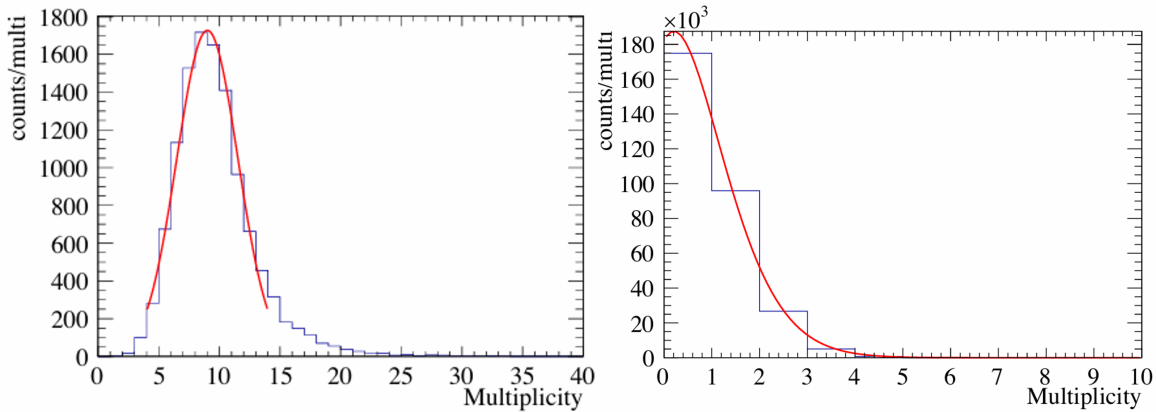


図 2.16: 先行研究で得られた陽電子入射による多重度分布 (左) と暗電流による多重度分布 (右)[9]。粒子の通過の保証のため、検出器前後に設置された  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  のシンチレータのヒットを要求している。

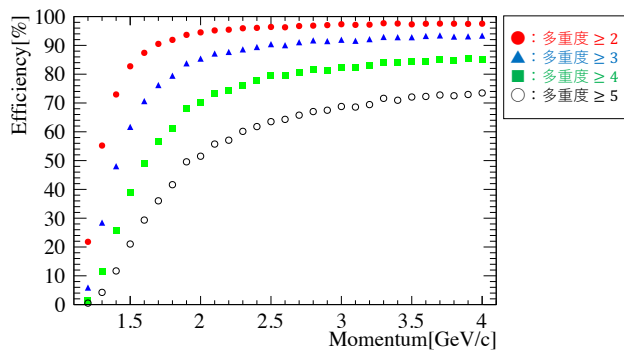


図 2.17: 先行研究で得られたシミュレーションによる試作機の運動量毎の  $\pi$  中間子の検出効率 [9]。赤の丸印、青の三角印、緑の四角印、白の丸印がそれぞれ多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の検出効率である。

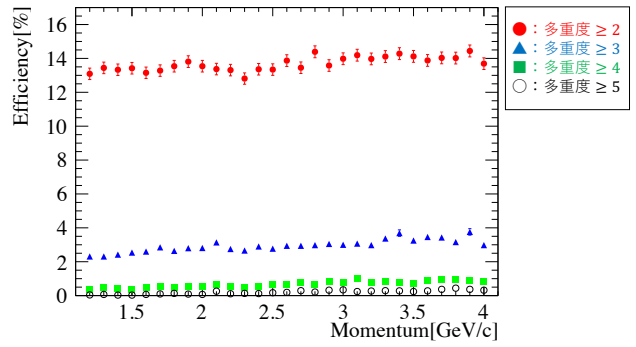


図 2.18: 先行研究で得られたシミュレーションによる試作機の運動量毎の  $K$  中間子の誤識別割合 [9]。赤の丸印、青の三角印、緑の四角印、白の丸印がそれぞれ多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の誤識別割合である。

# 第3章 SPring-8 LEPS2ビームラインにおける性能評価試験

## 3.1 性能評価試験の目的と概要

先行研究において透過長約 9 mm のエアロゲル、ピクセルピッチ 50  $\mu\text{m}$  の MPPC では目標とする  $\pi$  中間子と  $K$  中間子の識別性能を達成できないことが分かった。そこで光子の検出効率を高めるために透過長 20 mm のエアロゲルとピクセルピッチ 75  $\mu\text{m}$  の MPPC に変更し、検出光子数に改善がみられるかを評価することがこのテスト実験の目的である。テスト実験は 2024 年 12 月に兵庫県にある大型放射光施設 SPring-8(Super Photon ring-8 GeV) の LEPS2 ビームラインにおいて約 1 GeV/ $c$  の陽電子を用いて行った。試験項目は以下のとおりである。

- MPPC の光子検出効率および暗電流による誤検出割合のオーバー電圧依存性
  - MPPC はオーバー電圧によって光子検出効率や暗電流レートが変化する。これらは粒子の検出効率に直接影響するため、実験において最適なオーバー電圧を調べる。
- 最適条件下での光子検出数
  - 得られた最適なオーバー電圧における光子検出数を評価し、先行研究から光子検出数が向上しているかを調査する。
- エアロゲル以外からの光子の寄与の測定
  - 陽電子ビームでは検出したいエアロゲルからのチェレンコフ光だけでなく、空気やエアロゲルケースにビームが当たった場合に発生する光子も存在する。そのためエアロゲルを除いた場合の測定を行い、エアロゲル以外からの寄与を調べる。

## 3.2 SPring-8

SPring-8 の概観を図 3.1 に示す。SPring-8 では蓄積リング(周長 1436 m)内を 8 GeV/ $c$  まで加速された電子が周回しており、周回時に発生する放射光が各ビームラインに供給されている。この放射光は様々な分野の学術研究やナノテクノロジーやバイオテクノロジー、産業利用といった幅広い用途で利用されている。

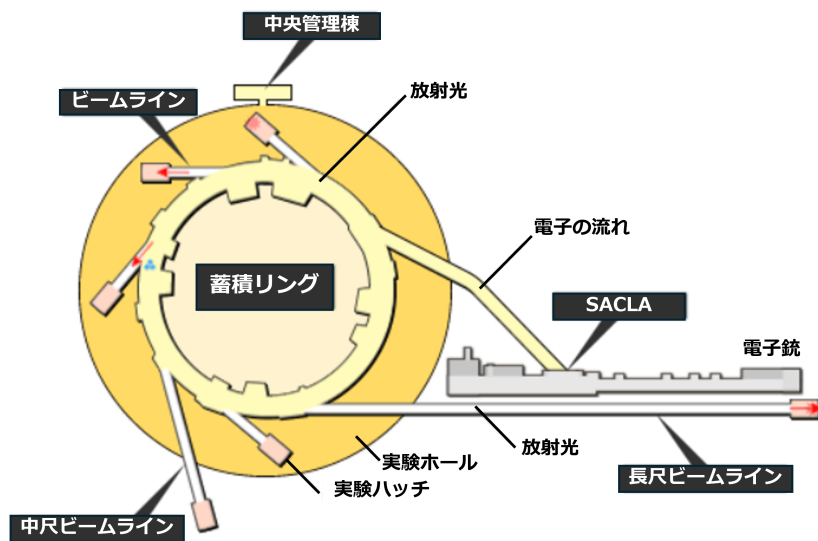


図 3.1: SPring-8 の加速器構成 [13]

### 3.3 LEPS2 ビームライン

LEPS(Laser-Electron Photon at SPring-8)2 ビームラインは SPring-8 のビームラインの 1 つである。LEPS2 ビームラインでは蓄積リング内の電子ビームに対してレーザー光を照射し、逆コンプトン散乱によって生成される GeV オーダーの  $\gamma$  線を利用することができる。本テスト実験においてはこの  $\gamma$  線を鉛標的 (標的厚 1 mm) に照射し、電子陽電子対を生成して使用した。標的直後に設置された永久磁石によってそれぞれの粒子の進行方向が上下方向に曲げられ、どちらかの粒子のみを利用できる。本テスト実験では陽電子が  $\gamma$  線の進行方向に対して鉛直上側に曲がるように磁石を設定してあり、実験セットアップも合わせて約 1 GeV/c の陽電子が当たるようにした。

### 3.4 実験セットアップ

実験セットアップの模式図を図 3.2 に示す。本テスト実験では、陽電子の thAC へのヒット位置を得るために 2 台のビームファイバートラッカー (BFT) を用いた。また陽電子のヒットのリファレンスカウンターとして 3 台のプラスチックシンチレータ (T1、T2、T3) を用いた。それぞれのプラスチックシンチレータのサイズは 10 cm×10 cm でエアロゲルサイズより一回り大きくエアロゲルの領域を完全に覆っている。なお、本テスト実験は MRPC 検出器のテスト実験と並行で行われているため、thAC の前方、2 台の BFT の間には MRPC 検出器も設置されている。以下で実験で用いた各検出器要素の詳細について説明する。

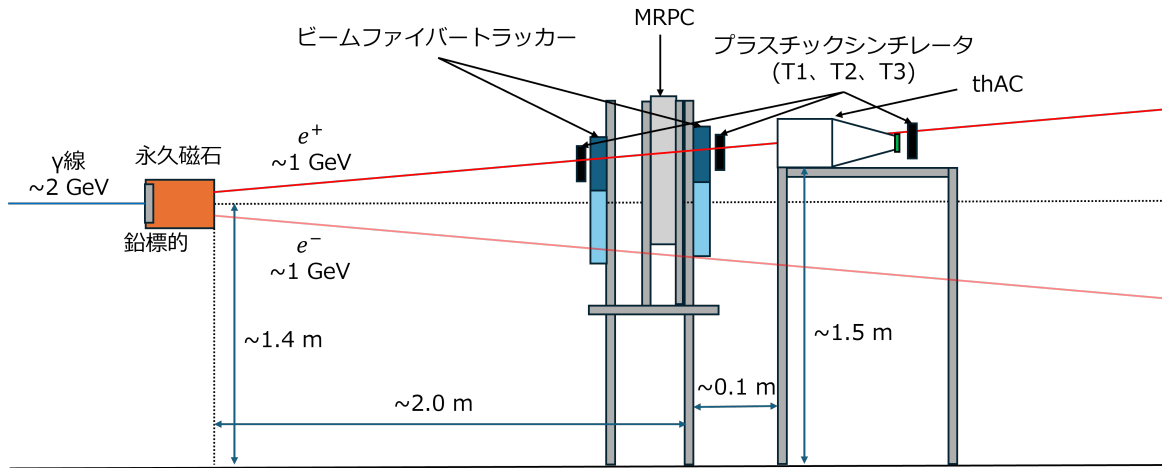


図 3.2: 実験セットアップの模式図

### 3.4.1 thAC

図 3.3 に実験で実際に使用した thAC の試作機を示す。本テスト実験では透過長約 20 mm、厚さ約 20 mm のシリカエアロゲルを厚さ方向に 5 枚重ねて約 10 cm 厚として用いた。エアロゲルは上流から TSA24-1a、TSA24-1b、TSA24-2b、TSA23-1b、TSA21-3b の順に並べた (各エアロゲルのスペックは表 2.1 に付した)。

また MPPC としてピクセルピッチ 75  $\mu\text{m}$  の MPPC(S13361-3075AE-08) を用いた。MPPC64 ch のうち前半 32 ch と後半 32 ch はそれぞれ別のケーブルによって読み出され、3.4.3 節および、3.4.4 節で後述する NIM-EASIROC 及び AMNEQ HR-TDC によって信号の処理、データ取得を行った。

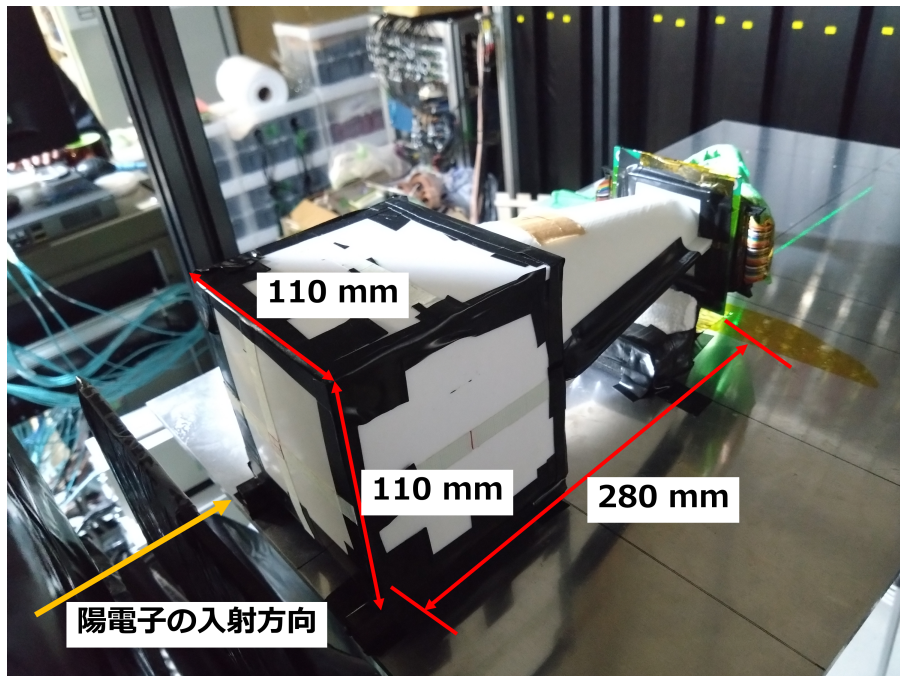


図 3.3: 実験で用いた thAC の試作機

### 3.4.2 ビームファイバートラッカー (BFT)

MARQ スペクトロメータの構成要素の1つであるビームファイバートラッカー (BFT) は高放射環境に耐えられる荷電粒子飛跡検出器である [8]。直径 0.5 mm のファイバー状のシンチレータが2層俵積みにされて1レイヤーを構成しており、ファイバーが鉛直方向の X 軸、X 軸に対して左右方向に 30° 傾いた U 軸、V 軸方向に並んだ合計 3 レイヤーによって粒子の飛跡を捉える。各ファイバーに荷電粒子が入射するとファイバーからシンチレーション光が発生し、読み出し口まで輸送される。輸送されたシンチレーション光は接続された MPPC によって読み出される。MPPC1 ch あたり 2 本のファイバーに接続されており、1 レイヤー当たりの読み出しチャンネル数が 256ch で 2 台の BFT で計 6 レイヤーを用いたため、合計 1536 ch の MPPC によって信号を読み取る。

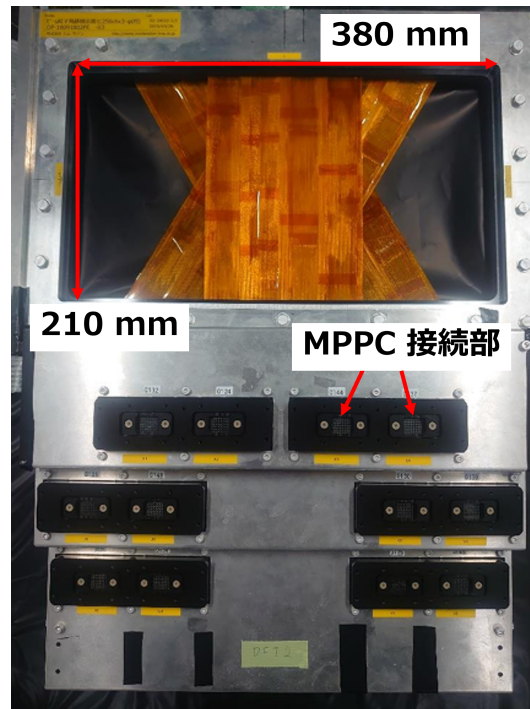


図 3.4: ビームファイバートラッカー (BFT)

### 3.4.3 NIM-EASIROC

NIM-EASIROC は多チャンネル MPPC 読み出し ASIC(EASIROC チップ) を搭載したモジュールである (図 3.5)[18]。1 つの ASIC で 32 ch の読み出しが可能で、1 台の NIM-EASIROC に 2 つの ASIC が搭載されているため 64 ch の読み出しが可能である。また MPPC 印加する電圧は基本的には低電圧電源によって調節するが、NIM-EASIROC によって ch ごとに微調整が可能である。入力した MPPC の信号は内部で分割され ADC(波高情報) と TDC(タイミング情報) の信号処理が行われる。TDC は fast amp により信号が早い時定数で整形され、ディスクリミネータによってロジック信号に変換される。EASIROC 自身にもデータ取得機能はあるが今回は変換されたロジック信号を実際に MARQ 実験の際にも使用する HR-TDC に送りデータを取得した。HR-TDC の詳細については 3.4.4 節で後述する。また、ADC は遅い時定数で整形され波高情報を記録できる。ただし MARQ スペクトロメータを構成する検出器では本番環境では TDC 情報のみを用いる予定である。そのため本テスト実験でも ADC 情報は取得せず、TDC 情報のみで解析を行った。

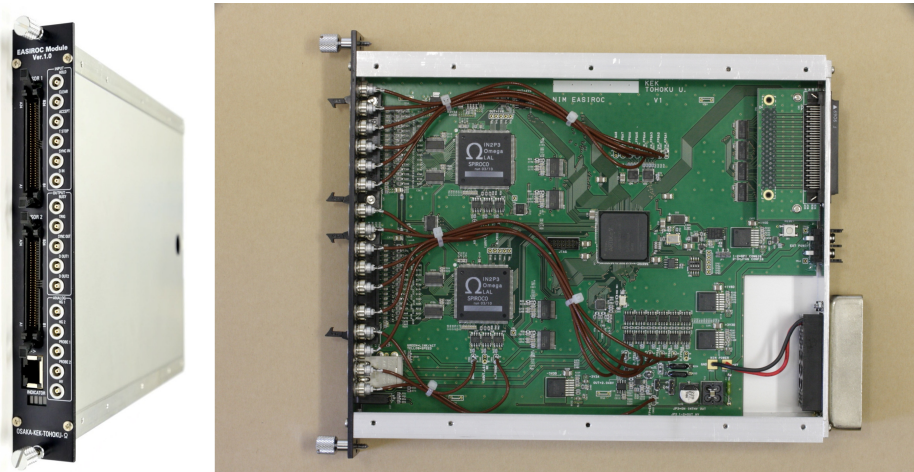


図 3.5: NIM-EASIROC[18]

#### 3.4.4 AMANEQ HR-TDC

AMANEQ(A main electronics for network oriented trigger-less data acquisition system) は連続読み出し DAQ 用の高速のデータリンクと十分な容量のバッファを持つフロントエンド回路である (図 3.6)[19]。メザニンスロットを 2 スロット備えており、メザニンカードを搭載することで機能拡張が可能である。

HR-TDC(High-Resolution TDC) は時間精度 20 ps の高時間分解能の TDC 情報を取得する機能を持ったメザニンカードである。1 台のメザニンカードあたり 32ch の読み出しが可能である。HR-TDC はディスクリミネートされたロジック信号を入力とし、信号の立ち上がりタイミングの情報 (leading TDC) 及び、立下りのタイミング情報 (trailing TDC) を取得することができる。

AMANEQ HR-TDC はメインのフロントエンド回路である AMANEQ に HR-TDC のメザニンボードを搭載したもので E50 実験をはじめとする、MARQ 実験で用いられる予定のモジュールである。本テスト実験では thAC と BFT に搭載された MPPC からの信号は NIM-EASIROC で整形、増幅、ディスクリミネートされ、プラスチックシンチレータに接続された PMT からの信号についてはディスクリミネータモジュールによって変換され、それぞれのロジック信号を AMANEQ HR-TDC に入力しデータ取得を行った。

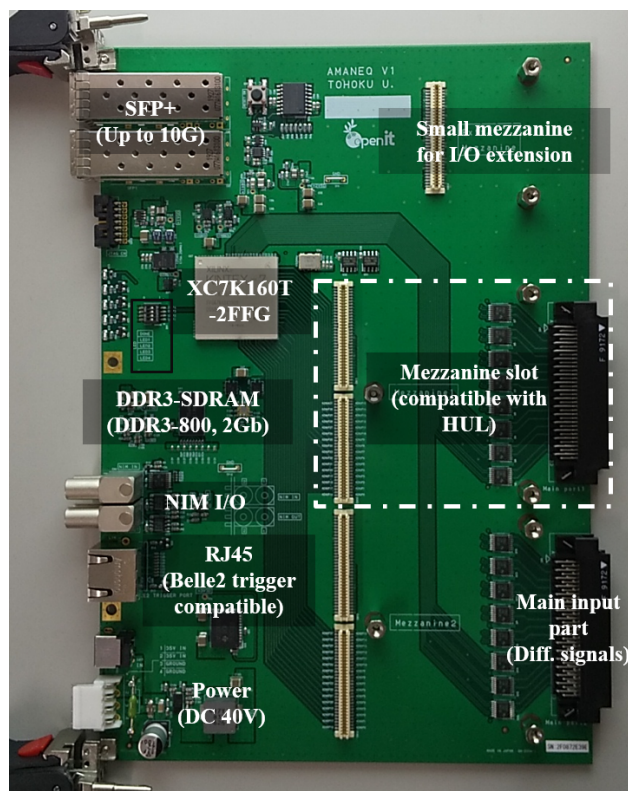


図 3.6: AMANEQ[19]

## 3.5 解析手法

2.3 節で述べたように、thAC の性能評価においては、MPPC の多重度を正確に評価することが重要である。そのため以下の手順で解析を行った。

1. BFT 及びプラスチックシンチレータを用いたイベントセレクト
2. MPPC のタイミング情報の Time walk 補正
3. MPPC のタイミング情報を用いたイベントセレクト

イベント選択後のタイミング情報を用いて MPPC の多重度を得て、オーバー電圧依存性及び陽電子の検出効率の評価を行った。なお、3.5 節で示すデータは代表として MPPC のオーバー電圧を 5.0 V とした取得したデータである。

### 3.5.1 BFT 及びプラスチックシンチレータを用いたイベントセレクト

一般的に用いられるトリガー型 DAQ ではデータ取得時にプラスチックシンチレータなどのリファレンスカウンターのヒットをもってデータ取得を行うが、本テスト実験では連続読み出し型の DAQ であるためトリガーをかけずに取得したデータを後からコンピュータ上でフィルターにかけることでイベントセレクトを行った。

BFT については 2 台合計 6 レイヤーのうち 5 レイヤーでヒット情報があることを要求し、その際の粒子のヒット位置  $(x, y)$  とビーム軸方向 ( $z$  方向) に対する粒子の  $x, y$  方向の入射角度  $(dx/dz, dy/dz)$  の情報を得られる。ただし  $x, y, z$  の向きについては鉛標的に照射する  $\gamma$  線の進行方向を  $z$ 、鉛直上方向を  $y$ 、水平方向を  $x$  とした右手系とし、以降断りのない限り  $x, y, z$  はこれに則ることとする。実験セットアップ中において永久磁石の領域

以外に磁場は存在しないため陽電子は BFT から thAC にかけて進行方向を変えずに進むとしてエアロゲル前面及び背面での陽電子の通過位置を決定した。解析では 90 mm×90 mm のエアロゲル前面及び背面のうち中心部分の 30 mm×30 mm の領域に BFT によるヒット情報があるイベントのみを選択した。

さらに実際に陽電子が thAC を貫通していることを保証するために thAC 前後に置かれたプラスチックシンチレータ (T1、T2、T3) にヒットがあることを要求した。各検出器の時間情報の原点はプラスチックシンチレータ T1 のヒットタイミングである。図 3.7 にプラスチックシンチレータ T2 と T3 のヒットタイミング (leading TDC) の分布を示す。赤線で囲まれた領域に leading TDC を持つことを陽電子のヒットと定義した。

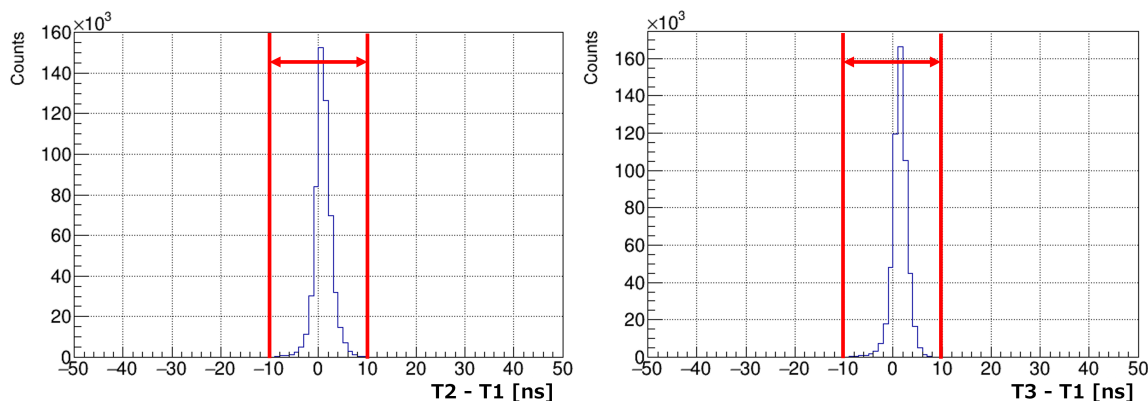


図 3.7: プラスシンチレータ (T2、T3) のヒットタイミング分布。赤線で囲まれた領域に leading TDC を持つことを陽電子のヒットと定義した。

### 3.5.2 MPPC のタイミング情報の Time walk 補正

NIM-EASIROC では、ディスクリミネータの閾値を設定することで閾値以上の波高を持つ場合のみ信号のロジック信号に変換し、HR-TDC へと送ることができる。MPPC から出力される信号はチャンネルで検出した光子数によって波高が変わる。そのためこの閾値を適切に設定することで取得するデータの下限を光子数によって決めることができる。

thAC では微量な光子を検出する必要があるため 1 光子の信号を取得できるように、オーバー電圧 5.0 V の場合の 1 光子に対応する信号の高さの半分に閾値を設定した。ただし MPPC に印加するオーバー電圧を変更した際のゲイン変化に対応する閾値変更をしていないため、オーバー電圧が 5.0 V より大きい場合は閾値が 1 光子信号の半分よりも低く、オーバー電圧が 5.0 V より小さい場合は閾値が 1 光子信号の半分よりも高く設定されている。図 3.8 に典型的な MPPC からのアナログ信号の波形を示した。

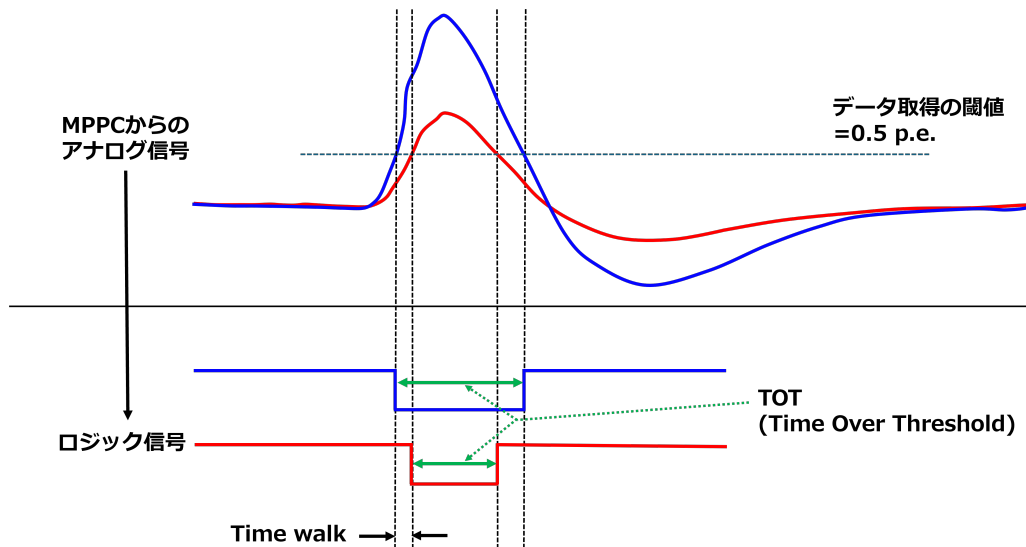


図 3.8: TOT(Time Over Threshold) と Time walk の概念図。アナログ信号の波形は MPPC の典型的な波形である。

NIM-EASIROC で処理した後のロジック信号はこの閾値を超えたタイミング (leading TDC) とこの閾値を下回ったタイミング (trailing TDC) の差分を幅を持つ矩形波となる。ここでこの差分のことを TOT(Time Over Threshold) と呼ぶ。TOT の幅は一般に信号の波高が高くなるほど大きくなり、信号の波高が低いほど小さくなる。そのため TOT は実質的に ADC(波高情報) に対応することになる。

また MPPC が同じタイミングで光子を検出したとしても波高の高い信号が低い信号に比べて早く閾値を超えるため波高の高い信号の方が leading TDC が小さくなる。このずれを Time walk と呼ぶ。今回の解析では MPPC のヒットタイミングとして leading TDC を用いるが Time walk があると leading TDC の分布が広がってしまうためイベント選択の time window を大きく取る必要が生じ、暗電流の影響が大きくなる。したがって time window を小さくするために Time walk を補正する。

図 3.9 に TOT と leading TDC の相関を示す。縦軸を leading TDC [ns]、横軸を TOT [ns] としている。この図ではエアロゲル前面及び背面でエアロゲルの全幅に対応する、90 mm×90 mm の領域に陽電子が通過していることを要求しており、エアロゲルの中心部分の 30 mm×30 mm の領域の通過は要求していない。TOT が大きいイベントでは leading TDC が小さくなっていることが分かる。また今回の実験では MPPC64 ch を 32 ch 毎に分割して異なる基板、ケーブルで読み出しを行ったが片側 32 ch (以降前半 32 ch と呼ぶ) のみで TOT の小さいイベント (例えば図 3.9 の左図におけるの 4 ns 程度の TOT を持つイベント) が計測され、もう一方の 32 ch (以降後半 32 ch と呼ぶ) では対応する分布がみられなかった。これは基板やケーブルで 1 光子に対応する信号に歪みが生じたことが原因であると考えられる。今回の解析ではこれらのイベントもチェレンコフ光によるものであるとした。Time walk の補正のために、今回は TOT 依存性を持つ 2 次関数 (式 (3.1)) を用いた。

$$f(TOT) = p_0 + p_1 \times TOT + p_2 \times TOT^2 \quad (3.1)$$

TOT を 0.1 ns ごとの bin に分割し各 bin で leading TDC の平均値を求め、式 (3.1) を用いてフィッティングを行うことでチャンネルごとの補正関数を得た。補正関数は TOT の範囲を 4 分割して 3 つの 2 次関数と 1 つの定数関数をつなげる形で作成した。前半 32ch と後半 32 ch では TOT と leading TDC の相関の様相に違いがあるため前半 32 ch では 0-3 ns、3 - 5 ns、5-8 ns の 3 つの領域のイベントをそれぞれ 2 次関数でフィットし、8 ns 以上のイベントを 5-8 ns の領域の 2 次関数と接続する定数関数であるとし、後半 32 ch では 0-3.5 ns、3.5-6 ns、6-8 ns の 3 つの領域のイベントをそれぞれ 2 次関数でフィットし、8 ns 以上のイベントを 6-8 ns の領域の 2 次関数と接続する定数関数であるとしてチャンネルごとの補正関数を求めた。図 3.10 に前半 32ch のうちの 1 つ (左) と後半

32chのうち1つ(右)の leading TDC と TOT の相関に対する補正関数を示す。赤線のフィットのように TOT の小さい領域についてはイベント数が少なくフィットが十分にあっていない。しかし信号の高さが1光子に満たないものについては3.5.3節で述べるイベントセレクトの際に除外されている。そして得られた補正関数に各イベントごとの TOT を代入することで補正値を得、補正値を leading TDC の分布から引くことにより Time walk を補正した leading TDC の分布を得た。

補正後の TOT と leading TDC の相関を図 3.11 に示す。また補正前と補正後の leading TDC の分布を図 3.12 に示す。補正前の leading TDC の分布では1光子を検出した場合と2光子を検出した場合の Time walk を反映してピークが2つに分かれている。Time walk 補正を行うことでこのピークが1つになり、ピークが細くなっていることが確認できる。また前半 32 ch のフィットのずれにより leading TDC が大きい部分にわずかにテール構造が存在する。

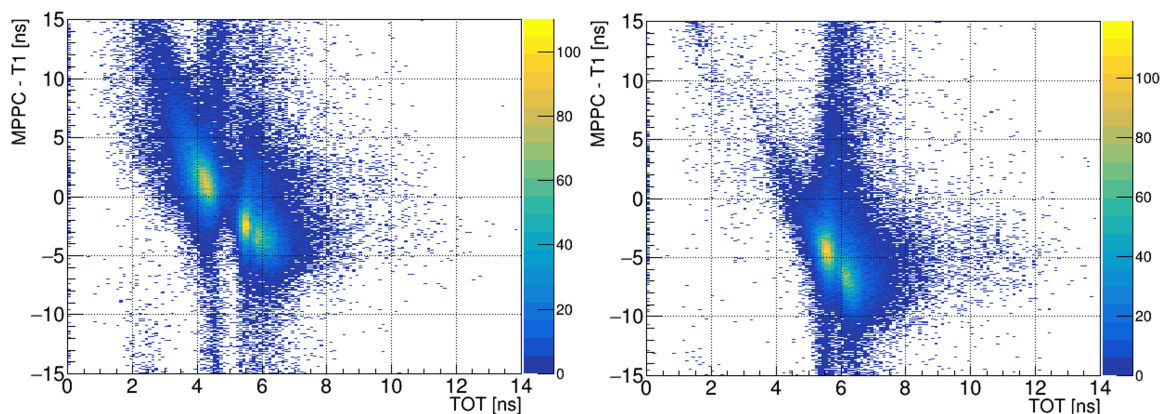


図 3.9: MPPC の TOT と leading TDC の相関。読み出しの異なる2つの MPPC チャンネルでの TOT と leading TDC の相関を示した。左側の図が前半 32 ch のうち1つ、右側の図が後半 32 ch のうち1chを選んだものである。また MPPC の leading TDC の分布の中心が 0 ns 付近に来るようにオフセットが乗っている。

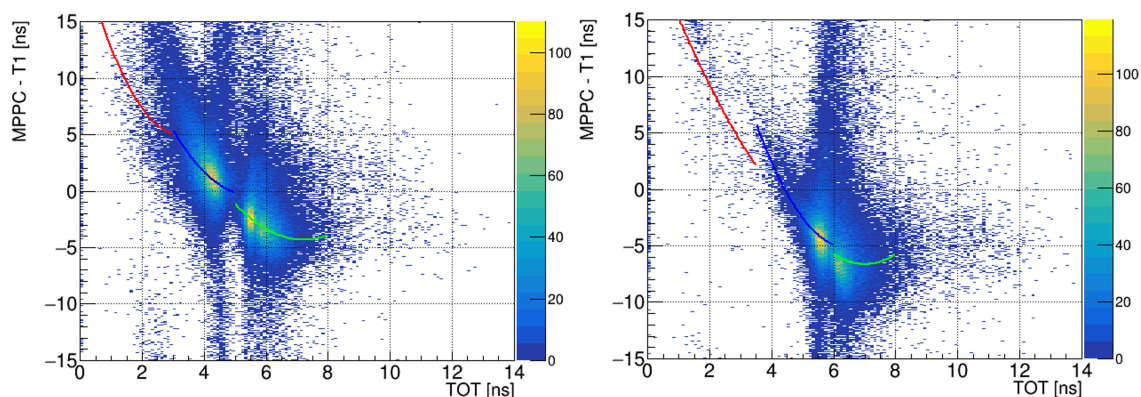


図 3.10: Time walk に対する補正関数。補正に用いた3つの2次関数をそれぞれ赤、青、緑の線で表示した。

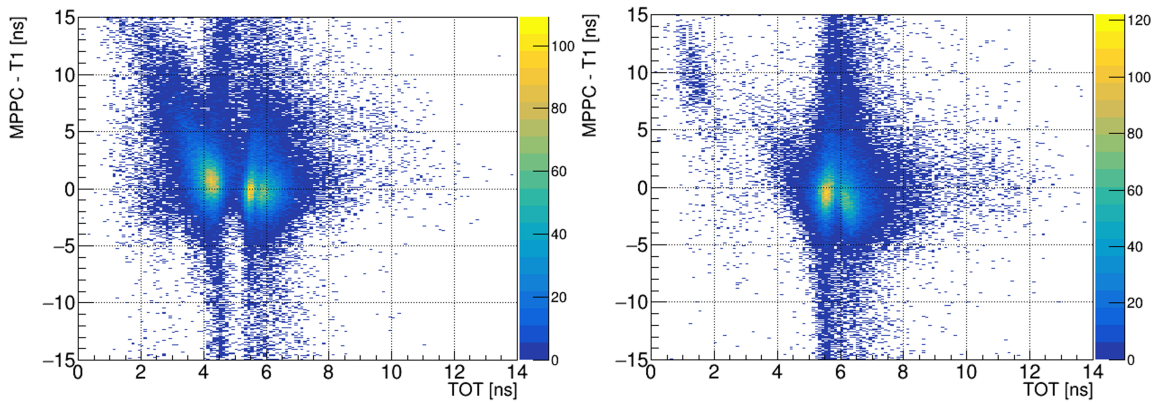


図 3.11: Time walk 補正後の MPPC の TOT と leading TDC の相関。

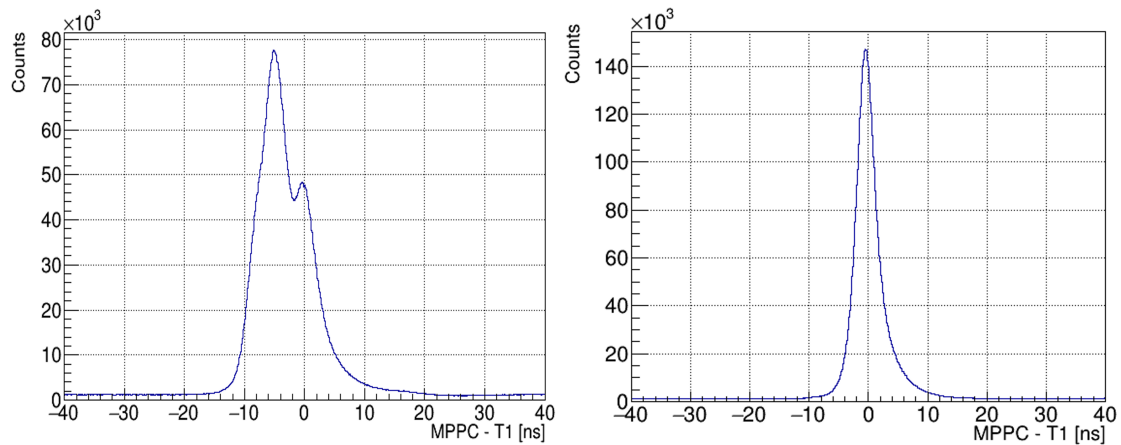


図 3.12: Time walk 補正前の MPPC の leading TDC の分布 (左) と Time walk 補正後の MPPC の leading TDC の分布 (右)。分布は MPPC64 ch 分を合わせたものである。

### 3.5.3 MPPC のタイミング情報を用いたイベントセレクト

Time walk 補正後の MPPC のタイミング情報を用いてイベント選択を行う。図 3.15 に検討したイベント選択の time window を示す。3.5.2 節で述べたように leading TDC の大きい側にわずかにテール構造が存在する。A のようにテール構造を含めずに、ピーク付近の  $\pm 5$  ns を選択した場合は一部の光子を除外してしまう可能性があるが暗電流の影響は低減することができる。一方で B のようにテール構造を含めて、ピーク付近の -5 ns から 10 ns を選択した場合には MPPC での光子検出数は増加するが、同時に暗電流による影響も増加する。そこで陽電子イベントの選択として A、B の 2 通りで検出効率を比較し適切な time window の幅を検討した。ただし暗電流の評価のための time window はイベントの time window と同じ幅にし、A の場合に -25 ns から -15 ns の 10 ns、B の場合に -30 ns から -15 ns の 15 ns とした。図 3.13 に陽電子イベントを選択した場合の time window ごとの多重度分布を示す。陽電子 1 個の入射に対する多重度の期待値は A の場合  $10.93 \pm 0.02$  で、B の場合で  $11.41 \pm 0.02$  と得られ、わずかに多重度が増加している (多重度の期待値の評価の仕方の詳細については 3.6.1 節に後述する)。

図 3.14 に暗電流を選択した場合の time window 多重度分布を示す。暗電流に対する多重度の期待値は A の場合  $0.285 \pm 0.002$  で、B の場合で  $0.431 \pm 0.02$  と得られ、これも多重度が増加している (多重度の期待値の評価の仕方の詳細については 3.6.1 節に後述する)。

また表 3.1、3.2 に A、B を選択した場合の多重度の閾値と閾値以上のイベントの割合を示す。

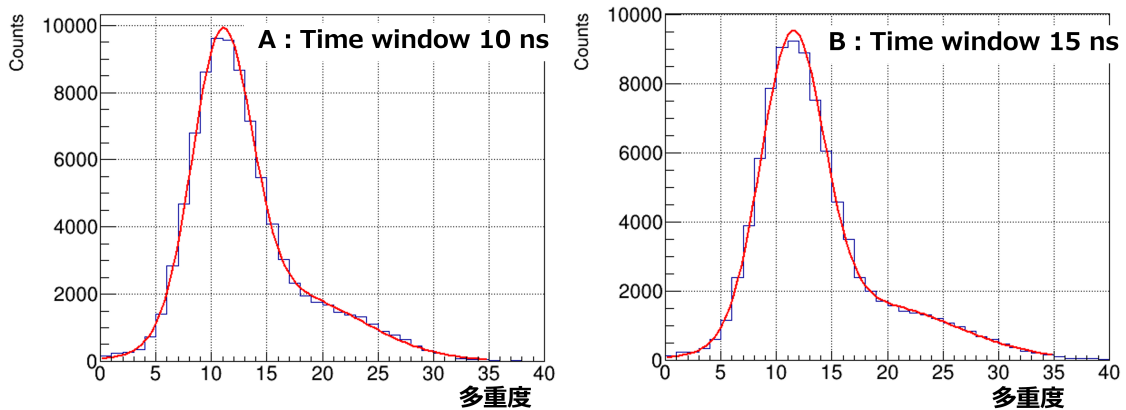


図 3.13: 陽電子イベントに対する time window ごとの多重度分布。左側が time window 10 ns(A) での多重度分布、右側は time window 15 ns(B) での多重度分布である。

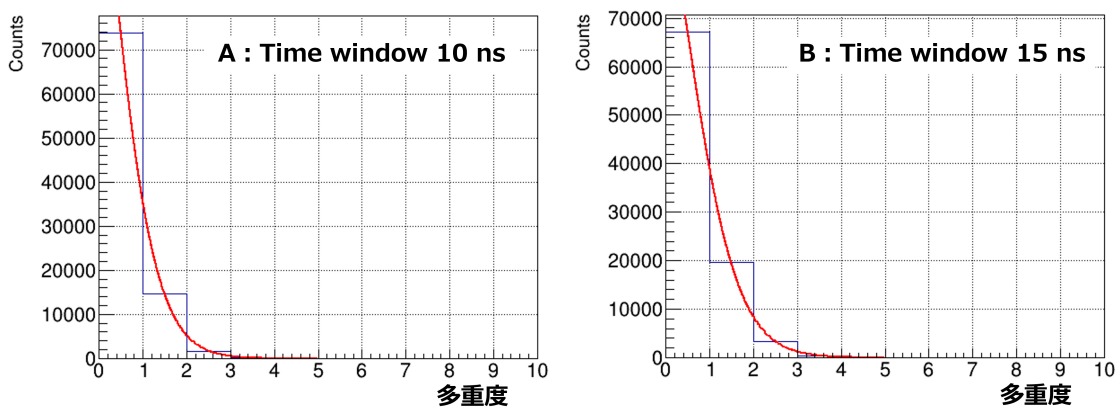


図 3.14: 暗電流に対する time window ごとの多重度分布。左側が time window 10 ns(A) での多重度分布、右側は time window 15 ns(B) での多重度分布である。

表 3.1: time window 10 ns(A) での多重度閾値ごとの陽電子の検出効率

多重度閾値	2	3	4	5	6
陽電子検出効率 [%]	99.57 ± 0.02	99.27 ± 0.03	98.87 ± 0.04	98.05 ± 0.05	96.48 ± 0.06
暗電流による誤検出割合 [%]	1.90 ± 0.05	0.14 ± 0.01	0.01 ± 0.003	0.002 ± 0.002	0.002 ± 0.002

表 3.2: time window 15 ns(B) での多重度閾値ごとの陽電子の検出効率

多重度閾値	2	3	4	5	6
陽電子検出効率 [%]	99.59 ± 0.02	99.34 ± 0.03	98.98 ± 0.03	98.30 ± 0.04	97.02 ± 0.06
暗電流による誤検出割合 [%]	4.07 ± 0.07	0.43 ± 0.02	0.05 ± 0.007	0.006 ± 0.002	0.002 ± 0.002

テールを含めていない場合でも陽電子に対する検出効率は十分高い一方で、暗電流による影響は特に閾値を小さくした場合に大きく変化している。そのため、今回は暗電流による影響を重視して陽電子によるチェレンコフ光のイベントの選択についてはピーク付近の  $\pm 5$  ns を選択し、暗電流パルスによるバックグラウンドの評価についてはビームタイミングと同期しておらず陽電子イベントの time window と同じ幅になるように  $-25$  ns から  $-15$  ns の  $10$  ns の幅を選択した。

さらにノイズを除外するため  $1$  光子に対応する TOT よりも小さい TOT を持つイベントのカットを行った。図 3.16 に MPPC の TOT 分布を示す。図 3.16 の赤線で示したように TOT に下限を設け、MPPC のヒットに対して下限以上の TOT を持つことを要求した。なお、本テスト実験ではデータ取得時に NIM-EASIROC のディスクリミネータの閾値の設定を MPPC のオーバー電圧ごとに設定していないため、MPPC のオーバー電圧の変更によるゲインの変化によって TOT の分布が異なる。そのため解析ではオーバー電圧ごとにイベント選択のための TOT の下限を変更した。

図 3.17 に TOT と leading TDC の相関に対して選択したイベントを示す。赤線で囲まれた領域を陽電子ビームの入射イベント、青線で囲んだ領域をビームタイミングと同期しない暗電流によるイベントであるとした。

またビームタイミングの前後の約  $\pm 50$  ns のタイミングで大きな TOT を持つ構造が見えている。これは SPring-8 のメインリングを周回する電子のバンチ構造に対応している。図 3.18 に実験時のバンチ構造 (B モード) を示す。B モードでは SPring-8 の  $1$  周を  $84$  分割し、 $1$  つあたり  $4$  つの電子が連なって周回している。この間隔が  $51.1$  ns であり、これにより約  $50$  ns ごとに TOT の大きい構造が現れていると考えられる。暗電流評価においては、このタイミングと同期しない部分を選択している。

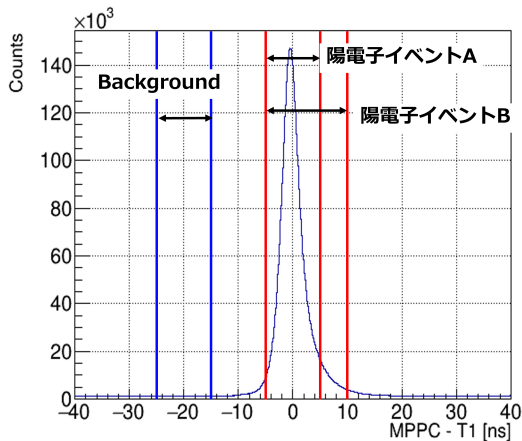


図 3.15: 選択した leading TDC の time window の範囲。陽電子のヒットに対する time window を赤色で暗電流評価のための time window を青色で示した。

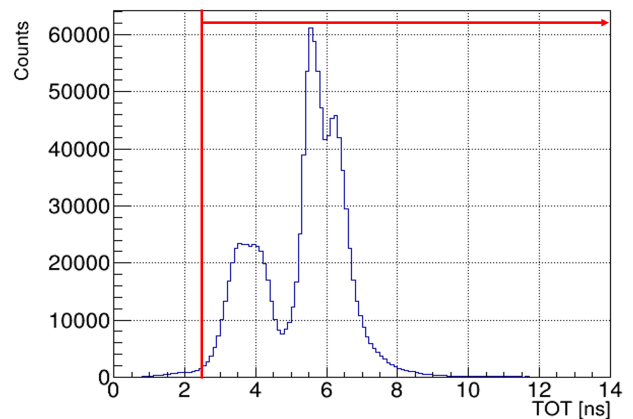


図 3.16: MPPC の TOT 分布。分布は  $64$  ch 分を合わせたものである。MPPC での光子の検出に対して、赤線で示した領域の TOT を持つことを要求した。

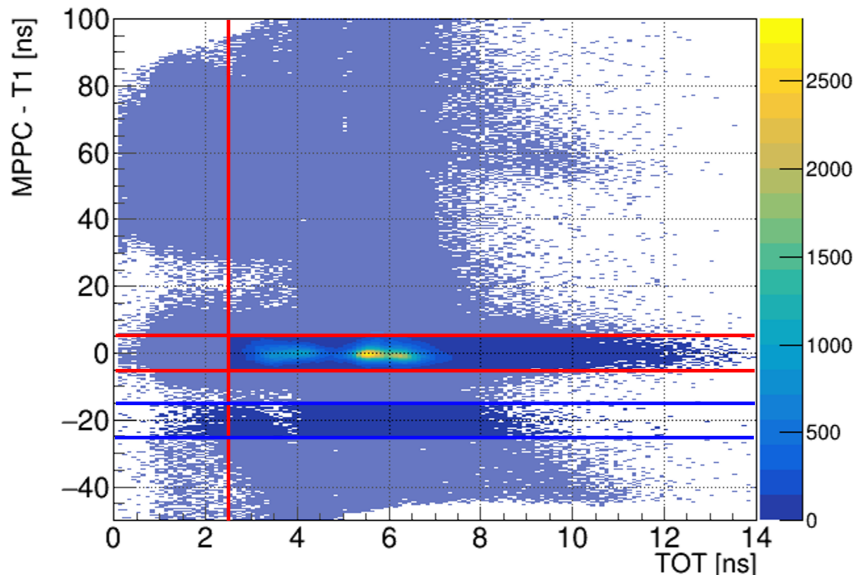


図 3.17: 選択したイベント。赤線で囲まれた領域を陽電子ビームの入射のイベント、青線で囲んだ領域をビームタイミングと同期しない暗電流によるイベントであるとした。

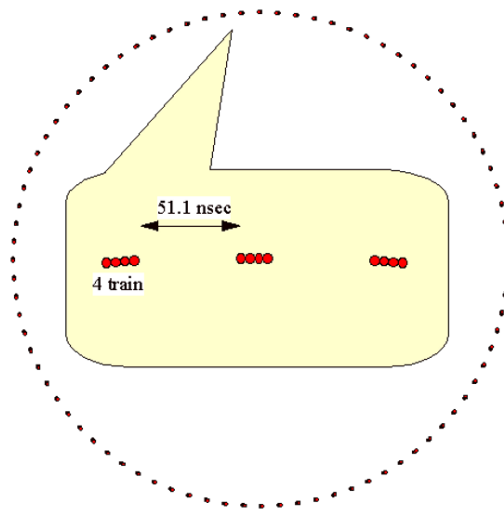


図 3.18: テスト実験時の SPring-8 のバンチ構造 (B モード)[16]

## 3.6 結果と考察

### 3.6.1 MPPC の多重度分布

3.5 節で選択したイベントを用いて MPPC の多重度の評価を行った。図 3.19 に MPPC のオーバー電圧を 5.0 V とした場合の、陽電子イベントに対する多重度分布を示す。多重度の中心値の評価として、今回は分布が 2 つのガウシアンを足し合わせた式 (3.2) であると仮定して評価した。

$$f(x) = c_1 \times \exp\left(-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + c_2 \times \exp\left(-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (3.2)$$

1つ目のガウシアンはピーク位置  $\mu_1 = 10.93 \pm 0.02$ 、広がり  $\sigma_1 = 2.67 \pm 0.02$  の分布であり、これは検出器に対してビーム陽電子1つが入射した場合の分布であると考えられる。2つ目のガウシアンはピーク位置  $\mu_2 = 16.88 \pm 0.09$ 、広がり  $\sigma_2 = 6.67 \pm 0.04$  の分布であり、これは入射した陽電子が thAC に入射する前に、手前に設置された MRPC やその他物質で制動放射した  $\gamma$  線から電子や陽電子が生成され、複数の粒子が同時に thAC に入射した場合の分布であると考えられる。また SPring-8 内を周回する同一バンチ内の電子の広がり約 14 ps であるため、同一バンチからの  $\gamma$  線はほぼ同時に入射され、同時に2つの陽電子ビームが生成される場合がある。その2つの陽電子が入射した場合もこの分布に寄与していると考えられる。今回の解析では1粒子の入射に相当する分布である、1つ目のガウシアン分布を多重度の評価に用いた。

先行研究では、陽電子の入射によって得られた多重度は  $9.01 \pm 0.01$  であり (図 2.16)、これと比較すると陽電子の入射に対する多重度が2程度増加している。これはエアロゲルの透過長が約2倍になり、MPPC の光子検出効率が約1.3倍になったことによる効果であると考えられる。

図 3.20 に MPPC の暗電流による多重度分布を示す。暗電流による分布についてはポアソン分布を仮定して評価した。ポアソン分布は式 (3.3) で表され、分布の期待値を  $\lambda$  とする分布である。

$$f(x) = c \times \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \quad (3.3)$$

フィッティングによって得られた分布の期待値は  $\lambda = 0.285 \pm 0.002$  である。また暗電流による多重度は先行研究の3分の1程度になっている。暗電流によるパルスは一定の確率で発生するため time window を 30 ns から 10 ns に3分の1に削減したことで暗電流による影響も3分の1になっているためと考えられる。

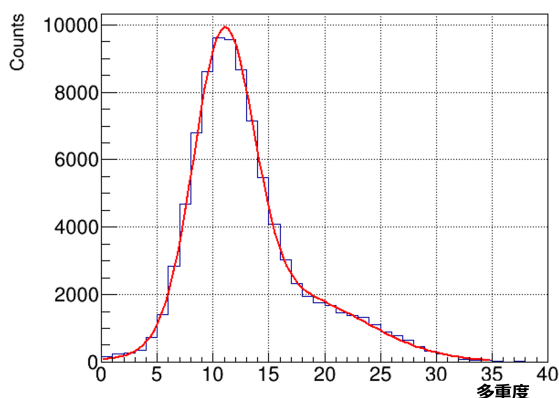


図 3.19: 陽電子の入射に対する MPPC の多重度分布。MPPC のオーバー電圧を 5.0 V とした場合である。評価に用いたフィッティングの関数 (式 (3.2)) を赤線で表示した。

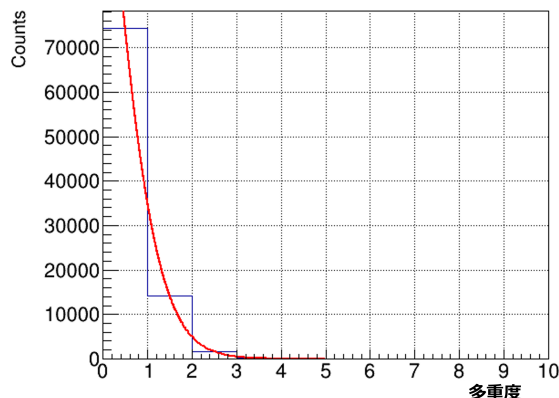


図 3.20: MPPC の暗電流による多重度分布。MPPC のオーバー電圧を 5.0 V とした場合である。評価に用いたフィッティングのポアソン分布を赤線で表示した。

### 3.6.2 MPPC のオーバー電圧依存性

MPPC への印加する電圧を変更させて測定を行った際の多重度の変化を図 3.21 に示す。横軸に MPPC への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]、縦軸にそのオーバー電圧での多重度を示す。赤が陽電子の入射による多重度、黒が暗電流による多重度である。またそれぞれの分布を独立に表示したものを図 3.22 に示す。オーバー電圧が大きいくほど MPPC の光子検出効率は高まるため多重度も増加していくが、徐々に増加の仕方は緩やかになり、オーバー電圧 5.0 V 付近では多重度が飽和している。

またオーバー電圧が高まると MPPC で熱的ノイズが発生する確率が高まるため、暗電流による多重度も増加している。

以降の解析では最適なオーバー電圧として多重度の飽和が確認できるオーバー電圧 5.0 V で取得したデータを用いて性能評価を行った。

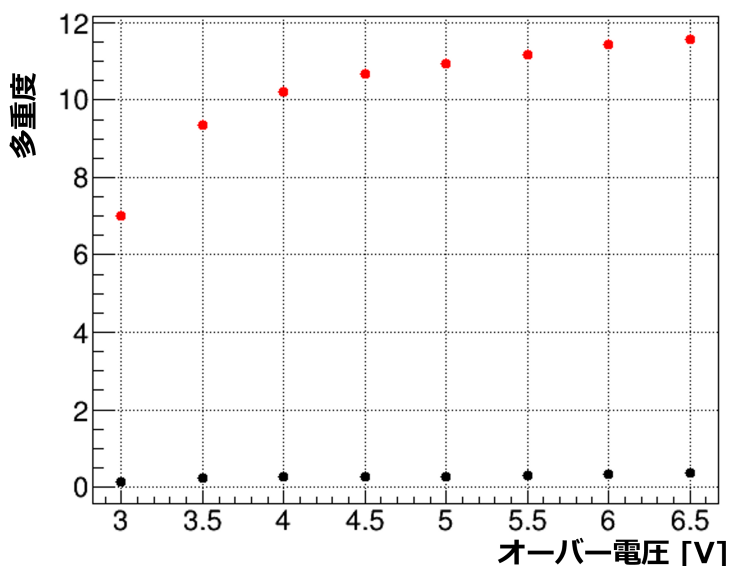


図 3.21: MPPC の多重度分布のオーバー電圧依存性。赤が陽電子の入射による多重度、黒が暗電流による多重度を示す。

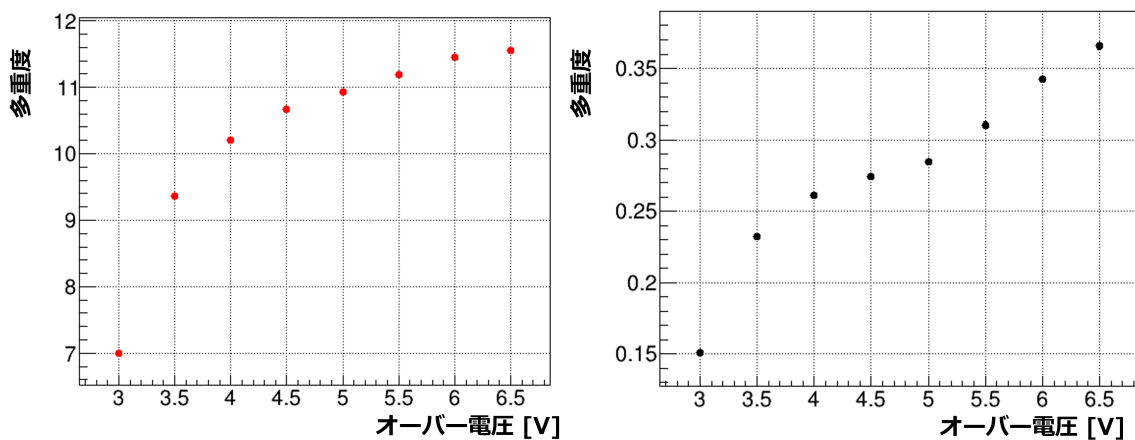


図 3.22: MPPC の多重度分布のオーバー電圧依存性。図 3.21 の黒と赤を別々に表示したもの。赤 (左) が陽電子の入射による多重度、黒 (右) が暗電流による多重度を示す。

### 3.6.3 エアロゲルを除いた場合の測定結果

本テスト実験でビームとして使用した 1 GeV/c 陽電子は集光器やエアロゲルケース中の空気 (常温常圧における屈折率  $n=1.000293$ ) でもチェレンコフ光を放出する。またエアロゲルケースとして用いたナフロン (屈折率  $n=1.35$ ) では粒子入射によるシンチレーション光やチェレンコフ光が放射される。また MPPC の表面をコーティングするエポキシ樹脂 (屈折率  $n=1.55$ ) の窓材からのチェレンコフ光も発生する。エアロゲルで発生したチェレンコフ光のみを評価するために、同様のセットアップでエアロゲルを除いた場合及びエアロゲルとエアロゲルケースを除いた場合の測定を行った。

図 3.23 にエアロゲルを除いた場合に得られた多重度の分布を示す。time window は 10 ns である。多重度の中心値の評価として式 (3.2) を用いて評価した。1 つ目の陽電子 1 個の入射に対するガウス分布のピーク位置は  $\mu_1 = 4.34 \pm 0.01$  である。この時の多重度はエアロゲルケース及び集光器内の空気からのチェレンコフ光、エアロゲルケースからのシンチレーション光及びチェレンコフ光、MPPC の窓材からのチェレンコフ光が寄与していると考えられる。

また図 3.24 にエアロゲルおよびエアロゲルケースを除いた場合に得られた多重度の分布を示す。time window は 10 ns である。多重度の中心値の評価としてガウス分布を用いて評価した。ガウス分布のピーク位置は  $\mu = 2.46 \pm 0.004$  である。この時の多重度は集光器内の空気からのチェレンコフ光、MPPC の窓材からのチェレンコフ光が寄与していると考えられる。

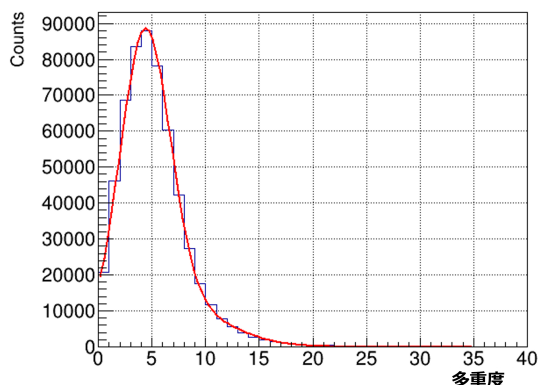


図 3.23: エアロゲルを除いた場合の MPPC の多重度分布。MPPC のオーバー電圧を 5.0 V とした場合である。評価に用いたフィッティングの関数 (式 (3.2)) を赤線で表示した。

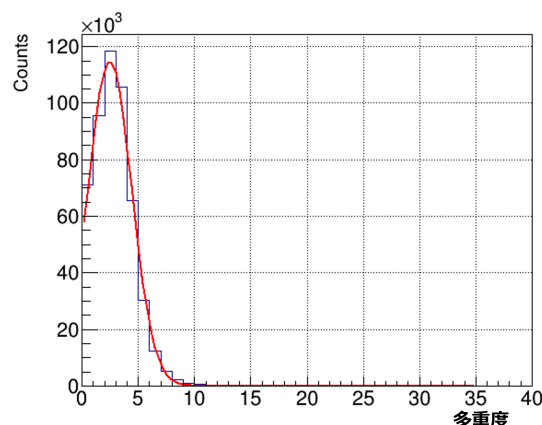


図 3.24: エアロゲルおよびエアロゲルケースを除いた場合の MPPC の多重度分布。MPPC のオーバー電圧を 5.0 V とした場合である。評価に用いたフィッティングのガウス分布を赤線で表示した。

### 3.6.4 陽電子の検出効率

図 3.25 に得られた多重度分布から算出した陽電子に対する検出効率を、図 3.26 に暗電流による陽電子の誤検出割合を示す。暗電流による誤検出割合は多重度 2 以上を要求した場合で  $1.90 \pm 0.05\%$  と、目標とする誤識別割合 3% を下回っており暗電流による影響を十分に抑えることができている。また陽電子の検出効率は多重度 6 以上を要求した場合でも  $96.48 \pm 0.06\%$  と目標性能である検出効率 95% を達成している。ただし 3.6.3 節で述べたエアロゲル以外からのビーム起因の光によって陽電子の検出効率を過大評価している可能性がある。しかし Time walk の補正により暗電流による影響を十分に抑えることができているため  $\pi$  中間子に対しても目標とする検出効率 95% を達成することが期待できる。

光子検出効率の高い MPPC、透過長の長いエアロゲルを用いることで先行研究よりもさらに高い検出効率で光子を検出できるようになり、Time walk 補正を用いることにより暗電流の影響を低減することができ、より粒子識別能力の高い試作機を確立することができた。

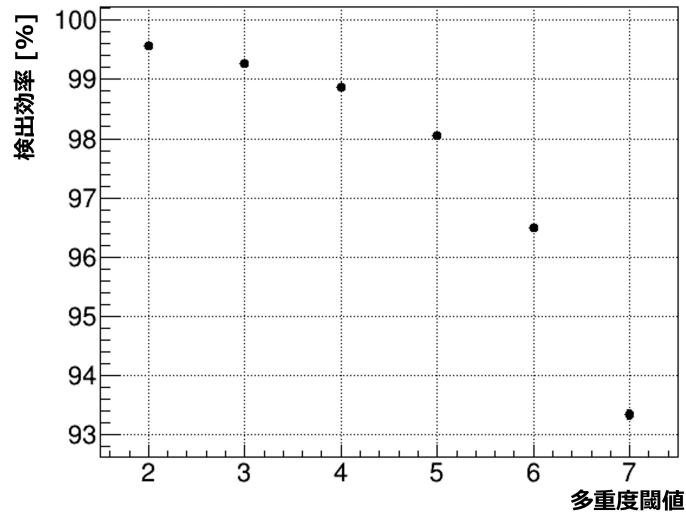


図 3.25: 多重度閾値ごとの陽電子の検出効率。MPPC のオーバー電圧を 5.0 V とした場合である。

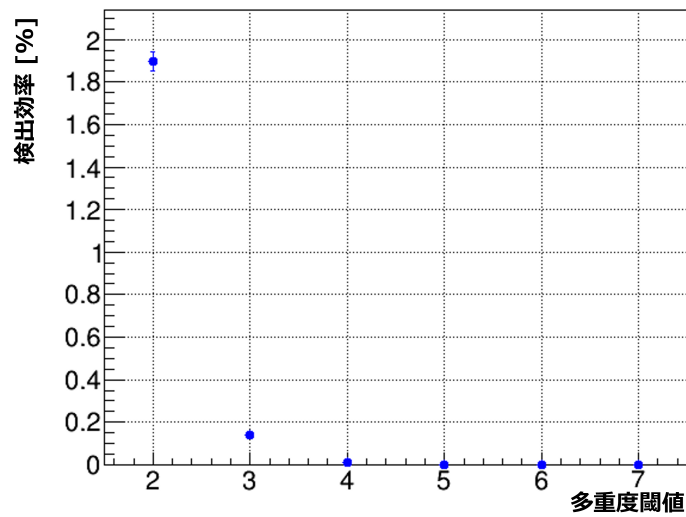


図 3.26: 多重度閾値ごとの暗電流による誤検出割合。MPPC のオーバー電圧を 5.0 V とした場合である。

## 第4章 シミュレーションによる試作機の性能評価

### 4.1 シミュレーションの目的

粒子飛跡シミュレーションツールである Geant4 を用いて、第 3 章で述べたテスト実験の再現を行った。再現により実験で得られた検出器性能の評価の妥当性を確認する。

さらに再現したシミュレーション環境を用いて  $\pi$  中間子と  $K$  中間子の入射に対する粒子識別性能の評価を行い、実機設計に向けた改善点、検討事項を得ることが本章の目的である。

#### 4.1.1 Geant4

Geant4(Geometry and Tracking) は CERN(欧州原子核研究機構) および Geant4 コラボレーションによって開発された、モンテカルロ法を用いて粒子の物質中の通過をシミュレーションするツールである [20, 21, 22]。Geant4 はシミュレーション空間における、材質及び形状からなる幾何モデルの構築、電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用といった物理相互作用の適用、2 次粒子の生成、モデル中での粒子飛跡の特定及び可視化等の機能をもっており、数 meV から数百 GeV までのエネルギー範囲の粒子を扱うことができる。放射線シミュレーションツールとして高エネルギー物理や原子核物理、医療分野など幅広い分野で利用されている。

### 4.2 テスト実験の再現

シミュレーションで再現した検出器を図 4.1 に示す。エアロゲルケース及び集光器の外枠を白線、内枠を赤線で表示した。またエアロゲルを黄線で、MPPC は青線で表示した。解析のために、シミュレーション空間に空気の一部を仮想的な検出器として設定しており、水色の線はその外枠を示している。また空気からのチェレンコフ光の寄与も考慮に入れるため検出器及びその外側の空間を屈折率  $n=1.000293$  の空気で満たした。空気と他物質の境界での光の屈折も考慮した。

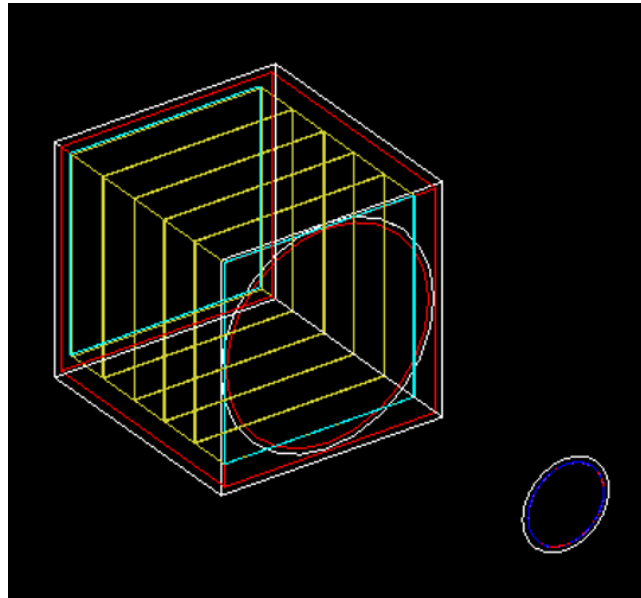


図 4.1: シミュレーションで再現した thAC。エアロゲルケース及び集光器の外枠を白線、内枠を赤線で表示した。またエアロゲルを黄線で、MPPC は青線で表示した。また解析のために、シミュレーション空間に空気の一部を仮想的な検出器として設定しており、水色の線はその外枠を示している。

#### 4.2.1 エアロゲル

実際にテスト実験で用いたエアロゲルの幅は 89 mm から 92 mm までのばらつきがあるが、シミュレーションの上では幅は 5 枚すべてで 90 mm×90 mm であるとし、厚さ、屈折率、透過長は製造時のスペックである表 2.1 の値をそれぞれ設定した。ただし屈折率については光の波長に依存せず一定であるとした。透過長については波長の 4 乗に依存する波長依存性を持つとした。また吸収長は波長ごとに透過長の 1000 倍を設定した。エアロゲル同士やエアロゲルとケースの隙間として 0.5 mm の隙間を設けた。

#### 4.2.2 ナフロン

エアロゲルを覆うケースとして使用したナフロンの材質については屈折率を 1.35 とし、波長に依存せず一定であるとした。またナフロンケースの内壁で乱反射した光子の一部は MPPC へ集光されているためナフロン表面での反射率は重要である。反射率については先行研究において最適化されたパラメータを用いて、波長依存性を持たず 0.832 であるとした。また吸収長は 0.001 mm と短く設定した。そのためナフロン中で発生したチェレンコフ光のほとんどは即時吸収されてしまう。ただしケース内部の空気との境界付近で発生したチェレンコフ光については MPPC で検出される可能性がある。ケースの側面の厚みは 5 mm、ビームの当たる正面の厚みは 2 mm で、実機と同様である。

#### 4.2.3 集光器

実際の集光器は PLA 製のコーンにアルミナイズドマイラーを張り付けたものであるがシミュレーション上では材質をアルミニウムとし、内部で鏡面反射が起こるようにした。反射率は図 2.11 に従って波長依存性を持たせた。また屈折率は 1.48 とし、吸収長を 0.001 mm と短く設定した。そのため集光器と検出器内部の空気との境界で発生したチェレンコフ光のみ検出される可能性がある。形状は実機と同様に、入り口側は直径 100 mm、出口側は直径 36 mm の円とし外側に 2.5 mm の厚みを持たせた。また集光器の長さは 160 mm とした。集光器出口の 36 mm

は1辺の長さを 25.8 mm とする正方形の MPPC の対角線の長さに対応している。そのため MPPC は集光器出口円に内接している。

#### 4.2.4 MPPC

MPPC の材質はシリコンとした。また MPPC の表面の窓材の再現のため MPPC の表面に厚さ 0.201 mm のエポキシ樹脂を設定し、屈折率は 1.55 とした。実際の試作機では MPPC は集光器出口の円に内接するように配置されているがシミュレーションではコーンの出口をすべて覆う仮想的な検出器を配置し、解析の際に実際の MPPC の光子検出エリアにヒットがあることを要求した。MPPC の検出効率については実験で最適化したオーバー電圧である  $V_{ov}=5.0$  V の場合に、図 2.9 より波長 450 nm の光に対して 60% であるのでこれを用いた。また図 2.8 に従う光子検出効率の波長依存性を持たせた。

#### 4.2.5 陽電子ビーム

陽電子ビームは以下のように設定した。

ビーム運動量は 1 GeV/c とし、運動量の広がりはないとした。またビーム生成位置の x 方向及び y 方向の広がりはないとした。またビームの角度についてはテスト実験時にビームファイバートラッカーで取得した入射粒子の角度情報を用いた。図 4.2 に BFT を用いて得られた入射粒子の角度情報  $dx/dz$  および  $dy/dz$  の分布を示す。得られた分布をガウス分布で評価しビーム角度の期待値及び角度広がりを評価した。ビーム生成位置は z 方向については検出器正面までの距離が実験時と同じになるようにした。y 方向の位置は検出器前面においてビームの中心が検出器の中心と一致するように調節した。図 4.3 に実際にシミュレーションで再現した thAC に陽電子ビームを入射した場合の様子を示す。光子の飛跡を緑線で、陽電子の飛跡を青色で表示した。

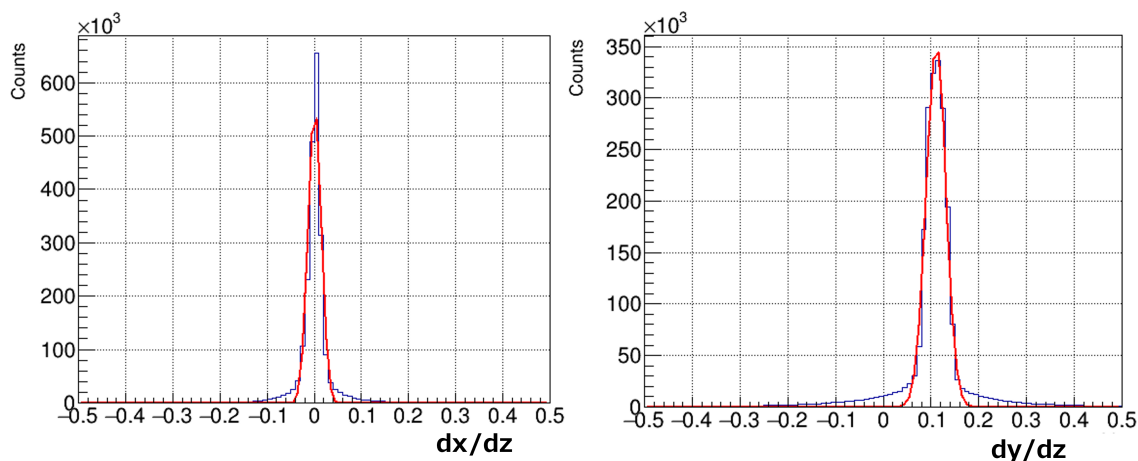


図 4.2: テスト実験時の陽電子ビーム角度の分布。左の図がビーム進行方向 (z) に対する水平方向 (x) の傾きの分布であり、右の図がビーム進行方向 (z) に対する鉛直方向 (y) の傾きである。評価に用いたフィッティングのガウス分布を赤線で表示した。

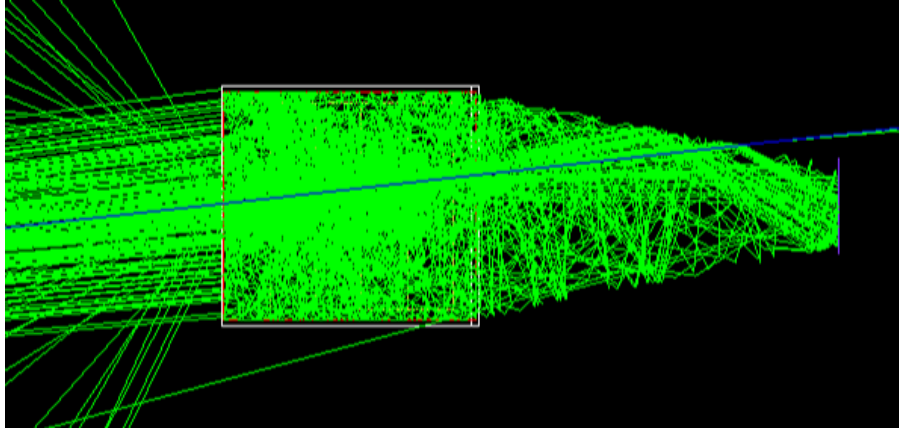


図 4.3: 再現した thAC に陽電子ビームを入射した時の様子。光子の飛跡を緑線で、陽電子の飛跡を青色で表示した。

### 4.3 解析手法

シミュレーションではこの仮想的な検出器に光子が入射した場合、その表面でのヒット位置や角度を取得した。解析ではシミュレーションで得られたヒット情報をもとに MPPC 間の隙間を考慮して実際の MPPC の光子検出エリアにヒットがあったもののみを選択した。

さらにテスト実験で陽電子がエアロゲルを通過していることを保証するための解析条件として、3.5.1 節で説明したように thAC 前後に設置したシンチレータへのヒット及びビームファイバートラッカーによる飛跡がエアロゲルの中心 30 mm×30 mm を陽電子が通過していることを要求していた。これを再現するためにシミュレーション空間上で検出器前面及びエアロゲルの背面に空気の仮想的な検出器を設置しエアロゲルの中心 30 mm×30 mm を陽電子が通過していることを要求した。

図 4.4 にシミュレーションで得られた光子のヒット分布 (左) と解析で選択した光子のヒット分布 (右) を示す。左図の赤線で囲まれた領域が実際の MPPC アレイが存在する領域である。多重度の評価においては複数光子が 1 つの MPPC の領域に入射した場合でも多重度は 1 の増加とした。

また暗電流イベントについてはテスト実験で暗電流評価に用いたイベントを用いて再現した。MPPC のチャンネルごとによって暗電流による信号を出す確率を実験データから算出し、解析においてチャンネルごとに生成した乱数 (0-1) が算出した確率を下回った場合に暗電流イベントが発生するとした。

この手法で得られた暗電流の分布を図 4.5 に示す。分布を式 (3.3) を用いて評価し、期待値  $\lambda = 0.282 \pm 0.008$  と得られた。これは実験データから得られた暗電流による多重度の期待値  $\lambda = 0.285 \pm 0.002$  と誤差範囲で一致しており、十分再現できているとしてこれを用いた。

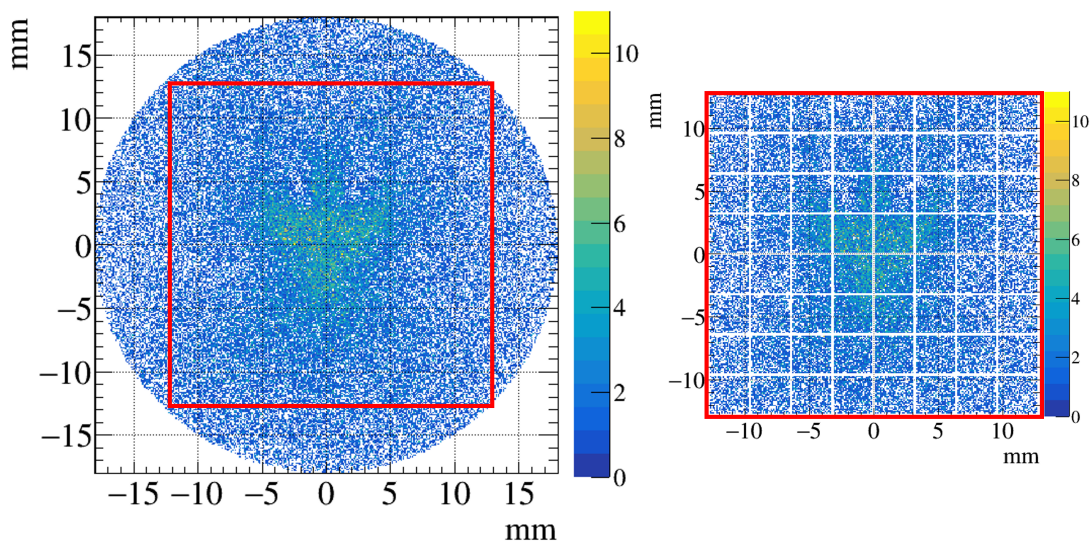


図 4.4: シミュレーションで得られた MPPC 受光面でのヒット分布。左の図は集光器出口における光子のヒット分布であり赤線で囲まれた部分が MPPC の存在する領域である。右の図は MPPC の光子検出の可能な領域のヒット分布である。

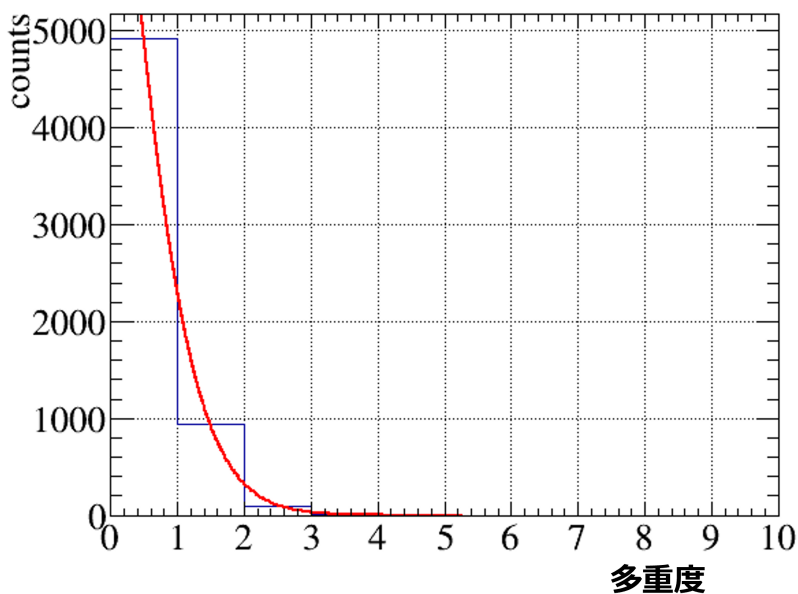


図 4.5: 再現した暗電流による多重度分布。評価に用いたフィッティングのポアソン分布を赤線で表示した。

#### 4.4 結果と考察

図 4.6 に MPPC 表面における光子の入射角度を示す。ビーム角度が検出器に対して垂直ではないこととビーム角度に広がりがあるため MPPC への入射角度の分布も広がりを持っている。0° 付近に見える構造は陽電子が空気を通過する際に発生したチェレンコフ光が直接 MPPC に入射したもの、3° 付近に見える構造は陽電子がエアロ

ゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が直接 MPPC に入射したもの、 $17^\circ$  から  $22^\circ$  の間に広がって見える構造は陽電子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が集光器で 1 回反射して MPPC に入射したものの、 $33^\circ$  付近に見える構造は陽電子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が集光器で 2 回反射して MPPC に入射したものである。MPPC の窓材 (屈折率  $n=1.55$ ) と空気 (屈折率  $n=1.000293$ ) の境界での光の屈折を考慮すると  $40.2^\circ$  以上の光子は検出されない。ただし陽電子が MPPC の窓材を通過する際に発生したチェレンコフ光については直接 MPPC に入射して観測されることがあり、 $50^\circ$  付近に見える構造はそれに対応している。

図 4.7 に得られた多重度分布を示す。分布をガウス分布を用いて評価し、多重度の期待値は  $12.02 \pm 0.04$  と得られた。テスト実験で得られた  $\mu_1 = 10.93 \pm 0.02$  とは多重度が 1 程度異なる。この差の原因として実際の検出器ではエアロゲルに局部的に傷があることや集光器を製作する際に半円ずつに分割して製作したことで真円から歪んでいたこと、集光器内側のマイラーを手張りしていることによる歪みによって理想的に光子が反射していないことなどが考えられる。また MPPC に印加する電圧の不定性やエアロゲルの収縮によって透過長が短くなり光子の集光率や検出効率が想定よりも低くなっていた可能性も考えられる。また解析において Time walk 補正が十分でなく time window に入らずに一部光子が除外されていることも影響していると考えられる。

以降は、これらの効果を全て光子の検出効率の低下と扱うことで、テスト実験の多重度を再現するようにした。具体的には MPPC の有効領域に光子のヒットがあった場合乱数 (0 から 1) を生成し、あらかじめ定めた検出効率の調整パラメータを下回った場合にそのイベントを解析に用いた。このパラメータを用いて多重度の期待値がテスト実験で得られた結果と一致するように調整した。

図 4.8 にパラメータを 0.89 とした場合の陽電子による多重度分布を示す。分布をガウス分布を用いて評価し、多重度の期待値は  $10.95 \pm 0.04$  と誤差の範囲でテスト実験の結果を再現する値が得られた。また図 4.9 に光子検出効率を調整した場合の多重度の変化を示す。テスト実験で得られた陽電子による多重度分布のガウシアンフィットの期待値を赤線で表示した。調整パラメータを 0.89 とした場合に実験結果を最も再現するという結果が得られた。そこで以降の解析では MPPC の検出効率の調整パラメータとして 0.89 を使い、この環境で性能評価を行った。

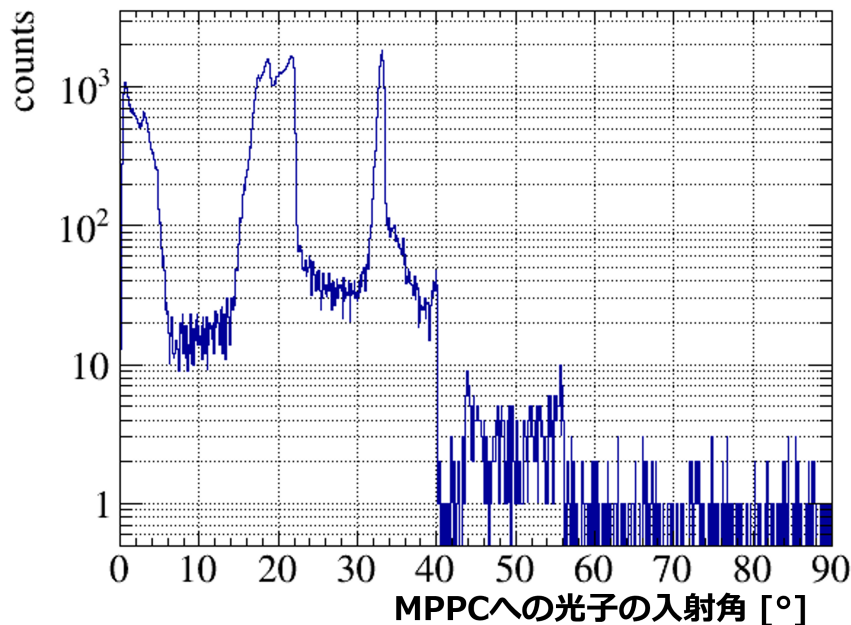


図 4.6: シミュレーションによる陽電子入射時の光子の MPPC への入射角度の分布。縦軸はカウント数を log スケールで表示してある。

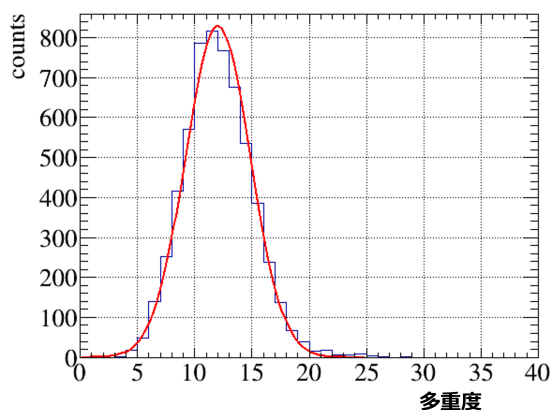


図 4.7: シミュレーションで得られた陽電子による多重度分布。評価に用いたフィッティングのガウス分布を赤線で表示した。

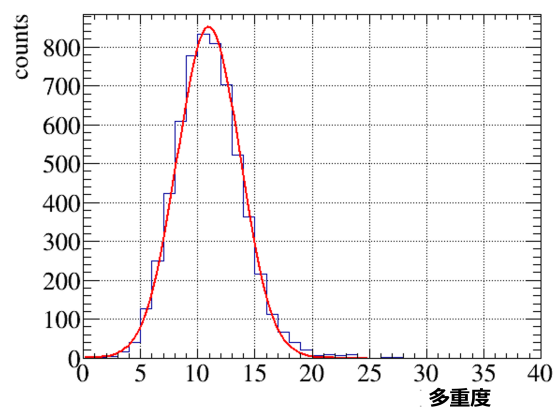


図 4.8: 光子検出効率を 0.89 とした場合にシミュレーションで得られた陽電子による多重度分布。評価に用いたフィッティングのガウス分布を赤線で表示した。

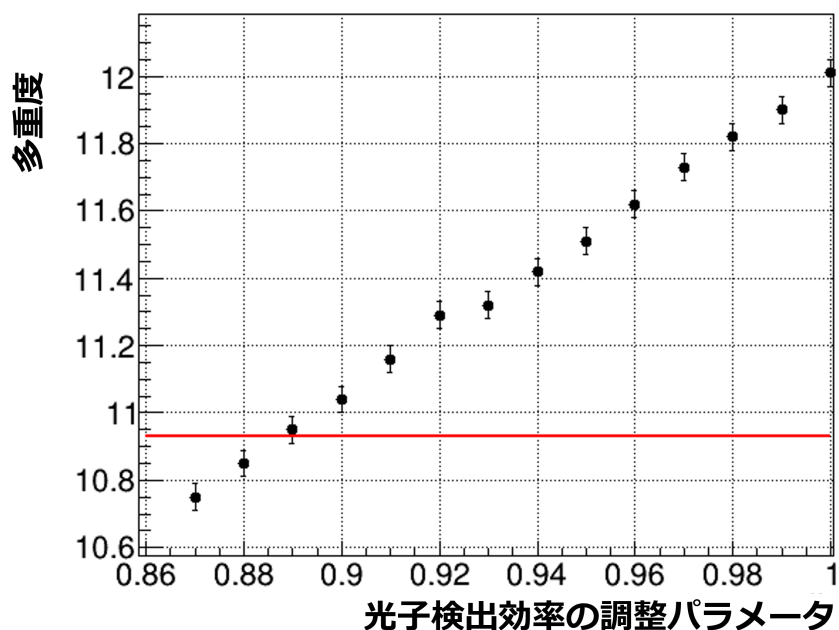


図 4.9: シミュレーションによる光子検出効率を調整した場合の多重度の変化。横軸は光子検出効率の調整パラメータ、縦軸はそのパラメータを用いた場合に得られる多重度分布のガウスフィットの期待値である。またテスト実験で得られた陽電子による多重度分布のガウスフィットの期待値を赤線で表示した。

#### 4.5 シミュレーションによる $\pi$ 中間子及び $K$ 中間子の識別能力の評価

4.4 節までで再現したシミュレーション環境を用いて  $\pi$  中間子、 $K$  中間子を入射させ同様の解析手法により試作機の粒子識別性能の評価を行った。

#### 4.5.1 評価の方法

4.4 節までで再現したシミュレーション上の thAC に対して  $\pi^+$  中間子及び  $K^+$  中間子ビームを入射した。ビームの運動量は 2-4 GeV/c まで 0.5 GeV/c 刻みで運動量に広がりはないとして 5 点で比較した。またビームの発生点は検出器より 100 mm 上流側とし、水平方向 (x) 及び鉛直方向 (y) は検出器の中心から 80 mm×80 mm にわたって一様に分布するとした。またビームの角度はなく検出器に垂直に入射するとした。エアロゲルのサイズが 90 mm(x)×90 mm(y) であるためすべてのビーム粒子はエアロゲルを通過する。

#### 4.5.2 $\pi$ 中間子に対する検出効率

図 4.10 に運動量 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子入射時の MPPC 表面における光子の入射角度を示す。陽電子ビームの場合と異なり、運動量 2-4 GeV/c の  $\pi$  中間子は空気中でチェレンコフ光を発生しない。4° 付近に見える構造は  $\pi^+$  中間子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が直接 MPPC に入射したもの、10° から 18° の間に広がって見える構造は  $\pi^+$  中間子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が集光器で 1 回反射して MPPC に入射したもの、30° 付近に見える構造は  $\pi^+$  中間子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が集光器で 2 回反射して MPPC に入射したものである。また 50° 付近に見える構造は  $\pi^+$  中間子が MPPC の窓材を通過する際に発生したチェレンコフ光によるものである。

図 4.11 に運動量 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子入射によって得られる多重度分布を示す。ガウス分布を用いて評価し、多重度の期待値は  $8.07 \pm 0.03$  と得られた。陽電子ビームの場合と異なり空気からチェレンコフ光が発生しないため多重度の期待値は陽電子ビームの場合よりも小さくなっている。

図 4.12 に運動量毎の  $\pi^+$  中間子の検出効率を示す。多重度 2 以上を要求した場合の検出効率を赤で、多重度 3 以上を要求した場合の検出効率を青で、多重度 4 以上を要求した場合の検出効率を緑で表示した。運動量が小さい場合、すなわち  $\beta$  が小さい場合、式 (2.3) より、発生するチェレンコフ光子数が減少するため、運動量が小さい場合に  $\pi^+$  中間子の検出効率が低下している。多重度 2 以上を要求した場合、検出効率は運動量 2 GeV/c において  $96.55 \pm 0.18\%$ 、運動量 4 GeV/c において  $98.47 \pm 0.12\%$  と thAC を運用する予定のすべての運動量領域で目標性能 95% を達成する。多重度 3 以上を要求した場合、検出効率は運動量 2.5 GeV/c において  $94.55 \pm 0.23\%$ 、3 GeV/c において  $95.76 \pm 0.20\%$  であり、おおむね 2.5 GeV/c 以上の運動量領域で目標性能 95% を達成する。また多重度 4 以上を要求した場合、検出効率は運動量 4 GeV/c においても  $92.82 \pm 0.26\%$  と thAC を運用する予定のすべての運動量領域で目標性能 95% に満たない。表 4.1 に運動量 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対する性能の先行研究の試作機との比較を示す。多重度 2 以上、3 以上を要求した場合どちらも検出効率が改善していることが分かる。

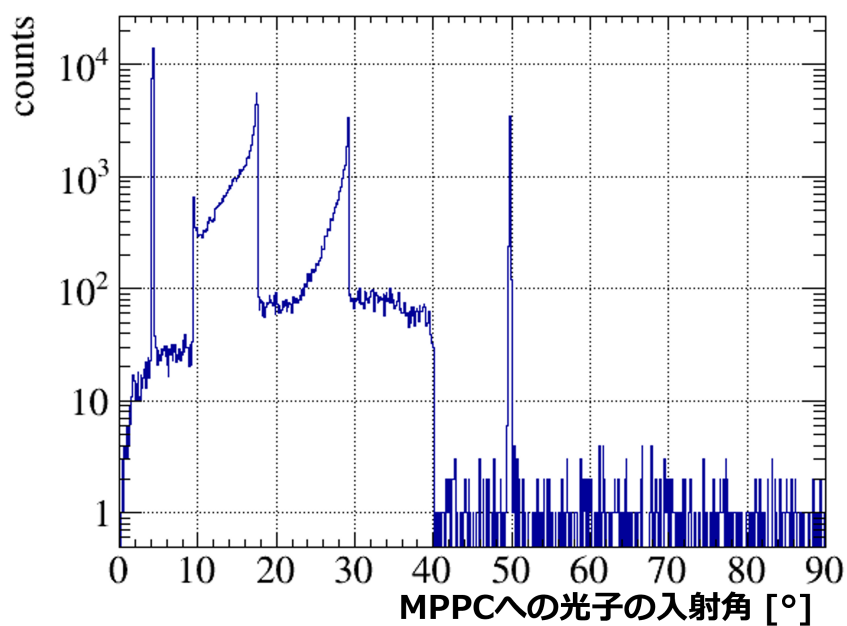


図 4.10: シミュレーションによる  $4 \text{ GeV}/c$  の  $\pi^+$  中間子光子の MPPC への入射角度の分布。縦軸はカウント数を log スケールで表示してある。

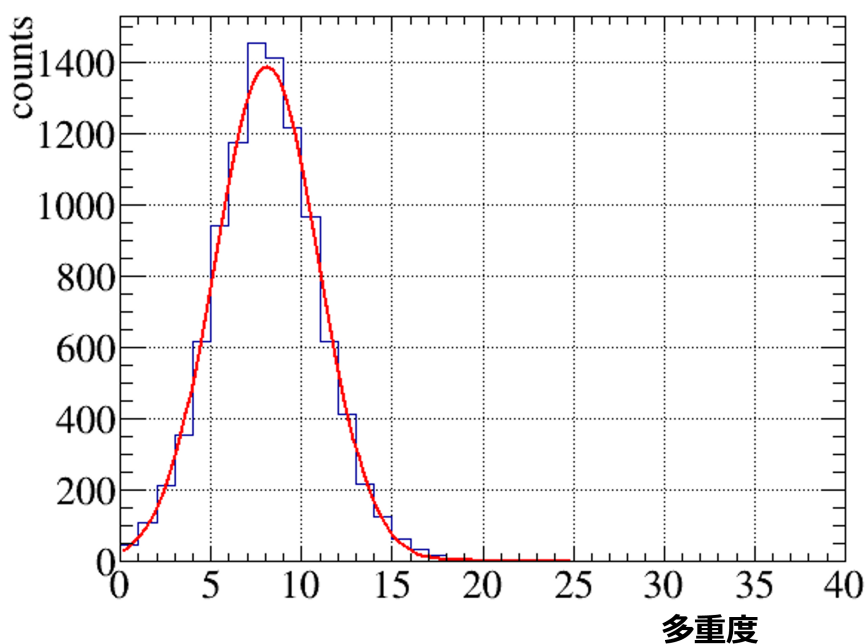


図 4.11: シミュレーションによる  $4 \text{ GeV}/c$  の  $\pi^+$  中間子入射に対する多重度分布。評価に用いたフィッティングのガウス分布を赤線で表示した。

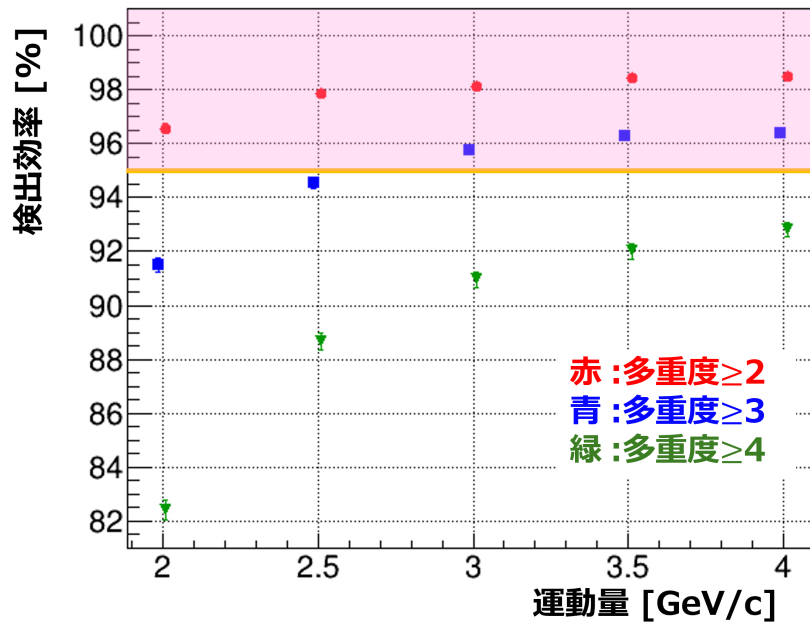


図 4.12: シミュレーションによる運動量毎の  $\pi^+$  中間子の検出効率。多重度 2 以上を要求した場合の検出効率を赤で、多重度 3 以上を要求した場合の検出効率を青で、多重度 4 以上を要求した場合の検出効率を緑で表示した。黄線は  $\pi$  中間子の検出効率の要求性能の下限 95%であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けした。

表 4.1: 4 GeV/c の  $\pi$  中間子の検出効率の先行研究の試作機との比較

多重度	$\geq 2$	$\geq 3$
検出効率 (先行研究の試作機)	$97.5 \pm 0.2\%$	$93.4 \pm 0.2\%$
検出効率 (本研究の試作機)	$98.47 \pm 0.12\%$	$96.36 \pm 0.19\%$

#### 4.5.3 K 中間子に対する誤検出割合

図 4.13 に運動量 4 GeV/c の  $K^+$  中間子入射時の MPPC 表面における光子の入射角度を示す。陽電子や  $\pi$  中間子と異なり、 $K$  中間子はエアロゲルによってチェレンコフ光を発さない。一方で  $K^+$  中間子の場合も MPPC の窓材を通過する際にはチェレンコフ光が発生する。50° 付近に見える構造はそれに対応している。

図 4.14 に運動量 4 GeV/c の  $K^+$  中間子入射によって得られる多重度分布を示す。分布をポアソン分布 3.3 を用いて評価し、多重度の期待値は  $0.43 \pm 0.007$  と得られた。シミュレーションで再現した暗電流による多重度の期待値  $\lambda = 0.282 \pm 0.008$  に比べて少し大きくなっている。これは  $K^+$  中間子が MPPC の窓材を通過した場合に生じるチェレンコフ光や  $K^+$  中間子が物質を電離させた際に発する  $\delta$  線によるものである。

図 4.15 に運動量毎の  $K^+$  中間子の誤識別割合を示す。多重度 2 以上を要求した場合の誤識別割合を赤点で、多重度 3 以上を要求した場合の誤識別割合を青点で、多重度 4 以上を要求した場合の誤識別割合を緑点で表示した。多重度 2 以上を要求した場合誤識別割合は運動量 2 GeV/c において  $3.63 \pm 0.18\%$ 、運動量 4 GeV/c において  $4.14 \pm 0.20\%$  と運動量に寄らず 3.5-4% であり目標性能である  $K$  中間子に対する誤検出割合に達さない。また多重度 3 以上を要求した場合は誤識別割合は運動量 2 GeV/c において  $0.72 \pm 0.08\%$ 、運動量 4 GeV/c において  $0.82 \pm 0.09\%$  と運動量に寄らず 0.5-1% となる。

このことから目標とする  $K$  中間子に対する誤検出割合を達成するには多重度閾値を 3 以上に設定する必要がある。先行研究の試作機では 2-4 GeV/ $c$  の  $K^+$  中間子に対する誤検出割合は多重度 2 以上を要求した場合で約 13%、多重度 3 以上を要求した場合で約 3% であり、多重度 2 以上、3 以上を要求した場合どちらも誤識別割合が改善していることが分かる (図 2.18)。

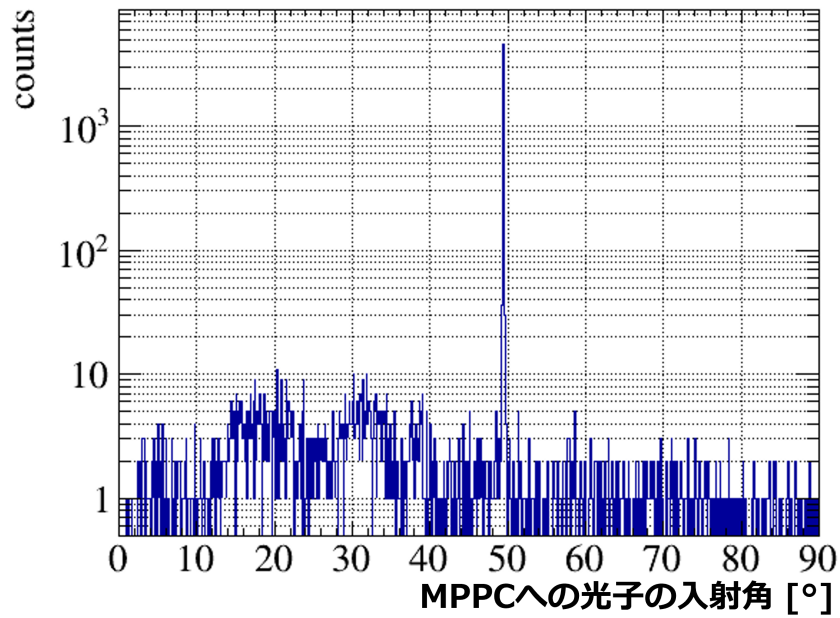


図 4.13: シミュレーションによる 4 GeV/ $c$  の  $K^+$  中間子光子の MPPC への入射角度の分布。縦軸はカウント数を log スケールで表示してある。

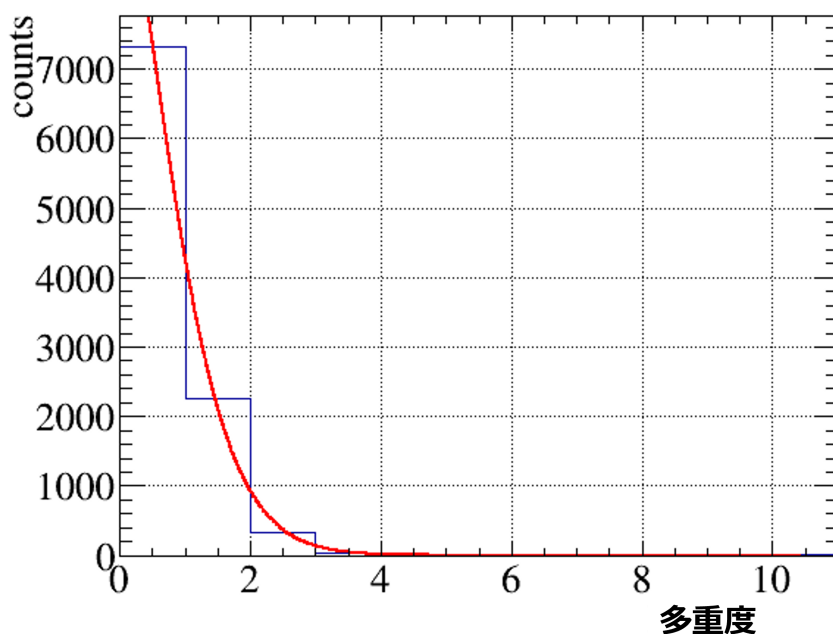


図 4.14: シミュレーションによる  $4 \text{ GeV}/c$  の  $K^+$  中間子入射に対する多重度分布。評価に用いたフィッティングのポアソン分布を赤線で表示した。

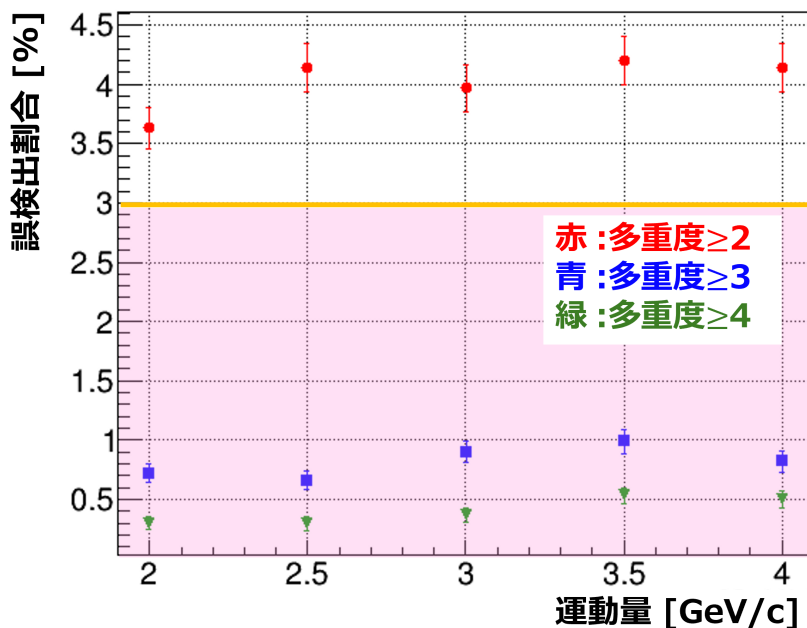


図 4.15: シミュレーションによる運動量毎の  $K^+$  中間子の誤識別割合。多重度 2 以上を要求した場合の誤識別割合を赤で、多重度 3 以上を要求した場合の誤識別割合を青で、多重度 4 以上を要求した場合の誤識別割合を緑で表示した。黄線は  $K$  中間子の誤識別割合の目標性能の上限の 3% であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けした。

#### 4.5.4 考察

4.5.2 節及び 4.5.3 節で得られた結果より現状の試作機では多重度 3 以上を要求した場合におおむね 2.5 GeV/c 以上の  $\pi$  中間子と  $K$  中間子に対しては目標とする識別性能である  $\pi$  中間子の検出効率 95%以上、 $K$  中間子の誤識別割合 3%以下を有することが分かった。また多重度 2 以上を要求した場合は  $K$  中間子の誤識別割合 3.5-4%と目標性能をわずかに満たさないが  $\pi$  中間子の検出効率は目標性能を満たしていることが分かり、多重度閾値を用いた粒子識別手法が実用化できると見込める。

運用予定の 2-4 GeV/c の運動量領域すべてで目標性能を達成するためには、さらに光子検出効率を高める工夫、もしくは暗電流の影響をさらに抑える工夫が必要である。暗電流の影響をさらに抑える工夫として、例えば MPPC の冷却があげられる。MPPC の暗電流レートの温度依存性は式 (4.1) で表される [14]。

$$N_{0.5p.e.}(T) \propto T^{3/2} \exp\left[\frac{-E_g}{2kT}\right] \quad (4.1)$$

ここで  $T$  は絶対温度 [K]、 $E_g$  はバンドギャップエネルギー [eV]、 $k$  はボルツマン定数 [eV/K] である。また図 4.16 に MPPC の増倍率  $M$  を一定とした場合の暗電流レートの温度依存性の例を示す。

縦軸が暗電流レート [kcps(k count per second)]、横軸が MPPC の動作環境の周囲の温度 [°C] である。ただしこの図は本研究で用いた MPPC(S13361-3075AE-08) の値を示す図ではなく、他の MPPC シリーズ (S13360-3050CS) での値である。MPPC の冷却により暗電流の影響をさらに抑えることが可能である。

また光子検出効率を高める工夫として集光器デザインの再考があげられる。現状の集光器の形状は図 4.4 で示したように出口に対して MPPC が内接するように配置されている。つまりこれは集光器で集光した光子の一部が MPPC にヒットしていないことを示している。そこで thAC 試作機の更なる性能向上のため集光器形状の再検討をおこなった。詳細については次章で述べる。

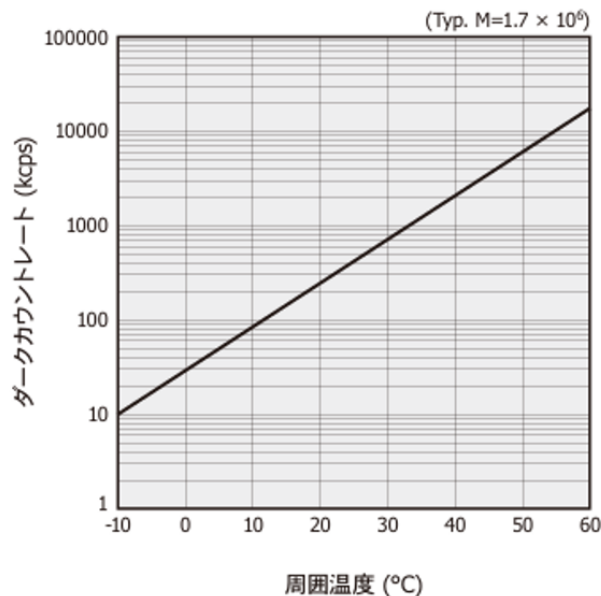


図 4.16: MPPC の暗電流レートの温度依存性。ただし本研究で用いた MPPC とは異なる MPPC シリーズ (S13360-3050CS) での値である。

## 第5章 実機設計に向けたシミュレーションと性能評価

第4章のシミュレーションにより現状の試作機では運用予定のすべての運動量領域で目標とする性能を満たさないことが分かった。そこで光子検出効率の向上のためにシミュレーションで集光器デザインの再検討を行った。また実機製作に向けて、シミュレーションで試作機を複数セグメント配置して大型化した thAC の性能評価を行った。

### 5.1 集光器デザインの再検討

図5.1に現行の集光器の出口部分とMPPCの覆う領域の模式図を示す。現行の集光器ではMPPCの対角線の長さと集光器の直径が一致するように設計されている。そのため集光器で集光された光子の一部は図の灰色の領域を通過し、MPPCで検出されない。これにより光子検出効率を下げている可能性がある。そこで新たに2つの集光器のデザインを検討し、現行の集光器の性能と比較を行った。

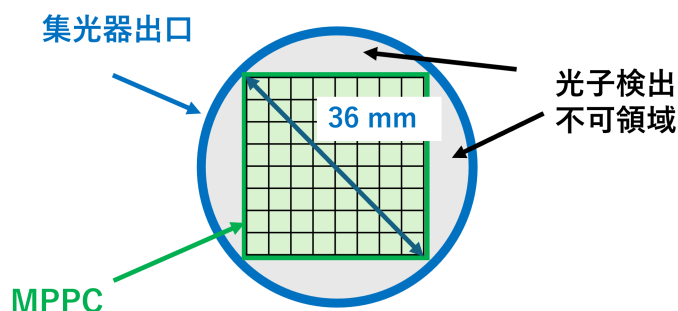


図 5.1: 現行の集光器の出口部分と MPPC の覆う領域。灰色で示した領域に集光された光子は MPPC で検出されず、検出効率を下げる原因となる。

#### 5.1.1 検討した集光器のデザイン

図5.2、5.3、5.4に比較した3種類の集光器デザインの模式図を示す。

集光器タイプAは現行の、集光器の入り口と出口がともに円形で、MPPCが集光器出口に内接する形状のものである。

集光器タイプBは集光器の入り口と出口がともに円形で、MPPCが集光器出口に外接する形状のものである。集光器タイプBではAのように光子を検出できない領域は存在しないという利点がある。しかしながらMPPCの角付近の数chは集光器出口より外側に存在するため、実質的に使用していないチャンネルが増え、多重度の最大値が64よりも小さくなる。本検出器では1つのMPPCに複数光子が入射した場合でも多重度は+1とするため、実質的に多重度が下がる可能性もある。

集光器タイプCは集光器の入り口と出口がともに正方形で、MPPCと集光器出口の形状をそろえたものである。集光器タイプCではタイプAのように光子を検出できない領域は存在しない。またタイプBと異なり、64 chすべてのMPPCを有効的に利用できる。さらに入り口部を正方形にしたことで今後の実機制作において集光器を複数並べる場合に、集光器の入り口部分の充填率を高めることができるため、大型化の際には他のタイプA、Bよりもさらに性能の向上の可能性がある。しかしながら欠点として集光器の角付近に入射した光子については反射回数が増えてしまうため、集光器表面で吸収されてしまう光子が増加する可能性がある。

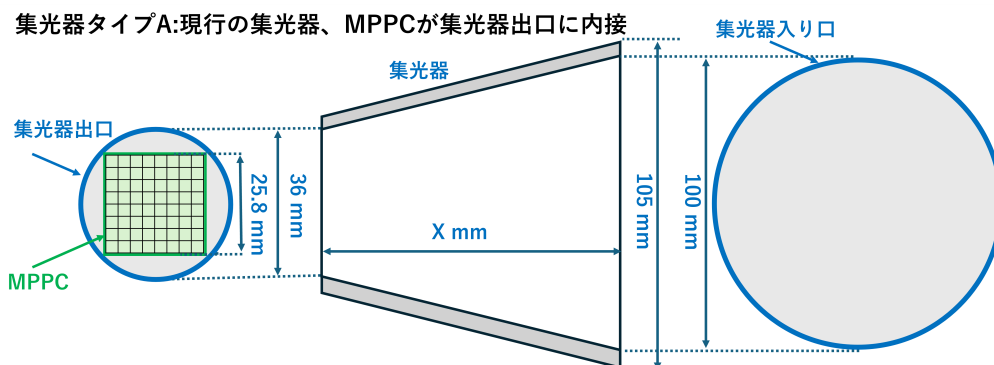


図 5.2: 集光器タイプ A の模式図

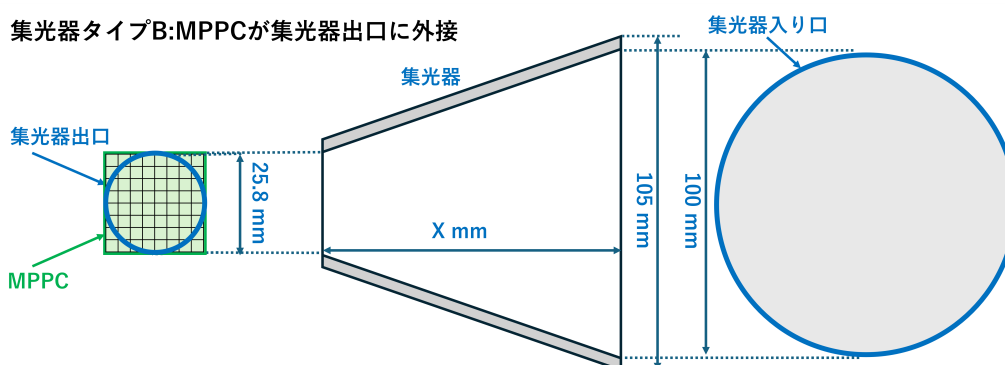


図 5.3: 集光器タイプ B の模式図

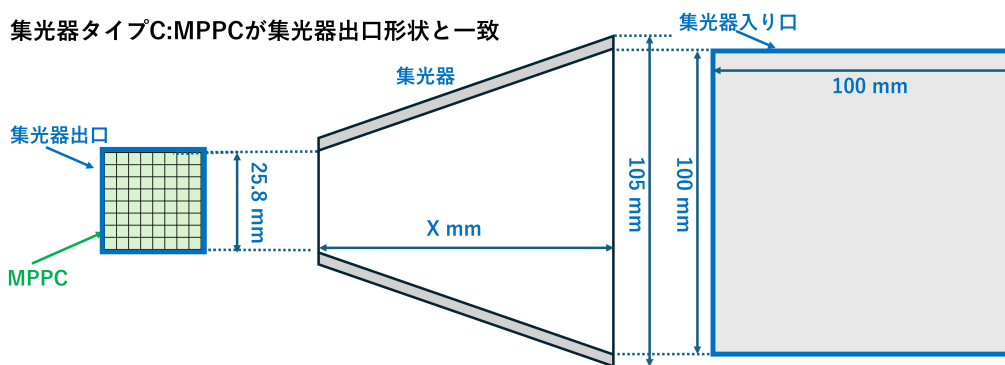


図 5.4: 集光器タイプ C の模式図

### 5.1.2 評価方法

第4章で再現した試作機を用いて集光器のみをタイプ A、B、C の3種類に変更し、それぞれの多重度を比較した。ただし第4章で行ったシミュレーションと異なりエアロゲルのパラメータは典型的な値である厚さ 20 mm、屈折率  $n=1.007$ 、透過長を 20 mm とし、5枚のエアロゲルで共通であるとした。

また入射ビームは 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子とし、運動量に広がりはないとした。ビームの発生点は検出器より 100 mm 上流側とし、水平方向 (x) 及び鉛直方向 (y) は検出器の中心から 80 mm×80 mm にわたって一様に分布するとし、ビームの角度はなく検出器に垂直に入射するとした。エアロゲルのサイズが 90 mm(x)×90 mm(y) でビーム領域がエアロゲルに対して一回り小さいため、全ビーム粒子がエアロゲルを通過する。

それぞれの集光器の長さを変えながら多重度の変化を確認し、最も多重度が大きくなる長さでそれぞれの集光器の性能を比較した。4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子では空気中ではチェレンコフ光は発生しないためコーンの長さを変えることによる空気の量の変化は多重度には影響しない。

### 5.1.3 集光器タイプ A の長さの最適化

図 5.5 に集光器タイプ A、長さ 120 mm の場合の MPPC への光子の入射角度の分布を示す。4° 付近に見える構造は  $\pi^+$  中間子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が直接 MPPC に入射したもの、15° から 22° の間に広がって見える構造は  $\pi^+$  中間子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が集光器で 1 回反射して MPPC に入射したもの、35° 付近に見える構造は  $\pi^+$  中間子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が集光器で 2 回反射して MPPC に入射したものである。また 50° 付近に見える構造は  $\pi^+$  中間子が MPPC の窓材を通過する際に発生したチェレンコフ光によるものである。

図 5.6 に集光器タイプ A での多重度の集光器長さ依存性を示す。多重度については、得られた多重度分布をガウス分布でフィッティングし、その期待値を用いた。集光器を長くしていくことで直接 MPPC に入射する光子に加えて 1 回反射、2 回反射の光子も MPPC に集光されるようになる。集光器の長さが 120 mm となったところで 2 回反射した光子のすべてが MPPC に集光されるようになる。しかしそれ以上集光器を長くしても 3 回反射した光子は MPPC 側に集光されず、長さ 120 mm 以上では徐々に多重度が下がっていく。最も多重度が大きくなる長さ 120 mm でのガウスフィットによる期待値は  $8.74 \pm 0.03$  となる。

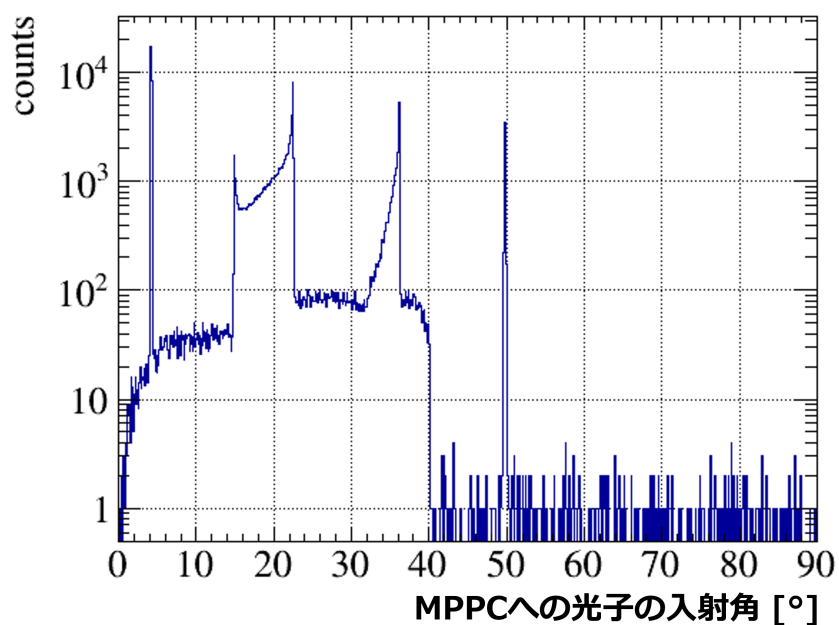


図 5.5: シミュレーションによる集光器タイプ A、長さ 120 mm の場合の MPPC への光子の入射角度の分布。縦軸はカウント数を log スケールで表示してある。

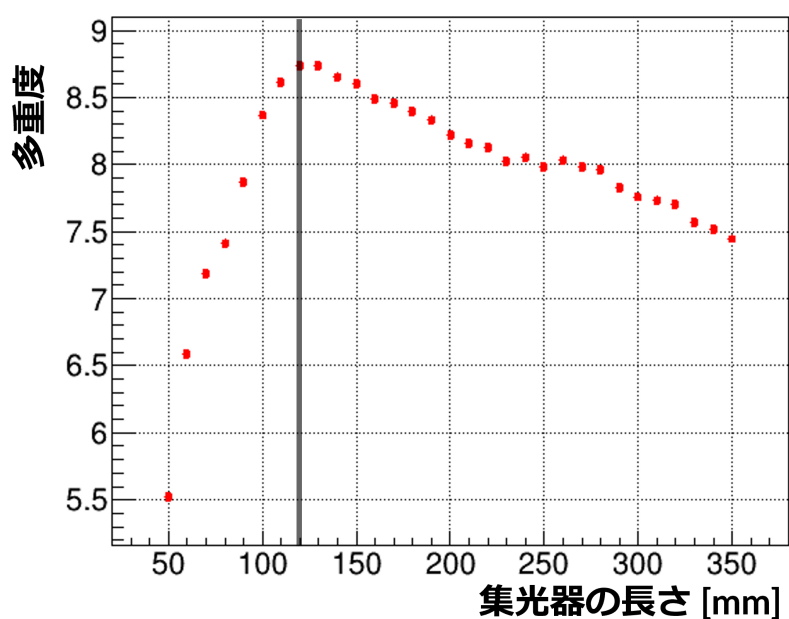


図 5.6: シミュレーションによる集光器タイプ A での多重度の集光器長さ依存性。黒線は多重度が最大になるときの集光器の長さを示した。

#### 5.1.4 集光器タイプ B の長さの最適化

図 5.7 に集光器タイプ B、長さ 260 mm の場合の MPPC への光子の入射角度の分布を示す。4° 付近に見える構造は  $\pi^+$  中間子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が直接 MPPC に入射したものの、6° から 15° の間に広がって見える構造は  $\pi^+$  中間子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が集光器で 1 回反射して MPPC に入射したものの、24°、32°、38° 付近に見える構造はそれぞれ 2、3、4 回反射して MPPC に入射したものである。また 50° 付近に見える構造は  $\pi^+$  中間子が MPPC の窓材を通過する際に発生したチェレンコフ光によるものである。

図 5.8 に集光器タイプ B での多重度の集光器長さ依存性を示す。多重度については、得られた多重度分布をガウス分布でフィッティングし、その期待値を用いた。集光器 B の場合も集光器を長くしていくことで 1、2、3、4 回反射の光子も MPPC に集光されるようになる。集光器の長さが 260 mm となったところで 4 回反射した光子のすべてが MPPC に集光されるようになる。しかしそれ以上集光器を長くしても 5 回反射した光子は MPPC 側に集光されず、長さ 260 mm 以上では集光器を長くした場合でも多重度は飽和してほとんど変化しなくなる。最も多重度が大きくなる長さ 260 mm でのガウスフィットによる期待値は  $9.65 \pm 0.03$  となる。

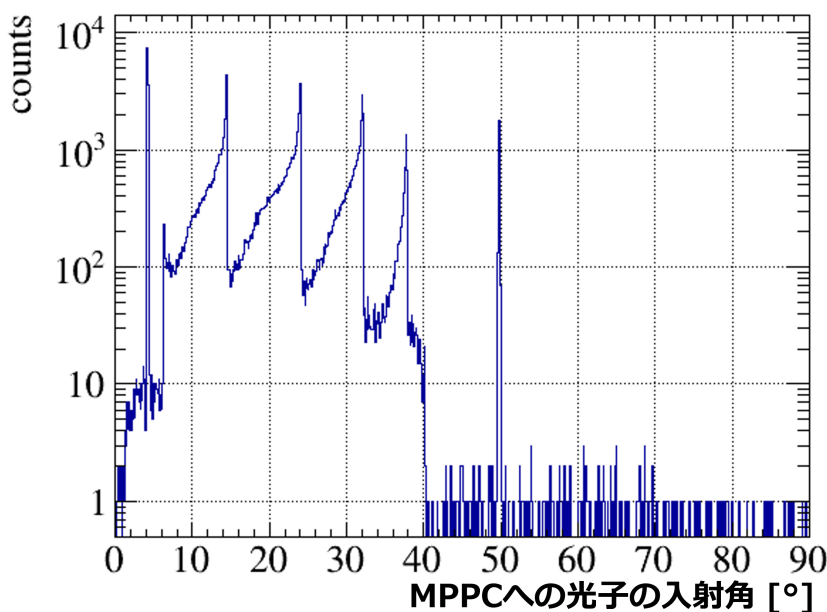


図 5.7: シミュレーションによる集光器タイプ B、長さ 260 mm の場合の MPPC への光子の入射角度の分布。縦軸はカウント数を log スケールで表示してある。

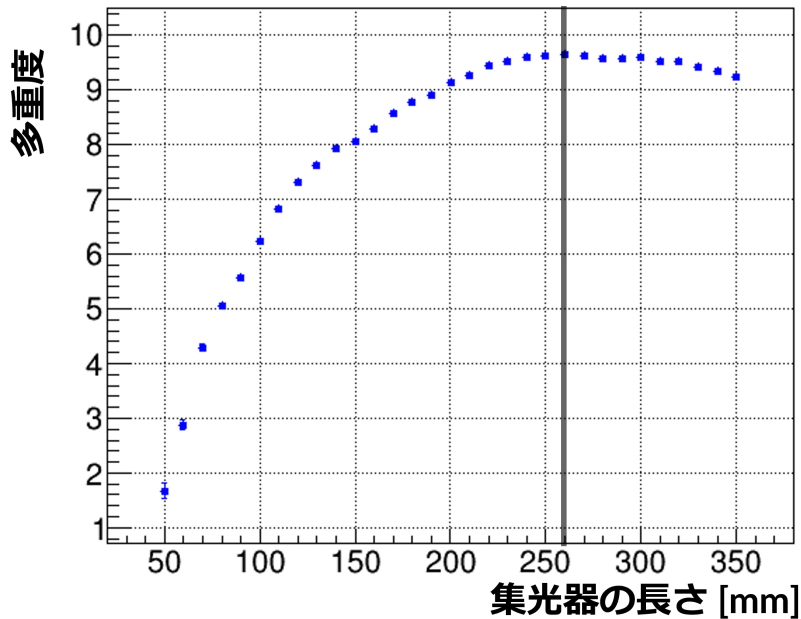


図 5.8: シミュレーションによる集光器タイプ B での多重度の集光器長さ依存性。黒線は多重度が最大になるときの集光器の長さを示した。

### 5.1.5 集光器タイプ C の長さの最適化

図 5.9 に集光器タイプ C、長さ 270 mm の場合の MPPC への光子の入射角度の分布を示す。4° 付近に見える構造は  $\pi^+$  中間子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が直接 MPPC に入射したもの、8° から 40° の間に広がって見える構造は  $\pi^+$  中間子がエアロゲルを通過する際に発生したチェレンコフ光が集光器で反射して MPPC に入射したものである。また 50° 付近に見える構造は  $\pi^+$  中間子が MPPC の窓材を通過する際に発生したチェレンコフ光によるものである。

図 5.10 に集光器タイプ C での多重度の集光器長さ依存性を示す。多重度については、得られた多重度分布をガウス分布でフィッティングし、その期待値を用いた。集光器 C の場合も集光器を長くしていくことで集光器で反射した光子も MPPC に集光されるようになる。集光器の長さが 270 mm となったところで多重度が最大になるが、それ以上集光器を長くした場合でも多重度は飽和してほとんど変化しなくなる。最も多重度が大きくなる長さ 270 mm でのガウスフィットによる期待値は  $10.37 \pm 0.03$  となる。

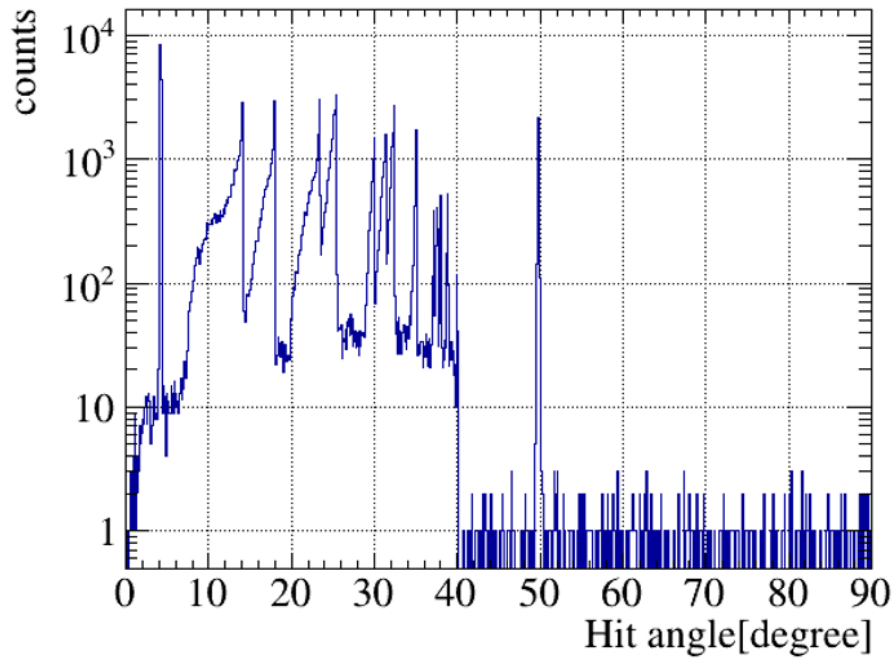


図 5.9: シミュレーションによる集光器タイプ C、長さ 270 mm の場合の MPPC への光子の入射角度の分布。縦軸はカウント数を log スケールで表示してある。

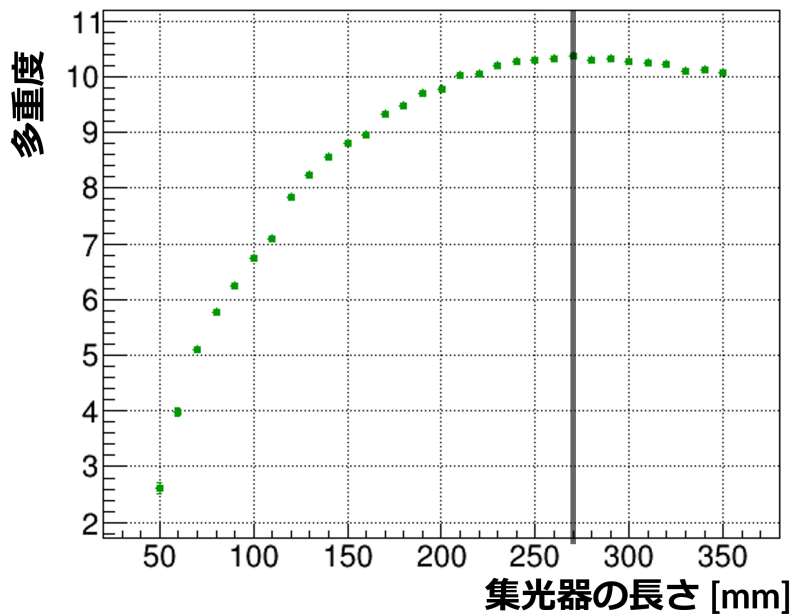


図 5.10: シミュレーションによる集光器タイプ C での多重度の集光器長さ依存性。黒線は多重度が最大になるときの集光器の長さを示した。

### 5.1.6 集光器の性能比較

図 5.11 に集光器タイプ A、B、C での多重度の集光器長さ依存性を重ねて表示したものを示す。タイプ A での結果を赤点で、タイプ B での結果を青点で、タイプ C での結果を緑点で示した。3 種類の集光器を比較するとタイプ C、長さ 270 mm の集光器を用いた場合に最も多重度が大きくなることが分かった。光子検出数が増加した理由として集光器出口の形状と MPPC の形状が一致したことで MPPC にヒットせずに通過する光子がなくなったことに加えて、集光器入り口側の形状がタイプ A、B では直径 100 mm の円であったがタイプ C では一片の長さを 100 mm とする正方形になって入り口面積が約 1.3 倍になったことで入り口部分での光子のロスも減っているためであると考えられる。以降の評価ではこの集光器を用いて性能評価を行った。

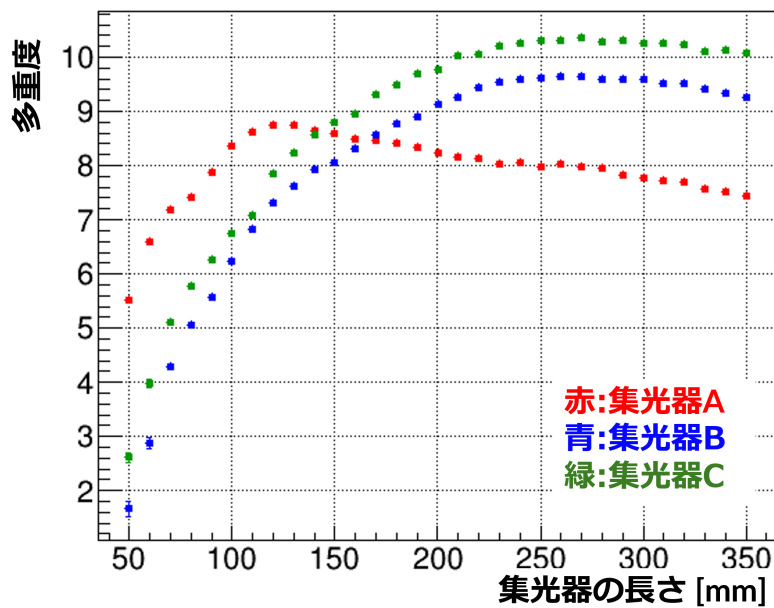


図 5.11: シミュレーションによる集光器タイプごとの多重度の集光器長さ依存性の比較。タイプ A での結果を赤点で、タイプ B での結果を青点で、タイプ C での結果を緑点で示した。

## 5.2 集光器タイプ C に変更した場合の試作機の性能評価

4.4 節までで再現したシミュレーション上の thAC を検討した 3 種類の集光器のうち最も性能の良い、長さ 270 mm、四角錐型の集光器タイプ C に変更して  $\pi$  中間子に対する検出効率と  $K$  中間子に対する誤識別割合の評価を行った。エアロゲルのパラメータについては 5.1 節と同様に、厚さ 20 mm、屈折率  $n=1.007$ 、透過長を 20 mm とし、5 枚のエアロゲルで共通であるとした。入射粒子は  $\pi^+$  中間子及び  $K^+$  中間子ビームとした。ビームの運動量は 2-4 GeV/c まで 0.5 GeV/c 刻みで運動量に広がりはないとして 5 点で比較した。ビームの発生点は検出器より 100 mm 上流側とし、水平方向 (x) 及び鉛直方向 (y) は検出器の中心から 80 mm $\times$ 80 mm にわたって一様に分布するとし、ビームの角度は検出器に垂直に入射するとした。エアロゲルのサイズが 90 mm(x) $\times$ 90 mm(y) であるため全てのビーム粒子はエアロゲルを通過する。

図 5.12 に試作機の集光器タイプを C とした場合の運動量毎の  $\pi^+$  中間子の検出効率を示す。運動量が小さい場合、すなわち  $\beta$  が小さい場合、式 (2.3) より、発生するチェレンコフ光子数が減少するため、運動量が小さい場合に  $\pi^+$  中間子の検出効率が低下している。現行試作機の結果である図 4.12 と比較して検出効率が向上しており、多重度 2 又は 3 以上を要求した場合に目標とする識別性能である、2-4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子の検出効率 95% 以上を達

成する。さらに多重度 4 以上を要求した場合でも運動量 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対する検出効率が  $94.89 \pm 0.22\%$  とわずかに目標性能に満たないが、ほとんどすべての領域で目標性能を満たし、多重度 5 以上を要求した場合でも運動量 2.5 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対する検出効率が  $94.08 \pm 0.24\%$ 、運動量 3 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対する検出効率が  $96.05 \pm 0.19\%$  と運動量 3 GeV/c 以上の  $\pi^+$  中間子に対して目標性能を達成する。

図 5.13 に試作機の集光器タイプを C とした場合の運動量毎の  $K^+$  中間子の誤識別割合を示す。現行試作機の結果である図 4.15 と比較しても誤識別割合は同様に、多重度 2 以上を要求した場合誤識別割合は運動量 2 GeV/c において  $3.65 \pm 0.18\%$ 、運動量 4 GeV/c において  $4.22 \pm 0.20\%$  と運動量に寄らず 3.5-4.5% であり目標性能である  $K$  中間子に対する誤検出割合 3% 以下に達さない。また多重度 3 以上を要求した場合は誤識別割合は運動量 2 GeV/c において  $0.5 \pm 0.07\%$ 、運動量 4 GeV/c において  $0.86 \pm 0.09\%$  と運動量に寄らず 0.5-1% となる。そのため目標とする  $K$  中間子に対する誤検出割合を達成するには多重度閾値を 3 以上に設定する必要がある。

この結果から多重度 3 以上を要求した時に運用予定の 2-4 GeV/c のすべての運動量領域で  $\pi^+$  中間子に対する検出効率および  $K$  中間子に対する誤検出割合を満たすということが分かった。

ただし本番の環境では粒子は検出器に対して必ずしも垂直に入射するわけではなく、角度広がりを持って入射するため、そのような粒子に対する性能は今後検討していく必要がある。

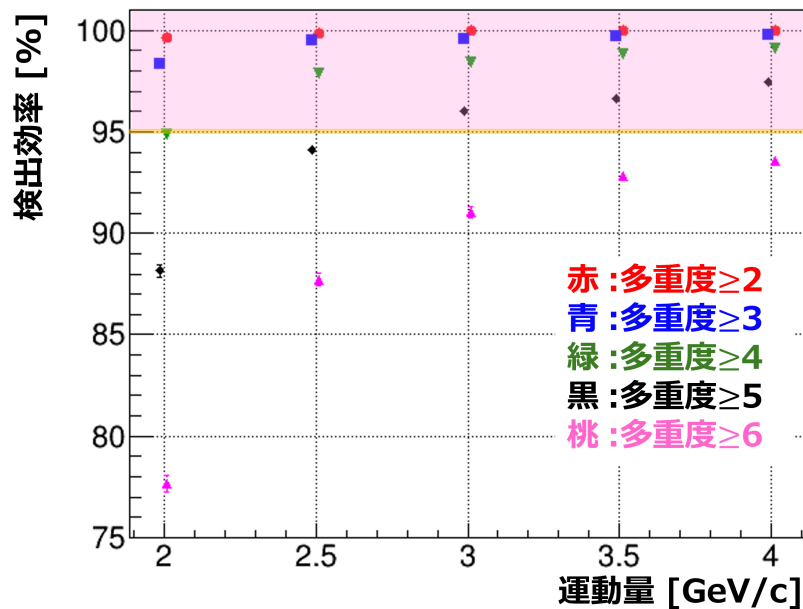


図 5.12: シミュレーションによる試作機の集光器タイプを C とした場合の運動量毎の  $\pi^+$  中間子の検出効率。多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の検出効率をそれぞれ赤、青、緑、黒、ピンクで表示した。黄線は  $\pi$  中間子の検出効率の要求性能の下限 95% であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けした。

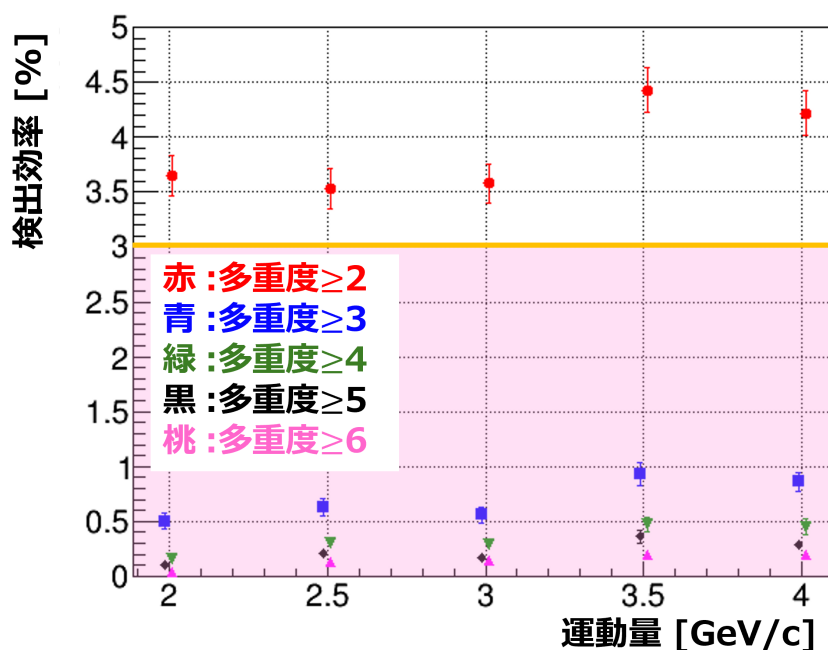


図 5.13: シミュレーションによる試作機の集光器タイプを C とした場合の運動量毎の  $K^+$  中間子の誤識別割合。多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の誤検出割合をそれぞれ赤、青、緑、黒、ピンクで表示した。黄線は  $K$  中間子の誤識別割合の目標性能の上限の 3% であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けした。

### 5.3 thAC の複数セグメント化

thAC の実機サイズは 1 機あたり高さ約 1.5 m、幅約 1 m である。現状の試作機のサイズはおおよそ 11 cm×11 cm の正方形であり、この 1 セグメントを高さ方向及び幅方向に並べることで実機を作成する予定である。ただしエアロゲルの領域についてはセグメントごとに仕切らず、エアロゲルを並べて壁状にし、全体を一つの箱で覆う予定である。エアロゲルは検出器を大型化した場合でも実機の領域を隙間なく覆うことで試作機とほとんど同じ性能を有することが期待できるが、集光器には厚みがあるため集光器の継ぎ目付近では光子検出効率が低下する可能性がある。

また 1 粒子の入射に対して複数の MPPC にチェレンコフ光が分かれて入射する可能性があるため、複数の MPPC のヒット情報を用いて多重度を評価する必要がある。複数の MPPC を使用する場合、チャンネル数の増加による暗電流の影響の増加も考えられる。そこで検出器の大型化による影響についてシミュレーションにより評価を行った。

#### 5.3.1 検討した複数セグメント thAC の全体デザイン

今回の評価では試作機 9 セグメントを 3×3 の正方形型に配置した検出器を用いた。図 5.14 にシミュレーションで作成した複数セグメント thAC の概観を示す。サイズは 303 mm×303 mm である。エアロゲルケース及び集光器の外枠を白線、内枠を赤線で表示した。またエアロゲルを黄線で、MPPC は青線で表示した。解析のためにシミュレーション空間に設定した空気の一部を仮想的な検出器として設定しており、水色の線はその外枠を示している。

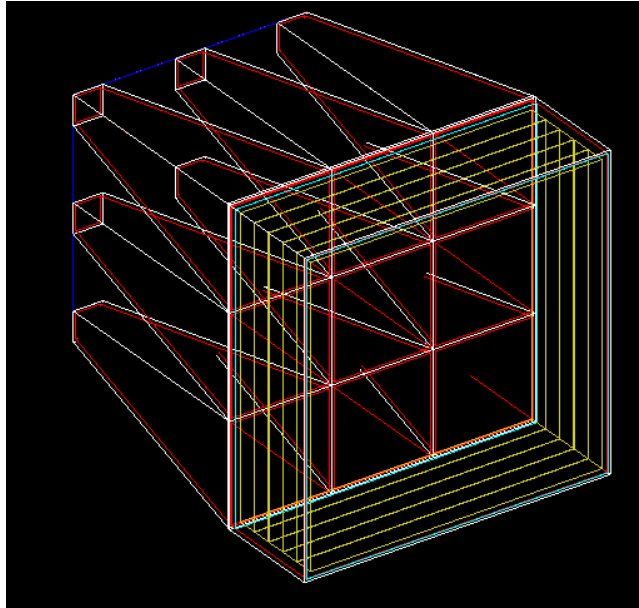


図 5.14: シミュレーションで作成した複数セグメント thAC。エアロゲルケース及び集光器の外枠を白線、内枠を赤線で表示した。またエアロゲルを黄線で、MPPC は青線で表示した。解析のためにシミュレーション空間に設定した空気の一部を仮想的な検出器として設定しており、水色の線はその外枠を示している。

### 5.3.2 エアロゲル

5.1 節および 5.2 節の集光器の最適化の際に用いたエアロゲルとサイズ以外は同じである。エアロゲルは使用した 5 枚すべてで屈折率 1.007、透過長 20 mm を仮定した。屈折率は光の波長に依存せず一定であるとし、透過長については波長の 4 乗に依存する波長依存性を持つとした。また吸収長は波長ごとに透過長の 1000 倍を設定した。

サイズは 288 mm×288 mm で、厚みを 20 mm を 1 枚としてこれを厚さ方向に 5 枚並べて 100 mm 厚とした。ただし、実際のエアロゲルではこれよりも小さいサイズのエアロゲルを並べることでエアロゲルの壁を作る予定であり、幅方向のエアロゲル同士の境目の効果は今回行ったシミュレーションでは考慮できていない。厚さ方向のエアロゲル同士の隙間及びエアロゲルとケースの隙間には 0.5 mm の空気の層を設けた。

またエアロゲルを覆うケースは 4.2.2 節で再現したナフロンを用いた。サイズはエアロゲルを覆う 303 mm×303 mm である。ケース内壁の乱反射の影響は大型化した thAC の端に限定されるため、乱反射による集光の効果は試作機の場合よりも小さい。

### 5.3.3 集光器

集光器は 5.1 節及び 5.2 節で最適化した集光器タイプ C の長さ 270 mm のものを用いた。材質はアルミニウムで、内部で鏡面反射が起こるようにした。反射率は図 2.11 に従って波長依存性を持たせた。また屈折率は 1.48 とし、吸収長を 0.001 mm と小さくした。そのため集光器と検出器内部の空気との境界で発生したチェレンコフ光のみ検出される可能性がある。

集光器の内径については入り口部分が一辺 100 mm の正方形、出口部分が一辺 25.8 mm の正方形であり、これも最適化された集光器のサイズと同じである。ただしコーンの厚さについては継ぎ目の評価のために実現可能な範囲で薄くし、0.5 mm とした。これを上下方向及び左右方向に並べるため 2 つの集光器の境目には 1 mm の継ぎ目ができ、この領域に入射した光子は MPPC で検出されない。

### 5.3.4 MPPC

MPPC についてはシミュレーション上では 9 セグメントの集光器出口すべてを覆う大きな 1 枚の検出器を設置し、解析時に MPPC のサイズを考慮して実際の光子検出エリアにヒットがあった光子のみを選択した。また MPPC の表面の窓材の再現のため MPPC の表面に厚さ 0.201 mm のエポキシ樹脂を設定し、屈折率は 1.55 とした。MPPC の光子検出効率は第 4 章と同様に波長 450 nm の光に対する検出効率を 60% とし、図 2.8 に従う波長依存性を持たせた。

9 つの MPPC について、図 5.15 のようにアルファベット順に A から I までの ID を振り、以降の節ではこれを使って説明する。ただし図 5.15 はビームの進行方向を向いて検出器を見た時の図である。

MPPC が暗電流によって信号を出す確率はテスト実験で暗電流評価に用いたイベントから再現したチャンネル毎の確率を用い、9 つの MPPC においてそれぞれの同じチャンネルでは同じ確率を用いた。

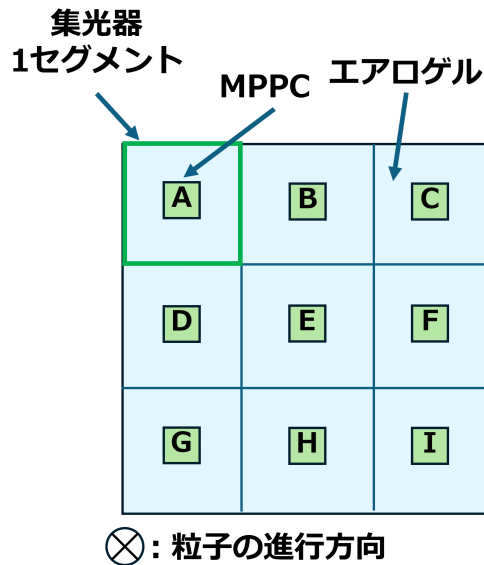


図 5.15: 9 つの MPPC の ID。ビームの進行方向を向いて検出器を見た時の図である。

## 5.4 複数セグメント thAC の性能評価

### 5.4.1 評価方法

作成した複数セグメント thAC の粒子識別能力の一様性の評価のために、粒子の入射位置を変更しながら、それぞれの位置での  $\pi$  中間子検出効率と  $K$  中間子誤識別割合をスキャンした。入射粒子は  $\pi^+$  中間子と  $K^+$  中間子とし、運動量については、より発生するチェレンコフ光子数が少なくなる、運用予定の運動量領域の下限である 2 GeV/c で評価を行った。なお、入射粒子を 4 GeV/c とした場合のスキャン結果は付録 A に付した。粒子の検出器への入射角は実際には広がりを持っているが、今回のシミュレーションでは検出器に対して垂直に入射する粒子のみの評価を行った。

図 5.16 及び図 5.17 にスキャンを行った入射粒子の位置を示す。横方向のスキャンについては 9 個のうちの中心のセグメントの MPPC から隣の MPPC までを 9 等分し、一边を 12.625 mm とする正方形の領域に粒子を入射させた。領域 1、2、8、9 では粒子入射位置と MPPC の領域に重なりがあるため MPPC の窓材からのチェレンコフ光により多重度を稼いでしまう可能性がある。

斜め方向のスキャンについては 9 個のうちの中心のセグメントの MPPC から斜め上の MPPC までを 9 等分し、一边を 12.625 mm とする正方形の領域に粒子を入射させた。ただし横方向のスキャンの際の領域 1 と斜め方向の

スキャンの際の領域1は一致している。この場合も領域1、2、8、9では粒子入射位置とMPPCの領域に重なりがあるためMPPCの窓材からのチェレンコフ光により多重度を稼いでしまう可能性がある。

多重度の評価の仕方については多重度評価に参加させるMPPCの個数が重要である。2 GeV/c、4 GeV/cの運動量の $\pi$ 中間子が屈折率1.007のアロゲルでチェレンコフ光を発するとき、チェレンコフ角は式(2.2)に従ってそれぞれ約7.1°、約7.8°となる。そのため100 mmのアロゲルを通過して集光器に届くまでにチェレンコフ光は約12から14 mmほど広がることになるがこれは集光器入り口の内径(100 mm×100 mm)よりも小さい。そのため継ぎ目付近では複数のセグメントの情報を合算した多重度評価を行う必要があるが、それ以外では多重度評価に用いるセグメント数を増やしても光子検出効率の改善への効果は限定的であり、むしろMPPCのチャンネル数が増え、暗電流の影響の増加してK中間子の誤検出割合を悪化させる原因となる可能性がある。

そのため横方向時のスキャンではMPPC(E)とMPPC(F)の2つから得られた多重度分布を用いた識別能力とMPPC(E)とMPPC(F)の2つのうちビーム入射位置の中心から近い方の1つから得られた多重度分布を用いた識別能力を比較した。ただしMPPC(E)とMPPC(F)からの距離が同じである領域5に入射したデータについてはMPPC(E)から得られる多重度分布を用いた。

また斜め方向時のスキャンではMPPC(B)、MPPC(C)、MPPC(E)、MPPC(F)の4つから得られた多重度分布を用いた識別能力とMPPC(B)、MPPC(C)、MPPC(E)、MPPC(F)の4つのうちビーム入射位置の中心から最も近いMPPCから得られた多重度分布を用いた識別能力を比較した。ただしMPPC(B)、MPPC(C)、MPPC(E)、MPPC(F)からの距離が同じである領域5に入射したデータについてはMPPC(E)から得られる多重度分布を用いた。

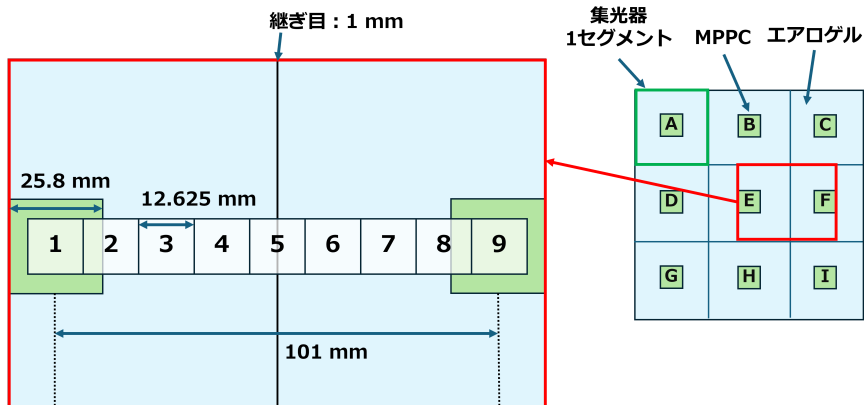


図 5.16: 横方向のスキャン位置。図の1から9までの領域に粒子を打ち込み、評価を行った。

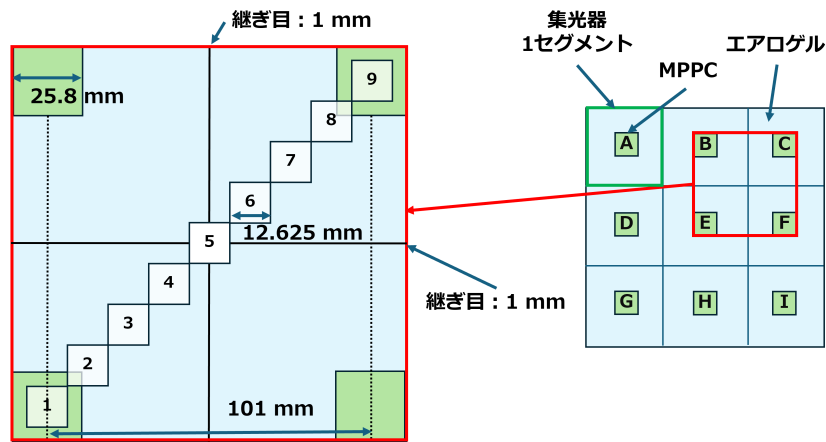


図 5.17: 斜め方向のスキャン位置。図の 1 から 9 までの領域に粒子を打ち込み、評価を行った。ただし横方向のスキャンの際の領域 1 と斜め方向のスキャンの際の領域 1 は一致している。

#### 5.4.2 横方向のスキャン (入射粒子が $\pi^+$ の場合)

複数セグメントの情報を用いた解析では、多重度分布に寄与する MPPC の個数が増えており、それに伴って暗電流による影響も大きくなる。そのため、5.2 節で検討したような 1 セグメントの thAC と比較した場合に入射粒子の種類や運動量が同じであっても多重度が大きくなる場合があり、それに伴って検出効率や誤検出割合が大きくなる場合があることに注意しなければならない。

図 5.18(左) に 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、MPPC(E) と MPPC(F) の 2 つを用いた多重度分布から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率を示す。領域 1、2、8、9 のように粒子の入射位置と MPPC の位置に重なりがある場合には、MPPC の窓材に入射粒子がヒットした場合に発生するチェレンコフ光により多重度が増加し、検出効率を過大評価してしまっている可能性がある。また入射位置が MPPC(E) や MPPC(F) から遠ざかるほど検出効率が下がり、継ぎ目において最も検出効率が悪くなっていることが確認できる。2 - 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対して目標とする検出効率を達成するには多重度の閾値を 3 以下に設定する必要がある。また継ぎ目付近の領域 4、5、6 を除けば、多重度 4 以上を要求した場合でも目標とする検出効率を達成する。

図 5.18(右) に 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、粒子入射位置から最も近い MPPC を用いた多重度分布から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率を示す。2 つの MPPC の中間地点にあたる領域 5 では MPPC(E) と MPPC(F) にほとんど均等に分割されて集光されるため、MPPC(E) のみで評価した場合には大幅に検出効率を落としている。そのため集光器の継ぎ目付近に粒子が入射した場合は複数のセグメントの情報をを用いる必要があると言える。また継ぎ目の領域 5 を除くと、2-4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対して目標とする検出効率を達成するには多重度の閾値を 3 以下に設定する必要がある。さらにその周囲の 4、6 の領域を追加で除けば、多重度 4 以上を要求した場合でも目標とする検出効率を達成する。つまり集光器の継ぎ目付近以外では MPPC(E) と MPPC(F) の両方を用いた場合と検出効率は大きく変わらないため、継ぎ目付近以外で複数のセグメントの情報をを用いるメリットは小さいと言える。

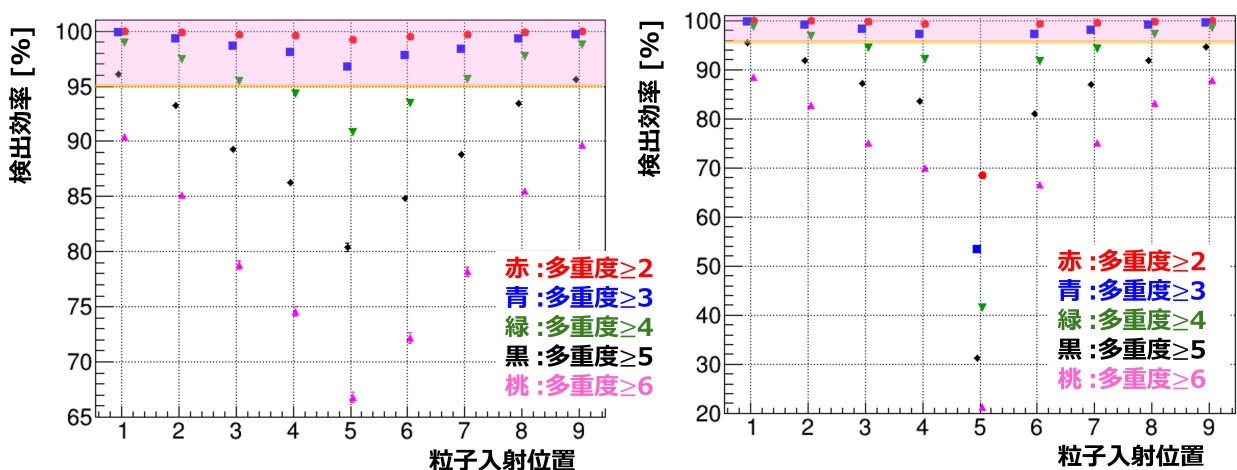


図 5.18: シミュレーションによる 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、2つの MPPC から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率 (左) と粒子入射位置から最も近い MPPC から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率 (右)。多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の検出効率をそれぞれ赤、青、緑、黒、ピンクで表示した。黄線は  $\pi$  中間子の検出効率の要求性能の下限 95% であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けた。2つの MPPC の中間地点にあたる領域 5 では集光効率が下がり大幅に検出効率を落としている。

#### 5.4.3 横方向のスキャン (入射粒子が $K^+$ の場合)

図 5.19(左) に 2 GeV/c の  $K^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、MPPC(E) と MPPC(F) の 2つを用いた多重度分布から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合を示す。閾値を 2 や 3 のように小さく設定した場合に、入射位置と MPPC の領域に重なりがあると急激に誤検出割合が悪化していることが分かる。これは MPPC の窓材に入射粒子がヒットした場合発生するチェレンコフ光により多重度が増加してしまっているためである。粒子が直接当たらない領域では多重度の閾値を 3 以上に設定した場合に目標性能を達成し、粒子が直接当たる領域でも多重度の閾値を 4 以上に設定した場合に目標性能に達する。

図 5.19(右) に 2 GeV/c の  $K^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、粒子入射位置から最も近い MPPC を用いた多重度分布から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合を示す。MPPC 2つを用いた場合に比べ、チャンネル数が半分であるので誤検出割合が下がっており、粒子が直接当たらない領域では多重度の閾値を 2 以上に設定した場合に目標性能を達成する。

以上のことからスキャンを行った 9 領域について、継ぎ目に当たる領域 5 では 2つの MPPC を用いて多重度の閾値を 3 に設定し、それ以外の領域では粒子の入射位置から近い側の 1つの MPPC を用いて閾値 3 に設定することで目標性能を達成することが分かった。

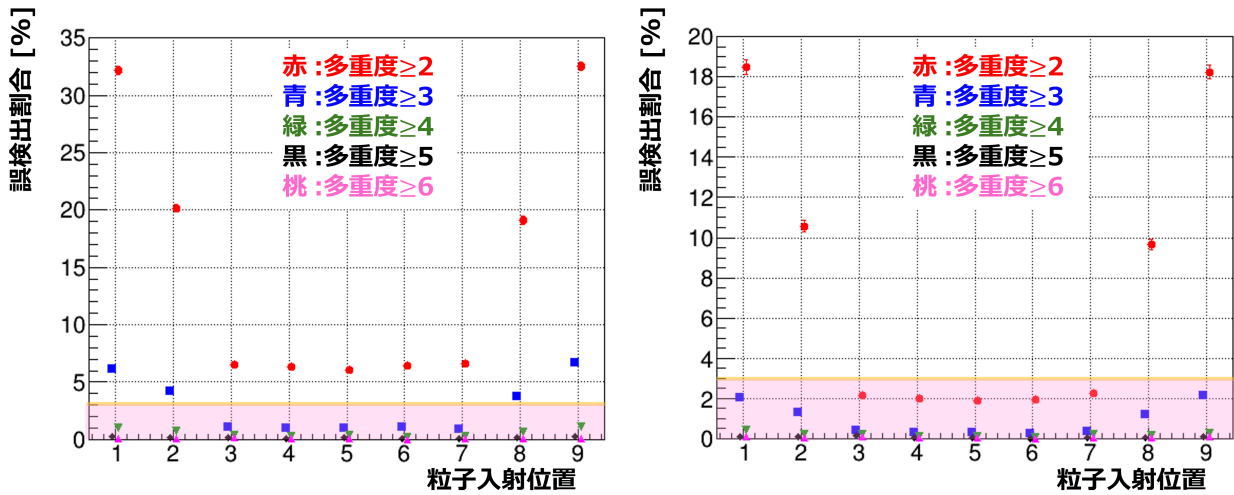


図 5.19: シミュレーションによる 2 GeV/c の  $K$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、2つの MPPC から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合 (左) と粒子入射位置から最も近い MPPC から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合 (右)。多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の誤検出割合をそれぞれ赤、青、緑、黒、ピンクで表示した。黄線は  $K$  中間子の誤識別割合の目標性能の上限の 3% であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けた。入射位置と MPPC の領域に重なりがある領域 1、2、8、9 では MPPC の窓材で発生するチェレンコフ光により誤検出割合が悪化している。

#### 5.4.4 斜め方向のスキャン (入射粒子が $\pi^+$ の場合)

図 5.20(左) に 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、MPPC(B)、MPPC(C)、MPPC(E)、MPPC(F) の 4 つを用いた多重度分布から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率を示す。横方向のスキャンの場合と同様に、領域 1、2、8、9 のように粒子の入射位置と MPPC の位置に重なりがある場合には、MPPC の窓材に入射粒子がヒットした場合に発生するチェレンコフ光により多重度が増加し、検出効率を過大評価してしまっている可能性がある。またこの場合も入射位置が MPPC から遠ざかるほど検出効率が下がり、継ぎ目において最も検出効率が悪くなっていることが確認できる。2-4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対して目標とする検出効率を達成するには多重度の閾値を 2 に設定する必要がある。また継ぎ目付近の領域 4、5、6 を除けば、多重度 4 以上を要求した場合でも目標とする検出効率を達成する。

図 5.20(右) に 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、粒子入射位置から最も近い MPPC を用いた多重度分布から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率を示す。

領域 5 では MPPC(B)、MPPC(C)、MPPC(E)、MPPC(F) にほとんど均等にわかれて集光されるため、MPPC(E) のみで評価した場合には大幅に検出効率を落としており、4 セグメント分の情報が必須であると言える。さらに領域 4、6 といった継ぎ目から少し離れた領域でも、用いる MPPC の個数を減らしたことで多重度の閾値を 3 とした場合でも目標性能を満たさなくなっており、これらの領域でも複数セグメントの情報を用いるメリットがあると言える。1 セグメントの情報で検出効率を評価すると、継ぎ目の領域 5 を除いては 2-4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対して目標とする検出効率を達成するには多重度の閾値を 3 以下に設定する必要がある。さらにその周囲の 4、6 の領域を追加で除けば、多重度 4 以上を要求した場合に 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対して領域 3、7 で目標とする検出効率にわずかに満たないがこれを許容すればを多重度 4 以上を要求した場合でも目標性能を達成することが分かった。

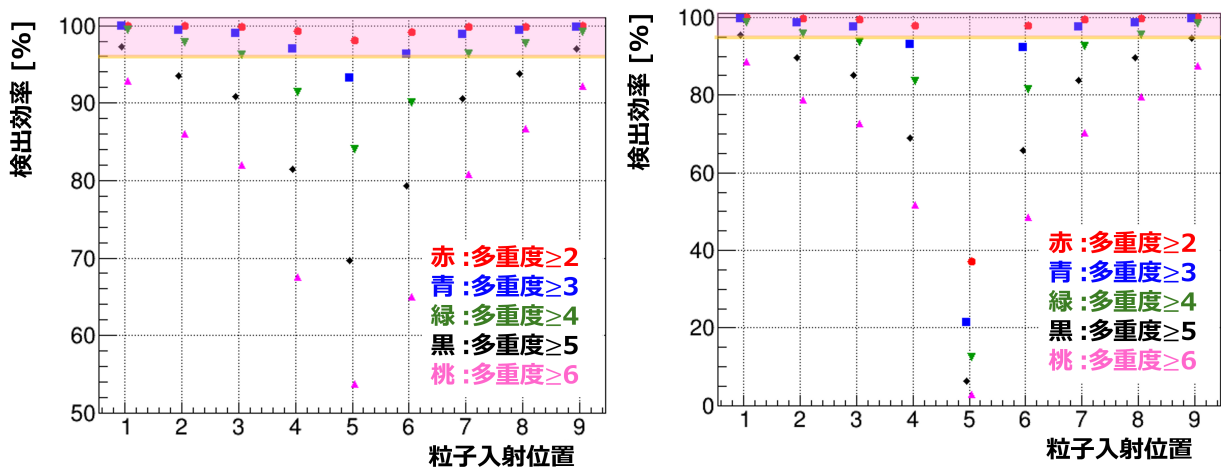


図 5.20: シミュレーションによる 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して斜め方向のスキャンを行った場合の、4つの MPPC から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率 (左) と粒子入射位置から最も近い MPPC から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率 (右)。多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の検出効率をそれぞれ赤、青、緑、黒、ピンクで表示した。黄線は  $\pi$  中間子の検出効率の要求性能の下限 95% であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けた。4つの MPPC の継ぎ目付近では集光効率が下がり大幅に検出効率を落としている。

#### 5.4.5 斜め方向のスキャン (入射粒子が $K^+$ の場合)

図 5.21(左) に 2 GeV/c の  $K^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、MPPC(B)、MPPC(C)、MPPC(E)、MPPC(F) の 4つを用いた多重度分布から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合を示す。この場合も入射位置と MPPC の領域に重なりがある領域 1、2、8、9 では MPPC の窓材で発生するチェレンコフ光により多重度が増加することで、閾値を 2 や 3 のように小さく設定した場合に急激に誤検出割合が悪化している。粒子が直接当たらない領域では多重度の閾値を 4 以上とした場合に目標性能を達成し、粒子が直接当たる領域でも多重度の閾値を 5 以上に設定した場合に目標性能に達することが分かった。

図 5.21(右) に 2 GeV/c の  $K^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、粒子入射位置から最も近い MPPC を用いた多重度分布から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合を示す。MPPC 4つを用いた場合に比べ、チャンネル数が 1/4 であるので誤検出割合が下がっており、粒子が直接当たらない領域では多重度の閾値を 2 以上に設定した場合に目標性能を達成し、粒子が直接当たる領域でも多重度の閾値を 3 以上に設定した場合に目標性能に達することが分かった。

以上のことからスキャンを行った 9 領域について、4つの集光器の継ぎ目以外の領域では粒子の入射位置から近い側の 1つの MPPC を用いて多重度の閾値 3 に設定することで目標性能を達成することが分かった。しかし、4つの集光器の継ぎ目に当たる領域 5 では MPPC 4つを用いると  $/\pi$  中間子の検出効率は多重度の閾値を 2 とすることで目標性能を達成できる一方で、ch 増加による暗電流の影響の増加のため  $K$  中間子の誤識別割合を十分に抑えるには閾値 4 以上が必要であり、この領域のみ目標性能を満たさないことが分かった。

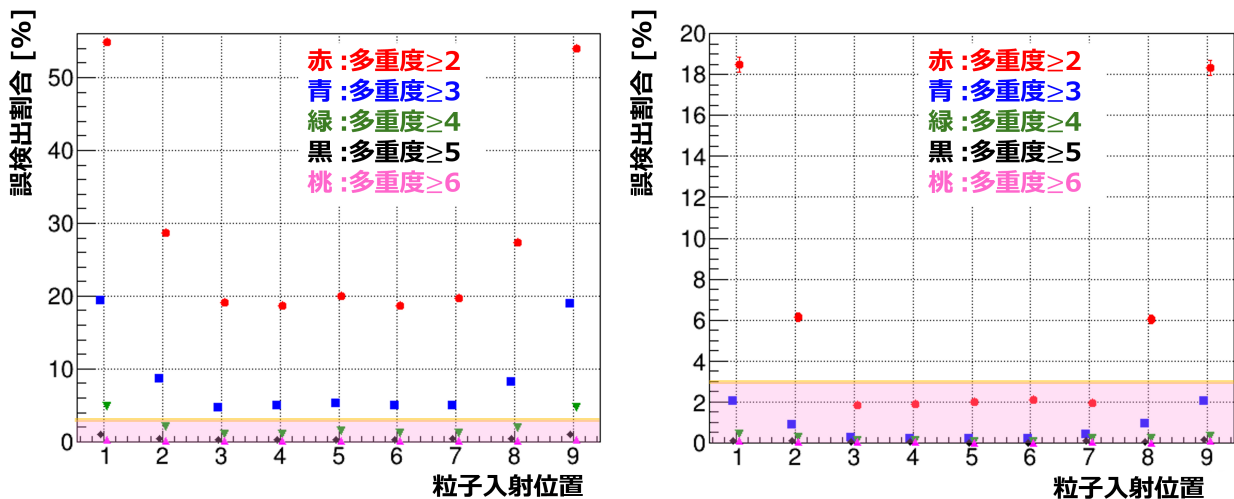


図 5.21: シミュレーションによる 2 GeV/c の  $K^+$  中間子を入射して斜め方向のスキャンを行った場合の、4つの MPPC から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合 (左) と粒子入射位置から最も近い MPPC から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合 (右)。多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の誤検出割合をそれぞれ赤、青、緑、黒、ピンクで表示した。黄線は  $K$  中間子の誤識別割合の目標性能の上限の 3% であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けした。入射位置と MPPC の領域に重なりがある領域 1、2、8、9 では MPPC の窓材で発生するチェレンコフ光により誤検出割合が悪化している。

## 5.5 複数セグメント thAC に関するまとめ

横方向及び斜め方向のスキャンの結果、セグメントの継ぎ目付近で局所的に光子の検出効率の低下がみられ、1セグメント分の MPPC に入射する光子のみで  $\pi$  中間子の検出効率を維持することは難しいことが分かった。逆に各セグメントの中心付近を通過し MPPC に直接粒子が入射する場合は MPPC の窓材からのチェレンコフ光により  $K$  中間子の誤検出割合が悪化するため粒子が MPPC に当たらない場合よりも閾値を高く設定する必要があることが分かった。そして粒子の入射位置によって多重度評価に用いる MPPC の個数や多重度の閾値を変更することにより、4つの集光器の継ぎ目に当たる領域を除く、ほとんどすべての領域にわたって目標とする  $\pi$  中間子の検出効率 95% 以上、 $K$  中間子の誤検出割合 3% 以下を保つことが可能であることを示した。また目標性能を満たさない領域は全体の領域に対して面積が 81 分の 1 の領域のみであるため実用上大きな問題はないと考えられる。図 5.22 に、多重度評価に用いる MPPC の個数と多重度の閾値の組み合わせを入射位置ごとに色分けしたものを示す。緑の領域が最も近い MPPC を用い、多重度閾値を 3 に設定する領域、青の領域が最も近い 2 つの MPPC を用い、多重度閾値を 3 に設定する領域、灰色の領域が目標性能に達さない領域である。ただし、これは粒子が検出器に対して垂直に入射した場合しか考慮していないため粒子が検出器に対して角度をもって入射する場合も考慮して解析に用いる MPPC の個数や閾値は最適化する必要がある。

いずれにせよ大型化した thAC の解析においては散乱粒子の飛跡情報が重要であることが新たに分かり、今後の thAC の開発においては散乱粒子の飛跡情報を組み合わせた解析方法を検討していく必要がある。また継ぎ目部分の改良策については例えば次のような案が考えられる。1つは図 5.23 のように、集光器を一行おきに横方向に半セグメントずらした構造にするというもので、これにより継ぎ目に集まる集光器の最大数は 3 つになるためチャンネル数の削減が可能である。また図 5.24 のように、集光器を正六角形にした場合も同様に継ぎ目に集まる集光器の最大数は 3 つになるためチャンネル数の削減が可能である。このように集光器の形状および配置の仕方もさらに検討していく必要がある。

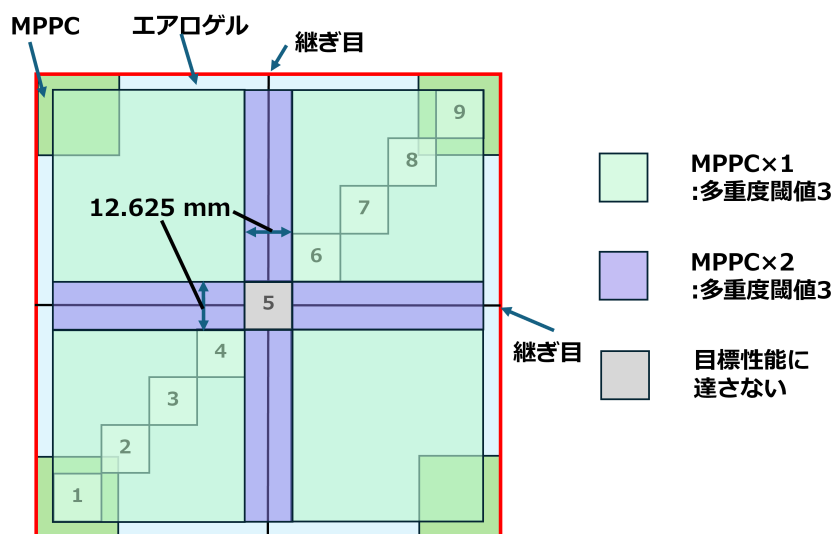


図 5.22: 複数セグメント thAC において多重度評価に用いる MPPC の個数と多重度の閾値の組み合わせを入射位置ごとに色分けしたもの (入射粒子の運動量が 2 GeV/c の場合)。緑の領域が最も近い MPPC を用い、多重度閾値を 3 に設定する領域、青の領域が最も近い 2 つの MPPC を用い、多重度閾値を 3 に設定する領域、灰色の領域が目標性能に達さない領域である。

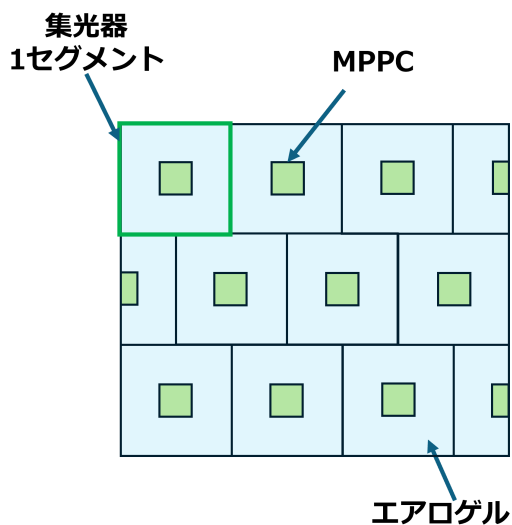


図 5.23: 実機における集光器配置の改善案。一列おきに半セグメントずつ集光器をずらすことによって継ぎ目に集まる集光器の数の最大値を 3 とすることができる。

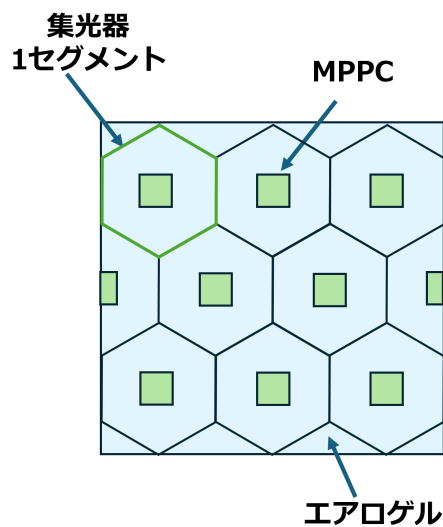


図 5.24: 実機における集光器形状の改善案。集光器を正六角形にすることによっても継ぎ目に集まる集光器の数の最大値を 3 とすることができる。

## 第6章 結論

### 6.1 本研究のまとめ

本研究では J-PARC の  $\pi 20$  ビームラインで計画されている、チャームバリオン分光実験をはじめとする一連のハドロン実験である MARQ 実験で汎用的に用いる散乱粒子識別検出器、閾値型エアロゲルチェレンコフ検出器 (thAC) の性能評価及び開発を行った。thAC は 2-4 GeV/c の  $\pi$  中間子及び  $K$  中間子の粒子識別を担い、要求性能は  $\pi$  中間子の検出効率 95% 以上、 $K$  中間子の誤識別割合 3% 以下である。

先行研究で屈折率 1.0086、透過長約 9 mm のエアロゲル、ピクセルピッチ 50  $\mu\text{m}$  の MPPC 及びチェレンコフ光を受光面積の小さい MPPC に効率的に集光するための円錐型の集光器を用いた試作機が開発された。またチェレンコフ光は 1 粒子の入射に対して複数放射されるため、64 個の MPPC が一体となった MPPC アレイを用いることで光子を検出した MPPC の個数 (=多重度) を用いて MPPC の暗電流バックグラウンドの影響を低減する手法が確立された。しかしながら先行研究で製作された試作機では十分な光子検出効率を得られず、目標性能に満たなかった。それを踏まえて本研究では、屈折率 1.007、透過長約 20 mm のより透明度の高いエアロゲル、より光子検出率の高い、ピクセルピッチ 75  $\mu\text{m}$  の MPPC を用いた試作機を製作し、SPring-8/LEPS2 ビームラインで約 1 GeV/c の陽電子を用いた性能評価を行った。MPPC へ印加するオーバー電圧を最適化したうえで光子検出数の評価を行い、先行研究で用いた試作機よりも改善していることが分かった。また MPPC からの信号を取得する際に、信号幅によって信号を取得するタイミングが変わってしまう Time walk を補正することにより、イベント選択の time window を狭く設定することが可能になり、MPPC からの暗電流バックグラウンドを抑制できることを示した。さらにこの実験結果をもとに Geant4 シミュレーションを用いて  $\pi$  中間子、 $K$  中間子に対する識別能力を評価し、現状の試作機で 3-4 GeV/c の  $\pi$  中間子の検出効率、 $K$  中間子の誤識別割合は目標に達することが分かった。

テスト実験の結果、さらなる光子検出効率の改善の必要性が判明したため、シミュレーションで集光器設計の再検討を行った。特に集光器出口の形状に注目し、MPPC が集光器出口全体を覆うような円錐型と四角錐型の集光器を新たに 2 つ設計し、最も集光効率の良い集光器とその長さを検討した結果、長さ 270 mm の四角錐型の集光器が最も光子検出効率が高いという結果が得られた。また最適化した集光器を試作機に組み込んだ場合には目標とする 2-4 GeV/c の全運動量領域での目標性能を達成することも分かり、実機製作の目的を立てることができた。

最後に、目標性能を達成した試作機を複数セグメント並べて大型化した thAC の性能の粒子の入射位置に対する一様性の評価を行った。その結果、集光器の継ぎ目付近では光子検出効率が低下しており、複数セグメントの情報をを用いて多重度の評価を行う必要があることが判明した。また複数の MPPC を用いる場合にはチャンネル数の増加により暗電流バックグラウンドも増加するため、多重度の閾値を入射位置によって調節する必要があることも判明した。そして多重度評価に用いる MPPC の個数、及び閾値の値を入射位置によって調節することで検出器のほぼすべての領域で目標性能を達成する見込みがあることを示した。

### 6.2 今後の課題と展望

本研究で行った集光器の最適化や複数セグメント thAC の一様性の確認はすべて入射粒子が検出器に対して垂直であることを仮定した。そのため検出器に対して角度を持って入射した粒子についての応答は未調査であり、検討の必要がある。特に大型化した場合には粒子の入射位置によって多重度評価に用いる MPPC の個数、及び閾値

の値を変更することを想定しているため、MPPC の個数、閾値の値の最適化においては角度を持って入射する粒子を検討に入れることは必須である。複数セグメント thAC の評価においては、粒子の入射領域をおよそ 13 mm 角として一様性の検討を行ったが、粒子の入射をより狭い領域に絞ることで詳細に入射位置ごとの評価方法を調査する必要もある。また集光器継ぎ目部分で局所的に性能の低下することが分かり、改善のために集光器の形状や配置の仕方についてより詳細な検討が必要である。

本研究の結果、目標性能を満たす試作機を確立することができ、大型化や実機製作の段階へ進める目途が立った。今後は大型化・実機製作の上で実際に目標性能に達するか評価を行い、MARQ 実験の実現を目指す。

# 謝辞

本研究及び本論文の執筆に当たり、大変多くの方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富田夏希助教には、解析や学会等の資料作成や発表、論文執筆など本当に多くの場面で手助けをしていただきました。定期的なミーティングだけでなく、行き詰まった時にはいつでも時間を見つけて相談に応じていただきました。私の拙い質問、意見にも常に真摯に向き合って下さる姿は、研究者としてだけでなく一人の人間として尊敬しております。本当に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、実験装置の扱い方、ROOT や Geant4 の基本的な使い方、実験の進め方といった研究における、あらゆる基礎を教えてくださいました。お忙しい中でも時間、場所を問わず助言をいただき本当に感謝しております。本当に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野海博之教授、石川貴嗣教授、鈴木謙助教、KEK の本多良太郎准教授をはじめとする  $\pi 20$ 、E50 コラボレーションのメンバーには毎回のミーティングでの確かなアドバイスをいただき、研究の大義を見失わずに進むことができました。本当にありがとうございました。

SPring-8 LEPS2 でのテスト実験の際には大阪大学核物理研究センターの赤石貴也特任研究員、大阪大学理学研究科の戸田匡哉さん、LEPS2 実験グループの方々には大変お世話になりました。初めての実験参加で多くのご迷惑をおかけしましたが、皆様のおかげで無事にデータを取得することができました。本当にありがとうございました。

また2年間の研究生生活を楽しく過ごせたのは、原子核・ハドロン物理学研究室の皆様のおかげです。時には学会発表の練習や研究のアドバイスなどの刺激をいただき、時にはリラックスして打ち解けた話をし、この2年間を実りあるものにしていただきました。中でも同じサブグループの小池諒太郎さんはいつも私のことを気にかけ、心の支えになっていました。本当にありがとうございました。

また研究室同期の石井大智君、小倉誠君、谷口智大君、橋本竣史君、柳井祥吾君とはサブグループこそ違うものの、大学であった時には親しくしていただきました。良き仲間に出会えて本当に嬉しく思います。本当にありがとうございました。

そして、大学院まで私がやりたいことを自由にやることを許していただいた両親と、辛いときや苦しいときに相談に乗ってくれた友人達に深く感謝いたします。本当にありがとうございました。

ここに感謝を述べた方々だけでなく、私と関わったすべての人のうち1人でも欠けていれば、本研究も本論文も完成することはなかったと思います。改めまして、皆様に深く感謝申し上げます。

# 付録A 複数セグメント thAC の運動量 4 GeV/c の粒子を用いたスキャン

5.4 節において複数セグメント thAC の検出器性能の一様性の評価のため、運動量 2 GeV/c の  $\pi$  中間子および  $K$  中間子を用いた。これは  $\pi$  中間子によるチェレンコフ光子数が運動量が低下した際に減少するため、thAC を運用する予定の運動量領域のうち最も運動量の低い 2 GeV/c において検出効率が最も悪化すると考えたためである。しかし確認のため運動量 4 GeV/c の  $\pi$  中間子および  $K$  中間子を用いて同様のスキャンを行い、この場合も一様性が保たれているかの確認を行った。

## A.1 横方向のスキャン (入射粒子が $\pi^+$ の場合)

図 A.1(左) に 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、MPPC(E) と MPPC(F) の 2 つを用いた多重度分布から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率を示す。図 5.18 に示した 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対する検出効率よりも高くなっており、多重度の閾値を 5 以下に設定した場合に 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対して目標とする検出効率を達成する。

図 A.1(右) に 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、粒子入射位置から最も近い MPPC を用いた多重度分布から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率を示す。この場合も図 5.18 に示した 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対する検出効率よりも高く、継ぎ目に当たる領域 5 以外では、多重度の閾値を 5 以下に設定した場合に 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対して目標とする検出効率を達成する。

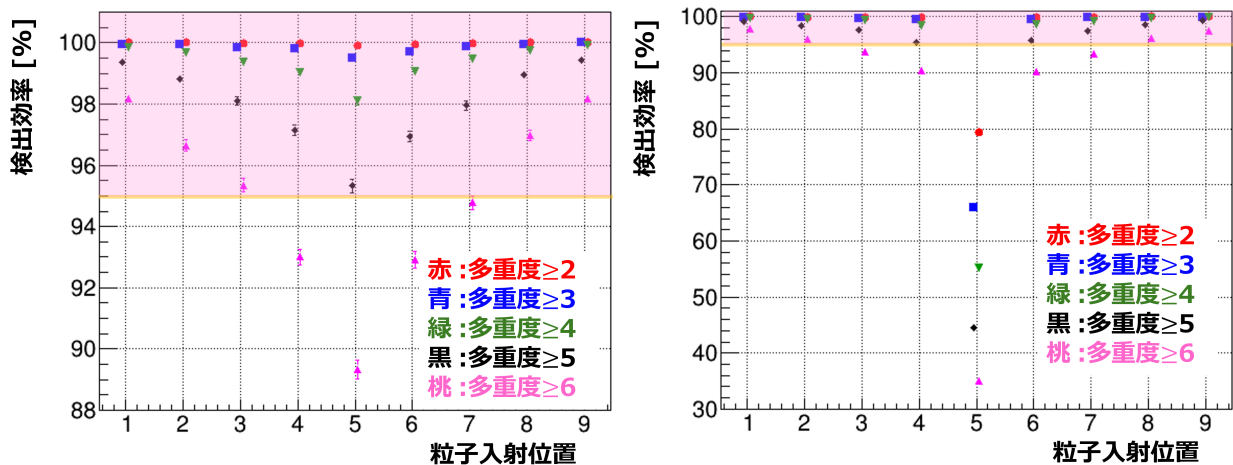


図 A.1: シミュレーションによる 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、2 つの MPPC から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率 (左) と粒子入射位置から最も近い MPPC から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率 (右)。多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の検出効率をそれぞれ赤、青、緑、黒、ピンクで表示した。黄線は  $\pi$  中間子の検出効率の要求性能の下限 95% であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けた。

## A.2 横方向のスキャン (入射粒子が $K^+$ の場合)

図 A.2 に 4 GeV/c の  $K^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の  $K^+$  中間子の誤検出割合を示す。左が MPPC(E) と MPPC(F) の 2 つを用いた多重度分布から得られる誤検出割合、(右) が粒子入射位置から最も近い MPPC を用いた多重度分布から得られる誤検出割合である。図 5.19 に示した 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対する誤検出割合とほとんど変わらない結果が得られた。

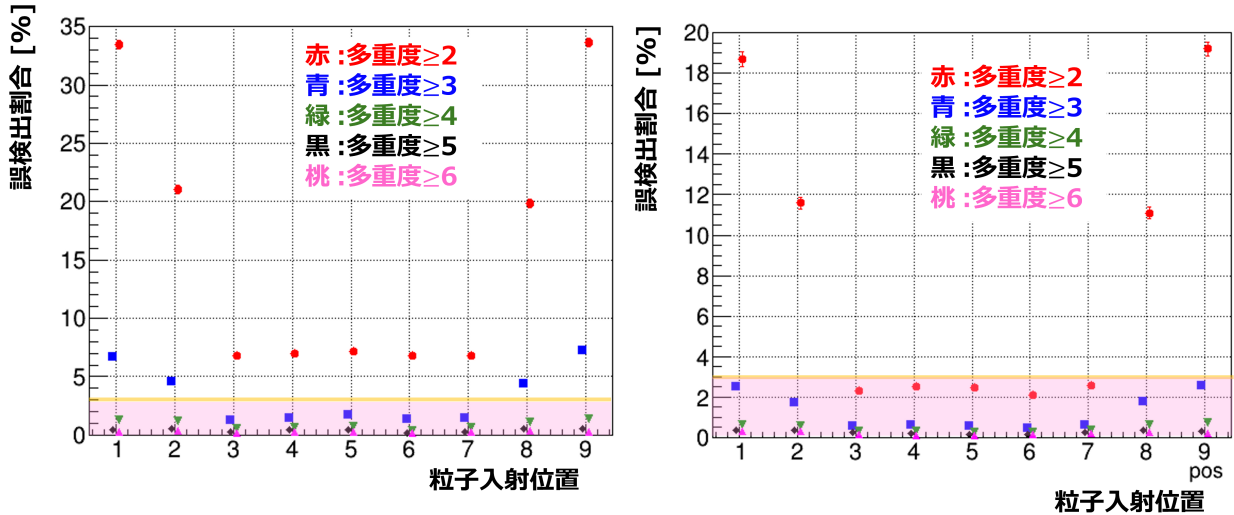


図 A.2: シミュレーションによる 4 GeV/c の  $K^+$  中間子を入射して横方向のスキャンを行った場合の、2 つの MPPC から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合 (左) と粒子入射位置から最も近い MPPC から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合 (右)。多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の誤検出割合をそれぞれ赤、青、緑、黒、ピンクで表示した。黄線は  $K$  中間子の誤識別割合の目標性能の上限の 3% であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けした。

## A.3 斜め方向のスキャン (入射粒子が $\pi^+$ の場合)

図 A.3(左) に 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して斜め方向のスキャンを行った場合の、MPPC(B)、MPPC(C)、MPPC(E)、MPPC(F) の 4 つを用いた多重度分布から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率を示す。図 5.20 に示した 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対する検出効率よりも高くなっており、多重度の閾値を 4 以下に設定した場合に 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対して目標とする検出効率を達成する。図 A.3(右) に 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して斜め方向のスキャンを行った場合の、粒子入射位置から最も近い MPPC を用いた多重度分布から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率を示す。この場合も 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対する検出効率 (図 5.20) よりも高く、継ぎ目に当たる領域 5 以外では、多重度の閾値を 3 以下に設定した場合に 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対して目標とする検出効率を達成する。

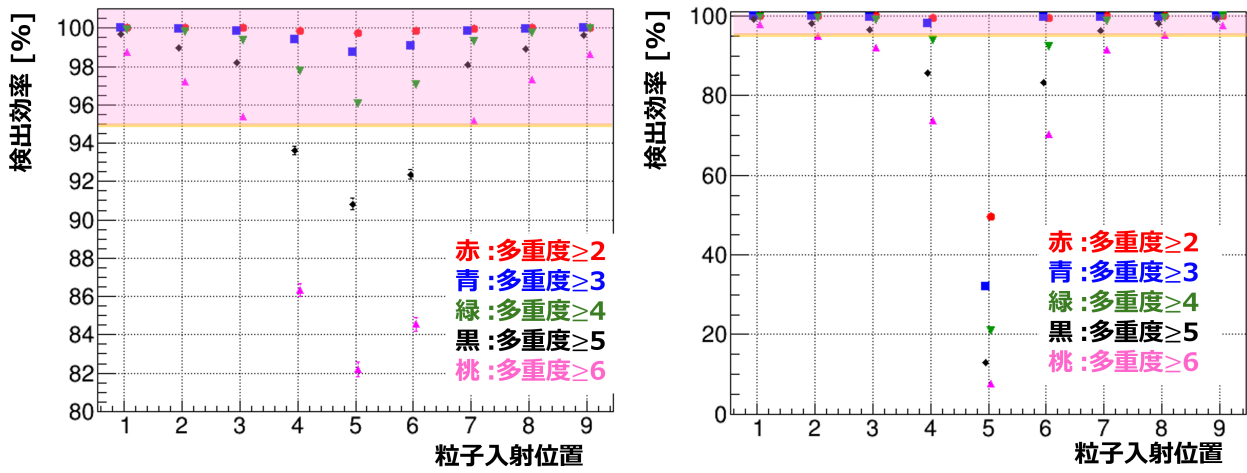


図 A.3: シミュレーションによる 4 GeV/c の  $\pi^+$  中間子を入射して斜め方向のスキャンを行った場合の、4つの MPPC から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率(左)と粒子入射位置から最も近い MPPC から得られる  $\pi^+$  中間子の検出効率(右)。多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の検出効率をそれぞれ赤、青、緑、黒、ピンクで表示した。黄線は  $\pi$  中間子の検出効率の要求性能の下限 95%であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けした。

#### A.4 斜め方向のスキャン(入射粒子が $K^+$ の場合)

図 A.4 に 4 GeV/c の  $K^+$  中間子を入射して斜め方向のスキャンを行った場合の  $K^+$  中間子の誤検出割合を示す。左が MPPC(B)、MPPC(C)、MPPC(E)、MPPC(F) の 4 つを用いた多重度分布から得られる誤検出割合、(右) が粒子入射位置から最も近い MPPC を用いた多重度分布から得られる誤検出割合である。図 5.21 に示した 2 GeV/c の  $\pi^+$  中間子に対する誤検出割合とほとんど変わらない結果が得られた。

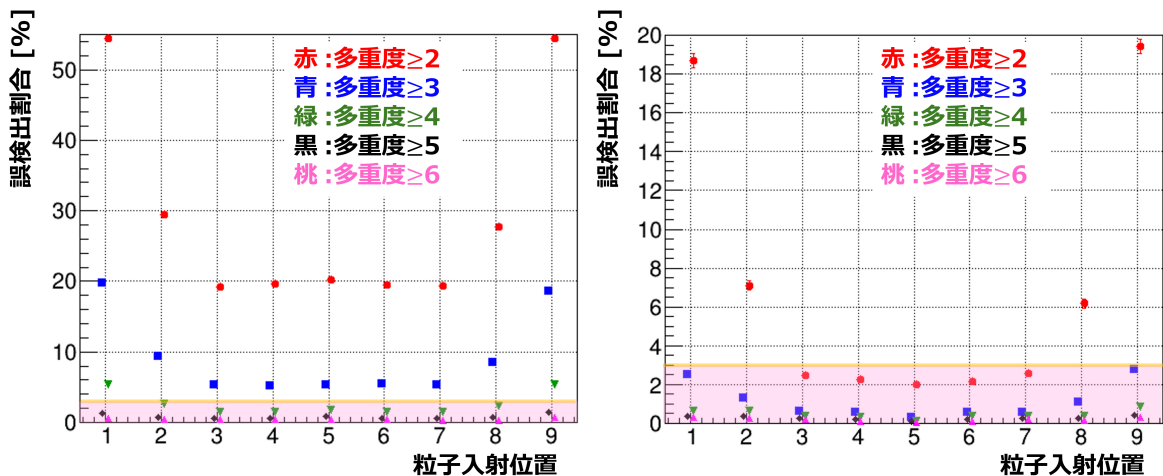


図 A.4: シミュレーションによる 4 GeV/c の  $K^+$  中間子を入射して斜め方向のスキャンを行った場合の、4つの MPPC から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合(左)と粒子入射位置から最も近い MPPC から得られる  $K^+$  中間子の誤検出割合(右)。多重度 2、3、4、5、6 以上を要求した場合の誤検出割合をそれぞれ赤、青、緑、黒、ピンクで表示した。黄線は  $K$  中間子の誤識別割合の目標性能の上限の 3%であり、要求性能に達している領域をピンク色で色付けした。

## A.5 運動量 4 GeV/c の粒子に対する検出器の性能のまとめ

運動量 4 GeV/c の場合、 $\pi$  中間子の発光量が増加するため識別能力が向上している。図 A.5 に、多重度評価に用いる MPPC の個数と多重度の閾値の組み合わせを入射位置ごとに色分けしたものを示す。緑の領域が最も近い MPPC を用い、多重度閾値を 3 に設定する領域、青の領域が最も近い 2 つの MPPC を用い、多重度閾値を 4 に設定する領域、黄色の領域が最も近い 4 つの MPPC を用い、多重度閾値を 4 に設定する領域である。粒子の入射位置によって多重度評価に用いる MPPC の個数や多重度の閾値を変更することにより、全ての領域にわたって目標とする  $\pi$  中間子の検出効率 95% 以上、 $K$  中間子の誤検出割合 3% 以下を保つことが可能であることを示した。

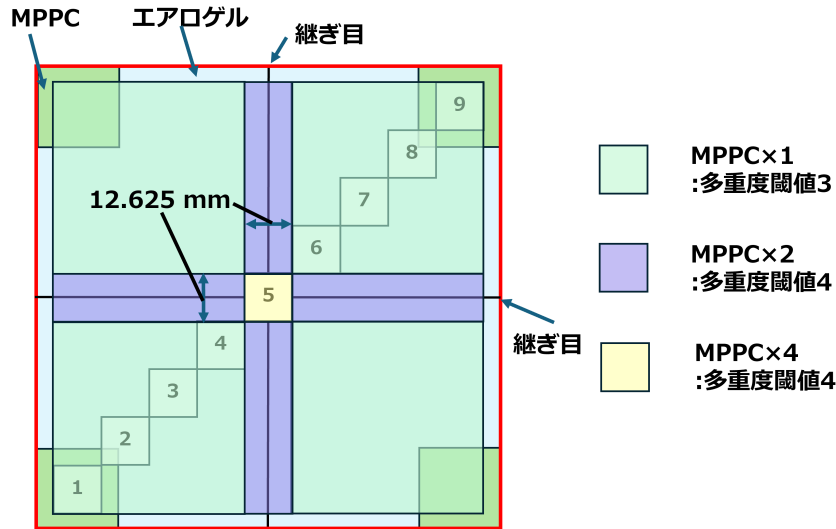


図 A.5: 複数セグメント thAC において多重度評価に用いる MPPC の個数と多重度の閾値の組み合わせを入射位置ごとに色分けしたもの (入射粒子の運動量が 4 GeV/c の場合)。緑の領域が最も近い MPPC を用い、多重度閾値を 3 に設定する領域、青の領域が最も近い 2 つの MPPC を用い、多重度閾値を 4 に設定する領域、黄色の領域が最も近い 4 つの MPPC を用い、多重度閾値を 4 に設定する領域である。

# 付録B J-PARC 高運動量ビームラインにおける $\pi$ 中間子及び陽子混合ビームを用いた検出器の性能評価実験

## B.1 性能評価試験の概要

2025年1月に J-PARC の高運動量ビームラインにおいて 2 次粒子の取り出し実験 (T106 実験) を行った。この実験で取り出した運動量  $5 \text{ GeV}/c$  の  $\pi$  中間子や陽子を第 3 章で用いた試作機を用いて検出器の性能評価を行った。ただし、thAC は実際には散乱粒子の識別に使用する予定であるが今回は入射ビームを測定しており、本番で想定される入射レート以上の粒子の入射による放射ダメージによって試作機に使用していた MPPC の暗電流が増加したため、第 3 章の試作機と異なり、先行研究で用いていた MPPC(S13361-3050AE-08) を用いた。暗電流レートの増加と光子検出効率の低下が原因で粒子識別性能については評価することができなかった。しかし、得られた多重度分布から混合ビーム粒子入射に対する  $\pi$  中間子と陽子の混合比を得られ、初めて  $\pi 20$  ビームラインにおける高運動量のハドロンビームに対して粒子識別を行い、多重度を用いた粒子識別手法を適用することが可能であることを示した。

## B.2 T106 テスト実験

図 B.1 に現在の J-PARC 高運動量ビームラインの模式図を示す [23]。また図 B.2 にランバートソン磁石の模式図を示す [23]。一次ビーム取り出しモードでは、メインリングから取り出された 1 次陽子ビームがランバートソン磁石で一部分が切り出されて分岐し、高運動量ビームラインに供給されている。 $\pi 20$  ビームライン完成時には分岐部に 2 次粒子標的を設置する予定である。また、このランバートソン磁石での 1 次陽子の切り出しの際に磁石と衝突した陽子によって  $\pi$  中間子や  $K$  中間子、ミューオンといった 2 次粒子が生成される。T106 実験では生成されたこれらの 2 次粒子のうち正電荷を持つものを高運動量ビームラインに初めて取り出し、評価を行った [24]。

本実験では 3、5、10  $\text{GeV}/c$  の 3 つの運動量を持つビームを取り出した。図 B.3 にシミュレーションで得られた運動量毎の 2 次粒子強度を示す。今回の実験では  $K$  中間子の生成量が  $\pi$  中間子や陽子に比べて 2 桁から 3 桁ほど小さいため、 $\pi$  中間子と  $K$  中間子を用いた thAC の性能評価を行うことはできなかった。そこで運動量  $5 \text{ GeV}/c$  の陽子と  $\pi$  中間子を用いた性能評価を行った。図 B.4 に運動量毎の陽子及び  $\pi$  中間子の  $1/\beta$  をプロットしたものを示す。運動量  $5 \text{ GeV}/c$  では  $\pi$  中間子はチェレンコフ光を発生し、陽子はチェレンコフ光を発生しないためこれを利用して性能評価を行った。ただし  $K$  中間子は  $\pi$  中間子や陽子に比べて十分少ないとして無視した。

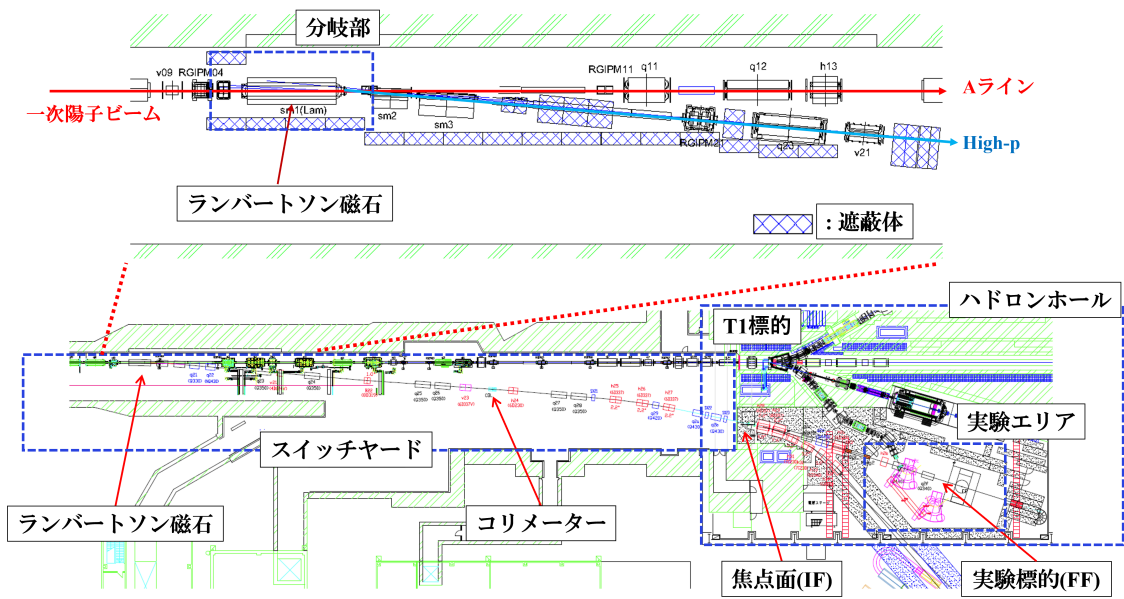


図 B.1: J-PARC 高運動量ビームラインの模式図 [23][24]。

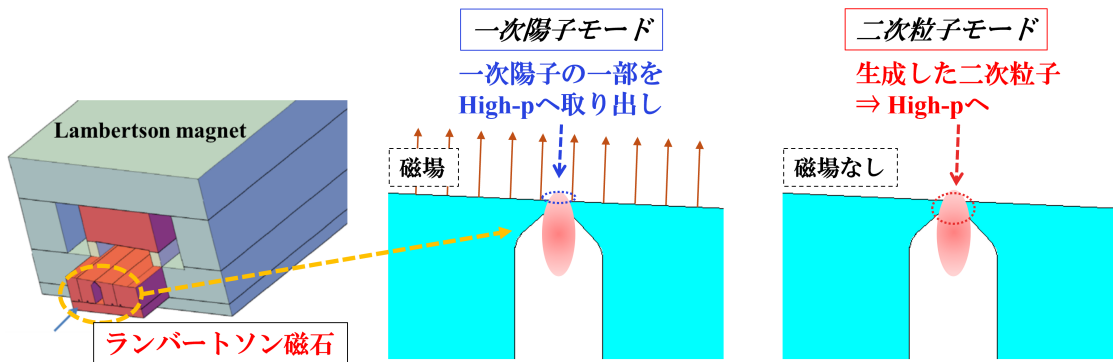


図 B.2: ランバートソン磁石の模式図 [23]。

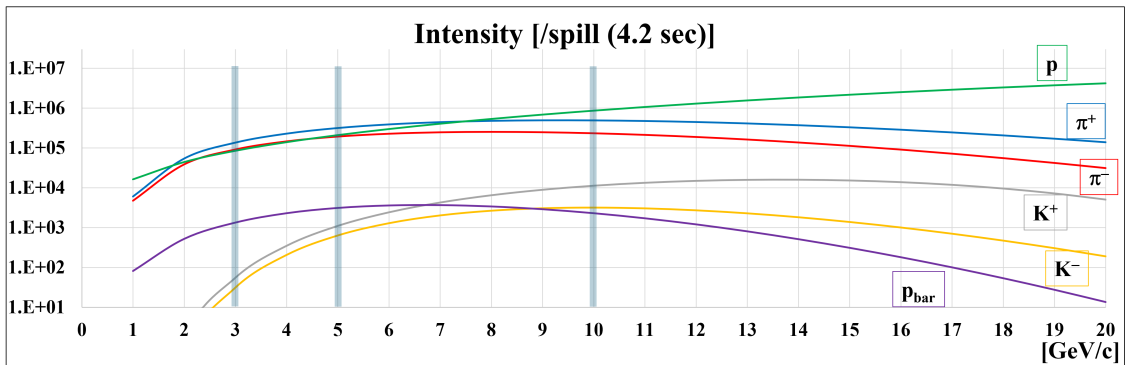


図 B.3: シミュレーションによる運動量毎の2次粒子強度。

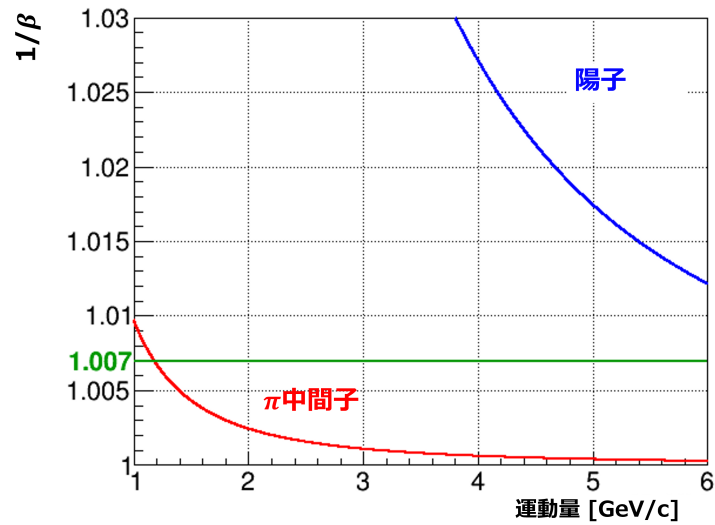


図 B.4:  $\pi$  中間子と陽子について運動量毎の  $1/\beta$ 。それぞれの粒子の質量は静止質量を用いた。式 (2.1) より屈折率 1.007 の物質中では緑で表示した線以下の  $1/\beta$  をもつ粒子がチェレンコフ放射を起こす。

### B.3 実験セットアップ

図 B.5 に T106 テスト実験のセットアップを示す。T1、T2 は約 20 cm×20 cm のプラスチックシンチレータの左右端に光電子増倍管を接続したタイミング検出器である。T1、T2 に同時にヒットがあることを確認して、ビームの入射を確認した。T1 と T2 の間に設置された BFT1,2 及び thAC 前方に置かれた BFT3 は第 3 章でも用いたビームファイバトラッカーで、粒子の飛跡検出を行う。B-RICH(ビームリングイメージングチェレンコフ検出器) はチェレンコフ光のリングイメージングを用いることで粒子識別を行う粒子識別検出器である。ただし本解析では B-RICH の情報を用いなかった。thAC は基本的には第 3 章で用いた試作機と同様である。唯一違う点として、実験当初は第 3 章で用いた MPPC(S13361-3075AE-08) を用設置していたが MPPC へのビーム入射による放射ダメージにより損傷し、性能評価にも散るデータを取得することが出来なかった。そのため予備の、先行研究で用いていた光子検出効率の劣る MPPC(S13361-3050AE-08) に変更して取得したデータを用いて性能評価を行った。thAC の後方にはシンチレータの片側に光電子増倍管を取り付けたタイミング検出器 (T3 から T6) とハドロン除去のための鉄ブロックを交互に配置したミュオンフィルターが設置された。

thAC のデータ取得の方法については第 3 章と同じく、NIM-EASIROC と AMANEQ HR-TDC を用いて行った。その上で本番と同様の、MPPC の信号タイミング (leading TDC) と信号幅 (TOT) を用いた解析を行った。また、先行研究で用いていた MPPC でもビーム入射に伴い、放射ダメージによる暗電流の増加がみられたため、解析は MPPC への放射ダメージが最も少ない、データ取得開始直後の run データを用いて行った。

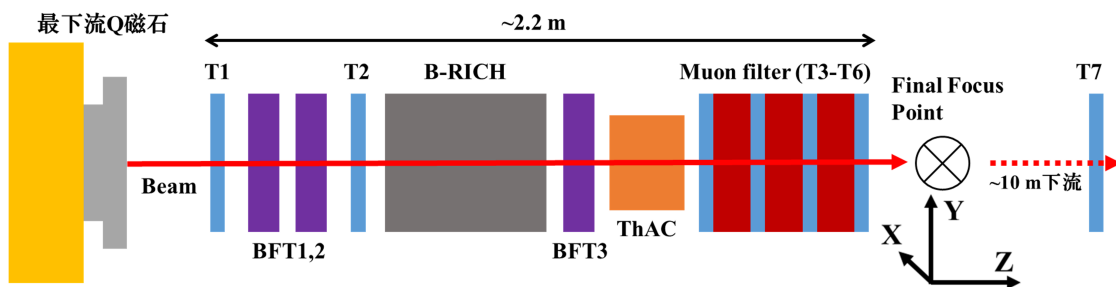


図 B.5: T106 実験セットアップの模式図

## B.4 解析手法

解析は基本的には 3.4 節と同様で以下の手順で行った。

1. 信号タイミングの時間原点の補正
2. BFT 及びプラスチックシンチレータを用いたイベントセレクト
3. MPPC のタイミング情報の Time walk 補正
4. MPPC のタイミング情報を用いたイベントセレクト

イベント選択後のタイミング情報を用いて MPPC の多重度分布を得て  $\pi$  中間子と陽子の混合比を評価した。

### B.4.1 信号タイミングの時間原点の補正

本解析ではセットアップ最上流に設置したタイミングカウンタである T1 のヒット情報を用いてタイミング原点を決定した。T1 は粒子入射時にプラスチックシンチレータで発生する光子を両端の光電子増倍管で検出しているため、一端のみの情報では時間原点に粒子のヒット位置依存性が生じてしまう。そのため両端のヒットタイミングの平均値をとることでこの効果を打ち消した。

また T1 の両端のヒットタイミングの平均値をとった場合も 3.5.2 節で説明した Time walk による信号幅依存性も生じる。図 B.6 に T1 の両端のヒットタイミングの平均値と T1 両端で得た信号幅の和の相関を示す。縦軸は T1 の両端のヒットタイミング (leading TDC) の平均値であり、時間の原点を T2 の両端のヒットタイミング (leading TDC) の平均値とした。横軸は T1 の両端で得られた信号の信号幅 (TOT) をイベントごとに足し合わせた値である。この分布について図に赤線で表示した 2 次の補正関数を用いて T1 両端のタイミング情報に対する Time walk 補正を同時に行った。

図 B.7 に T1 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端の leading TDC の平均値と T1 両端で得た TOT の和の相関を示す。これによって T1 におけるのヒットタイミングのずれを補正することができたが、時間の原点として T2 の両端の leading TDC の平均値を用いたため今度は T2 での Time walk を考慮する必要が生じる。

図 B.8 に T1 に対する Time walk 補正後の T1 の両端のヒットタイミングの平均値と T2 両端で得た信号幅の和の相関を示す。縦軸は前述の T1 に対する Time walk 補正を行った後の、T1 の両端の leading TDC の平均値であり、時間の原点は T2 の両端の leading TDC の平均値である。横軸は T2 の両端で得られた信号の信号幅 (TOT) をイベントごとに足し合わせた値である。この分布についても図に赤線で表示した 2 次の補正関数を用いて T2 両端のタイミング情報に対する Time walk 補正を同時に行った。

図 B.9 に T1、T2 に対する Time walk 補正後の T1 の両端のヒットタイミングの平均値と T2 両端で得た信号幅の和の相関を示す。縦軸は前述の T1、T2 に対する Time walk 補正を行った後の、T1 の両端の leading TDC

の平均値であり、時間の原点は T2 の両端の leading TDC の平均値である。横軸は T2 の両端で得られた信号の信号幅 (TOT) をイベントごとに足し合わせた値である。さらに図 B.10 に T1、T2 に対する Time walk 補正後の T1 の両端のヒットタイミングの平均値と T1 両端で得た信号幅の和の相関を示す。縦軸は前述の T1、T2 に対する Time walk 補正を行った後の、T1 の両端の leading TDC の平均値であり、時間の原点は T2 の両端の leading TDC の平均値である。横軸は T1 の両端で得られた信号の信号幅 (TOT) をイベントごとに足し合わせた値である。この 2 つの図から T1 でのタイミング情報について T1 と T2 どちらの信号幅依存性も打ち消すことができていることが分かる。

また図 B.11 に T1、T2 に対する Time walk 補正後 T1 と T2 の時間差の分布を示す。ガウスフィッティングにより分布を評価し、T1、T2 を合わせた時間分解能が  $\sigma = 0.287 \pm 0.001$  [ns] と得られた。

以降の解析では時間の原点としてこの T1、T2 に対する Time walk 補正を行った後の、T1 の両端の leading TDC の平均値を時間原点とし、T1\_mean と表記する。

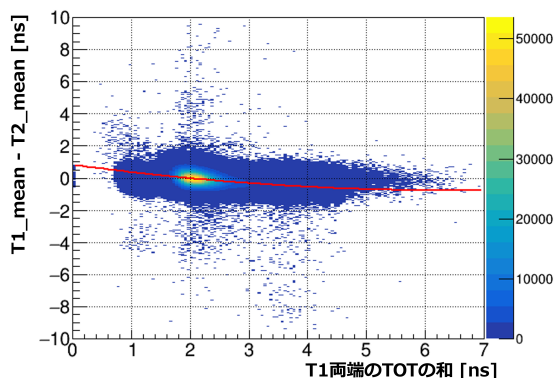


図 B.6: T1 の両端のヒットタイミングの平均値と T1 両端で得た信号幅の和の相関。縦軸は T1 の両端の leading TDC の平均値であり、時間の原点を T2 の両端の leading TDC の平均値とした。横軸は T1 の両端で得られた TOT をイベントごとに足し合わせた値である。補正に用いた関数を赤線で表示した。

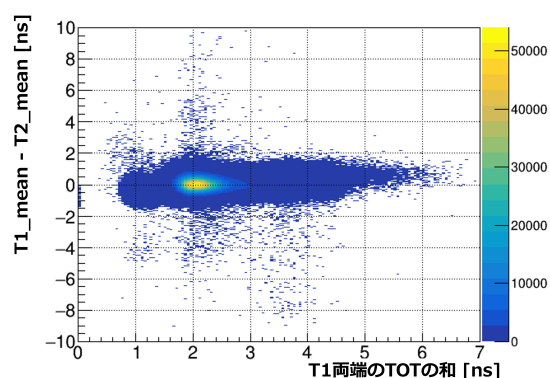


図 B.7: T1 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端の leading TDC の平均値と T1 両端で得た TOT の和の相関。縦軸は T1 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端の leading TDC の平均値であり、時間の原点を T2 の両端の leading TDC の平均値とした。横軸は T1 の両端で得られた TOT をイベントごとに足し合わせた値である。

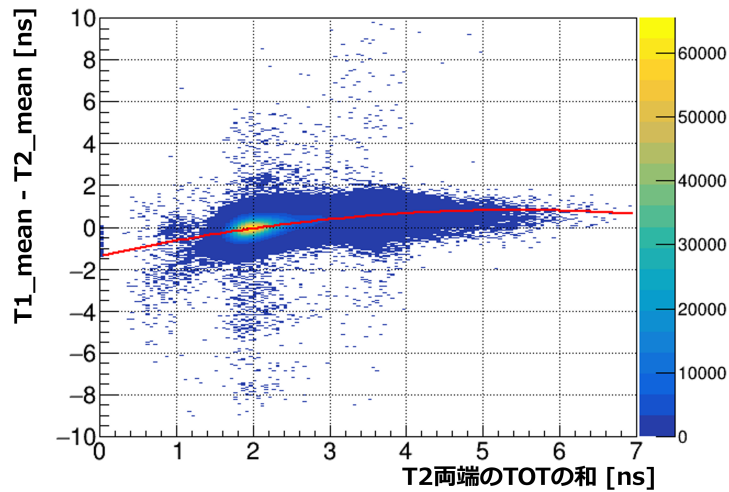


図 B.8: T1 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端のヒットタイミングの平均値と T1 両端で得た信号幅の和の相関。縦軸は T1 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端の leading TDC の平均値であり、時間の原点を T2 の両端の leading TDC の平均値とした。横軸は T2 の両端で得られた TOT をイベントごとに足し合わせた値である。補正に用いた関数を赤線で表示した。

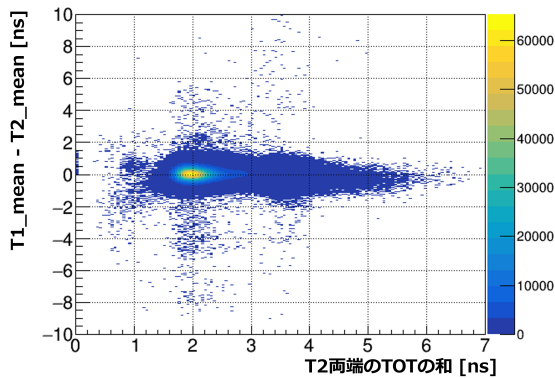


図 B.9: T1、T2 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端の leading TDC の平均値と T1 両端で得た TOT の和の相関。縦軸は T1、T2 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端の leading TDC の平均値であり、時間の原点を T2 の両端の leading TDC の平均値とした。横軸は T2 の両端で得られた TOT をイベントごとに足し合わせた値である。

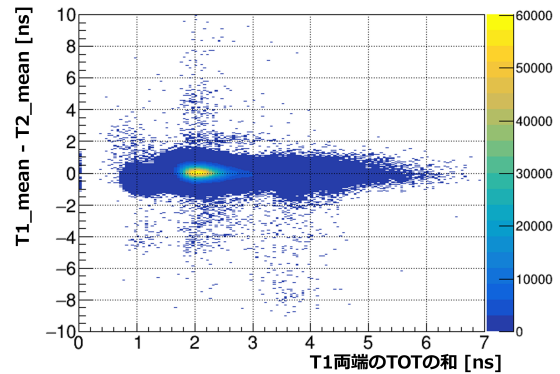


図 B.10: T1、T2 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端の leading TDC の平均値と T1 両端で得た TOT の和の相関。縦軸は T1、T2 に対する Time walk を補正した後の T1 の両端の leading TDC の平均値であり、時間の原点を T2 の両端の leading TDC の平均値とした。横軸は T1 の両端で得られた TOT をイベントごとに足し合わせた値である。

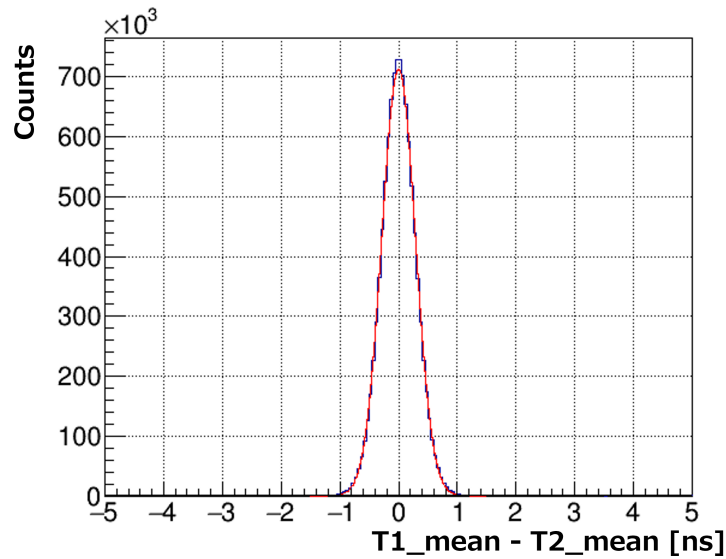


図 B.11: T1、T2 に対する Time walk 補正後 T1 と T2 の時間差の分布。

#### B.4.2 BFT 及びプラスチックシンチレータを用いたイベントセレクト

ビームがエアロゲルを通過していることを要求するため設置された 3 台の BFT を用いて算出された粒子の飛跡を用いたイベント選択を行った。エアロゲルのサイズは 90 mm×90 mm であり、その中心部分の 60 mm×60 mm の領域をエアロゲルの前面及び背面で通過していることを要求した。これによりエアロゲル端をかすめるように通過するイベントを除外した。またビームが thAC を通過していることを保証するため、ミュオンフィルターの最前面に設置されたサイズが約 20 cm×20 cm プラスチックシンチレータ (T3) のヒットを要求した。図 B.12 に T3 のヒットタイミング (leading TDC) の分布を示す。図の赤線で囲まれた領域に leading TDC を持つことをビームの T3 へのヒットと定義した。

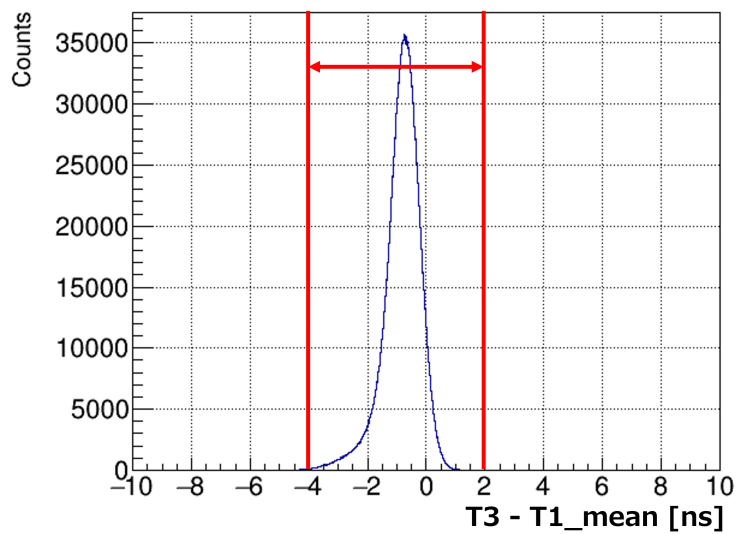


図 B.12: T3 のヒットタイミング (leading TDC) の分布。時間の原点は T1\_mean である。赤線で囲まれた領域に leading TDC を持つことをビームの T3 へのヒットと定義した。

### B.4.3 MPPC のタイミング情報の Time walk 補正

暗電流の影響を低減しつつ、MPPC への光子ヒットタイミング情報を取得するために MPPC の leading TDC の Time walk 補正を行った。手法は 3.5.2 節とほとんど同様であるため詳細は省略する。

図 B.13 に MPPC の leading TDC と TOT の相関を示す。縦軸は MPPC の leading TDC [ns] で、時間の原点は T1\_mean であり、横軸は TOT [ns] である。分布は 64 ch 分の分布を重ね合わせたものである。

3.5.2 節と同様の方法で ch ごとに 3 つの 2 次関数と定数関数を用いた補正関数を決定した。なお、この実験では第 3 章で用いたものと異なる MPPC 読み出し基盤を使用しており、信号の歪みは見られなかったため読み出しごとに補正関数の区切り方を変更することはしなかった。図 B.14 に 1 つの MPPC チャンネルに対する leading TDC と TOT の相関に対する補正関数を示す。補正に用いた 3 つの 2 次関数をそれぞれ赤、青、緑の線で表示した。TOT 30 ns 以下についてはイベント数が少なく十分にフィットがあてないが、以降の解析で 1 光子に対応する TOT に満たないイベントはイベントセレクトで除外したため大きな影響はないと考えられる。また TOT 65 ns 以上の領域ではフィット関数が、TOT の増加ともなって信号タイミングが遅くなるような関数になってしまっており、Time walk の実情を反映し切れていないことが分かる。しかしこれについても TOT 65 ns 以上の領域のイベントが極端に少ないため大きな影響はないとして解析を行った。

図 B.15 に Time walk 補正後の MPPC の leading TDC と TOT の相関を示す。分布は 64 ch 分の分布を重ねたものである。Time walk 補正により leading TDC の TOT 依存性を打ち消すことができていることが分かる。

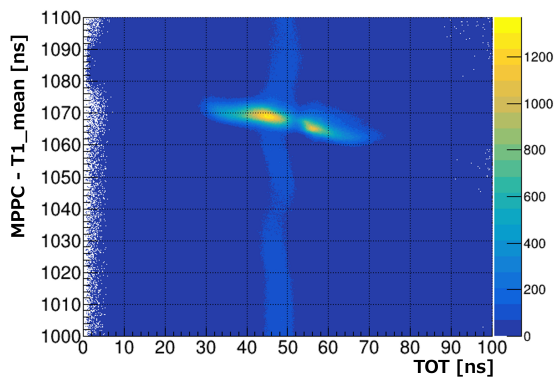


図 B.13: MPPC の leading TDC と TOT の相関。分布は 64 ch 分の分布を重ねたものである。

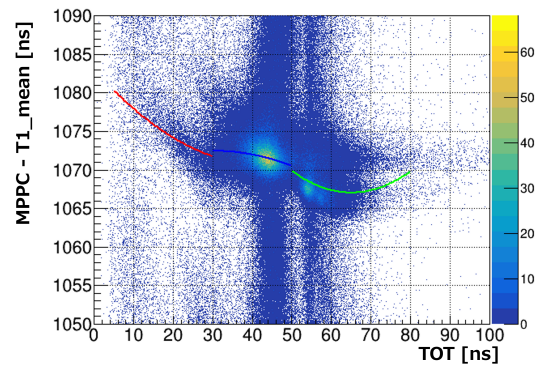


図 B.14: 1 つの MPPC チャンネルに対する leading TDC と TOT の相関に対する補正関数。補正に用いた 3 つの 2 次関数をそれぞれ赤、青、緑の線で表示した。

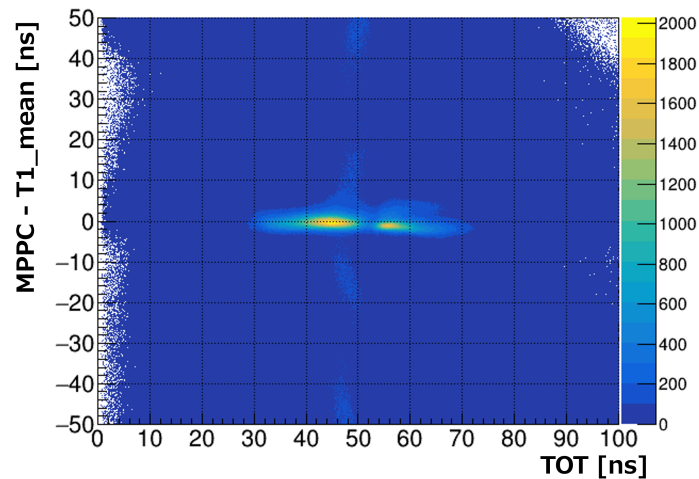


図 B.15: Time walk 補正後の MPPC の leading TDC と TOT の相関。分布は 64 ch 分の分布を重ねたものである。

#### B.4.4 MPPC のタイミング情報を用いたイベントセレクト

B.4.3 節で説明した Time walk 補正後の分布を用いてイベントセレクトを行った。Time walk 補正後の leading TDC の分布を図 B.16 に示す。分布は 64 ch 分の分布を重ね合わせたものである。ビーム粒子に起因する光子の MPPC へのヒットしたイベントを選ぶために、図の赤線で囲まれた領域 (-5 ns から 10 ns の領域) に leading TDC を持つことを要求した。

また TOT を用いて 1 光子に満たない信号幅を持つイベントの除外を行った。図 B.17 に MPPC の TOT 分布を示す。黒線は leading TDC によるイベントカットを行う前の TOT 分布であり、青線は図 B.16 に示した、赤線の領域に含まれる leading TDC を持つイベントの TOT 分布である。分布は 64 ch 分の分布を重ね合わせたものである。分布のピークは左から 1 光子、2 光子の信号に対応している。また TOT25 ns 以下の分布は信号幅が 1 光子に満たないものであり、これは電源等に由来するベースラインノイズによる信号であると考えられる。そのため TOT25 ns 以下のイベントを除外し、図 B.17 に赤線で示した領域の TOT を持つイベントを選択した。また暗電流の評価についてはビームタイミングと同期しない、time window15 ns、TOT25 ns 以上のイベントを用いた。

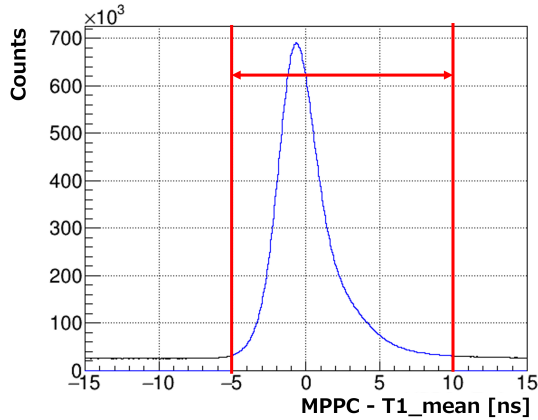


図 B.16: Time walk 補正後の MPPC の leading TDC。

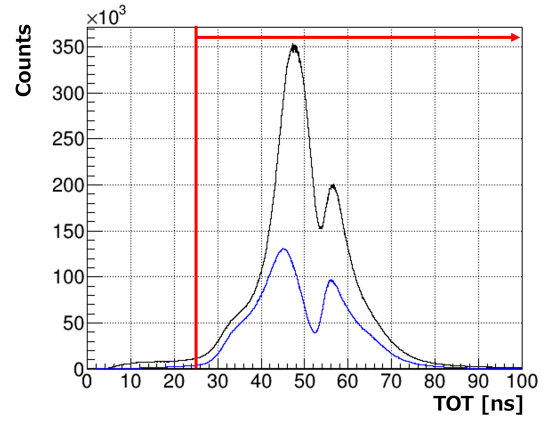


図 B.17: MPPC の TOT 分布。黒線は leading TDC によるイベントカットを行う前の TOT 分布であり、青線は図 B.16 に示した、赤線の領域に含まれる leading TDC を持つイベントの TOT 分布である。

## B.5 結果と考察

### B.5.1 運動量 5 GeV/c の $\pi$ 中間子及び陽子の混合比の算出

B.4 節で選択したイベントを用いて得られた多重度分布を図 B.18 に示す。分布の左側のピークがチェレンコフ光を発さない粒子、すなわち陽子と暗電流によるものである。また分布の右側のピークがチェレンコフ光を発する粒子、すなわち  $\pi$  中間子によるものである。陽子及び暗電流による分布と  $\pi$  中間子による分布それぞれがポアソン分布に従うと仮定して 2 つのポアソン分布の重ね合わせである式 (B.1) を用いてフィッティングし、それぞれの分布を評価した。

$$f(x) = c_1 \times \frac{\lambda_1^x}{x!} e^{-\lambda_1} + c_2 \times \frac{\lambda_2^x}{x!} e^{-\lambda_2} \quad (\text{B.1})$$

フィッティングによって得られた陽子及び暗電流による分布の期待値は  $\lambda_1 = 2.24 \pm 0.001$ 、スケール因子は  $c_1 = (3.88 \pm 0.002) \times 10^6$  である。またフィッティングによって得られた  $\pi$  中間子による分布の期待値は  $\lambda_2 = 9.47 \pm 0.001$ 、スケール因子は  $c_2 = (5.75 \pm 0.003) \times 10^6$  である。本来は 2 つの分布の間に閾値を設け、粒子識別を行う設計であるが、前述のように MPPC の放射ダメージによる暗電流の増加のため 2 つの分布を閾値によって十分に分けることができない。そのため本解析ではフィッティングで得られた 2 つのポアソン分布の面積比が取り出したビーム中の陽子と  $\pi$  中間子の混合比に対応するとして評価を行った。ポアソン分布の面積はスケール因子によって決まるため、陽子と  $\pi$  中間子の混合比は  $c_1$  と  $c_2$  の比であるから

$$N_{\text{陽子}} : N_{\pi} \simeq c_1 : c_2 \simeq 3.88 \times 10^6 : 5.75 \times 10^6 \simeq 0.40 : 0.60 \quad (\text{B.2})$$

と得られた。図 B.3 に示したシミュレーションによると運動量 5 GeV/c における陽子と  $\pi$  中間子の混合比は  $N_{\text{陽子}} : N_{\pi} = 0.40 : 0.60$  と計算されており、シミュレーションと一致する結果が得られた。

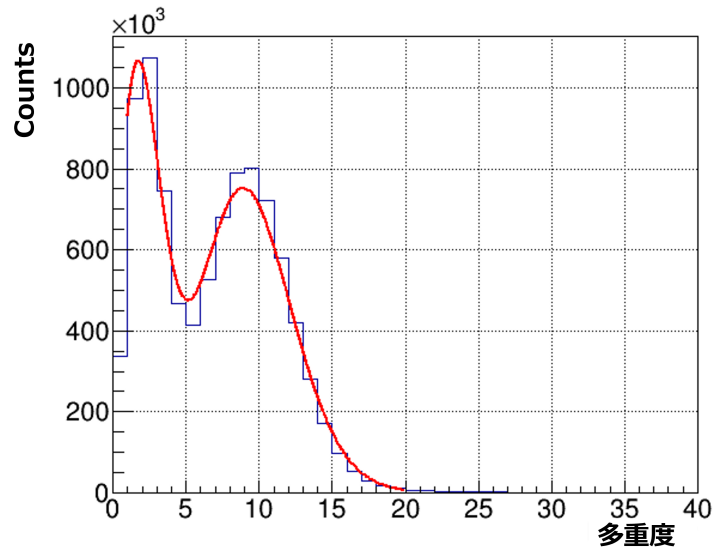


図 B.18: 運動量 5 GeV/c の  $\pi$  中間子及び陽子に対する多重度分布。分布の左側のピークが陽子と暗電流によるもの、分布の右側のピークが  $\pi$  中間子によるものである。赤線で示した、式 (B.1) を用いてフィッティングし、それぞれの分布を評価した。

### B.5.2 暗電流による多重度分布

図 B.19 にビームタイミングと同期しない、time window 15 ns、TOT 25 ns 以上のイベントをによる多重度分布を示す。分布をポアソン分布 (式 (3.3)) を用いてフィッティングし、評価した。フィッティングによって得られた暗電流分布の期待値は  $\lambda_1 = 1.09 \pm 0.0004$  である。3.6.1 節で評価した暗電流多重度と比較を行う。先行研究で用いた MPPC は第 3 章のテスト実験で用いた MPPC とスペック上の暗電流レートは同じである (表 2.2)。また time window が同じではないため単純な比較はできないが、暗電流は確率的に起こるため time window の幅と暗電流多重度の期待値は大まかに比例しており、これを考慮すると本実験での暗電流レートはテスト実験の際よりも大きくなっていることがわかる。これは放射ダメージによって試作機に使用していた MPPC の暗電流が増加した影響である。また、陽子ビーム通過起因の光子が発生しないような理想的な場合には、暗電流による分布のポアソン分布の期待値と、B.5.1 節で評価した陽子と暗電流による分布のポアソン分布の期待値は一致するはずである。しかしながら陽子と暗電流による分布のポアソン分布の期待値で 1 程度大きくなっている。この差はビーム起因の光子であると考えられ、主な要因はエアロゲルケースであるナフロンでのシンチレーション光、MPPC にビームが入射した際の窓材でのチェレンコフ光が挙げられる。特に MPPC がビーム軸上に設置された本実験セットアップでは、後者の影響は強く表れていると考えられる。

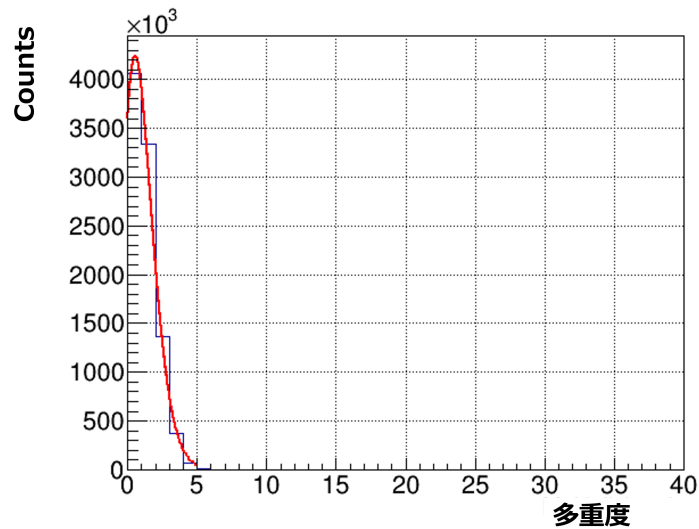


図 B.19: 暗電流による多重度分布。赤線で示した、ポアソン分布 (式 (3.3)) を用いてフィッティングし、評価した。

### B.5.3 考察・まとめ

本解析により T106 実験で初めて高運動量ビームラインに取り出した  $5 \text{ GeV}/c$  の陽子及び  $\pi$  中間子混合ビームに対して MPPC の多重度分布から混合比を得ることが出来た。得られた混合比はシミュレーションで予測された混合比とよく一致しており、チェレンコフ光の有無を反映した多重度分布が得られていることが確認でき、多重度を用いた粒子識別手法が高運動量のハドロンに対しても適用可能であることを示した。

ただし閾値を用いた粒子識別手法を用いるためには光子検出効率や暗電流レート低減の必要がある。光子検出効率については第 3 章で用いたピクセルピッチ  $75 \mu\text{m}$  の光子検出効率の良い MPPC を用いることで改善が期待できる。

また実際の環境で想定されている thAC への散乱粒子の入射レートは最大強度でも  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  の領域に対して  $2 \text{ kHz}$  から  $3 \text{ kHz}$  と予測されている。一方でビーム軸上に MPPC を設置した本実験では MPPC のサイズの  $25.8 \text{ mm} \times 25.8 \text{ mm}$  の領域へ  $80 \text{ kHz}$  のレートで 2 次粒子ビームを入射しており、本番環境よりも MPPC への負荷が大きかったことが分かる。そのため放射ダメージによる暗電流レートの増加は本番環境では今回の結果より改善する可能性が高い。一方で MPPC を通過する粒子による窓材からのチェレンコフ光は識別能力を大幅に低下させる可能性が示唆されている。このことは 5.4 節で行ったシミュレーションからも同じことが示唆されている。そのため MPPC を通過する粒子による窓材からのチェレンコフ光の影響を抑えるような集光器、MPPC の配置の仕方について今後も検討していく必要があると考えられる。

## 参考文献

- [1] M. Anselmino *et al.* Diquarks , 1993 , Rev. Mod. Phys. 65, 1199 (1993)
- [2] K. Shirotori. "Hadron spectroscopy with high-momentum hadron beams" JPS Conf.Proc. 33 (2021) 011115
- [3] H. Noumi *et al.* J-PARC E50 proposal
- [4] J-PARC 大強度陽子加速器施設 ハドロン実験施設  
<https://www.j-parc.jp/c/facilities/nuclear-and-particle-physics/hadron.html>. Accessed on 23 January 2026.
- [5] K. Aoki *et al.* Extension of the J-PARC Hadron Experimental Facility: Third White Paper, 2021. arXiv:2110.04462 [nucl-ex].
- [6] 赤石貴也. 2018 年度大阪大学大学院理学研究科物理学専攻 修士論文.  
<https://nucl.phys.sci.osaka-u.ac.jp/public>
- [7] 鈴木翔太. 2023 年度京都大学大学院理学研究科 修士論文.  
<https://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/articles-wp/>
- [8] 岡崎 凜太郎. 2024 年度京都大学大学院理学研究科 修士論文.  
<https://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/articles-wp/>
- [9] 辰巳凌平. 2022 年度大阪大学大学院理学研究科物理学専攻 修士論文.  
<https://nucl.phys.sci.osaka-u.ac.jp/public>
- [10] Y. Nara *et al.* Relativistic nuclear collisions at 10A GeV energies from  $p + \text{Be}$  to  $\text{Au} + \text{Au}$  with the hadronic cascade model, 1999 , Phys. Rev. C 61, 024901(2000)
- [11] Aerogel Factory. Aerogel Specificztions Data sheet
- [12] M.Tabata *et al.* Hydrophobic silica aerogel production at KEK , 2012 , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 668 (2012) 64-70.
- [13] 浜松ホトニクス. データシート S13361-3075 シリーズ
- [14] 浜松ホトニクス. 技術資料/MPPC  
[https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/mpcc\\_kapd9008j.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mpcc_kapd9008j.pdf). Accessed on 23 January 2026.
- [15] 国際商事株式会社. 技術資料.  
<https://kokusaishoji.co.jp/wp/wp-content/uploads/2014/06/tec.pdf>. Accessed on 23 January 2026.
- [16] SPring-8 ウェブサイト.  
[http://www.spring8.or.jp/ext/ja/nano\\_tech/Page\\_spring\\_frb.htm](http://www.spring8.or.jp/ext/ja/nano_tech/Page_spring_frb.htm). Accessed on 23 January 2026.

- [17] ニチアス/ナフロン PTFE シート.  
<https://www.nichias.co.jp/products/detail/131>. Accessed on 23 January 2026.
- [18] Open-it, 汎用 MPPC 読み出しモジュール.  
<https://openit.kek.jp/project/MPPC-Readout-Module/public>. Accessed on 23 January 2026.
- [19] Open-it, AMANEQ (連続読み出し DAQ 用フロントエンド主回路).  
<https://openit.kek.jp/project/StrHRTDC>. Accessed on 23 January 2026.
- [20] J. Allison *et al.* Geant4 A Simulation Toolkit, 2003 , Nuclear Instruments and Methods A 506 (2003) 250 – 303.
- [21] J. Allison *et al.* Geant4 developments and applications, 2006 , IEEE Trans on Nuclear Science 53 No. 1 (2006) 270 – 278.
- [22] J. Allison *et al.* Recent developments in Geant4 , 2016 , Nuclear Instruments and Methods A 835 (2016) 186 – 225.
- [23] 素粒子原子核研究所 2025 年 4 月の活動報告：ハドロングループ  
[https://www2.kek.jp/ipns/ja/research\\_introduction/report/7219/](https://www2.kek.jp/ipns/ja/research_introduction/report/7219/). Accessed on 12 February 2026.
- [24] K. Shirotori *et al.* J-PARC proposal T106, “Proposal for the first stage of the P93 experiment (Evaluation of the performance of the secondary beam at the high-momentum beam line)” , 2024.