修士論文

チャームバリオン分光実験用 ビームタイミング検出器の開発

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻 赤石 貴也

2019年2月28日

概要

近年、ハドロンの励起状態の研究によって、従来の構成子クォーク模型では記述できないエキゾ チックハドロンと考えられる状態が多数発見されている。そこで、ハドロンの全体像をより理解 する新しい知見を得るために、基本的なバリオンの内部構造がどのようになっているのかを調べ、 ハドロンを記述するための新しい有効自由度の性質解明が求められている。その有力な手がかり として、ダイクォーク相関の理解が重要である。3 クォークから成るバリオンの1 クォークを重 いチャームクォークとすることで、残る軽い2 クォーク間の相関であるダイクォーク相関を顕著 に観測できる可能性がある。チャームバリオンの励起エネルギー、生成率や崩壊過程の性質はダ イクォーク相関の性質を反映すると考えられ、チャームバリオンの包括的な研究によって、ダイ クォーク相関の性質を解明することが期待される。

J-PARC ハドロン実験施設の高運動量ビームラインにおいてチャームバリオン分光実験を計画 している。実験では 20 GeV/c の π^- 中間子ビームを使用した $\pi^- + p \rightarrow Y_c^{*+} + D^{*-}$ 反応により、 チャームバリオンの励起状態を生成する。欠損質量法によってチャームバリオンの励起状態の生成 率と崩壊幅を広い質量領域で測定し、チャームバリオンの励起状態の性質に顕著に現れると期待さ れるダイクォーク相関を明らかにする。実験では、チャームバリオンの生成断面積は 1 nb 程度と 予想されており、多数のチャームバリオン励起状態の十分な生成量を得るために、 6.0×10^7 /spill (取り出し時間 2 秒のため 30 MHz の計数率)の大強度二次ビームを使用する。その為、高計数率 環境下で動作するビームタイミング検出器が必要である。ビームタイミング検出器は、全検出器の 時間基準となる検出器で、さらに飛行時間測定法により散乱粒子を識別するため、高計数率環境下 において 60 ps (rms)の高時間分解能が要求される。目標を達成するために蛍光寿命の短いプラス チックシンチレータと MPPC の組み合わせのシンチレーション検出器と、極めて短い時間で発光 するチェレンコフ光を用いたアクリル輻射体と MPPC から成る Bar 型チェレンコフ検出器と X 型チェレンコフ検出器の性能を評価した。高計数率耐性のため、検出器の多セグメント化と出力信 号の幅の整形を行った。特に新しいタイプの検出器である X 型チェレンコフ検出器については動 作特性を詳しく調べた。

検出器の性能評価のため、J-PARC K1.8BR ビームラインで低計数率の中間子ビームを照射した 基本性能評価と東北大学電子光理学研究センター第2実験室で高計数率環境下での性能評価を行っ た。X型チェレンコフ検出器では、低計数率環境下において、MPPC 動作電圧 59 V(オーバー電 E +7 V)、電圧しきい値 3.5 p.e.、検出器の中心の位置という条件で (35.6 ± 1.0) ps の時間分解 能を得て、検出器の動作条件の最適値を決定した。さらに、高計数率環境下において、信号の重な りによる時間分解能への影響を明らかにした。実験での想定ビームレートである 2 – 3 MHz 以上 の高計数率において (54.0 ± 0.8) ps の時間分解能を得ることができ、目標性能を達成した。

目次

第1章	序論	4
1.1	ハドロン物理学	4
1.2	ハドロンの有効自由度	5
1.3	チャームバリオンにおけるダイクォーク相関	5
1.4	チャームバリオン分光実験...................................	7
1.5	高運動量ビームライン	9
1.6	チャームバリオンスペクトロメータ	9
1.7	研究目的	12
第2章	ビームタイミング検出器の要求性能と設計	13
2.1	要求性能	13
2.2	設計思想	14
2.3	検出器の設計	26
2.4	時間の測定	33
第3章	低計数率環境における基本性能評価	35
第3章 3.1	低計数率環境における基本性能評価 中間子ビームを使用したテスト実験	35 35
第 3 章 3.1 3.2	低計数率環境における基本性能評価 中間子ビームを使用したテスト実験	35 35 35
第3章 3.1 3.2 3.3	低計数率環境における基本性能評価 中間子ビームを使用したテスト実験	35 35 35 38
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4	低計数率環境における基本性能評価 中間子ビームを使用したテスト実験	 35 35 35 38 43
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5	低計数率環境における基本性能評価 中間子ビームを使用したテスト実験	 35 35 38 43 52
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章	低計数率環境における基本性能評価 中間子ビームを使用したテスト実験	 35 35 38 43 52 53
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1	低計数率環境における基本性能評価 中間子ビームを使用したテスト実験	 35 35 38 43 52 53 53
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2	低計数率環境における基本性能評価 中間子ビームを使用したテスト実験	 35 35 35 38 43 52 53 53 53
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2 4.3	低計数率環境における基本性能評価 中間子ビームを使用したテスト実験	 35 35 35 38 43 52 53 53 56
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2 4.3 4.4	低計数率環境における基本性能評価 中間子ビームを使用したテスト実験	 35 35 35 38 43 52 53 53 56 62
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5	低計数率環境における基本性能評価 中間子ビームを使用したテスト実験	 35 35 35 38 43 52 53 53 56 62 74

付録 A	シンチレーション検出器の動作電圧依存、しきい値依存	77
A.1	結果	77
付録 B	シリコンシート	79
参考文献		82

図目次

1.1	チャームバリオンの励起準位スペクトル...........................	6
1.2	チャームバリオン牛成反応の模式図	7
1.3	シミュレーションによる欠損質量スペクトル	8
1.4	ρ モードと λ モードの励起モードの崩壊の模式図	9
1.5	チャームバリオンスペクトロメータの概要図	10
1.6	飛行時間測定のシミュレーションでの粒子分布	11
2.1	シミュレーションによるビームプロファイル	15
2.2	シミュレーションによって見積もったセグメント当たりの計数率分布	17
2.3	EJ-228 のシンチレーション光の放出波長分布..............	18
2.4	Metal Package PMT (R9880U-113) の写真と波長ごとの検出効率	20
2.5	MPPC	21
2.6	APD の構造の概略図	22
2.7	MPPC S13360-3050 の波長ごとの検出効率	23
2.8	MPPC S13360-3050 の検出効率、ゲイン、クロストークの割合のオーバー電圧依	
	存性	25
2.9	回路図	27
2.10	MPPC を取り付けた反転増幅微分回路	28
2.11	反転増幅微分回路の出力波形	28
2.12	チェレンコフ検出器の原理説明	29
2.13	PMMA の透過率	30
2.14	X型PMMA	31
2.15	X 型チェレンコフ検出器	32
2.16	time walk の概略図	33
2.17	Time-over-Threshold の概略図	34
२ 1	ハドロン実験施設の概要図	36
3.1 3.9	K1 8BR ビームラインの概要図	30 37
9.4 3.3	K1.0Dh C ムノーンジベムロ	37
ე.ე	NIODN ヒームノーイツ大欧生ノノ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	57

3.4	K1.8BR ビームラインでのテスト実験のセットアップ 38
3.5	DRS4 モジュールで取得した波形 40
3.6	チェレンコフ検出器の波高分布 41
3.7	Slewing correction 前後の波高と飛行時間の相関
3.8	補正前後の TOF の分布 42
3.9	検出器の試験器の時間分解能の MPPC 動作電圧依存性
3.10	X 型チェレンコフ検出器の Up、Down それぞれの時間分解能の MPPC 動作電圧
	依存性
3.11	チェレンコフ検出器の時間分解能の電圧しきい値依存性
3.12	チェレンコフカウンターの波高分布 46
3.13	X 型チェレンコフ検出器の光量の位置依存性 47
3.14	チェレンコフ検出器の光量の位置依存性 48
3.15	チェレンコフ検出器の光量の動作電圧依存性 48
3.16	しきい値ごとに見積もった検出効率
3.17	TOF 時間分解能の位置依存性 50
3.18	検出器固有の時間分解能の位置依存性51
4.1	東北大電子光理学研究センターの実験室レイアウト54
4.2	テスト実験のセットアップ (ELPH) 55
4.3	高計数率環境下での信号波形 57
4.4	低計数率環境下での波形のタイミング分布 57
4.5	検出器の波高分布
4.6	X 型チェレンコフ検出器 (上側) の計数率分布
4.7	DRS4 モジュールにおける slewing correction 前後の波高と飛行時間の相関 60
4.8	HRTDC モジュールにおける slewing correction 前後の波高と飛行時間の相関 61
4.9	DRS4 モジュールでの TOF の時間分解能の計数率依存 62
4.10	HUL モジュールでの TOF の時間分解能の計数率依存
4.11	DRS4 モジュールでの検出器固有の時間分解能の計数率依存 63
4.12	HUL モジュールでの検出器固有の時間分解能の計数率依存 64
4.13	信号のベースラインとリンギングの波形での選択範囲 65
4.14	信号のベースラインとリンギングの分布 66
4.15	波形のベースラインの分布67
4.16	プラスチックシンチレータの波高分布
4.17	トリガータイミングの前に先行信号あるイベントの例
4.18	パイルアップイベントの計数率。
4.19	パイルアップイベントの TOF 分布 70
4.20	DRS4 モジュールでのパイルアップイベントを考慮した時間分解能 70

4.21	HUL モジュールでのパイルアップイベントを考慮した時間分解能.......	71
4.22	DRS4 モジュールでのパイルアップイベントを除いたイベントによる時間分解能 .	72
4.23	HUL モジュールでのパイルアップイベントを除いたイベントによる時間分解能	73
A.1	シンチレーション検出器の時間分解能の MPPC 動作電圧依存性	78
A.2	シンチレーション検出器の時間分解能の電圧しきい値依存性........	78
B.1	シリコンシートの波長ごとの透過率..............................	80
B.2	シリコンシートありなしの光量分布	80

表目次

2.1	様々なプラスチックシンチレータの基本性質	18
2.2	R9880U-113 の基本的性質	20
2.3	MPPC の構造	24
2.4	MPPC の電気的及び光学的特性..............................	25
2.5	PMT (R9880U-113) と MPPC (S13360-3050PE) の性能比較。	26
4.1	ベースライン等の値。	66
4.2	プラスチックシンチレータの 1MIP と 2MIP の波高の値。	67
B.1	シートの特性	79

第1章

序論

1.1 ハドロン物理学

1.1.1 ハドロンの構造

ハドロンが強い相互作用によってクォークからどのように形成されるかを理解することは、ハド ロン物理学の目標の一つである。強い相互作用の基礎理論はハドロンの構成要素であるクォークと グルーオンを自由度として記述される量子色力学 (Quantum Chromo Dynamics : QCD) である。 ハドロンの性質を QCD から理解するときに考えなければいけないことが、相互作用の強さであ る。高エネルギー領域では QCD の結合定数が小さくなり摂動論による計算が可能である。これは QCD の漸近的自由性と呼ばれる。一方で、低エネルギー領域になると結合定数が大きくなり、カ ラーの閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れといったことが起こる。このエネルギースケールで は、ハドロンの性質を QCD から摂動的に計算できない。そのため、非摂動的な手法が不可欠であ る。その中で、格子上に場の理論を設定して数値的にこれを解く方法として、格子 QCD (lattice QCD) の数値シミュレーションがある。近年、スーパーコンピュータを用いた計算により、ハドロ ンの基底状態のスペクトルやクォークの閉じ込め現象に迫る研究が発展しているが、励起状態につ いては未だに詳細な内部構造の理解に至っていない。ハドロンの全体像を描くためには実験と理論 の両面からの研究によって、ハドロンの内部構造を理解することが必要不可欠である。

1.1.2 構成子クォーク模型

u, d クォークは摂動論的な領域では数 MeV の質量を持つ。一方、低エネルギーでは、カイラル 対称性の自発的破れにともなって、約 300 MeV の質量を持つ準粒子として振る舞う。この準粒 子を構成子クォークと呼ぶ。ハドロンは、3 つのクォークから構成されるバリオンとクォーク・反 クォーク対で構成されるメソンに分類される。構成子クォーク模型は、構成子クォークを有効自由 度としてハドロンを記述する。構成子クォーク間に働く力として、閉じ込め力、スピン・スピン力、 スピン・軌道力などが導入される。ハドロン質量や基底状態ハドロンの磁気モーメントなどのハド ロンの性質は、構成子クォーク模型でよく記述される。

1.1.3 エキゾチックハドロン

エキゾチックハドロンとは、3 クォーク構造のバリオン、クォーク・反クォーク対構造のメソ ン以外の構造を持つハドロンの総称である。近年、ハドロンの励起状態において、3 つより多い クォークで構成されるマルチクォーク状態やハドロン同士が分子的に結合するハドロン分子状態 といった、単純な構成子クォーク模型では記述できない状態が発見されている。例えば、5 つの クォークで構成されると考えられるペンタクォーク [1] や、重いクォークを含むハドロンでペンタ クォーク [2] やテトラクォーク [3] と考えられる状態が報告されている。有効自由度が現れる機構 は QCD によって完全に解明されているわけではないが、ここで重要なことは、低エネルギーのあ るスケールにおいてクォーク・グルーオンの世界とハドロンの世界との間に低エネルギー有効自由 度による物質階層が出現している可能性が示唆されることである。近年のペンタクォークやテトラ クォークの候補の実験観測による発見は、ハドロンの内部有効自由度の理解において新たな知見を 必要とし、さらにその背後に潜むカラー閉じ込め機構の起源探求を進めるための突破口となるハド ロン物理にとって重要な進展である。

1.2 ハドロンの有効自由度

近年のエキゾチックハドロンの研究から、ハドロンを記述する有効自由度として構成子クォーク のほかに、ハドロン分子状態や2つのクォーク間の相関 (ダイクォーク相関) もハドロンの励起状 態を記述する際の有効自由度と考えることができる。エキゾチックハドロンを含めたハドロン全体 の内部構造を理解するため、ハドロンを記述するための新しい有効自由度の性質解明が求められて いる。

1.3 チャームバリオンにおけるダイクォーク相関

ダイクォーク相関とは、クォークとクォークの相関である。軽いバリオンの場合、3 対のダイ クォークが等しい重みで互いに相関しているので、単独のダイクォーク相関の抽出方法は明らかで はない。一方で、バリオン内の軽いクォーク1つを重いクォークに入れ替えることでダイクォー ク相関を顕在化できる。軽いクォーク (u, d) に比べ重いクォーク (チャームクォーク) を1つ持つ チャームバリオンでは、運動学的にダイクォークとチャームクォークの相対運動状態 (λ モード) とダイクォークの内部励起状態 (ρ モード) に分離する。その結果、図 1.1 に示すようにアイソトー プシフトと呼ばれる 2 つの励起モードが準位構造に出現する。このとき、励起状態のエネルギー 比は、

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

となる。ここで m_Q と m_q はそれぞれ重いクォークと軽いクォークの質量 (構成子クォーク質量) である。 $m_Q = m_q$ の場合、式 (1.1) は 1 となる。つまり、3 つの軽いクォークからなる通常のバ リオンの励起状態では、 λ モードと ρ モードが縮退することがわかる。一方 $m_Q \neq m_q$ の場合、状 態が分離し、 m_Q が無限大の時に以下のようになる。

$$\frac{\hbar\omega_{\rho}}{\hbar\omega_{\lambda}} \to \sqrt{3} \ (m_Q \to \infty) \tag{1.2}$$

さらに、クォーク間のカラースピン相互作用の大きさはクォーク質量の逆数に比例するため、2 つの軽いクォークの相関は他のペアの相関よりも強くなる。図 1.1 に示すように λ モードと ρ モー ドに分離されてモードに応じた励起状態が観測できる。したがって、チャームバリオンの励起エネ ルギー、生成率や崩壊過程の性質はダイクォーク相関の性質を反映すると考えられる。チャームバ リオンの包括的な研究によって、ダイクォーク相関の性質を解明することが期待される。



図 1.1: チャームバリオンの励起準位スペクトル。ダイクォーク相関の *ρ* および λ モード励起を反映して準位構造がスペクトルに現れる。

1.4 チャームバリオン分光実験

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) のハドロン実験施設の高運動量ビームラインにおいてチャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験)[4] を計画している。チャームバリオン (Y_c^{*+}) は、図 1.2 で示すような 20 GeV/c の高運動量 π 中間子ビームを使用した $\pi^- + p \rightarrow Y_c^{*+} + D^{*-}$ 反応で生成 する。ビーム粒子 (π^-) と散乱粒子 (D^{*-}) を測定することで欠損質量法によって、 Y_c^{*+} の質量ス ペクトルを得る。欠損質量法の利点は生成した励起状態の終状態に依らずに、基底状態から高励起 状態まで広い質量範囲 (励起エネルギー 1 GeV 以上) で生成事象を系統的に測定できる点である。 1.4.1 項に述べるように、 Y_c^{*+} の生成率と崩壊分岐比は内部のダイクォーク相関を反映する。実験 では、図 1.2 で示している D^{*-} の崩壊モードである $D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 + \pi^-$ からの π^- (分岐比 67.7 %) と \bar{D}^0 の崩壊モードである $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ + \pi^-$ (分岐比 3.89 %) の K^+ と π^- を磁気スペクトロメータによって検出して不変質量を得て D^{*-} を同定し、その四元運動量を得る。実験に用いる磁気ス ペクトロメータは終状態の (K^+, π^-, π^-) の 3 粒子を効率良く検出できるように設計している [5]。 終状態の (K^+, π^-, π^-) とビーム粒子 π^- を測定して運動量を得て、静止している標的の陽子から 欠損質量を求める。10 MeV/ c^2 程度の分解能で Y_c^{*+} の質量を求め同時に生成断面積 (生成率) を 測定する。同時に、 Y_c^{*+} の崩壊粒子を測定することにより、崩壊分岐比が容易に測定できる。



図 1.2: チャームバリオン生成反応の模式図。終状態の (K^+, π^-, π^-) を測定し、 D^{*-} の不変質量 を組むことで同定し、その四元運動量を得る。ビーム粒子 (π^-) と散乱粒子 (D^{*-}) を測定すること でチャームバリオンの欠損質量を得る。

1.4.1 生成率と崩壊様式

 $\pi^{-} + p \rightarrow Y_{c}^{*+} + D^{*-}$ 反応は、陽子の u クォークをチャームクォークに置き換える反応で、反応に寄与しなかった陽子中のクォーク対 (ダイクォーク) と導入されたチャームクォークとの間に角運動量が持ち込まれ易く、相対運動である λ モード励起状態の生成率が高くなる [6]。図 1.3 は既知のチャームバリオン状態を用いてシミュレーションを行った、予想される欠損質量スペクト

ルである。 λ モードの励起状態(軌道角運動量 L)で、ダイクォークのスピンが0の場合、チャー ムクォークのスピン 1/2 により、J = L - 1/2, L + 1/2のスピン二重項(重クォーク二重項)を 形成する。この場合、生成率の比はスピン多重度 2J + 1の比になることが期待される。 $\Lambda_c(2595)$ と $\Lambda_c(2625)$ はL = 1の重クォーク二重項と考えられているが、実験的にスピン・パリティ等は決 まっていない。生成比が1:2 であれば、重クォーク二重項という解釈を確かめることができると ともにスピン・パリティの決定が可能である。



図 1.3: 既知のチャームバリオン状態を用いてシミュレーションを行った、予想される欠損質量ス ペクトル。 $\Lambda_c(2940)$ のスピン・パリティはまだ決定されていないので、このシミュレーションで は $J^P = 3/2^+$ としている。

また、励起状態を明らかにするためのもう一つのアプローチは、図 1.4 に示す崩壊分岐比の測定 である。 ρ モードの場合、励起しているダイクォークが、 π 中間子を放出することによって崩壊す ると考えられる。 この場合、チャームバリオンは、 $\Lambda_c^{*+} \rightarrow \pi + \Sigma_c$ のような軽い中間子とチャー ムバリオン対になる。 同様に考えると、 λ モードの場合、チャームバリオンは $\Lambda_c^{*+} \rightarrow N + D$ の ようにチャームを持つ中間子と核子の対に崩壊する傾向にあると考えられる。 このように励起状 態を反映して、崩壊分岐比の違いが予想される。 ρ モードの崩壊分岐比は、 $\Lambda_c^{*+} \rightarrow \pi + \Sigma_c$ の割合 が $\Lambda_c^{*+} \rightarrow N + D$ の割合よりも大きい ($\Gamma_{\pi\Sigma_c} > \Gamma_{ND}$)と予想される。 λ モードの崩壊は、 ρ モー ドとは逆の結果 ($\Gamma_{\pi\Sigma_c} < \Gamma_{ND}$)になると予想される。



図 1.4: ρ モードと λ モードの励起状態の崩壊の模式図。 ρ モードの崩壊分岐比は、 $\Lambda_c^{*+} \rightarrow \pi + \Sigma_c$ の割合が $\Lambda_c^{*+} \rightarrow N + D$ の割合よりも大きい($\Gamma_{\pi\Sigma_c} > \Gamma_{ND}$)と予想され、 λ モードの崩壊は、 ρ モードとは逆の結果($\Gamma_{\pi\Sigma_c} < \Gamma_{ND}$)になると予想される。

1.5 高運動量ビームライン

J-PARC の高運動量ビームラインは、既存の一次ビームラインのハドロン実験施設への入射部の 途中から分岐するビームラインである。分岐点に二次粒子生成標的を置くことにより発生させた高 い運動量をもつ二次粒子を輸送できるように設計されている。二次粒子の運動量分散とビーム位置 の相関を際立たせたイオン光学を設計に取り入れ、ビーム運動量を dp/p = 0.1 % の分解能で測定 可能である。運動量 2 – 20 GeV/c の π^- 中間子ビームを毎秒 10⁷ 個以上供給できる。

1.6 チャームバリオンスペクトロメータ

図 1.5 に、チャームバリオンスペクトロメータの概要図を示す。欠損質量法を用いる場合、ビーム粒子と散乱粒子を反応の前後で測定する必要がある。実験装置は大別して、ビーム粒子測定用検出器群と標的で反応を起こして生成された散乱粒子を測定する磁気スペクトロメータにより構成される。高運動量ビームを用いた固定標的実験の場合、散乱された D^{*-} の崩壊からの高運動量粒子だけでなく、生成された Y_c^{*+} の崩壊粒子も、すべての生成粒子が前方に放出される。そのため、 D^{*-} の崩壊粒子と、生成された Y_c^{*+} からの崩壊粒子の両方を測定する双極磁石システムを用いる。 D^{*-} 中間子の崩壊粒子である \bar{D}^0 からの高運動量 K^+ および π^- を標的の下流にあるシンチレーションファイバー飛跡検出器、磁石の出口のドリフトチェンバーとリングイメージ型チェレンコフ検出器 [7] によって測定する。 D^{*-} からの遅い π^- と Y_c^{*+} からの崩壊粒子を広い範囲で測定するためには、磁石内部も検出器で覆う必要がある。大きな検出有効範囲を有するドリフトチェ

ンバーを標的の下流に設置する。水平方向と垂直方向は磁極の周囲に設置されたドリフトチェン バーと時間測定用タイミング検出器、磁極面に配置された時間測定用タイミング検出器をそれぞれ 使用して測定する。



図 1.5: チャームバリオンスペクトロメータの概要図。ビーム粒子測定用検出器群と標的で反応を 起こして生成された散乱粒子を測定する磁気スペクトロメータにより構成される。

1.6.1 ビーム粒子測定用検出器群

欠損質量の測定にはビーム粒子を測定し、運動量と速度を決定することが不可欠である。チャームバリオンの生成断面積が1 nb 程度と予想されており、十分な事象数を得るために 6.0 × 10⁷/spill (取り出し時間 2 秒)、すなわち 30 MHz の大強度ビームを使用する。大強度ビームを測定するためには、高計数率環境下で動作する検出器が必要不可欠である。このビーム粒子測定用検出器群は、 飛行時間を測定するための時間基準となるビームタイミング検出器、ビーム粒子の位置と角度を測定するためのシンチレーションファイバー飛跡検出器、ビーム粒子識別のためのリングイメージ型 チェレンコフ検出器で構成される。

1.6.2 ビームタイミング検出器

ビーム粒子測定用検出器群の中で、ビーム粒子のタイミングを測定し、反応事象の時間原点を決 定する検出器である。図 1.6 にビームタイミング検出器と磁極の周囲にある時間測定用タイミング 検出器を用いる飛行時間測定のシミュレーションでの粒子分布を示す。左図は二乗した質量 (mass squared) の分布であり、粒子の運動量で 1.5 – 2.0 GeV/c の領域のみを射影している。右図は 2.5 GeV/c までの運動量と mass squared の相関である。飛行時間の分解能が 100 ps (rms) の場合の 結果である。時間測定用タイミング検出器として、Resistive Plate Chamber (RPC) を想定して おり、LEPS2 実験用に開発された RPC は 60 ps (rms) の時間分解能を達成している [8]。した がって、ビームタイミング検出器には、80 ps (rms) 以下の時間分解能が要求される。特に運動量 1.5 – 2.0 GeV/c 程度の π 中間子と K 中間子の十分な識別性能を得るためには、RPC と同程度の 60 ps (rms) の時間分解能が望ましい。また、大強度ビームを使用するため 30 MHz の高計数率環 境下で動作する必要がある。したがって、高計数率環境下で高時間分解能を実現する検出器が要求 される。



図 1.6: 飛行時間測定のシミュレーションでの粒子分布。左図は二乗した質量 (mass squared) の分 布であり、粒子の運動量を 1.5 - 2.0 GeV/c の領域のみを射影している。右図は 2.5 GeV/c まで の運動量と mass squared の相関である。飛行時間の分解能が 100 ps (rms) の場合の結果である。

1.7 研究目的

本研究の目的は、高計数率環境下で動作し高時間分解能を持つビームタイミング検出器の開発で ある。目標性能は、30 MHz の高計数率環境下での動作と、飛行時間測定用タイミング検出器と同 程度の 60 – 80 ps (rms)の高時間分解能を両立することである。

本論文の内容は、以下のとおりである。2章では、検出器の設計思想について述べる。ビームタ イミング検出器の要求性能を満たす最適な設計を検討した。3,4章では、検討した検出器が要求 性能を満たすかどうかを確かめるために行ったテスト実験について述べる。テスト実験は、ハドロ ンビームを用いた基本性能の評価と、電子・陽電子ビームを用いた高計数率環境下での性能評価を 行った。5章では、本論文の結論を述べる。

第2章

ビームタイミング検出器の要求性能と 設計

2.1 要求性能

J-PARC E50 実験におけるビームタイミング検出器への要求は次の通りである。

- 高計数率環境における動作
 30 MHz のビーム粒子を測定する。
- 高時間分解能

標的で反応を起こして生成された散乱粒子を識別するため、高い時間分解能が必要である。 散乱粒子の π 中間子と K 中間子を分離するための飛行時間測定の時間分解能は 100 ps (rms) である。TOF 検出器 (ストップタイミング) について固有時間分解能 60 ps (rms) が 得られているため、ビームタイミング検出器 (スタートタイミング) の固有時間分解能は 80 ps 以下の時間分解能が要求される。高い時間分解能を高計数率環境下でも達成する必要が ある。

• 磁場耐性

ビームタイミング検出器は、標的の直前に置かれ電磁石の間口の近傍となるため、0.1 T 程 度の磁場中で動作する必要がある。

• 物質量

ビーム通過方向に物質量が多いと欠損質量測定の分解能に影響するが、上記の性能要求より優先度は下がる。実験としては1g/cm²程度が許容でき、密度が1g/cm³程度のプラス チック等を使用する場合、ビーム通過方向は数 mm 程度の厚さにする必要がある。

以上の要求を満たす検出器を開発する。

2.2 設計思想

実験で使用するビームタイミング検出器を開発するにあたって基本的な検出器の特性について述 べる。その上で、検出器を構成する要素の候補を挙げる。

2.2.1 TOF 測定法

反応を起こして生成された粒子は、主として電荷と質量の違いから粒子識別が行われる。電荷の 正負は磁場中を運動する際に受けるローレンツ力の向きによって識別できる。荷電粒子の質量を求 めるために使われる方法の一つが TOF 測定法である。ビームタイミング検出器は粒子がある距離 離れた2点間を飛行する時間 t を測定するためのスタートタイミングの基準となる検出器である。 測定したスタートタイミングと、ストップタイミングを測定する TOF 検出器のデータを組み合わ せることによって飛行時間を測定する。さらに、運動量と飛行距離を飛跡検出器で再構成し、飛行 時間の情報と組み合わせて粒子の質量を求める。

粒子の運動量 p は、粒子の質量を m、速度を v、光速度を c として

$$p = \beta \gamma mc \tag{2.1}$$

$$\beta = \frac{v}{-} \tag{2.2}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{2.3}$$

と書ける。したがって、粒子の飛行距離をL、飛行時間をtとすると、粒子の質量mは

$$m^{2} = \frac{p^{2}}{c^{2}} \left(\frac{c^{2}t^{2}}{L^{2}} - 1\right)$$
(2.4)

と求まり、p、tとLの関数となる。

ここで、 π 中間子と K 中間子を分けるために必要な時間分解能を計算する。質量 m の誤差伝搬の式を求めると、

$$m = \frac{p}{c}\sqrt{\frac{c^2t^2}{L^2} - 1}$$
(2.5)

$$(dm)^{2} = \left(\frac{\partial m}{\partial p}\right)^{2} dp^{2} + \left(\frac{\partial m}{\partial L}\right)^{2} dL^{2} + \left(\frac{\partial m}{\partial t}\right)^{2} dt^{2}$$
(2.6)

$$= \left(\frac{c^2 t^2}{L^2} - 1\right) \frac{dp^2}{c^2} + \frac{p^2 t^2}{L^2} \frac{1}{1 - \frac{L^2}{c^2 t^2}} \frac{dL^2}{L^2} + \frac{p^2 t^2}{L^2} \frac{1}{1 - \frac{L^2}{c^2 t^2}} \frac{dt^2}{t^2}$$
(2.7)

$$= m^2 \left(\frac{dp}{p}\right)^2 + m^2 \gamma^4 \left(\frac{dL}{L}\right)^2 + m^2 \gamma^4 \left(\frac{dt}{t}\right)^2$$
(2.8)

となる。ここで、dp、dL、dtはそれぞれの測定精度である。具体的な数値として、p = 2 GeV/c、 dp/p = 0.002 (0.2 %)、L = 5000 mm、dL = 1 mmを用いる。 π 中間子とK中間子の質量はそ れぞれ 140 MeV/ c^2 、494 MeV/ c^2 であるので飛行時間は、それぞれ $t_{\pi} = 16.7$ ns、 $t_K = 17.2$ ns となる。運動量 (p) と飛行経路 (L) は飛跡検出器で再構成し、測定精度の比である $dp/p \ge dL/L$ を含む式 (2.8) の第 1 項と第 2 項は数 MeV/ c^2 程度と十分に小さくできるため、dm に最も寄与す るのは dt/t が含まれる第 3 項となる。したがって、タイミング検出器の時間分解能が粒子識別の 性能を決める。いま、飛行時間の分解能を 100 ps とすると、 $dm_{\pi} = 172 \text{ MeV}/c^2$ 、 $dm_K = 50$ MeV/ c^2 となる。

2.2.2 大強度ビームへの対策

J-PARC E50 実験では 30 MHz の大強度ビームを使用する。一次粒子である陽子を金の標的に 照射して、生成される二次粒子の π⁻ 中間子をビーム粒子として使用する。π⁻ 中間子ビームを電 磁石によって実験標的まで輸送するため、ビームはある程度の広がりを持つ。図 2.1 に示すよう に、理想的なシミュレーションではビームの広がりは ±30 mm 程度の広がりになっている。実際 の実験では電磁石の調整や標的でのビーム収束の条件等を考慮し、より広い範囲を覆うようにデザ インする。検出器に要求される仕様を次に示す。



図 2.1: シミュレーションによるビームプロファイル。上図は水平方向の 1 mm あたりの計数率。 下図は垂直方向の計数率である。

● 検出器のサイズ

シミュレーションから想定されるビームプロファイルを十分に覆うことができる 100 mm(水平) × 100 mm(垂直) 以上とする。

セグメント化
 20 NUL た業体の検出間でまれは

30 MHz を単体の検出器で読み出すと信号の重なり (パイルアップ) や光センサーの電流量 の増加でゲインの変動等が起こる。波形読み出しであればパイルアップやゲインの変動も解 析で補正が可能ではあるが、データ収集システムにおけるデータ量の制限から従来のディス クリミネータと TDC を使用するため、計数率の抑制が必要であり、セグメントに分ける。

● 検出器の種類

パイルアップ事象の抑制と高時間分解能の達成のため、応答の早い光検出器にし、各セグメ ントを光センサーで読む。

● 狭い信号幅 パイルアップの抑制のため、出力信号は 10 ns 程度の狭い幅にする。

2.2.3 セグメント化

30 MHz を単体の検出器で読み出すとパイルアップや光センサーの電流量の増加でゲインの変動 等が起こる。データ収集システムの制約から従来のディスクリミネータと TDC を使用するため、 計数率の抑制が必要であり、セグメントに分ける。このとき、1 セグメントで受けることのできる 最大の計数率を検出器全体のパイルアップの割合を考慮して概算する。信号がランダムに来ると考 えると、任意の時間 (T) を M 個の区間に分割した際の小区間内に事象が 1 回発生する確率 p は、 確率が小さくなると考えられる場合、次のとおりとなる。

$$p \sim \frac{\lambda \cdot T}{M} \tag{2.9}$$

$$= \lambda \cdot dt \tag{2.10}$$

ここで、λ は単位時間当たりの事象の発生回数、*dt* は小区間の時間間隔である。信号の幅を 10 ns、 1 セグメントの計数率を 3 MHz とすると、10 ns の間に信号がパイルアップする確率は、

$$p = \lambda \cdot dt \tag{2.11}$$

$$= 3 \times 10^6 \cdot 10 \times 10^{-9} \tag{2.12}$$

$$= 0.03 (3 \%)$$
 (2.13)

となる。

図 2.1 の 1 mm 当たりの計数率のより低い水平方向の分布に対して、1 セグメントの幅を 3 mm として分割すると、中心のセグメントで 2 – 3 MHz の計数率となる。図 2.2 に 3 mm 幅のセグメ ントにした場合のビームプロファイルを示す。この時、各セグメントにおいて、パイルアップする 確率を求めると、検出器全体が受ける 30 MHz の計数率では 1.8 % となる。 実験ではタイミング検出器でパイルアップした粒子を飛跡検出器で2つのビーム粒子として分離 して、散乱粒子の反応点の情報を利用した解析によって救う手法や、ビーム計数率の損失をビーム が直接当たらない位置に設置している他の検出器の計数率との比を考慮して断面積を評価すること も可能であるため、2%程度のパイルアップの割合は実用上大きな問題にならない。より細い幅に セグメント化することで、パイルアップの割合はより小さくできるが、後述する光検出器の発光体 や光センサーの選択の際のサイズの適合も考慮し、1セグメントの幅を3mmとした。



図 2.2: シミュレーションによって見積もったセグメント当たりの計数率分布。3 mm 幅のセグメ ントを使用する場合、中心セグメントで 2.5 MHz 程度の計数率となる。

2.2.4 光検出器の種類

ビームタイミング検出器に使用できる光検出器の候補として、プラスチックシンチレーション検 出器とチェレンコフ検出器が挙げられる。プラスチックシンチレーション検出器は、発光原理や荷 電粒子に対する応答がよく知られており、一般的なビームタイミング検出器として広く使用されて いる。チェレンコフ検出器は、主にビーム粒子の識別等に使用されているが、チェレンコフ光の発 光原理から早い応答を持つタイミング検出器としての使用も例がある。これらの検出器について詳 しく述べる。

プラスチックシンチレーション検出器

シンチレータとは、荷電粒子が物質を通過すると蛍光を発するものである。この蛍光のことをシ ンチレーション光と呼ぶ。プラスチックシンチレータとはポリスチレンなどのプラスチックの中に 有機発光物質が溶かし込まれている固体であり、シグナルの立ち上がりと立ち下りが数 ns のオー ダーで早い。また、加工が簡単で自由な形状にできるという特徴がある。蛍光寿命の短いプラス チックシンチレータである Pilot-U 互換の EJ-228 やその他のプラスチックシンチレータの基本的 な性質を表 2.1 に示す [9, 10]。プラスチックシンチレーション検出器は、このシンチレーション光 を光センサーによって検出し、電気信号に変換して読み出す。例として EJ-228 のシンチレーショ ン光の波長ごとの強度を図 2.3 に示す [10]。最大感度となる波長は 391 nm であり、図ではこの頂 点を 1 に規格化している。光センサーによってシンチレーション光を読み出すとき、光センサーの 波長ごとの検出効率の分布をシンチレーション光の発光波長分布に合わせると効率良く検出でき る。シンチレーション検出器の時間分解能はシンチレーション光の上昇時間と減衰時間、光量、光 センサーの時間特性で決まる。

	EJ-200	EJ-204	EJ-212	EJ-228	EJ-230
光子数 (photons / 1 MeV)	10000	10400	10000	10200	9700
最大放出波長 [nm]	425	408	423	391	391
上昇時間 [ns]	0.9	0.7	0.9	0.5	0.5
減衰時間 [ns]	2.1	1.8	2.4	1.4	1.5
密度 [g/cm ³]	1.023	1.023	1.023	1.023	1.023

表 2.1: 様々なプラスチックシンチレータの基本性質 [9, 10]。



図 2.3: EJ-228 のシンチレーション光の放出波長分布 [10]。

チェレンコフ検出器

荷電粒子が物質中を運動するとき、荷電粒子の速度が物質中の光の伝搬速度より速い場合にチェ レンコフ光が放射される。チェレンコフ光を放射する物質で検出器によく使用されるものとして、 アクリルやエアロゲル、鉛ガラス等が挙げられる。チェレンコフ光はシンチレーション光とは異な り、粒子が通過したタイミングで放出されるため、応答が数 ps と非常に早い。また、シンチレー ション光はあらゆる方向に放出されるのに対し、チェレンコフ光は指向性が高く、その角度は頂角 θ を持つ円錐の表面上に限定される。このとき、チェレンコフ光の角度 θ_c は、物質の屈折率n、速度 β を用いて、

$$\theta_c = \cos^{-1}(\frac{1}{n\beta}) \tag{2.14}$$

と書ける。

チェレンコフ光の発光量は発光体の厚さ (L)、荷電粒子の電荷量 (ze) 及びチェレンコフ光の波 長 (λ) に依存する。微小な長さ (dL) の輻射体で、光子の波長幅 ($d\lambda$) の領域に放射される光子数 (N_{ph}) は、

$$\frac{d^2 N_{ph}}{dL d\lambda} = \frac{2\pi \alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2 \theta_c \tag{2.15}$$

$$=\frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2}\left(1-\frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right) \tag{2.16}$$

となる。ここで、 α は微細構造定数、 $n(\lambda)$ は波長 λ ごとの屈折率である。式 (2.16) は $1/\lambda^2$ に比例するため、短波長側の光子数が多くなる。

チェレンコフ検出器は、時間応答性に優れており、高い時間分解能が見込める。しかし、チェレ ンコフ光はシンチレーション光に比べて、発光量が少ない。時間分解能は光センサーで読み出す光 量に強く依存するため、光センサーで十分な光量が得られるようにする必要がある。

2.2.5 光センサーの種類とメリットとデメリット

光電子増倍管 (PMT)

PMT は光を電流に変換する真空管で、放射線粒子によってシンチレータやチェレンコフ輻射体 で発生する光のパルスを電流パルスに変換する。PMT は光電面において光電効果によって光 (光 子)を電子に変える。このとき、放出される電子の数は、入ってきた光子の数に比例する。光電面 から放出された電子は初段のダイノード電極まで 100 – 200V の電圧で加速され、電極に衝突する と二次電子放出が起き、数が2倍以上に増える。これを繰り返すことによって電子の数は鼠算式に 増え、10数段の増幅過程を経ることで 10⁷以上に信号が増幅できる。しかし、PMT は高いレー トにおいてはダイノード間の電流の増大によって加速電圧が下がり、その結果増幅率が下る。その ため、ダイノードブースターで加速電圧を一定にするなどの対策が必要になる。また、通常の光電 子増倍管は磁場があると使用できないため、磁場中で使用するにはファインメッシュ型と呼ばれ る PMT が必要である。また、比較的小型で時間応答の良い PMT として、浜松ホトニクス製の Metal Package PMT (R9880U-113) がある。Metal Package PMT (R9880U-113) がある。Metal Package PMT (R9880U-113) の写真と波長 ごとの量子効率を図 2.4 に、基本性能を表 2.2[11] に示す。



図 2.4: 左図は Metal Package PMT (R9880U-113)の写真。右図が光電面のスーパーバイアルカ リの波長ごとの検出効率である。青い点線が R9880U-113の検出効率である。185 – 700 nm の波 長の範囲に感度があり、400 nm がピークである。実線は、波長の放射エネルギーに対する光電陰 極電流である [11]。

	R9880U-113
 受光面サイズ [mm]	$\phi 8$
感度波長範囲 [nm]	185-700
最大感度波長 [nm]	400
受光面種類	スーパーバイアルカリ (SBA)
增倍率	$2.0 imes 10^6$
上昇時間 [ns]	0.57
走行時間 (T.T) [ns]	2.7
走行時間広がり (T.T.S) [ns]	0.2

表 2.2: R9880U-113 の基本的性質 [11]

また、光センサーにおいて時間分解能に関係する走行時間広がり (σ_{T.T.S}) と光量の関係につい て述べる。走行時間広がりは1光子が光センサーに入射してから信号として出力される時間の広が りである。光センサーの時間分解能とは、次の関係がある。

$$\sigma = \frac{\sigma_{T.T.S}}{\sqrt{N}} \tag{2.17}$$

ここで、N は全体の光子の数ではなく、時間的に早く光センサーに到達した光子の数であるため、良い時間分解能を得るためには、この早く到達する成分を十分に得ることが重要である。 R9880U-113 の場合、 $\sigma_{T.T.S}$ は 200 ps である。R9880U-113 は、ソケット (E10679-02) に接続し、 電圧を印加することによってすぐに信号を出力できる。出力信号の幅は 10 ns であり、ゲインも十 分にあるのでそのまま使用できる。

この PMT をビームタイミング検出器で用いる場合のメリットとして、走行時間広がりが 200 ps と時間応答が良く、信号の幅が整形せずとも 10 ns であり、400 nm 付近で感度が高いことが挙げ られる。この感度はプラスチックシンチレータ (EJ-228) の発光波長分布と合っていおり、チェレ ンコフ光で多い短波長側の光子を検出する利点でもある。デメリットは、磁場耐性が低い、PMT の一つのサイズが直径 16 mm であり、3 mm 幅のセグメントを考えた時、セグメントを隙間無く 並べるのが困難である点が挙げられる。

Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)

Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)(図 2.5) は小型のピクセル型半導体光検出器 (Pixeled Photon Detector: PPD) の一種であり、浜松ホトニクス社の製品 [12] である。MPPC は非常に 小型 (数+ μ m角)の Avalanche Photo Diode (APD) を数 mm 角の光電面上に敷き詰めた検出器 であり、ガイガーモードで動作する。APD は、逆電圧を印加することにより光電流が増倍される 高速・高感度のフォトダイオードである。APD の構造の概略図を図 2.6 に示す。



図 2.5: MPPC の写真。左側がセラミックパッケージタイプ、右側が表面実装型である [13]。



図 2.6: APD の構造の概略図。APD に逆電圧をかけることによって空乏層が生じる。この空乏層 に光が入射すると電子正孔対ができ、電場によって、電子は N⁺ 層に、正孔は P⁺ 層にドリフトす る。このドリフト過程で電子は、アバランシェ増幅を起こす。

N型半導体とP型半導体の接合部分ではそれぞれのキャリア(正孔と電子)が互いに拡散し、打ち消し合うことでキャリアが少ない領域である空乏層が形成される。これに逆電圧を印加するとその電位差によりキャリアが引き付けられてさらに空乏層が広がり、そこに電場が生じる。この領域に光子が入射すると空乏層内の電子が励起されて新たに電子正孔対を生成し、生じた電場に沿って電子はN⁺層に、正孔はP⁺層にドリフトする。このドリフト速度は電場の強度に依存し、電場が約10⁴ V/cm に達すると結晶格子との衝突回数が増加するため、ある一定の速度に収束する。さらに逆電圧を上げると次の衝突までの間にキャリアは大きなエネルギーを持つようになり、このキャリアが半導体の原子と衝突電離を起こしてさらに新たな電子正孔対を生成する。この反応が繰り返されて電子正孔対が雪崩的に増幅していくことを雪崩増幅(アバランシェ増幅)といい、APD はこの現象を利用することで信号を増幅する仕組みになっている。APD に印加する逆電圧をある一定以上にすると内部電場が高くなり、増倍率が10⁵ – 10⁶ に増大する。このときの電圧を降伏電圧といい、降伏電圧値以上の電圧でAPD を動作させることをガイガーモード動作という。ガイガーモードでAPD を動作させることをガイガーモード動作という。ガイガーモードで APD を動作させることをガイガーモード動作という。ガイガー

$$Q = C \times (V_{op} - V_{br}) \tag{2.18}$$

$$= C \times V_{over} \tag{2.19}$$

Cは APD の静電容量、 V_{op} は MPPC に印加している逆電圧、 V_{br} はガイガー放電の止まる降伏 電圧、 V_{over} は逆電圧と降伏電圧の差であるオーバー電圧を示す。



図 2.7: MPPC S13360-3050 の波長ごとの検出効率。オーバー電圧が 3 V の時に、最大感度波長 である 450 nm で 40 % の検出効率を得る [13]。

MPPC は、2 次元的に並んだ APD ピクセルが並列接続された構造になっており、全てのピクセルにおいて共通の電圧供給、読み出し回路につながっている。そのため、それぞれの APD ピクセルから出力される電荷量 Q の総和 Q_{total} が MPPC から出力され、光子を検出できた APD ピクセルの数を N_{fired} とすると以下の式で表すことができる。

$$Q_{total} = N_{fired} \times Q \tag{2.20}$$

この式から、APD ピクセルの電荷量 Q がオーバー電圧に比例するので MPPC の増幅率にはオー バー電圧依存性があることがわかる。また、MPPC の増幅率には温度依存性がある。温度が上昇 すると APD 内の結晶の格子振動が激しくなり、加速されたキャリアのエネルギーが十分に大きく なる前に結晶格子と衝突するため半導体原子との衝突電離の確率が減少し、増幅率が小さくなる。 以上のことから、MPPC からの出力を一定に保つためには、温度変化にともなってオーバー電圧 を変化させる、または温度を一定に保つ必要がある。MPPC の検出効率 PDE (Photon Detection Efficiency: 入射した光子のうち検出できる光子の割合)は、以下の式で表される。

$$PDE = \epsilon_q \times \epsilon_{ap} \times \epsilon_{ex} \tag{2.21}$$

 ϵ_q は半導体の量子効率(入射光子数に対して発生するキャリア数の比)、 ϵ_{ap} は MPPC の開口率 (1 ピクセルにおいて、配線部などを除いた受光部の面積の割合)、 ϵ_{ex} はピクセルの励起確率(キャ リア対が発生する確率、アバランシェ効率)である。なお、 ϵ_{ap} と全ピクセル数はトレードオフの

	S13360-3025PE	S13360-3050PE	S13360-3075PE
 有効受光面サイズ [mm]		3 imes 3	
ピクセルピッチ [μm]	25	50	75
ピクセル数	14400	3600	1600
開口率 [%]	47	74	82
上昇時間 [ns]		2	
減衰時間 (FWTM) [ns][14]		140	250
パッケージ		表面実装型	
窓材		エポキシ樹脂	
窓材屈折率		1.55	

表 2.3: MPPC の構造 [13]。

関係にある。この検出効率から、1 つのピクセルについて平均 N_{in}/N_{total} の光子が入射しており、 少なくとも1 つ光子が検出される確率は検出効率を含めたポアソン分布になるので、光子を検出し たピクセル数は以下の関係式で表される。

$$N_{fired} = N_{total} \times \left\{ 1 - exp\left(-\frac{N_{in} \times PDE}{N_{total}}\right) \right\}$$
(2.22)

ここで、 N_{total} は MPPC の全ピクセル数、 N_{in} は入射光子数である。MPPC のピクセルは、それ ぞれが光子の検出時に同じパルスを出力するため、1 ピクセルに複数の光子が入射されたときも、1 光子と同じ大きさのパルスを出力する。したがって、高計数率環境下においては、入射する光子の 数に見合ったピクセル数の MPPC を選択し、出力信号の波高が計数率で変動しないようにする必 要がある。表 2.3 に MPPC のピクセルサイズごとの構造を、表 2.4 に MPPC のピクセルサイズご との電気的及び光学的特性を、図 2.7 に例として MPPC (S13360-3050) の波長ごとの検出効率を、 図 2.8 に例として MPPC (S13360-3050) の検出効率、ゲイン、クロストークのオーバー電圧依存 性を示す [13]。MPPC でも同様に、時間分解能の走行時間広がりと光量の関係である $\sigma_{T.T.S}/\sqrt{N}$ が成り立つ。MPPC の走行時間広がりは 200 ps 程度であり、オーバー電圧を上げると小さくなる ことが知られている。

MPPC をビームタイミング検出器で使用するとき、まず、MPPC のピクセルピッチのサイズを 決める必要がある。最大感度波長での検出効率と、増倍率は 75 µm のものが一番良いが、開口率 と信号の減衰時間 [14]、波高に影響するクロストークの割合を考慮すると、50 µm のサイズが最 適である。その上で、MPPC S13360-3050PE を使用するメリットは、PMT と同様に走行時間広 がりが 200 ps 程度であり、動作電圧を上げることによってさらに良くなる点、そして半導体素子 のため、磁場中での動作が可能である点である。そして、素子のサイズが小さいため、セグメント を隙間無く並べるのに適している。デメリットは、信号の立ち下りが 100 ns 以上のテールを持つ ため、信号を整形する回路を組む必要がある点、波長ごとの感度が長波長側で高く、プラスチック

	S13360-3025PE	S13360-3050PE	S13360-3075PE
降伏電圧 (V_{br})		53 ± 5	
測定条件 (V_{over}) [V]	+5	+3	+3
感度波長範囲 [nm]		320-900	
最大感度波長 [nm]		450	
最大感度波長での検出効率 (P.E.D) [%]	25	40	50
增倍率	$7.0 imes 10^5$	$1.7 imes 10^6$	$4.0 imes 10^6$
クロストーク [%]	1	3	7

表 2.4: MPPC の電気的及び光学的特性 [13]。

シンチレータやチェレンコフ光の発光波長との適合が若干悪い点が挙げられる。しかし、検出効率は、図 2.8 に示すように、オーバー電圧を上げることによって上昇する。波長 405 nm において、+3 V では 40 % であるが、+7V にすると 55 % まで上がる。オーバー電圧を上げることで、波長分布との適合を補うことが可能である。また、MPPC の使用は、保護抵抗と電源の高周波ノイズを取り除くためのコンデンサを用いた回路を作成する必要がある。この時の MPPC の出力信号は 2 ns 程度の早い立ち上がりを持つが、立ち下りは 100 ns 以上のテールを持つ。そのため、高計数率での使用の場合、信号を整形する回路を加えた形で使用が必要である。



図 2.8: MPPC S13360-3050 の検出効率、ゲイン、クロストークのオーバー電圧依存 [13]。

2.3 検出器の設計

2.3.1 光センサーの選定

ビームタイミング検出器に用いる光センサーを決める。PMT (R9880U-113) と MPPC (S13360-3050PE)の性能の比較を表 2.5 に示す。増倍率と走行時間広がりはほぼ同じ性能である。 波長ごとの検出効率は PMT の方がシンチレーション光やチェレンコフ光に有利な短波長側でと 高くなっているが、MPPC は動作電圧を上げることで補うことが可能である。さらに、決定的に 違うのは磁場耐性とサイズである。PMT では 3 mm のセグメントを細密に並べるのが困難であ り、さらに磁気シールドも加わるため、実際に検出器を組み立てる際に大きな問題となる。した がって、時間特性と検出効率、検出器の組み立ての方法を考慮し、ビームタイミング検出器では MPPC (S13360-3050PE)を光センサーとして使用する。

	PMT(R9880U-113)	MPPC(S13360-3050PE)
受光面サイズ [mm]	$\phi 8$	3 imes 3
感度波長範囲 [nm]	185-700	320-900
最大感度波長 [nm]	400	450
検出効率@405 nm [%]	34	40-55
增倍率	$2.0 imes 10^6$	$1.7 imes 10^6$
走行時間広がり [ns]	0.2	0.2
磁場耐性	×	\bigcirc

表 2.5: PMT (R9880U-113) と MPPC (S13360-3050PE) の性能比較。

2.3.2 性能評価のための MPPC 信号整形回路

MPPC の出力信号は 2 ns 程度の早い立ち上がりを持つが、立ち下りは 100 ns 以上のテールを 持つ。また、増幅率が 10⁶ 程度と高いものの MPPC から直接出力される信号自体は 1 – 2 mV 程 度と小さいため、増幅が必要である。したがって、信号のパイルアップを避け高速応答をするため に、整形回路によって MPPC の信号のテールをカットして狭い幅にする。アナログ・デバイセズ 社製の高速オペアンプである AD8000[15] を用いた反転増幅微分回路を試験器の評価のために製作 した。この回路は Ref.[16] の回路を基本にして、それを改良したものである。MPPC の信号は 10 倍に増幅されて出力される。Ref.[16] の回路では、現行の MPPC の信号を読み出した際に、出力 信号全体が大きく振動するリンギングが生じたため、22 Ωのダンピング抵抗を加えている。信号 の overshoot を消すため、pole zero 補正のための回路を追加した。S13660-3050PE を使用する場 合、pole zero 補正用の抵抗値をいくつか試したところ 390 Ω が適切であった。回路図を図 2.9 に 示す。そして、この反転増幅微分回路を基板に組んで MPPC を取り付けたものが図 2.10 である。 動作例として、図 2.11 にプラスチックシンチレータに ⁹⁰Sr 線源のベータ線を当て、MPPC で読 み出したときの信号出力の波形を示す。信号のテール部に若干のリンギングが残っており、この影 響は高計数率環境下での試験で評価する。



図 2.9: Ref.[16] の回路を基本にして改良した回路図。信号のリンギングを抑えるための 22 Ω のダ ンピング抵抗を加え、pole zero 補正のための抵抗として 390 Ω を加えた。



図 2.10: MPPC を取り付けた反転増幅微分回路。



図 2.11: 反転増幅微分回路の出力波形。プラスチックシンチレータに ⁹⁰Sr 線源のベータ線を当て、 MPPC を取り付けて読み出したときの出力信号の波形。

2.3.3 シンチレーション検出器を使用した構成要素

ビームタイミング検出器の構成要素の候補の一つは、プラスチックシンチレータと MPPC を組 み合わせた検出器である。プラスチックシンチレータは、蛍光寿命の短い Pilot-U 互換の EJ-228 を使用する。MPPC は S13360-3050PE を反転増幅微分回路に組み込んで使用する。シンチレー タのサイズは、断面積を MPPC の有効受光面サイズである 3 mm × 3 mm とし、長さはビームプ ロファイル全体を覆うため 150 mm とした。ビーム通過方向の物質量は 0.31 g/cm² となり要求を 満たす。プラスチックシンチレータには光量を増やすため、表面に反射材 (テフロンテープ) を巻 いた。プラスチックシンチレータの両端に MPPC を取り付け読み出す。3 mm 幅のプラスチック シンチレータと MPPC の組み合わせは、従来の技術を組み合わせた基本的な構成と考えられる。

2.3.4 チェレンコフ検出器を使用したの構成要素

もう一つの候補は、より高い時間分解能を得るために、発光時間が極めて短いチェレンコフ光を 放射するチェレンコフ輻射体と MPPC を組み合わせた検出器である。チェレンコフタイミング検 出器の設計の出発点はチェレンコフ輻射体の棒をチェレンコフ光の放出角度 (アクリルの場合は約 48°) に傾け、全反射する光を光センサーに導くものある。傾けることで輻射体表面で全反射する 回数を減らし指向性のあるチェレンコフ光の時間広がりを抑えて端面に設置した光センサーで捉え 時間分解能の向上を図る。図 2.12 に検出器の原理を示す。チェレンコフ輻射体の候補としていく つかの素材が考えられるが、加工が容易で安価な通称アクリルと呼ばれるポリメチルメタクリレー ト樹脂 (PMMA: 密度 1.18 g/cm³) を採用した。



図 2.12: チェレンコフ検出器の原理説明。屈折率 1.49 のアクリルは約 48° に指向性のあるチェレ ンコフ光を放出する。アクリルの棒を 48° に傾け、全反射光を最短経路で光センサーに光を導くこ とで時間広がりを抑え、時間分解能の向上を図る。 近年、製作されているアクリルは透明度が高く、ライトガイドの製作等で削出や表面加工の技術 も確立されており、高精細なチェレンコフ光検出器への利用に適していると考えられる。図 2.13 に使用したアクリルの光の透過率を示す。今回製作したアクリルの素材は日東樹脂工業が開発した S-0-S と呼ばれるものであり、透過率が全波長で良く、従来品の S-0 よりも特に短波長側の透過率 が良い。

チェレンコフ光をアクリルと空気との全反射条件で導くためには、アクリル表面に何も反射材を 密着させないことが製作上の重要な注意点である。遮光のために表面にブラックシートを密着させ たときに、光量の大きな損失が見られた。チェレンコフ輻射体を使用する場合は、検出器全体を覆 う形での遮光が必要である。



図 2.13: PMMA の透過率 (日東樹脂工業による測定値)。

チェレンコフ輻射体は「Bar 型」と「X 型」と呼ばれる 2 種類のアクリルの形を試した。Bar 型 はアクリルの棒で、サイズはシンチレータと同様に 3 mm (W) × 3 mm (T) のものと、幅をさら に細くした 1 mm (W) × 3 mm (T) の 2 種類を用意した。長さは図 2.1 に示したビームサイズ を考慮して、150 mm とした。これをチェレンコフ光の放出角度に傾けて使用する。この時、ビー ム通過方向の物質量は 0.50 g/cm² となり要求を満たす。この方法では一方から光を読み出す形に なる。光センサーで信号を読み出すとき、一方の読み出しのみでは、粒子が通過する位置によって 光センサーまで届く時間が変わり、検出時刻が位置依存性を持つ。この依存性をキャンセルする通 常の方法は、光センサーを付けた反対側にも光センサーを取り付け、2 方向から光を読み出し、時 間平均をとることである。チェレンコフ光が放出される角度に傾けて使用し、かつ 2 方向から読み 出すために、一枚のアクリル板を X の形に切り出したアクリル輻射体を製作した (図 2.14)。これ により、2 方向から光を読み出すことが可能となり、検出器の検出時刻の位置依存性をキャンセル できる。さらに、光量を倍にすることで、時間分解能も向上する。図 2.15 に示すように断面積を 3 mm (W) × 3 mm (T) とし、長さはビームプロファイルを覆うため 150 mm とした。アクリ ル板から切り出す製作手法のため、中心部分の角は曲率を付けて削っており、棒の部分より 3 割程 度輻射体の厚さが大きくなっている。X 形にすると厚さは倍程度となるが、ビーム通過方向の物質 量は 1.0 g/cm² となり要求を満たす。X 型のチェレンコフ検出器は両読みのシンチレーション検 出器の手法を指向性のあるチェレンコフ光の測定に応用した新しいタイプの検出器である。

以上より、プラスチックシンチレーション検出器、Bar 型チェレンコフ検出器、X 型チェレンコフ検出器をビームタイミング検出器の構成要素の候補として製作し性能の評価を行った。



図 2.14: X 型 PMMA。一枚のアクリル板から X の形に切り出したアクリル製の輻射体である。


図 2.15: X 型チェレンコフ検出器。一体化した二本の棒状の輻射体をビーム粒子が通過すること で、それぞれの棒の端面に取り付けられた MPPC で同時タイミングの光が測定できる。時間平均 をとることでタイミングのずれを補正でき、光量の倍化も行える。

2.4 時間の測定

2.4.1 Slewing correction

時間測定の方法は、光センサーからの電気信号をディスクリミネータと呼ばれる信号の波高があ るしきい値を越えたときにロジック信号を出力する回路を用いてタイミング情報に変換し、TDC によって基準となる信号との時間差を測定する。信号がしきい値を超えた leading edge のタイミ ングで出力されるロジック信号が時間情報を持つ。この時、leading edge のタイミングは波高の大 きさによって変わる。このロジック信号のタイミングのずれを time walk と呼ぶ。図 2.16 に time walk の概略図を示す。Time walk のない時間情報を得るためには、この補正が必要である。これ は、電荷または波高の情報とタイミングの相関を利用し、ADC による slewing correction という 方法がある。



図 2.16: time walk の概略図。

Slewing correction のためには、TDC と ADC の両方を測定する必要がある。大強度ビームを 使用するチャームバリオン分光実験では、不感時間のないデータ収集システムを使用するため、数 µsec の不感時間がある通常の ADC が使用できない。さらに高速 ADC の使用は著しいコスト増 加のため困難である。また、フラッシュ ADC を使用すると、データ量が膨大となるためデータ転 送が困難となる。したがって、ADC 情報以外を使用した slewing correction が必要である。

2.4.2 Time-over-Threshold (TOT)

図 2.17 に Time-over-Threshold の概略図を示す。TOT とは、信号がしきい値 (Threshold) を 超えていた間の時間で、立ち上がりの leading edge と立下りの trailing edge の時間差である。 ADC 情報を使用しない測定方法として、ADC の代わりに TOT が使用できる。TOT は波高の大 きさに対応して変化するので、ADC 情報の代わりに TOT を用いての slewing correction が可能 である。



Time-over-Threshold

図 2.17: Time-over-Threshold の概略図

ビームタイミング検出器では、最終的に TOT による slewing correction で時間分解能の向上を 目指す。しかし、今回使用している整形回路では、立ち上がりの時定数が速く、この信号の立ち上 がりを微分するのみであるため、波高が高くなると信号の幅が飽和し易く、TOT の情報から波高 の補正が十分にできなかった。そのため、本論文では、波高情報による slewing correction を用い て、ビームタイミング検出器の試験器の性能評価を行った。TOT による slewing correction を有 効にするためには、整形回路としてタイミング情報の出力の他に、波高と幅の情報を保つ形 (積分 回路や遅い時定数での信号整形) による出力を加える改良が必要である。この改良は今後の課題で ある。

第3章

低計数率環境における基本性能評価

3.1 中間子ビームを使用したテスト実験

3.1.1 目的

テスト実験の目的は低計数率環境において、試験器の動作特性を理解することである。第2章 で考察した検出器を構成する要素で試験器を製作した。試験器はシンチレーション検出器と Bar 型チェレンコフ検出器、X型チェレンコフ検出器である。チェレンコフ検出器に関して、MPPC の動作電圧やディスクリミータのしきい値、検出器の位置を変えて測定を行い、それぞれの設定 において時間分解能を求め依存性を調べた。特にチェレンコフ光は発光量が少なく、十分な光量 を MPPC で検出できないと検出効率が悪くなるため、チェレンコフ検出器において傾けた場合の ビーム方向の厚さ4 mm で十分な光量が得られるかを調べた。位置ごとの光量を求め、ポアソン 分布を仮定したときの検出効率を評価した。シンチレーション検出器は、これに先立つ予備実験 (付録 A) にて得られた動作電圧としきい値に固定し、検出器へのビーム入射位置を変えた測定を 行った。

3.2 実験概要

3.2.1 J-PARC K1.8BR ビームライン

中間子ビームを用いたテスト実験を J-PARC K1.8BR ビームラインにおいて行った。K1.8BR ビームラインはハドロン実験施設ハドロンホール北側エリアにある二次粒子ビームラインで、最大 運動量 1.1 GeV/c のビームを輸送することができる。図 3.1 にハドロン実験施設の概要図を示す。 二次粒子生成標的 (T1) によって生成された粒子は一段の静電セパレータ (ESS1) によって粒子の 種類を選別し、中間像スリット (IFS)、マススリット (MS1) によって粒子の純度を向上することが できる (図 3.2[17])。K 中間子や π 中間子、反陽子を二次ビームとして取り出すことができる。

今回の実験は、K1.8BR ビームラインで行われる本実験中にパラサイトで行ったため、ビームダンプ内に検出器を設置し測定を行った。K1.8BR ビームラインの概要図を図 3.3 に示す。本実験で

は 1.0 GeV/c の K⁻ 中間子ビームを用いるが、セパレータ等を用いた粒子弁別では、実験標的に おいて K⁻ と π^- の比は 1: 2 となった。そのため、ビームダンプでは K⁻ 中間子の崩壊も考慮す ると、 π^- 中間子 (μ^- も含む) が 90 % 程度の割合になる。ビームサイズはビームダンプにおいて 約 500 mm(H) × 500 mm(V) に広がっており、ほぼ平行なビームが検出器に入射する。ビーム強 度は標的位置において 1 M/spill である。検出器の計数率は 3 mm 幅、150 mm の長さのシンチ レーション検出器で 8 k/spill であった。



図 3.1: ハドロン実験施設の概要図。図中の上側中央の K1.8BR エリアにてテスト実験を行った。

3.2.2 セットアップ

プラスチックシンチレーション検出器は、3 mm(W) × 3 mm(T) × 150 mm(L) のサイズのプ ラスチックシンチレータにテフロンテープ (厚さ 0.1 mm) を二重に巻いたものをビーム方向に対 して垂直に設置し、MPPC をプラスチックシンチレータの両端に取り付けたものである。Bar 型 チェレンコフ検出器は、3 mm(W) × 3 mm(T) × 150 mm(L) および 1 mm(W) × 3 mm(T) × 150 mm(L) の 2 種類のサイズを用意した。空気との全反射条件にて光を輸送するため、アクリル の表面に反射材は使用しない。アクリルの棒をビーム軸に対して 48 度に傾けて棒の端に MPPC を配置した。X 型チェレンコフ検出器は 3 mm(W) × 3 mm(T) × 150 mm(L) の大きさのアク リル板からX型を切り出し、ビーム軸からの交差の開き角が 48 度であるアクリル輻射体のビーム 下流側の両端に MPPC を取り付けた。プラスチックシンチレータ及びアクリルと MPPC の光学



図 3.2: K1.8BR ビームラインの概要図 [17]。



図 3.3: K1.8BR ビームラインの実験エリア。ビームダンプに試験器を置いて測定した。

コンタクトには屈折率が 1.405 の粘着剤が付いている透明なシリコンシート (厚さ 0.125 mm)(付 録 B 参照)を使用した。チェレンコフ検出器に関しては整形回路で信号の増幅を行っているが、少 ない光量のため十分な波高を得るためにゲインが足りなかったので、さらに PMT アンプで 10 倍 にして信号を読み出した。これらの試験器をビームダンプに置いたときのセットアップの概要図を 図 3.4 に示す。



図 3.4: K1.8BR ビームラインでのテスト実験のセットアップ。セットアップの最上流に検出器の ビーム通過位置を同定する5本のプラスチックシンチレーション検出器を設置し、その下流側に試 験器であるプラスチックシンチレーション検出器とチェレンコフ検出器を設置した。

ビームラインの上流に試験器のビーム通過位置を同定する5本のプラスチックシンチレーション 検出器 (幅 3 mm)を設置した。中央 (0 mm)、上下に ±20 mm と ±40 mm の5 つの位置に設置 した。その下流側に試験器であるプラスチックシンチレーション検出器とチェレンコフ検出器を設 置した。トリガー信号は、上流の5本のプラスチックシンチレーション検出器の OR 信号と最下流 のプラスチックシンチレーション検出器との AND 信号にて作った。

検出器の時間情報と波高は、DRS4 モジュール [18] を用いて測定した。DRS4 モジュールは、 FPGA ベースの high-resolution TDC (時間分解能 20 ps) を備え、内蔵のディスクリミネータに よってタイミング情報を取得でき、さらに波形情報の取得も可能である。テスト実験では、検出器 からの信号の波形と TDC 情報の両方を取得した。取得した波形は、波高のみを slewing correction に使用した。

3.3 解析

3.3.1 時間分解能の評価方法

各検出器の固有の時間分解能を求めるために TOF 法を用いた。時間情報は、シンチレーション 検出器と X 型チェレンコフ検出器は両読みであるため、両方の TDC 情報の平均値を使用した。 Bar 型チェレンコフ検出器は片読みなので、そのままの TDC 情報を使用した。これらの検出器の うち 3 つの検出器間でそれぞれ飛行時間 (TOF) を求める。3 つの検出器で測定した時間をそれぞ れ、t₁、t₂、t₃とすると、以下のようになる。

$$t_{12} = t_1 - t_2 \tag{3.1}$$

$$t_{23} = t_2 - t_3 \tag{3.2}$$

$$t_{31} = t_3 - t_1 \tag{3.3}$$

ここで、 t_{12} 、 t_{23} 、 t_{31} は、3組の TOF である。この時、取得した時間情報には、波高の大きさに よる time walk があるため、slewing correction によって補正する。補正後の TOF に対して、ガ ウス関数で fit して、標準偏差を TOF の時間分解能として得る。3 つの組み合わせの TOF の時間 分解能が得られると、検出器固有の時間分解能 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 について、誤差伝搬によって以下の連 立方程式を組むことができる。

$$\sigma_{12}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \tag{3.4}$$

$$\sigma_{23}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \tag{3.5}$$

$$\sigma_{31}^2 = \sigma_3^2 + \sigma_1^2 \tag{3.6}$$

連立方程式を解くことによって検出器固有の時間分解能を導出した。TOF を測定する具体的な検 出器の組み合わせは、1 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器、3 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検 出器、X 型チェレンコフ検出器の組み合わせが一つ目で、これはチェレンコフ検出器の固有時間分 解能を求める組み合わせである。もう一方は、1 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器、3 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器、シンチレーション検出器の組み合わせで、シンチレーション検出器の 評価に使用した。

3.3.2 波高の選択

DRS4 モジュールにて取得した典型的な波形を図 3.5 に示す。低計数率であるため、1 µs の波形 取得時間範囲にトリガータイミングに同期した信号が1 つだけ入る。トリガータイミングに来てい る信号の最も電圧の高い時間をピーク位置とし、最高電圧を信号の波高とした。取得した波高の分 布を図 3.6 に示す。

3.3.3 Slewing correction

波高の大きさによるタイミングのずれを slewing correction によって補正する。補正は以下の関 数を用いた。

$$f(PH) = a + \frac{b}{\sqrt{PH}} + c\ln\left(PH\right) \tag{3.7}$$

$$f(PH) = a + \frac{b}{\sqrt{PH}} \tag{3.8}$$

ここで、PH は波高である。式 (3.7) はシンチレーション検出器、式 (3.8) はチェレンコフ検出器の 補正に用いた。



図 3.5: DRS4 モジュールで取得した波形。370 ns の位置がトリガータイミングに対応する。図は X 型チェレンコフ検出器の信号である。

図 3.7 に DRS4 モジュールで取得した X 型チェレンコフ検出器の上側の波高と、3 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器と X 型チェレンコフ検出器の間の TOF の相関を示す。縦軸が 3 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器と X 型チェレンコフ検出器の間の TOF、横軸が X 型チェレンコ フ検出器の上側の波高である。(a) が slewing 補正前、(b) が補正後の相関である。(a) に重ねて表 示した曲線は補正の際に求めた関数であり、相関の分布の中央位置を示している。



図 3.6: チェレンコフ検出器の波高分布: (a)1 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器、(b)3 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器、(c)(d) はそれぞれ 3 mm 幅の X 型チェレンコフ検出器の上側と下側 である。



図 3.7: Slewing correction 前後の波高と飛行時間の相関。縦軸が 3 mm 幅の Bar 型チェレンコフ 検出器と X 型チェレンコフ検出器の間の TOF、横軸が X 型チェレンコフ検出器の上側の波高で ある。(a) が slewing 補正前、(b) が補正後の相関である。

図 3.8 に補正前後の相関を時間軸へ射影した TOF 分布を示す。(a) が slewing 補正前、(b) が補 正後である。TOF の分布に対してガウス関数で fit した。(c) が補正前の TOF 分布にガウス関数 で fit したもの、(d) が補正後の TOF 分布に fit したものである。ガウス関数の標準偏差を TOF の時間分解能として得た。この例では、補正前の標準偏差は (205.0 ± 1.8) ps、補正後の標準偏差 は (62.7 ± 0.5) ps である。



図 3.8: 補正前後の TOF の分布。(a) が補正前、(b) が補正後である。(c) が補正前の TOF 分布に ガウス関数で fit したもの、(d) が補正後の TOF 分布に fit したものである。

3.4 結果

3.4.1 MPPC 動作電圧依存性

図 3.9 に試験器の時間分解能の MPPC 動作電圧依存性を示す。縦軸が検出器固有の時間分解 能、横軸が逆電圧と降伏電圧の差のオーバー電圧 (Vover) である。測定では、オーバー電圧を1 V ずつ変え、浜松ホトニクスの推奨電圧である +3 V から +9 V まで測定した。しきい値は、シンチ レーション検出器で MIP の波高の 10 % の電圧値、チェレンコフ検出器は 3.5 p.e. で、ビーム通 過位置は検出器の中央である。



図 3.9: 検出器の試験器の時間分解能の MPPC 動作電圧依存性。縦軸が検出器固有の時間分解能、 横軸がオーバー電圧である。縦の誤差棒はプロットした点のサイズ程度である。オーバー電圧を上 げると、時間分解能が良くなる傾向が見られた。

Bar 型、X 型ともにオーバー電圧を上げると分解能が良くなっていることが分かった。これは、 動作電圧を上げることによって MPPC の検出効率が上昇して、時間分解能を決める要因の一つで あるより多くの光子が検出できるからである。一方で、電圧を +8 V 以上に上げると、Bar 型チェ レンコフ検出器では分解能の悪化が見られた。図 3.10 に X 型チェレンコフ検出器の Up、Down それぞれの時間分解能の動作電圧依存性を示す。X 型チェレンコフを Bar 型とみなしての解析で あるが、Bar 型チェレンコフ検出器のように +8 V 以上での分解能の悪化は見られなかった。電圧 を +8 V 以上に上げると、ダークカレントの著しい上昇やクロストークが増加する。MPPC ごと にこれらの特性に違いがあり、それらが時間分解能に影響した可能性がある。したがって、PDE の上昇効果を利用して時間分解能を向上させる場合、+7V までの使用が可能であることが分かった。



図 3.10: X 型チェレンコフ検出器の Up、Down それぞれの時間分解能の MPPC 動作電圧依存性。 縦軸が検出器固有の時間分解能、横軸がオーバー電圧である。縦の誤差棒はプロットした点のサイ ズ程度である。

全体として、電圧を上げるとダークカレントの one photoelectron が増えるがしきい値は影響の ない 3.5 p.e. に設定している。また、Bar 型チェレンコフ検出器では時間分解能が輻射体の幅 (1 mm と 3 mm) に依らないことが分かった。これはチェレンコフ光のアクリル内での反射回数が少 なく、MPPC に届く全反射を満たすチェレンコフ光の時間広がりの差が幅の違いで大きく変わら ないためであると考えられる。シンチレーション検出器の時間分解能は最良となる +7 V でのみ取 得した。

3.4.2 しきい値依存性

図 3.11 にチェレンコフ検出器の時間分解能のデスクリミネータの電圧しきい値依存性を示す。 縦軸が検出器固有の時間分解能、横軸がしきい値電圧に相当する photoelectron 数である。one photoelectron の波高を基準として、1.5 p.e. から、1 p.e. ずつしきい値を上げていった。動作電圧 は、オーバー電圧で +7 V、ビーム通過位置は検出器の中央である。チェレンコフ検出器では、し きい値を変えても大きな変化がないことが分かった。チェレンコフ検出器の波高は 30 p.e. 程度で あるため、3 p.e. が波高の 1/10 でしきい値を設定した場合に相当する。最大のしきい値である 7.5 p.e. は波高の 1/4 に相当する。この結果は、チェレンコフ光の光センサーへの到達時間の広がり が小さく、信号の立ち上がりが高い電圧まで十分に鋭く保たれているためと考えられる。したがっ て、しきい値の設定はダークカレントによる影響を抑え、検出効率が十分に出る位置に柔軟に設定 することが可能であることが分かった。



図 3.11: チェレンコフ検出器の時間分解能の電圧しきい値依存性。縦軸が検出器固有の時間分解 能、横軸がかけたしきい値電圧に相当する photoelectron 数である。縦の誤差棒はプロットした点 のサイズ程度である。チェレンコフ検出器では、しきい値による変化はほとんど見られなかった。

3.4.3 光量

図 3.12 に波高の分布を one photoelectron の波高で規格化して、光電子数にした分布を示す。 赤い線はポアソン分布を仮定して fit した関数である。1 mm 幅 Bar 型チェレンコフ検出器は、か すった粒子によって十分な光量が得られない場合があるため、光電子数が低い側にテールを引いて いる。その領域は fit の範囲から除外し、テールの影響が無い 12 p.e. 以上を fit の範囲として光量 を評価した。



図 3.12: チェレンコフ検出器の波高分布。ビーム通過位置は +20 mm である。(a)1 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器、(b)3 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器、(c)(d) はそれぞれ X 型チェレ ンコフ検出器の上側と下側である。波高の分布を one photoelectron の波高で規格化して、光電子 数にした。赤い線はポアソン分布を仮定して fit した関数である。

図 3.13 にビーム通過位置ごとに、X 型チェレンコフ検出器の上側と下側、それぞれを足し合わ せた光量を示す。図 3.14 にはビーム通過位置ごとに、X 型チェレンコフ検出器の足し合わせた光 量と Bar 型チェレンコフ検出器の光量を示す。縦軸は光量の平均の値、横軸はビーム通過位置で ある。検出器の中央を位置 0 mm として上側を正の方向、下側を負の方向としている。Bar 型チェ レンコフ検出器では、MPPC に遠い位置の光量が少なく、近づくにつれて光量が増えることから 反射回数が増えることによって光量が減っていることが分かった。これは、光が全反射する際に、 ー部が全反射条件を満たさずに損失していると考えられ、アクリル表面の不完全性に起因すると 考えられる。また、3 mm 幅が1 mm 幅より光量が減少しているが、これは MPPC とのコンタク トが不十分であったためである。3 mm 幅はコンタクトの改善で 10 % 程度の改善が見込める。一 方、X 型チェレンコフ検出器では、MPPC に近いビーム通過位置と、遠い位置とで中央部分を挟 んで光量の違いが大きい。遠い位置からの光は、X がクロスするところで一体型となっているもう 一方のアクリル側へ逃げるものがあると考えられる。しかし、2 つの MPPC で合計するとどの位 置でもほぼ同じだけ光量が得られることが分かった。X 型の中央で光量が多いのは、加工技術の関 係で中央部分が棒状の部分より 3 割程度厚くなっているためである。



図 3.13: X 型チェレンコフ検出器の光量の位置依存性。X 型チェレンコフ検出器の上側と下側、そ れぞれを足し合わせた光量である。縦軸は光量の平均の値、横軸はビーム通過位置である。縦の誤 差棒はプロットした点のサイズ程度である。

図 3.15 に光量の電圧依存を示す。MPPC はオーバー電圧を上げると、光子の検出効率が上がる ため光量が増える。時間分解能は $\sigma_{T.T.S}/\sqrt{N}(N$ は光電子数)の関係で、MPPC の走行時間広が りと光量に依存する。図 3.15 の光量依存だけでは、図 3.9 に示すようなオーバー電圧による時間 分解能の大きな変化は説明できない。実際には、時間分解能に寄与する光電子数 (N) は MPPC に 到達する早い光であり、全体の光量よりも少ないため、このような早いタイミングの光のみを考慮 した場合、依存性はもっと大きな変化となると考えられる。また、MPPC は、オーバー電圧を上げ ることによって、走行時間広がりが変化するため、この寄与も考慮する必要があると考えられる。



図 3.14: チェレンコフ検出器の光量の位置依存性。X 型チェレンコフ検出器の足し合わせた光量と Bar 型チェレンコフ検出器の光量を示している。縦軸は光量の平均の値、横軸はビーム通過位置で ある。縦の誤差棒はプロットした点のサイズ程度である。



図 3.15: チェレンコフ検出器の光量の動作電圧依存性。縦軸は光量の平均の値、横軸はオーバー電 圧である。縦の誤差棒はプロットした点のサイズ程度である。

図 3.16 にポアソン分布を仮定したしたときのしきい値ごとの検出効率の見積りを示す。チェレ ンコフ検出器にて得られる光量として最も少ないのは、X 型チェレンコフ検出器の MPPC から遠 い位置をビーム粒子が通過したときである。全位置での平均光子数 25 .p.e に対して、遠い位置で は平均光電子数が 15 p.e. である。この値を考慮して、見積もると検出効率 99 % 以上を達成でき るしきい値は 5.5 p.e. であることが分かった。



図 3.16: しきい値ごとに見積もった検出効率。光量分布をポアソン分布と仮定し、それより求めら れる検出効率を見積もった。縦軸が検出効率、横軸がしきい値である。

3.4.4 位置依存性

図 3.17 に TOF 時間分解能のビーム通過位置依存性の結果を示す。縦軸が TOF の時間分解能、 横軸が検出器に対するビーム通過位置である。検出器の中央を 0 mm として上側を正の方向、下側 を負の方向とした。測定条件は、動作電圧がオーバー電圧で +7 V、しきい値がシンチレーション 検出器で MIP の波高の 10 % の電圧値、チェレンコフ検出器は 3.5 p.e. である。TOF 時間分解能 が位置により変動していることが分かる。



図 3.17: TOF 時間分解能の位置依存性。縦軸が TOF の時間分解能、横軸が検出器に対するビー ム通過位置である。マイナスの符号側が Bar 型において MPPC に近い側である。縦の誤差棒はプ ロットした点のサイズ程度である。

図 3.18 にシンチレーション検出器、チェレンコフ検出器固有の時間分解能のビーム通過位置依 存性の結果を示す。両側から MPPC で光を読み出しているシンチレーション検出器と X 型チェレ ンコフ検出器には、位置依存性がほぼ見られなかった。これらの検出器では両側から光を読み出し ているため、全体の光量が一定に保たれているので、一定の時間分解能が得られていると考えられ る。X 型チェレンコフ検出器で位置 0 mm の時間分解能が良いのは、X 型アクリルの製作上、中 央のアクリルの厚みが他の位置の厚みより厚くなっているため、光量が多くなり時間分解能が良く なっている。一方、Bar 型チェレンコフ検出器では、位置によって反射回数が増え、MPPC に届く までに、光量の損失が生じるため、MPPC からビームのあたる位置が遠くなるほど時間分解能が 悪化していると考えられる。この結果より、シンチレーション検出器と X 型チェレンコフ検出器 は位置依存が無いが、Bar 型チェレンコフ検出器では位置依存があることが分かった。また、Bar



型チェレンコフ検出器では依存性が輻射体の幅 (1 mm と 3 mm) に依らないことが分かった。

図 3.18: 検出器固有の時間分解能の位置依存性。縦軸が検出器固有の時間分解能、横軸が検出器に 対するビーム通過位置である。マイナスの符号側が Bar 型において MPPC に近い側である。縦 の誤差棒はプロットした点のサイズ程度である。シンチレーション検出器、X 型チェレンコフ検 出器では、ビーム通過位置による依存がほぼ見られなかったが、Bar 型チェレンコフ検出器では、 MPPC からビーム通過位置が遠くなるほど時間分解能が悪化している。

3.5 まとめ

シンチレーション検出器

オーバー電圧 +7 V、しきい値 10 % の測定条件で、検出器固有の時間分解能が (72.5 ± 0.7) ps であった。ビーム通過位置による時間分解能の位置依存性はなかった。低計数率環境であれば、シ ンチレータと MPPC の組み合わせで、目標とする性能を達成する。

Bar 型チェレンコフ検出器

オーバー電圧 +7 V、しきい値 3.5 p.e. の測定条件で、検出器の中央位置において検出器固有の時 間分解能が (50.9±1.0) ps であった。ビーム通過位置による時間分解能の位置依存性は、ビームの あたる位置が遠くなるほど時間分解能が悪化するのが見られた。ビーム方向の厚さを MPPC の受 光面サイズと同じ 3 mm に設定していたが、15 – 25 p.e. と十分な光量が得られている。J-PARC E50 実験においては位置依存があるため使用が難しいが、他実験にて狭いビーム領域を覆う場合は 十分に使用可能である。一方で、時間分解能が 3 mm 幅と 1 mm 幅の検出器で差が生じなかった。 これはチェレンコフ光を利用した検出器の特徴と考えられる。したがって、Bar 型や X 型検出器 を製作する場合に、より細いセグメントでの検出器構成が可能であることが分かった。

X 型チェレンコフ検出器

オーバー電圧 +7 V、しきい値 3.5 p.e. の測定条件で、検出器の中央位置において検出器固有の 時間分解能が (35.6 ± 0.9) ps であり、中央以外の位置では、例えば +40 mm のビーム通過位置に おいて (42.0 ± 1.8) ps であった。ビーム通過位置による時間分解能の位置依存性はなかった。低 計数率環境であれば、X 型のアクリルと MPPC の組み合わせで、目標とする性能を達成する。

以上から、低計数率環境下におけるテスト実験において、シンチレーション検出器と X 型チェ レンコフ検出器が、目標時間分解能を達成し、位置依存なくタイミング測定が行えることが分かっ た。より良い粒子識別を行うために、時間分解能が良い X 型チェレンコフ検出器を使用するのが 望ましい。この時、測定条件の最適値は、電圧依存性から MPPC のオーバー電圧 +7 V、しきい 値依存性と光量から、しきい値 3.5 p.e. である。

ここで、DRS4 モジュールの時間分解能を含めて、X 型チェレンコフ検出器の時間分解能を評価 する。DRS4 モジュールの時間分解能は、実測値 20 ps であるので、シンチレーション検出器の時 間分解能は中央の位置で $\sqrt{73^2 - 20^2} = 70$ ps、Bar 型チェレンコフ検出器の時間分解能は中央の 位置で $\sqrt{51^2 - 20^2} = 47$ ps、X 型のアクリル輻射体と MPPC を組み合わせた X 型チェレンコフ 検出器の時間分解能は中央の位置で $\sqrt{36^2 - 20^2} = 30$ ps となる。

55

第4章

高計数率環境下における性能評価

4.1 電子・陽電子ビームを用いたテスト実験

4.1.1 目的

J-PARC E50 実験における1セグメントあたりの想定ビームレートである3 MHz での時間分解 能の評価が目的である。高計数率環境下でテストを行い検出器で発生する信号の頻度を上げること で、低計数率では生じないパイルアップ等の時間分解能への影響を調べる。ビームタイミング検出 器の試験器として3種類の検出器を用意し、これらの検出器について高計数率環境における性能評 価を行った。時間分解能の評価には異なる TDC モジュール (DRS4 モジュールと HUL モジュー ル)を2種類用いて、TDC モジュールの性能による違いも調査した。ビームレートを低計数率か ら徐々に上げていき、最大5 MHz までの計数率で測定を行い、時間分解能の計数率依存性を評価 した。

4.2 実験概要

4.2.1 東北大学電子光理学研究センター

テスト実験は、東北大学電子光理学研究センター (ELPH)の第2実験室において行った。東北 大学電子光理学研究センターの実験室レイアウトを図 4.1 に示す。線形加速器から入射された電子 ビームはブースターストレージリング (BST リング)で最大 1.3 GeV/c まで加速される。BST リ ングを周回する電子ビームに炭素ファイバーのラディエータを挿入することで制動放射により高 エネルギー光子が発生する。テスト実験は図 4.1 に示すように GeV-γ 照射室に入射する位置にお いて行った。発生した光子を出口のアルミニウムのフランジによってコンバージョンさせ、e[±] を ビームとして利用した。磁石等で粒子の電荷を分離しなかったため、対生成した e⁺ と e⁻ が同時 に検出器を通過する場合もあった。ビーム強度は、BST リングの周回電子の数と炭素ファイバー ラディエータを挿入する速度によって調整した。また、フランジの表面に金属の板を貼り、厚さを 厚くすることによってもビーム強度を調節することができる。テスト実験ではフランジとその表面 に1mmのアルミ板を張り、合計2mm厚のアルミにて光子をコンバージョンした。



図 4.1: 東北大電子光理学研究センターの実験室レイアウト。線形加速器から入射された電子ビー ムはブースターストレージリング (BST リング) で最大 1.3 GeV/c まで加速される。BST リング を周回する電子ビームに炭素ファイバーのラディエータを挿入することで制動放射により高エネ ルギー光子が発生する。テスト実験は図 4.1 に示すように GeV-γ 照射室に入射する位置において 行った。

4.2.2 セットアップ

実験で使用した試験器は、第3章で行った実験の試験器と同様である。プラスチックシンチレーション検出器は、3 mm(W) × 3 mm(T) × 150 mm(L) のサイズのプラスチックシンチレータにテフロンテープ (厚さ 0.1 mm)を二重に巻いたものをビーム方向に対して垂直に設置し、MPPCをプラスチックシンチレータの両端に取り付けた。Bar型チェレンコフ検出器は、3 mm(W) × 3 mm(T) × 150 mm(L) のサイズを用意し、空気との全反射条件にて光を輸送するため、反射材は使用しない。設置の容易さと、少し角度が変わっても性能(光量や時間分解能)が変わらないため、本実験ではアクリルの棒をビーム軸に対して 45 度に傾けて棒の端に MPPCを配置した。X型チェレンコフ検出器は 3 mm(W) × 3 mm(T) × 150 mm(L) のサイズであり、ビーム軸からの交差の開き角が 45 度であるアクリル輻射体の下流側の両端に MPPC を取り付けた。実機の製作の際の設置の容易さを考え、開き角を 48 度から 45 度に変更した。チェレンコフ検出器に関し

ては整形回路で信号の増幅を行っているが、少ない光量のためゲインが足りなかったので、さら に出力信号を PMT アンプで 10 倍にして読み出した。プラスチックシンチレータ及びアクリルと MPPC の接着部分には屈折率が 1.405 の粘着剤が付いた透明なシリコンシート (厚さ 0.125 mm) を使用した。これらの試験器のセットアップの概要図を図 4.2 に示す。ビームタイミング検出器



チェレンコフカウンター

図 4.2: テスト実験のセットアップ (ELPH)。リファレンスカウンター (Ref1, Ref2, Ref3) を置き、 Ref1 と Ref2 の間にビームタイミング検出器の試験器を設置した。

の試験器用のリファレンスカウンターとして、プラスチックシンチレータ検出器をクロスさせて AND 信号をとることで 3 mm × 3 mm の範囲にビームを限定している。これを試験器の上流と下 流に設置した (Ref1, Ref2)。さらに 6 mm 幅のプラスチックシンチレータを Metal Package PMT (R9880U-113) で片側から読み出す検出器を製作し、これを 2 つ重ね、AND 信号をとることで 6 mm 幅の範囲にビームが来たイベントを取得した (Ref3)。トリガーは、Ref1 と Ref3 の AND 信 号にて作った。

検出器の時間情報は、DRS4 モジュールと HUL モジュール [20] に信号をそれぞれ入力して 取得し、波高情報は DRS4 モジュールにて取得した。DRS4 モジュールは、FPGA ベースの high-resolution TDC (時間分解能 20 ps)を備え、内部のディスクリミネータによってタイミン グ情報を取得でき、さらに波形情報の取得も可能である。取得した波形は、波高のみを使用し、 slewing correction と高計数率環境下での影響の調査のために使用した。HUL モジュールへの入 力信号は、SPring-8 の LEPS2 実験で使用されているディスクリミネータ [19] でタイミングを切 り、FPGA ベースの high-resolution TDC (時間分解能 20 ps)を備えたメザニンカードを HUL モジュールに接続してタイミング情報を測定した。DRS4 モジュールは入力信号がディスクリミ ネータに入る前に前段のアンプ回路があり、高計数率環境ではアンプ回路の変動の影響も顕在化 する可能性がある。そのため、高速のディスクリミネータと入力部分にアンプ回路の無い HUL モ ジュールを比較として用いた。

4.2.3 測定条件

検出器の動作条件として、動作電圧は、オーバー電圧 +7 V、しきい値は、チェレンコフカウン ターで 3.5 p.e.、シンチレーションカウンターで MIP の波高の 10 % でかけた。これらの測定条件 を固定し、ビーム強度のみを変えて、時間分解能の依存性を調べた。

4.2.4 計数率の測定

ELPH の加速器からのビーム強度は、ラディエータの挿入中に時間変動しており、検出器の瞬間 的な計数率とスピルで平均をとった計数率で2-3倍の違いがある。そのため、各検出器の計数率 はトリガーがあったイベントごとに取得して解析に使用した。DRS4モジュールのディスクリミ ネータの出力信号を HUL モジュール (FPGA を変更して HUL scaler モードで使用した) に入力 した。HUL scaler はトリガーごとに計数率のデータを出力できるため、トリガーがあったイベン トごとの瞬間の計数率の情報が得られる。テスト実験での計数率の評価の際には、1 kHz のクロッ ク入力を基準として、ELPH 加速器のスピル構造を考え 200 ms ごとにスケーラー値の平均をとる ことで、検出器の瞬間の計数率とした。

4.3 解析

4.3.1 波高の選択

DRS4 モジュールにて取得した高計数率環境下での典型的な波形を図 4.3 に示す。高計数率環境 下では 1 µs の範囲内に信号が複数個入る。そのため、トリガータイミングでの信号を選択する必 要がある。

トリガータイミングを選択するため、低計数率のデータにおいて、取得した波形のタイミング分 布を示したものが図 4.4 である。トリガータイミングの波形において時間の広がり (250 – 300 ns) が見られるが、これは DRS4 モジュールのクロック幅に相当する。したがって、図 4.4 中の赤線 の 230 ns から 300 ns の範囲内の信号がトリガータイミングの信号範囲とした。この範囲内で最も 電圧の高い時間をピーク位置とし、最高電圧を信号の波高として用いた。取得した波高の分布を図 4.5 に示す。このテスト実験では、高エネルギー光子のコンバージョンによる e[±] をビームとして 使用しているため、e⁺ と e⁻ が同時に検出器に入ることがあり、MIP の二倍のエネルギーを落と す。高い波高のイベントは光量が多く、時間応答がさらに良く出るため、MIP の条件での検出器 の性能を評価するため、解析では高い波高のイベントをカットして除いた。カットは MIP のピー クと 2MIP のピークの谷間を基準に行った。



図 4.3:高計数率環境下での信号波形。高計数率環境下では、1 µs の範囲内に信号が複数個入る。 この例では 290 ns にある信号がトリガータイミングである。



図 4.4: 低計数率環境下での波形のタイミング分布。赤線の 230 ns から 300 ns の範囲内の信号を トリガータイミングに来た信号の波形と考えた。



図 4.5: 検出器の波高分布。(a) シンチレーション検出器、(b)3 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出 器、(c)(d) はそれぞれ 3 mm 幅の X 型チェレンコフ検出器の上側と下側である。e[±] が同時に検出 器に入った場合、MIP の二倍の光量となるため波高の高いピークがある。赤い斜線が選択範囲を 示す。

4.3.2 計数率分布の選択

計数率依存性を調べるため、ビームの強度のみを変えた条件で、複数のデータを取得した。図 4.6 に例として X 型のチェレンコフ検出器の計数率の分布を示す。(a) が低計数率で平均 200 kHz のデータである。(b)(c) が高計数率で、それぞれ平均 1.5 MHz、3 MHz のデータである。計数率 分布から (1)0.14 – 0.22 MHz、(2)0.22 – 0.30 MHz、(3)0.90 – 1.40 MHz、(4)1.40 – 2.00 MHz、 (5)2.20 – 3.40MHz、(6)3.40 – 5.00 MHz の 6 つの計数率の範囲を選択し、これらの計数率におけ る時間分解能を求めた。



図 4.6: X 型チェレンコフ検出器 (上側) の計数率分布。DRS4 モジュールのディスクリミネータの 出力信号を HUL scaler にてイベントごとに測定し、200 ms ごとに取得した信号の数を瞬間の計 数率として算出した。(a) が低計数率で平均 200 kHz のデータである。(b)(c) が高計数率で、それ ぞれ平均1.5 MHz、3 MHz のデータである。

4.3.3 Slewing correction

DRS4 モジュールで取得した波高によって DRS4 モジュールの TDC と HUL モジュールの TDC でそれぞれ測定した飛行時間の time walk を補正する。補正の関数は、第3章で使用したも のと同じである。図 4.7 に DRS4 モジュールの TDC を用いた測定における低計数率環境下と高 計数率環境下でのそれぞれの補正前後の相関を示す。図 4.8 に HUL モジュールの TDC を用いた 測定における低計数率環境下と高計数率環境下でのそれぞれの補正前後の相関を示す。この時、計 数率が上がっても、slewing 補正に使用した関数のパラメータは変化しなかった。したがって、5 MHz までの高計数率においても従来の slewing correction の方法が有効であることが分かった。



図 4.7: DRS4 モジュールにおける slewing correction 前後の波高と飛行時間の相関。縦軸が 3 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器と X 型チェレンコフ検出器の間の TOF、横軸が X 型チェレンコフ検出器の上側の波高である。(a) が低計数率環境下における補正前、(b) が低計数率環境下における補正後の相関である。(c) が高計数率環境下における補正前、(d) が高計数率環境下における補正後の相関である。

補正後の相関を時間軸へ射影し、これらの時間分布に対してガウス関数で fit して TOF の標準



図 4.8: HRTDC モジュールにおける slewing correction 前後の波高と飛行時間 (TOF)の相関。 縦軸が3 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器と X 型チェレンコフ検出器の間の TOF、横軸が X 型チェレンコフ検出器の上側の波高である。(a) が低計数率環境下における補正前、(b) が低計数 率環境下における補正後の相関である。(c) が高計数率環境下における補正前、(d) が高計数率環 境下における補正後の相関である。

偏差を得て、連立方程式を解くことによって検出器固有の時間分解能を計数率ごとに求めた。TOF を測定した具体的な検出器の組み合わせは、3 mm 幅のリファレンスシンチレーション検出器、3 mm 幅の Bar 型チェレンコフ検出器、X 型チェレンコフ検出器である。

4.4 結果

4.4.1 計数率依存性

DRS4 モジュールで測定した TOF の時間分解能の計数率依存を図 4.9 に、HUL モジュールで 測定した TOF の時間分解能の計数率依存性を図 4.10 に示す。TOF の時間分解能は、どちらのモ ジュールでも計数率が上がるにつれて悪化している。



図 4.9: DRS4 モジュールでの TOF の時間分解能の計数率依存。縦軸が検出器固有の時間分解能、 横軸が計数率である。横軸の計数率の誤差棒は、選択した計数率の範囲を示している。縦の誤差棒 はプロットした点のサイズ程度である。

DRS4 モジュールで測定した検出器固有の時間分解能の計数率依存を図 4.11 に、HUL モジュー ルで測定した検出器固有の時間分解能の計数率依存性を図 4.12 に示す。どの試験器でも、またど ちらの TDC モジュールであっても計数率が上がるにつれて、時間分解能の悪化が見られたが、 J-PARC E50 実験の想定計数率である 2 – 3 MHz では、すべて 100 ps 以下の時間分解能となるこ とが分かった。目標の 80 ps (rms) 以下の時間分解能は、HUL モジュールの使用において、すべ ての検出器で達成した。その中で X 型チェレンコフ検出器が DRS4 モジュールにて (66.4 ± 0.9) ps、HUL モジュールにて、(54.1 ± 0.8) ps の時間分解能を達成した。



図 4.10: HUL モジュールでの TOF の時間分解能の計数率依存。縦軸が検出器固有の時間分解能、 横軸が計数率である。横軸の計数率の誤差棒は、選択した計数率の範囲を示している。縦の誤差棒 はプロットした点のサイズ程度である。



図 4.11: DRS4 モジュールでの検出器固有の時間分解能の計数率依存。縦軸が検出器固有の時間分 解能、横軸が計数率である。横軸の計数率の誤差棒は、選択した計数率の範囲を示している。縦の 誤差棒はプロットした点のサイズ程度である。



図 4.12: HUL モジュールでの検出器固有の時間分解能の計数率依存。縦軸が検出器固有の時間分 解能、横軸が計数率である。横軸の計数率の誤差棒は、選択した計数率の範囲を示している。縦の 誤差棒はプロットした点のサイズ程度である。

4.4.2 時間分解能悪化の原因の考察

高計数率環境下において、DRS4 と HUL の TDC モジュールどちらにおいても、時間分解能の 悪化が見られた。この原因について、考えられる可能性を列挙する。

1. 信号パイルアップによる影響

高計数率にすることで、信号どうしのパイルアップや、トリガータイミングより先行した信 号がベースライン等に影響した可能性がある。これは波形の解析によって調べることがで きる。図 4.13 に低計数率環境下における波形での信号のベースラインの選択範囲 (a) と信 号のリンギングの選択範囲 (b) を示す。それぞれ信号の前後 5 – 55 ns の範囲を選択した。 図 4.14 に低計数率環境下での信号のベースライン (a) と信号のリンギング (b) の波高分布 を示す。信号のベースラインはトリガータイミングの信号の前 5 – 55 ns の範囲を、信号の リンギングはトリガータイミングの信号の後 5 – 55 ns の範囲をそれぞれ波高の軸に射影し たものである。低計数率環境下で、ベースラインの中心値と幅はそれぞれ 2.53 mV と 1.35 mV、one photoelectoron の中心値と幅はそれぞれ 16.0 mV と 1.92 mV であった。一方、 信号のリンギングはベースラインから大きく変わっていることが分かる。リンギングのピー クは 28.7 mV であり 1.5 – 2.0 p.e. 程度に対応している。さらにリンギングは、-70 – 130 mV の範囲に分布が広がっている。したがって、ベースラインと波高が変動することで正し く slewing correction が正しくできていないと考えられる。この影響について、次節にて詳 しく調査した。



図 4.13: 信号のベースライン (a) とリンギング (b) の波形での選択範囲。それぞれ信号の前後 5 – 55 ns の範囲を選択した。



図 4.14: 信号のベースライン (a) と信号のリンギング (b) の波高分布。トリガータイミングの信号 の後 5 – 55 ns の範囲の波形を波高の軸に射影したものである。リンギングのピークは 28.7 mV 程度であり 1.5 – 2.0 p.e. 程度に対応している。さらにリンギングは、-70 – 130 mV の範囲に分布 が広がっている。

2. ベースラインの変動

図 4.15 に低計数率 (A) と高計数率 (B) における DRS4 モジュールで取得した波形のベース ラインの分布を示す。波形を波高側に射影したものである。低計数率環境下と高計数率環境 下でのベースライン及び one photoelectoron、two photoelectron の各値を表 4.1 に示す。 表にはピークをガウス関数で fit したときの中央値と 1σ の幅を示した。誤差は小さく、小 数点第3以下であるため表では省略している。低計数率と高計数率でほとんど変化がないた め、アンプの出力信号のベースライン自体は安定していることが分かった。また、波高デー タの取得の際に同時に取得される one photon や two photon の波高の幅や分布のピーク間 の値についても大きな変化は無かったため、アンプ出力のベースラインは安定していると結 論付けられる。

表 4.1: ベースライン等の値。

	低計数率環境下	高計数率環境下
ベースライン (ピーク値/1σ の幅) [mV]	2.53/1.35	2.75/1.51
one photoelectron (ピーク値/1 σ の幅) [mV]	16.0/1.92	15.9/2.28
two photoelectron (ピーク値/1 σ の幅) [mV]	31.4/2.73	31.0/3.07

3. アンプのゲインの変動

図 4.16 に低計数率 (A) と高計数率 (B) における DRS4 モジュールで取得したプラスチック シンチレータの波高の分布を示す。表 4.2 に低計数率環境下と高計数率環境下での、1 粒子 通過のピークの値及び 2 粒子通過のピークの値を示す。上記 1. の項目でリンギングでベー スラインが変動しているのが分かったので、その効果を区別するため、それらのイベントは



図 4.15: 波形のベースラインの分布。(A) が低計数率、(B) が高計数率である。低計数率と高計数 率で変化がなく、アンプの出力信号のベースライン自体は安定している。

表 4.2: プラスチックシンチレータの 1MIP と 2MIP の波高の値。

	低計数率環境下	高計数率環境下
1 粒子通過ピーク [mV]	144.3 ± 0.2	137.8 ± 0.3
2 粒子通過ピーク [mV]	279.2 ± 0.5	268.2 ± 0.8

除去した。粒子の通過に対応する波高のピーク位置に若干の変動が見られた。しかし、上記 2の項目で調べたようにベースラインの変動が小さく、波高情報は time walk と対応するた め、波高のシフトだけでは slewing correction に問題なく、時間分解能には影響しないと考 えられる。



図 4.16: プラスチックシンチレータの波高分布。(A) が低計数率、(B) が高計数率である。粒子の 通過に対応する波高のピーク位置に若干の変動が見られた。
4. FPGA high-resolution TDC の性能劣化

FPGA high-resolution TDC について、高計数率環境下においても、時間分解能が安定し ていると報告されている [21]。しかしながら、この評価はクロック入力のみの評価であり、 近隣のチャンネルの同時ヒットや異なる計数率の場合の応答等の実際の測定条件を完全に調 べ切れてはいない。そのため、モジュール自体の性能劣化が影響した可能性がある。

以上、4 つの影響を考察した。上記の考察のように 2 と 3 が性能に大きく影響しているとは考え にくい。1 については、アンプ出力信号のリンギングが影響した可能性があるため、次節にて詳し く調べた。また、4 の影響についても次節で調査した。

4.4.3 先行信号による時間分解能への影響

本実験で使用した MPPC の信号は、反転増幅微分回路にて整形しており、信号の立ち下りの後 にリンギングが残っている。リンギングに信号が重なることでベースラインの変動によってディス クリミネータでのタイミングが変わり、時間分解能が悪化すると考えられる。取得した波形からト リガータイミングに先行して信号があるイベントを取り除くことで評価した。図 4.17 に先行信号 のリンギングの上にトリガータイミングの信号がパイルアップしているイベントの例を示す。この ようなイベントの選択を、トリガータイミングで来た信号の前の、50 ns、100 ns、150 ns、200 ns の範囲を調べ、先行信号の有無によって行った。



図 4.17: トリガータイミングの前に先行信号があるイベントの例。

図 4.18 に、トリガータイミング前 50 ns の範囲に先行信号があるイベントを選択したときの検 出器の計数率分布を示す。黒がすべてのイベント、赤がパイルアップイベントを除いたイベント、 青がパイルアップイベントのみである。パイルアップイベントを除いても計数率の分布が変わら ず、均等な確率でパイルアップが起きていることが分かる。このときのパイルアップイベントの割 合は、(21.4 ± 0.2) % であり、計数率 (平均 3 MHz) と時間幅 (50 ns) から想定されるパイルアッ プの割合より多いが概ね一致している。



図 4.18: パイルアップイベントの計数率。黒線がすべてのイベント、赤線がパイルアップイベント を除いたイベント、青線がパイルアップイベントのみである。パイルアップイベントを除いても計 数率の分布が大きく変わらない。

図 4.19 に、すべてのイベントとパイルアップイベントを除いたイベント、パイルアップイベントのみのものに対して slewing correction で補正を行った後の TOF の分布を示す。黒線がすべてのイベント、赤線がパイルアップイベントを除いたイベント、青線がパイルアップイベントを選んだ場合である。パイルアップイベントでは顕著に分解能が悪化していることが分かる。

X型チェレンコフ検出器にて先行信号がパイルアップしたイベントを除いたイベントのみで時 間分解能を導出した。図 4.20 と図 4.21 にそれぞれトリガータイミングの前 50 ns を調べた DRS4 モジュールと HUL モジュールでの結果をに示す。パイルアップイベントを除いたイベントの時間 分解能は、すべてのイベントを用いたときの時間分解能より良くなっている。一方パイルアップの みのイベントで時間分解能は二倍程度悪化している。先行信号を 50 ns で取り除いた場合、2 – 3 MHz で DRS4 モジュールで (59.8 ± 1.0) ps、HUL モジュールでは (47.4 ± 1.0) ps を得た。



図 4.19: パイルアップイベントの TOF 分布。黒線がすべてのイベント、赤線がパイルアップイベ ントを除いたイベント、青線がパイルアップイベントのみである。パイルアップイベントが期間分 解能の悪化に影響していることが分かる。



図 4.20: DRS4 モジュールでのパイルアップイベントを考慮した時間分解能。パイルアップイベントはトリガータイミング前 50 ns を調べたものである。それぞれ、黒点はパイルアップをしている イベントのみ、赤点は全体のイベント、緑点はパイルアップイベントを除いた分解能である。



図 4.21: HUL モジュールでのパイルアップイベントを考慮した時間分解能。パイルアップイベントはトリガータイミング前 50 ns を調べたものである。それぞれ、黒点はパイルアップをしている イベントのみ、赤点は全体のイベント、緑点はパイルアップイベントを除いた分解能である。

さらに、50 ns、100 ns、150 ns、200 ns の範囲を調べた場合のパイルアップイベントを除いた イベントの時間分解能の結果を図 4.22 (DRS4 モジュール) と図 4.23 (HUL モジュール) に示す。 DRS4 モジュールでは、時間分解能は変わらないが、HUL モジュールでは、200 ns の範囲のパイ ルアップイベントを除いたイベントを用いての時間分解能は (39.6 ± 1.9) ps を得た。したがって、 先行信号のリンギングのパイルアップが時間分解能に大きく影響することが分かった。



図 4.22: DRS4 モジュールでのパイルアップイベントを除いたイベントによる時間分解能。それぞれ、黒点はトリガータイミング前 50 ns、緑点はトリガータイミング前 100 ns、青点はトリガータ イミング前 150 ns、赤点はトリガータイミング前 200 ns を調べ、パイルアップイベントを除いた ときの時間分解能である。

以上より、計数率が上昇するにつれて時間分解能が悪化した原因は、先行信号がパイルアップし た際にリンギングがベースラインの変動としてタイミング測定に大きく影響したためであると考 えられる。パイルアップイベントを除いた時間分解能において DRS4 モジュールでは、変化がな かったが、HUL モジュールでは時間分解能が回復した。先行信号のリンギングのパイルアップを 分解能が回復する 200 ns の範囲で除いた場合、全イベントの 6 割を失うことになってしまう。し たがって、整形回路に対して信号にリンギング成分が発生しないような改良が必要不可欠である。

本実験では二種類のディスクリミネータでタイミングをとり、FPGA ベースの high resolution TDC を備えた DRS4 モジュールと HUL モジュールを用いて、時間情報の測定を行った。2 つの モジュールで時間分解能の差があり、これは DRS4 モジュールの前段のアンプの性能に起因する と考えられる。DRS4 モジュールの入力信号は前段のアンプを通過した後にディスクリミネータに 入るため、高計数率環境ではアンプにおけるパイルアップによるベースラインの変動等がタイミン グ測定に影響した可能性がある。また、HUL モジュールにおいても時間分解能は完全に回復はし



図 4.23: HUL モジュールでのパイルアップイベントを除いたイベントによる時間分解能。それぞれ、黒点はトリガータイミング前 50 ns、緑点はトリガータイミング前 100 ns、青点はトリガータ イミング前 150 ns、赤点はトリガータイミング前 200 ns を調べ、パイルアップイベントを除いた ときの時間分解能である。

なかった。高計数率において入力信号の頻度が上がることで FPGA 内部での電圧変動等が生じ、 モジュール自体の分解能に若干の悪化が生じたと考えられる。このとき、X 型チェレンコフ検出器 の本来の時間分解能が低計数率環境下での分解能だとすると、高計数率環境下でのモジュールの時 間分解能は $\sqrt{40^2 - 30^2} = 26$ ps となっている可能性がある。今後、モジュールの性能の悪化を調 べるためには、入力信号の頻度や近隣チャンネルの影響等を様々な条件で調査する必要がある。一 方で、実験の目標の分解能を得るという点では、このモジュール自体の変動と考えられる影響は小 さい。したがって、十分な時間分解能の性能が FPGA ベースの high-resolution TDC で得られて いることが分かった。

4.5 まとめ

シンチレーション検出器

想定計数率である 2 – 3 MHz では、DRS4 モジュールにおいて (94.7 ± 1.1) ps、HUL モジュー ルにおいて (75.1 ± 0.8) ps の時間分解能を達成した。

Bar 型チェレンコフ検出器

想定計数率である 2 – 3 MHz では、DRS4 モジュールにおいて (65.1 ± 1.7) ps、HUL モジュー ルにおいて (70.1 ± 0.9) ps の時間分解能を達成した。

X型チェレンコフ検出器

想定計数率である 2 – 3 MHz では、DRS4 モジュールにおいて (66.4 ± 0.9) ps、HUL モジュー ルにおいて (54.0 ± 0.8) ps の時間分解能を達成した。さらに、200 ns の範囲のパイルアップイベ ントを除いたイベントを用いた場合では、DRS4 モジュールにおいて (59.9 ± 1.8) ps、HUL モ ジュールにおいて (39.6 ± 1.9) ps の時間分解能である。

以上より、どの検出器も計数率を上げると時間分解能は悪化するが、HUL モジュールを使用した場合、すべての検出器でビームの想定計数率において、目標である 80 ps (rms) 以下を達成している。その中で、X 型チェレンコフ検出器が最も良い時間分解能を達成した。時間分解能の悪化の原因として、先行信号のリンギングがトリガータイミングの信号とパイルアップした場合であることが分かった。パイルアップしたイベントを除いた解析での時間分解能は HUL モジュールでは低計数率環境下の分解能と同等になることが分かった。高計数率環境下における試験によって、MPPC 直後のアンプのリンギングのパイルアップによって時間分解能が悪化することが分かり、また FPGA モジュールの高計数率での挙動の変化の影響がある可能性があり、読み出し回路の改良や今後に必要な性能の評価も行うことができた。最も大きな寄与である信号のリンギングの影響を取り除くために、整形回路に対して信号のリンギング成分が発生しないような改良が必要不可欠である。

77

第5章

結論

本研究では、チャームバリオン分光実験で使用するビームタイミング検出器の開発を行った。

ビームタイミング検出器の要求性能は、30 MHz のビームを測定し、標的で反応を起こして生成 された散乱粒子を飛行時間測定によって識別するため、60 – 80 ps (rms)の高い時間分解能が必要 である。また、ビームタイミング検出器は、標的の直前に置かれ電磁石の間口の近傍となるため、 漏れ磁場があっても動作する必要がある。

ビームタイミング検出器を開発するにあたって、光検出器や光センサーなどの各構成要素につい て基本的な性質を述べ、検討した。光検出器として、従来より使われているプラスチックシンチ レータと早い応答が見込めるチェレンコフ輻射体を、また光を読み出す光センサーとして、応答の 早い光電子増倍管と MPPC を検討した。検出器の構成と要求を考慮して、断面積が3 mm 角で長 さが150 mm のプラスチックシンチレータとチェレンコフ輻射体であるアクリルを MPPC で読み 出す検出器とした。チェレンコフ検出器は棒状のアクリルをビームに対して、チェレンコフ光の放 出角度に傾けて使う。チェレンコフ検出器を考える中で、チェレンコフ光の性能を最大限に活かし た検出器としてアクリルの板から一体の X 型のアクリルを切り出す X 型チェレンコフ検出器を考 案した。ビームタイミング検出器の試験器は、シンチレーション検出器と Bar 型チェレンコフ検 出器、X 型チェレンコフ検出器である。特に X 型チェレンコフ検出器は両読みのタイミング検出 器の技術をチェレンコフ光の読み出しに応用した新しいタイプの検出器であるため、動作特性等を 詳しく調べた。

試験器の動作特性を理解するため、J-PARC K1.8BR ビームラインにて低計数率環境でのテスト 実験を行った。テスト実験では、チェレンコフ検出器に関して、MPPCの動作電圧やディスクリミ ネータのしきい値、ビーム粒子の入射位置を変えて測定を行い、FPGA ベースの high-resolution TDC (時間分解能 20 ps)を使用して時間情報を取得し、時間分解能を求め各種依存性を調べた。 さらに、チェレンコフ検出器において傾けた場合のビーム方向の厚さ4 mm で十分な光量が得られ るかを調べた。位置ごとの光量を求め、ポアソン分布を仮定したときの検出効率を評価した。チェ レンコフ検出器においては、Bar 型にて平均 25 p.e.、X 型において全体の光量で平均 43 p.e. が 得られた。これは、最適に設定されたしきい値 (3.5 p.e.) に対して十分な光量である。シンチレー ション検出器と X 型チェレンコフ検出器が、目標時間分解能を達成し、さらに位置依存なくタイ ミング測定が行えることが分かった。特に X 型チェレンコフ検出器において、オーバー電圧 +7 V、しきい値 3.5 p.e. の測定条件で、検出器の中央位置において検出器固有の時間分解能が (35.6 ± 0.9) ps であり、他の位置では、+40 mm のビーム照射位置において (42.0 ± 1.8) ps であった。 個の測定により使用時の最適値を、電圧依存性から MPPC のオーバー電圧 +7 V、しきい値依存 性と光量から、しきい値 3.5 p.e. とした。

J-PARC E50 実験における 1 セグメントあたりの想定ビームレートである 3 MHz での時間分解 能の評価を東北大学電子光理学研究センターにて行った。低計数率から徐々に計数率を上げ、最大 5 MHz までのビームレートで検出器の性能を評価した。時間情報の測定は、FPGA ベースの high resolution TDC を備えた DRS4 モジュールと HUL モジュールを用いて行った。どの検出器も計 数率を上げると時間分解能は悪化したが、HUL モジュールの場合、すべての検出器でビームの想 定計数率において、目標である 80 ps (rms) 以下を達成した。その中で、X 型チェレンコフ検出器 が最も良い時間分解能を達成した。想定ビームレートである 2 – 3 MHz では、DRS4 モジュール において (66.4 ± 0.9) ps、HUL モジュールにおいて (54.0 ± 0.80) ps の時間分解能であった。さ らに、信号のパイルアップを評価し、パイルアップイベントを除いたイベントを用いた場合では、 DRS4 モジュールにおいて (59.9 ± 1.8) ps、HUL モジュールにおいて (39.6 ± 1.9) ps であった。

総合的に判断すると、実験で要求される高い時間分解能を持ち、位置依存依存性もない検出器要素で、最も良い時間分解能が得られる X 型チェレンコフ検出器がビームタイミング検出器として 最適であると結論付けられる。さらに、X 型チェレンコフ検出器は十分な光量を持ち、電圧依存の 特性やしきい値依存の特性もビームタイミング検出器としての柔軟な運用に耐えられるものであ る。以上、J-PARC E50 実験用のビームタイミング検出器の開発において、X 型のアクリルチェレ ンコフ輻射体と MPPC を使用することで、要求性能を満たす検出器構成要素の開発を達成した。

さらなる改善に向けた課題

今後の課題として、実機の設計がある。3 mm 幅の狭いセグメントや X 型の検出器を構成要素 としたとき、ビームのイベントすべてを検出できるように、隙間無く配置にする必要がある。ま た、時間の測定方法を考える必要がある。本研究では、slewing correction を行う際、波高を用い て補正を行った。Slewing correction では、TDC と ADC の両方を測定する必要がある。大強度 ビームを使用するチャームバリオン分光実験では、ADC を使用しない測定方法が必要であり、代 わりに TOT での補正を行うために、信号の整形回路を最適化する必要がある。使用した整形回路 では信号の立ち上がりを微分するのみであるため、波高が高くなると信号の幅が飽和してしまい、 幅の情報から波高の補正を行うのに十分ではない。そのため、整形回路としてタイミング情報の出 力の他に、波高と幅の情報を保つ形 (積分や遅い時定数) で信号を整形する出力を加える改良が必 要である。そして、高計数率環境下でリンギングのパイルアップの影響を除くため、リンギングの 発生を抑える改良が必要である。整形回路の時定数や増倍率、ダンピング抵抗等の回路素子の調整 によってリンギングの抑制を行う。これらの課題を解決し、今後ビームタイミング検出器の実機の 製作を行う予定である。

付録 A

シンチレーション検出器の 動作電圧依存、しきい値依存

第4章で行った実験の先立つ準備実験として東北大学電子光理学研究センターにおいて、低計数 率環境下でのシンチレーション検出器の電圧依存性としきい値依存性を調べた。以下、結果をまと める。

A.1 結果

A.1.1 MPPC 動作電圧依存性

図 A.1 にシンチレーション検出器の時間分解能の MPPC 動作電圧依存性を示す。縦軸が検出器 固有の時間分解能、横軸が逆電圧と降伏電圧の差のオーバー電圧である。測定条件は、オーバー電 圧を 1 V 単位で変化させ、+5 V から +8 V まで測定した。しきい値は、シンチレーション検出器 で MIP の波高の 10 % の電圧値である。オーバー電圧を上げると時間分解能が良くなることが分 かった。時間分解能は、+7 V で (56.8 ± 1.0) ps を得た。

A.1.2 しきい値依存性

図 A.2 にシンチレーション検出器の時間分解能の電圧しきい値依存性を示す。縦軸が検出器固 有の時間分解能、横軸がかけたしきい値電圧に相当する MIP 波高に対する割合の値である。動作 電圧は、オーバー電圧で +7 V、ビーム通過位置は検出器の中央である。8.3 %、10 %、12.5 % の 3 点のしきい値で測定した。このしきい値の範囲では、時間分解能はほとんど変化がないことが分 かった。



図 A.1: 検出器の試験器の時間分解能の MPPC 動作電圧依存性。縦軸が検出器固有の時間分解能、 横軸がオーバー電圧である。縦の誤差棒はプロットした点のサイズ程度である。オーバー電圧を上 げると、時間分解能が良くなる傾向が見られた。



図 A.2: シンチレーション検出器の時間分解能の電圧しきい値依存性。縦軸が検出器固有の時間分 解能、横軸がかけたしきい値電圧に相当する MIP の波高の割合の値である。縦の誤差棒はプロッ トした点のサイズ程度である。

付録 B

シリコンシート

本研究で光検出器と MPPC の光学コンタクトに使用したシリコンシートの情報をまとめる。こ のシリコンシートは、Nitto 社の LUCIACS CS9865US の光学用透明粘着シートである。表 B.1 に特性を示す。

表 B.1: シートの特性

厚み [mm]	0.125
180° 引き剥がし粘着力 [N/200 mm]	18 (対ガラス)/14 (対 PMMA)
透過率 [%]	92
屈折率	1.405

図 B.1 に波長ごとの透過率を示す [22]。フレネル反射により、100 % にはならないが、MPPC の有効検出波長領域で 90 % 以上の透過率を持ち、十分な性能である。

図 B.2 にチェレンコフ検出器のシリコンシートありなしの光量分布を示す。黒がシートなし (エ アーコンタクト)、赤がシートありの光量である。シリコンシートの使用によって光量が 1.7 倍程 度増加した。



図 B.1: シリコンシートの波長ごとの透過率 [22]。



図 B.2: シリコンシートありなしの光量分布。黒がシートなし (エアーコンタクト)、赤がシートなしの光量である。シリコンシートの使用によって光量が 1.7 倍程度増加した。

謝辞

本研究及び修士論文執筆にあたり、多くの方々にお世話になりました。この場を借りてお礼申し 上げます。

初めに指導教員である阪口篤志准教授には多くの助言を頂きました。また、発表や文章の較正な ど何度も見て頂きました。ありがとうございました。大阪大学核物理研究センターの白鳥昂太郎助 教には、テスト実験、解析、発表、修士論文執筆と手厚い指導をして頂きました。未熟な私に最後 まで、付き合って頂き、本当に感謝しています。大阪大学核物理研究センターの野海博之教授には、 このような研究の機会を頂き、深く感謝申し上げます。さらに実験等、様々な場面で支えて頂きま した。理化学研究所の浅野秀光特別研究員には、実験を行うための DAQ システムの構築を行って いただきました。また、データの Analyzer も用意していただきました。非常に感謝しております。

J-PARC K1.8BR ビームラインにてテスト実験を行う際、K1.8BR グループの方々に大変お世 話になりました。実験準備の際、実験がやりやすいように配慮して頂きました。ありがとうござい ました。

東北大学電子光理学研究センターでテスト実験を行うにあたっては、J-PARC E50 実験の皆様 にお世話になりました。特に、東北大学電子光理学研究センターの石川貴嗣助教には、実験の準備 から実験中と様々な場面でご協力頂きました。ありがとうございました。

同じ研究グループの先輩である中川真奈美さんには、わからなかったことを丁寧に教えて頂きま した。同期の星野寿春君、水越彗太君とは、研究室で2年間いろんなことをやってきてとても楽し く研究生活を送ることができました。

本当に多くの方々にお世話になりました。最後に、大学院まで行かせて頂き、さらに博士課程進 学まで許してくれた両親に深く感謝します。

参考文献

- [1] T. Nakano et al., Phys. Rev. Lett. 91, 012002 (2003).
- [2] R. Aaij et al., Phys. Rev. Lett. 115, 072001 (2015).
- [3] S. K. Choi et al, Phys. Rev. Lett. 91 262001 (2003).
- [4] H. Noumi et al, "Charmed Baryon Spectroscopy via the $p(\pi^-, D^{*-})$ reaction", KEK/J-PARC-PAC 2012-19.
- [5] K. Shirotori et al., JPS Conf. Proc. 8, 022012 (2015).
- [6] S.H. Kim, A. Hosaka, H.C. Kim, H. Noumi, K. Shirotori, Prog. Theor. Exp. Phys. 103D01 (2014).
- [7] 山我拓巳, "チャームバリオン分光実験用粒子識別検出器の設計", 2013 年度大阪大学理学研究 科修士論文
- [8] 冨田夏希, "大面積 · 高時間分解能 Resistive Plate Chamber の開発", 2011 年度京都大学理学 研究科修士論文
- [9] ELJEN TECHNOLOGY, GENERAL PURPOSE, EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212, https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212
- [10] ELJEN TECHNOLOGY, FAST TIMING EJ-228, EJ-230, https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-228-ej-230
- [11] 浜松ホトニクス株式会社, 光電子増倍管 R9880U-113, Datasheet, https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/R9880U-113/index.html
- [12] 浜松ホトニクス株式会社, 光半導体素子ハンドブック/第3章 Si APD, MPPC.
- [13] 浜松ホトニクス株式会社、プロモーション資料/精密計測用 MPPC/MPPC モジュール、 https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd0004j.pdf
- [14] Marc A. Wonders, et, al., "Assessment of Performance of New-Generation Silicon Photomultipliers for Simultaneous Neutron and Gamma Ray Detection" IEEE TRANSAC-TIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 65, NO. 9 (2018).
- [15] AD8000 data sheet.
- [16] T. Nishizawa et al., IEEE TNS 61 (2014) 1278.
- [17] T. Hashimoto, "Search for K-pp bound state in the $3\text{He}(\text{K}^-,\text{n})$ reaction at $p(\text{K}^-) = 1$ GeV/c", Doctor Thesis(2014).

- [18] T. N. Tomonori et al., "Development of a FPGA-based high resolution TDC using Xilinx Spartan-6", Annual Report 2016.
- [19] N. Tomida et al., "The TOF-RPC for the BGO-EGG experiment at LEPS2", Journal of Instrumentation, Volume 9, Octorber 2014.
- [20] R.Honda, "Hadoron Universal Logic Module 仕様書 兼 ユーザーガイド".
- [21] 本多良太郎, "Xilinx FPGA Kintex-7 への tapped delay line 型 high-resolution TDC の実 装", 日本物理学会 2017 年秋季大会.
- [22] S. Nagao, private communication.