

チャーム・バリオン分光実験における
シンチレーション・ファイバー
飛跡検出器の性能評価

大阪大学大学院理学研究科 物理学専攻

木村 祐太

2022年2月18日

概要

我々は、J-PARCのハドロン実験施設内の高運動量ビームラインにおいて、charm・バリオン分光実験 (J-PARC E50 実験) を計画している。E50 実験では標的付近が高計数率環境 (30 MHz) となることが想定されており、標的付近で使用する検出器群には高レート環境下で安定に動作することが要求される。実験標的付近での粒子の飛跡検出には、シンチレーション・ファイバー飛跡検出器 (FT) を用いる。FTはシンチレーション・ファイバーと1.3 mm角のMPPCを組み合わせた飛跡検出器であり、速い応答特性が期待される。我々は3種類のFTを製作した。1つはビームラインの上流における飛跡からビーム粒子の運動量を測定するFocal plane Fiber Tracker (FFT)、2つ目は実験標的の上流で入射ビーム粒子の飛跡検出を行うBeam Fiber Tracker (BFT)、3つ目は実験標的の下流で散乱粒子の飛跡検出を行うScattering Fiber Tracker (SFT)である。

本研究では3種類のFTに対して宇宙線を用いた試験を行った。宇宙線試験で得られたデータからFTで検出される光量、及び、検出効率を評価した。その結果、それぞれのFTをcharm・バリオン分光実験で使用するにあたって、十分な光量が検出されている事がわかった。検出効率はFFTが約99%、BFTが約96%であることが分かった。

また東北大学電子光理学研究センターにおいて、FTのデータ読み出しボード (Front-End Electronics : FEE) の高計数率環境下での性能評価を行った。FEEにはCITIROC1AとPETIROC2Aの2種類のASICをそれぞれ搭載したものを使用した。ビーム計数率は数段階に変更し、データの収集を行った。その結果、それぞれのASICを使用した際のMPPCゲイン、時間分解能、及び、検出効率の計数率依存性を評価した。

目次

第1章	序論	1
1.1	ハドロン物理学	1
1.1.1	ハドロンとクォーク模型	1
1.1.2	構成子クォーク模型	1
1.1.3	QCD	1
1.1.4	エキゾチック・ハドロンとクォーク模型	2
1.1.5	ダイクォーク相関	2
1.2	チャーム・バリオンにおけるダイクォーク相関	2
1.3	J-PARCにおけるチャーム・バリオン分光実験	3
1.4	高運動量ビームライン	4
1.5	チャーム・バリオン・スペクトロメータ	5
1.6	ストリーミングDAQシステム	5
1.7	シンチレーション・ファイバー飛跡検出器	7
1.8	本研究の目的	8
第2章	シンチレーション・ファイバー飛跡検出器の要求性能と構造	9
2.1	シンチレーション・ファイバー	9
2.2	Multi-Pixel Photon Counter	9
2.3	シンチレーション・ファイバー飛跡検出器の構造	11
2.3.1	Prototype Fiber Tracker	11
2.3.2	Focal plane Fiber Tracker	14
2.3.3	Beam Fiber Tracker	17
2.3.4	Scattering Fiber Tracker	18
2.4	高計数率環境下での要求性能	21
第3章	シンチレーション・ファイバー飛跡検出器の宇宙線試験	23
3.1	研究目的	23
3.2	実験セットアップ	23
3.2.1	EASIROC チップ搭載モジュール	23
3.2.2	FFT と BFT の光電子数評価の際のセットアップ	24
3.2.3	FFT と BFT の検出効率評価の際のセットアップ	25
3.2.4	SFT 光量評価の際のセットアップ	26

3.3	解析と結果	27
3.3.1	解析に用いる値とその分布	27
3.3.2	光電子数評価の解析方法	32
3.3.3	光電子数評価の結果	34
3.3.4	検出効率の解析方法	42
3.3.5	検出効率の結果	44
3.4	第3章のまとめ	49
第4章	シンチレーション・ファイバー飛跡検出器データ読み出しボードの高 計数率試験	50
4.1	研究目的	50
4.1.1	先行研究の結果	50
4.1.2	CITIROC1A と PETIROC2A	51
4.2	実験概要	53
4.2.1	東北大学電子光理学研究センターの加速器施設	53
4.2.2	ストリーミング DAQ システム	55
4.2.3	Front-End Electronics	55
4.2.4	実験セットアップ	55
4.2.5	測定条件	57
4.3	解析と結果	58
4.3.1	ストリーミング DAQ におけるイベントの選択方法	58
4.3.2	解析に使用する時間情報の定義	60
4.3.3	計数率依存解析のためのデータ分割	61
4.3.4	正確なビーム計数率の見積もり	61
4.3.5	信号のパイルアップによる数え落とし	65
4.3.6	MPPC のゲイン変動	67
4.3.7	時間分解能	73
4.3.8	検出効率	79
4.4	第4章のまとめ	82
第5章	まとめ	83

目次

1.1	チャーム・バリオンにおける励起モードの模式図	3
1.2	チャーバリオン生成反応の模式図	4
1.3	FM 双極電磁石	6
1.4	チャーム・バリオン・スペクトロメータの概要図	6
2.1	プラスチック・シンチレーション・ファイバーの構造	10
2.2	アレイタイプの MPPC	11
2.3	Prototype Fiber Tracker の構造	12
2.4	PFT の構造概略図	13
2.5	PFT の光信号読み出し	14
2.6	Focal plane Fiber Tracker (FFT) の全体、及び、側面写真	15
2.7	FFT 検出面の構造模式図	16
2.8	FFT の内部配線、及び、光信号読み出し部分	17
2.9	BFT の全体写真、及び、光信号の読み出し部分	19
2.10	BFT 検出面の構造模式図	20
2.11	SFT の全体図	21
3.1	EASIROC 搭載モジュール	24
3.2	FFT、及び、BFT の宇宙線試験のセットアップ概略図	25
3.3	FFT、及び、BFT の宇宙線試験の回路図	26
3.4	検出効率評価のセットアップ (水平方向)	27
3.5	検出効率評価のセットアップ (鉛直方向)	28
3.6	検出効率評価際の回路図	28
3.7	SFT データ収集に用いたトリガー検出器の模式図	29
3.8	SFT データ収集の際のトリガー配置の概略図	29
3.9	SFT データ収集の際の回路図	30
3.10	宇宙線試験における TDC 分布と ADC 分布	31
3.11	FT チャンネル番号の定義	31
3.12	BFT の x layer のヒットパターン	32
3.13	検出される光電子数の評価	33
3.14	チャンネル番号ごとの検出光電子数	35
3.15	MPPC のバイアス電圧ごとの検出光電子数の分布	35

3.16	MPPC の特性のバイアス電圧依存	36
3.17	BFT のチャンネルごとの光電子数	38
3.18	BFT の x layer のヒット・パターンと検出光電子数の比較	39
3.19	BFT の各 layer に対する検出された光電子数の分布	39
3.20	FFT のチャンネルごとの検出された光電子数	41
3.21	FFT の各 layer に対する検出された光電子数の分布	42
3.22	SFT のチャンネルごとの検出された光電子数	43
3.23	SFT の各 layer に対する検出された光電子数の分布	44
3.24	検出効率評価の際に用いたヒット・パターン	45
3.25	BFT x layer のヒットパターン	47
3.26	ヒットパターンの補正	47
4.1	CITIROC1A のブロックダイアグラム	52
4.2	PETIROC2A のブロックダイアグラム	53
4.3	東北大学電子光理学研究センターの施設概要図	54
4.4	Front-end electronics boards	56
4.5	本実験のセットアップ (ELPH)	57
4.6	リファレンス・カウンターの構造図	58
4.7	ストリーミング DAQ におけるデコード方法の模式図	60
4.8	ELPH ビームスピル中の変動	61
4.9	ダブルパルスの模式図	62
4.10	PETIROC2A 使用時の ΔT 分布	63
4.11	信号のパイルアップの模式図	64
4.12	パイルアップに依る数え落としの例	64
4.13	ΔT 分布及びフィッティングによるビーム計数率の見積もり	65
4.14	それぞれの FT-ASIC の組み合わせにおけるあるチャンネルの ΔT 分布	66
4.15	FT-ASIC の組み合わせごとの survival ratio の計数率依存	68
4.16	TOT 分布	70
4.17	PETIROC2A 使用時の ΔT と TOT の相関	71
4.18	TOT とビーム計数率の相関	72
4.19	BFT-CITIROC1A の high ゲインにおける TOT 変動	73
4.20	Time walk の模式図	74
4.21	CITIROC1A 使用時の TOT と TOF の相関	75
4.22	PETIROC2A 使用時の TOT と TOF の相関	76
4.23	Time walk 補正後の TOF 分布	77
4.24	リファレンス・カウンターの時間分解能	79
4.25	FT-ASIC の時間分解能	80
4.26	リファレンス・カウンターの構造とその範囲の模式図	81

4.27 BFT-ASIC 検出効率レート依存性	82
------------------------------------	----

表 目 次

1.1	高運動量ビームラインで使用される検出器群	8
2.1	Kuraray 社製 マルチクラッド・プラスチック・シンチレーション・ ファイバー (SCSF-78M) の特性	10
3.1	MPPC のバイアス電圧ごとの光電子数分布の平均値	34
3.2	BFT の各 layer の光電子数分布の平均値	37
3.3	FFT の各 layer の光電子数分布の平均値	40
3.4	SFT の各 layer の光電子数分布の平均値	42
3.5	BFT 検出効率	45
3.6	FFT 検出効率	46
3.7	FFT における飛跡検出可能な割合	48
3.8	BFT における飛跡検出可能な割合	48
4.1	FT のセットアップ条件	59
4.2	ビーム強度の条件	59
4.3	パイルアップが生じている ΔT の範囲	66
4.4	1 MHz/mm のビーム計数率におけるパイルアップによる数え落と しの割合。	69

第1章 序論

1.1 ハドロン物理学

1.1.1 ハドロンとクォーク模型

ハドロンとは強い相互作用する粒子の総称で、大きくはバリオンとメソンに分類される。1947年以降、宇宙線の観測により様々なハドロンが発見され始めた。加速器技術の発展と共に更に多くのハドロンが発見され、その総数は今では数百になっている。多くのハドロンが発見される中でその種類や性質が矛盾なく説明できる模型を考案する必要があるがあった。1964年に Gell-Mann と Zweig によってクォーク模型が提唱された。クォーク模型ではハドロンは素粒子ではなく、更に基本的な粒子であるクォークから作られた複合粒子であると考えた。クォークの種類はフレーバーと呼ばれており、1964年の段階ではアップ (u)、ダウン (d)、ストレンジ (s) の3種類であったが、その後、チャーム (c)、ボトム (b)、トップ (t) が発見され、今では6種類存在することがわかっている。1960年代後半には高エネルギーの電子をハドロンに衝突させて起こる深非弾性散乱により、ハドロン内のクォークの存在が確認された。

1.1.2 構成子クォーク模型

構成子クォーク模型とはハドロンを構成子クォークと呼ばれる準粒子の複合体と考えるモデルである。深非弾性散乱から得られた u, d クォークの質量は、わずか数 MeV/c^2 程度でありハドロンの質量に対してかなり小さい。例えば、2つの u と1つの d で構成されるハドロンである陽子の質量は、約 $938 \text{ MeV}/c^2$ である。そこで、ハドロンを構成する主な粒子として、構成子クォークと呼ばれる質量約 $300 \text{ MeV}/c^2$ の準粒子を用いたモデルが考えられた。ハドロンの質量や基底状態の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 QCD

ハドロン内部の構造が研究される中で、強い相互作用の基礎理論として量子色力学 (QCD) が生まれた。QCD ではハドロンはクォークとグルーオンによって出

来ており、強い相互作用は色電荷を持つクォークとグルーオンのゲージ相互作用として記述される。グルーオンとは電磁相互作用における光子と同じ役割を果たすゲージボソンである。色電荷は、光の三原色になぞらえて、赤、青、緑の三種類が存在する。QCDではハドロンは全体として白色になるとされている。つまり、バリオンであれば3つのクォークは赤、青、緑の色電荷が集まって、白色となり、メソンであれば赤と反赤のように色電荷とその補色が結合して白色となっている。

1.1.4 エキゾチック・ハドロンとクォーク模型

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ペンタ・クォークやテトラ・クォークといった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・クォークや、重いクォークを含むハドロンでもペンタ・クォークやテトラ・クォークと考えられる状態が報告されている。

1.1.5 ダイクォーク相関

ハドロンの内部構造の性質は構成子クォーク模型でよく説明されている。しかし、一部の励起状態やエキゾチック・ハドロンのような状態は構成子クォーク模型では理解できない。この問題を解決するため、ダイクォーク相関と呼ばれる2クォーク間の相関を有効自由度として導入する試みがなされている。

1.2 チャーム・バリオンにおけるダイクォーク相関

チャーム・バリオンとは、チャーム・クォークを含むバリオンである。チャーム・クォークはu, dの構成クォーク質量に比べて、5倍程度重い有効質量を持っている。図1.1にチャーム・バリオンにおける励起モードの模式図を示す。バリオンを構成する3つのクォークが同程度の質量の場合、ダイクォーク相関は縮退するため分離することが困難である。チャーム・バリオンではチャーム・クォークと軽いクォークとの重さの違いにより、2つの軽いクォークの運動がダイクォーク相関として分離する。ダイクォーク相関はハドロン物理においては理論的に存在が示唆されているが、確固たる実験的証拠が未だ得られていない。チャーム・バリオンでは、軽いクォーク対(ダイクォーク)の励起状態(ρ モード)とダイクォークとチャーム・クォークとの相対運動による励起状態(λ モード)が生じる。そのため、チャーム・クォークを含むバリオンの励起準位を詳細に測定し、各励起状態

がどどの励起モードであるかを調べることで、ダイクォーク相関を明らかにすることができる。

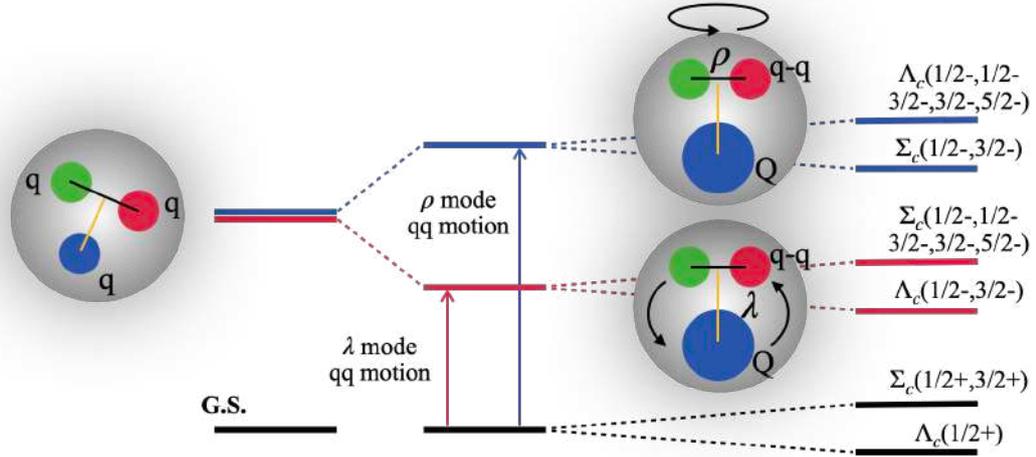


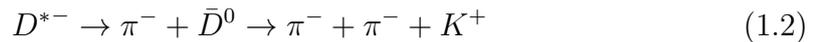
図 1.1: チャーム・バリオンにおける励起モードの模式図 [1]。軽いクォーク対の励起 (ρ モード) と、軽いクォーク対と重いクォーク間の励起 (λ モード) がチャーム・バリオンの励起スペクトルに現れる。

1.3 J-PARC におけるチャーム・バリオン分光実験

我々は、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) のハドロン実験施設内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) を計画している。図 1.2 に実験におけるチャーム・バリオン生成反応の模式図を示す。チャーム・バリオン分光実験では、20 GeV/c の π^- ビームを液体水素標的 (LH₂) に入射し、式 (1.1) の生成反応式によってチャーム・バリオン (Y_c^{*+}) を生成する。



チャーム・バリオンと同時に生成される D^{*-} は、式 (1.2) で表される崩壊モードにより 2 つの π 中間子と、1 つの K 中間子へと崩壊する。



チャーム・バリオン分光実験においては、入射された π^- ビームと D^{*-} の崩壊反応から得られる 2 つの π 中間子と K 中間子の四元運動量を測定することによって、欠損質量法によりチャーム・バリオン (Y_c^{*+}) の質量スペクトルを再構成する。得られる質量スペクトルからチャーム・バリオンの励起状態の性質を知ること、バリオンにおけるダイクォーク相関の確立を目指す。

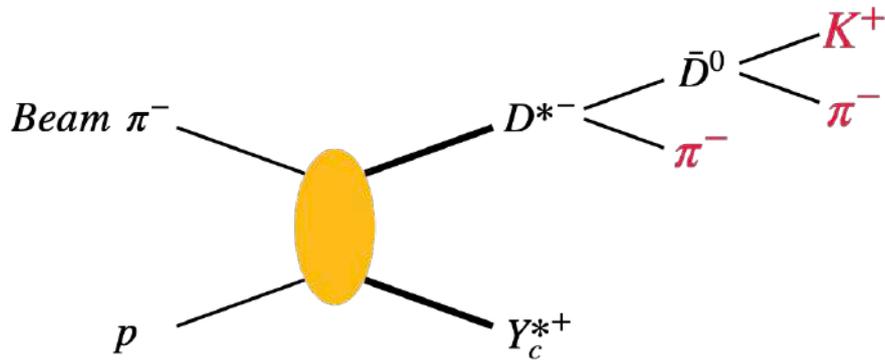


図 1.2: チャーム・バリオン生成反応の模式図。高運動量ビームラインで生成された π^- ビームを液体水素標的 (p) に入射することで、チャーム・バリオン (Y_c^{*+}) と D^{*-} を生成する。 D^{*-} が崩壊することによって生成される π^- , π^- , K^+ と入射ビーム粒子 (π^-) の四元運動量を測定することで、質量欠損法によってチャーム・バリオン (Y_c^{*+}) の質量スペクトルを再構成する。

1.4 高運動量ビームライン

チャーム・バリオン分光実験は、J-PARC のハドロン実験施設における高運動量ビームライン (high-p ビームライン) で行われる。J-PARC では陽子を直線線形加速器 (LINAC) で 400 MeV まで加速した後、シンクロトロン加速器 (RCS) で 3 GeV まで加速する。加速された陽子はさらに Main Ring (MR) と呼ばれるシンクロトロン加速器に送られ、最大 30 GeV まで加速される。その後、MR リングからハドロン実験施設にビームが取り出される。このときビームの供給には遅い取り出しモードが使用される。遅い取り出しモードでは加速器から長い時間を掛けて少しずつビームを取り出す。MR では 2 秒 (1 spill = 2 秒) かけてビームが取り出される。

現在の高運動量ビームラインでは、MR から取り出した陽子ビームの一部を標的へ輸送し、実験に使用している。更に、既存の一次陽子ビームラインとの分岐点に二次粒子生成標的を設置することで、ハドロン反応により生成された二次粒子が輸送できるように光学系を調整できる。二次粒子ビームの運動量は最大で 20 GeV/c、ビーム強度は 60 M/spill を達成出来る。しかし、二次ビームの運動量が高いために静電セパレータを利用したの粒子分離が困難となるため、負電荷の π 中間子以外にも、K 中間子や反陽子といった様々な二次粒子が混在して実験標的まで到達する。そこで、ビーム粒子識別にはチェレンコフ光を利用したリングイメージチェレンコフカウンター (RICH) を使用する。また、運動量分散を利用したビーム光学系を用いることで、焦点面での位置の測定に依ってビームの運動量情報を得ることが出来る。焦点面において 1 mm 間隔で位置測定を行うことで、ビーム運動量を $dp/p = 0.1\%$ (σ) の分解能で測定可能である。

1.5 チャーム・バリオン・スペクトロメータ

高運動量ビームラインでは、最大運動量 20 GeV/c、ビーム強度 60 M/spill の大強度二次粒子ビームが使用できる。高いビーム運動量のおかげで、様々な反応チャンネルが開き、多種多様なイベントが観測できる。一方で、高計数率環境下でも動作する検出器群と、様々な反応事象に対応するスペクトロメータ・システムが必要となる。

図 1.3、及び、図 1.4 に、チャーム・バリオン分光実験に用いられる FM 双極電磁石の全体写真と、チャーム・バリオン・スペクトロメータ全体の模式図を示す。図 1.3 に示す FM マグネットは、J-PARC E16 実験用の仕様となっている。チャーム・バリオン分光実験では、磁極を変更して使用する計画である。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。チャーム・バリオン・スペクトロメータは、大きく分けて 2 つの検出器群で構成されている。1 つ目は、入射ビーム粒子測定検出器群である。2 つ目は標的での反応により生成された散乱粒子を測定する磁気スペクトロメータ検出器群である。入射ビーム粒子検出器群には、ビーム粒子の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 (T0 detector)[11]、飛跡を検出するためのシンチレーションファイバー飛跡検出器、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。磁気スペクトロメータにおいて、散乱粒子の軌道を曲げるための双極電磁石として FM 双極電磁石が使用される [6]。FM 双極電磁石は、大きさが 5 m(幅)×5 m(高)×2 m(奥行) の双極電磁石である。最大磁場は 1 T であり、磁極の間隔は 1 m、磁極の直径は 1.8 m である。FM 双極電磁石の周辺には時間測定用の高時間分解能 TOF 検出器、飛跡検出用のシンチレーション・ファイバー飛跡検出器やドリフト・チェンバー、粒子識別用のリングイメージング・チェレンコフ検出器、及び、閾値型チェレンコフ粒子識別検出器が配置される。

このチャーム・バリオン・スペクトロメータは、測定可能な運動量領域が 0.2–1.6 GeV/c と広いため、様々な反応事象が測定可能である。また、スペクトロメータの運動量分解能は 5 GeV/c の粒子に対して $dp/p = 0.2\%$ (σ) である。

1.6 ストリーミング DAQ システム

チャーム・バリオン・スペクトロメータでは高計数率環境下で多種多様なイベントが観測される。ハドロン実験では、検出器の信号に対してハードウェアを用いてトリガーを生成し、そのトリガーに基づいてデータの処理及び保存を行うデータ収集システム (トリガー DAQ システム) を使用してきた。高運動量ビームラインでの実験の場合、ビーム強度は 60 M/spill と高く、反応レートは 3.6 M/spill と非常に大きな値になるのに対し、トリガー DAQ システムが許容するトリガー・レートは 10 kHz 程度である。

表 1.1 に高運動量ビームラインで使用される検出器の情報を示す。ビームタイミン



図 1.3: FM 双極電磁石。現在は、J-PARC E16 実験用の仕様になっており、E50 実験では磁極の変更を行う計画である。

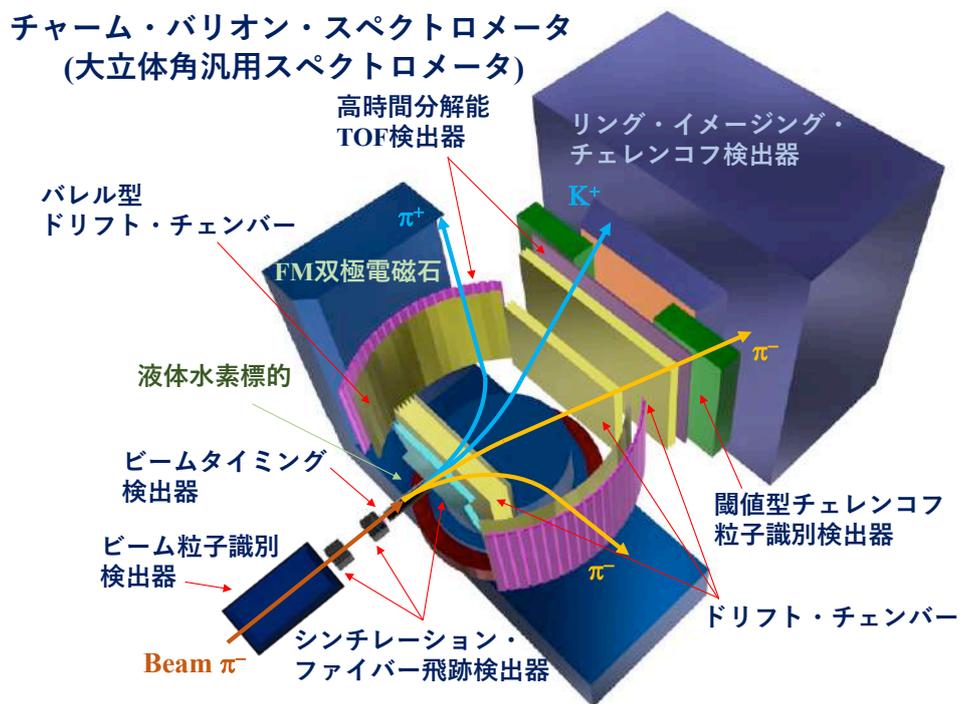


図 1.4: チャーム・バリオン・スペクトロメータの概要図。液体水素標的 (p) に π^- ビームを入射し、チャーム・バリオン (Y_c^{*+}) と D^{*-} を生成する。 D^{*-} が崩壊して生成される π^- , π^- , K^+ と入射ビーム粒子 (π^-) の四元運動量を測定する。

グ検出器 (T0) と磁気スペクトロメータ中の時間測定用タイミング検出器 (I.TOF, S.TOF) でトリガーを生成すると、トリガー・レートは1-2 M/spill となり、要求レートを大きく上回る。そこで、それらに加えシンチレーション・ファイバー検出器 (SFT) とドリフト・チャンバー (DC, IDC)、リングイメージ型チェレンコフ検出器 (S.RICH) をトリガーに参加させ、オンライン・トラッキングによるトラックの再構築を行うことで、トリガー・レートを15-23 k/spill まで抑えることが可能である。しかし、このトリガーDAQシステムを実現することは困難である。まず、トリガーに参加する検出器のチャンネル数が多いこと (約20000 ch) が挙げられる。次に、記録するデータをへらすためにはFPGA等でのオンライン・トラッキングなどが必要であるが、そのような回路は開発コストが高く再利用性も低い。更に、ある特定の反応事象のみを観測できるようにトリガーを生成すると、その他の多くの反応チャンネルを破棄してしまう。そこで、これらの問題を解決するためトリガーレスのストリーミングDAQシステムを導入する。

ストリーミングDAQシステムとは、デジタル化した検出器の信号全てを一度コンピュータに取り込み、コンピュータ上でイベントの選別を行うデータ収集系である。このシステムは以下に示す3つの要素で成り立っている。

- 検出器：粒子を検出
- Front-end electronics：検出器からの信号をデジタル信号に変換
- コンピュータ群：変換されたデジタル信号の処理及び保存

まず、各検出器からの信号はTDCベースのFront-End Electronics (FEE) で読み出される。FEEでは検出器から得られたアナログ信号をディスクリミネータを用いてタイミング信号へと変換する。その後、タイミング信号はデータ・ストリーミング用のTDC (ストリーミングTDC) へ送られ時間情報を持つデジタル信号に変換される。次に各検出器のデータはすべてコンピュータ群に送られ、取得したデータに対してタイミング・クラスターの生成 (パッキング) を行い、オンラインでトラッキングすることで不要なデータに対してフィルターをかける。その後、local storageにてデータが保存される。予想される生のデータ・レートは約25 GB/spillであり、フィルターによって0.05-0.1 GB/spill程度に削減することが要求される。このストリーミングDAQシステムを導入することでハードウェア上でトリガーを生成する必要がなくなり、開発コストが軽減される。また、ソフトウェア上でイベントの選別ができるため、多くの反応チャンネルの同時測定が可能になる。

1.7 シンチレーション・ファイバー飛跡検出器

チャーム・バリオン分光実験では、3種類のシンチレーション・ファイバー飛跡検出器 (FT) が使用される。1つ目は、高運動量ビームラインの上流の焦点面で、

表 1.1: 高運動量ビームラインで使用される検出器群。

検出器名	構成要素	チャンネル数	ビーム計数率 [M/spill]
FFT + BFT	Sci.Fi. + MPPC	1536 + 2304	60
B.RICH	gas/aerogel + MPPC	256	60
T0	Scinti. + MPPC	78	60
SFT	Sci.Fi. + MPPC	6400	60
DC + I.CD	Wire Chamber + ASD	4000	8-16
I.TOF	MPPC + amp + discri.	780	8
S.TOF	Scinti. + FM-PMT	150	8
Vth AC	aerogel + MPPC	200	8
S.RICH	gas/aerogel + MPPC	10000	8

入射ビームの飛跡検出によりビームの運動量測定を行う Focal plane Fiber Tracker (FFT) である。2つ目は、液体水素標的の上流で入射ビーム粒子の飛跡検出を行う Beam Fiber Tracker (BFT) である。3つ目は、液体水素標的の下流で散乱粒子の飛跡検出を行う Scattering Fiber Tracker (SFT) である。シンチレーション・ファイバー飛跡検出器は、ビーム強度が 30 MHz の高計数率環境下で使用され、計数率やビーム中心では 1 MHz/mm になると予想される。そのため、高計数率環境下で安定に動作し、高時間分解能、及び、高い検出効率が要求される。FT の構造と要求性能については第 2 章で示す。

1.8 本研究の目的

本研究の目的は、チャーム・バリオン分光実験において用いられる、シンチレーション・ファイバー飛跡検出器 (FT) の高計数率環境下における性能評価、及び、宇宙線を用いた試験による性能評価である。

本論文では、第 2 章でシンチレーション・ファイバー飛跡検出器の要求性能と構造を述べる。第 3 章で、宇宙線を用いた性能の評価の結果を述べる。第 4 章で、東北大学電子光物理学研究センターで行ったシンチレーション・ファイバー飛跡検出器の高計数率試験の結果を述べる。そして、最後の第 5 章で本論文の結論を述べる。

第2章 シンチレーション・ファイバー 飛跡検出器の要求性能と構造

シンチレーション・ファイバー飛跡検出器 (FT) は、シンチレーション・ファイバーと Multi Pixel Photon Counter (MPPC) を用いた飛跡検出器である。チャーム・バリオン・スペクトロメータにおいて、高計数率となるビーム上流、及び、標的付近で使用し、粒子の飛跡検出を行う。この章では FT の要求性能とその構造について述べる。

2.1 シンチレーション・ファイバー

シンチレーション・ファイバー飛跡検出器には Kuraray 社製のマルチクラッド型プラスチック・シンチレーション・ファイバー (SCSF-78M) を用いた [17]。表 2.1 にその性能を示す。SCSF-78-M はマルチクラッド構造になっているプラスチック・シンチレーション・ファイバーである。図 2.1(a) にファイバーの断面の模式図を示す。荷電粒子が通過した際に、core の部分でシンチレーション光が発生する。図 2.1(b) にシンチレーション光がファイバー端面まで輸送される際の模式図を示す。発生したシンチレーション光は全反射を繰り返すことでファイバーの端面まで輸送される。core の周りには 2 層のクラッドがあり、屈折率の違いでファイバー外縁におけるシンチレーション光の反射角度が変化する。クラッドの存在によりファイバーの外縁における全反射が起こり易くなり、より多くのシンチレーション光が端面まで輸送される。

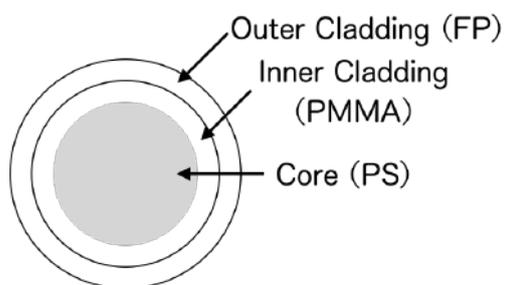
発光量が必要な FFT には直径が 1.0 mm、低物質量を要求する BFT と SFT には直径が 0.5 mm の 2 種類の直径のプラスチック・シンチレーション・ファイバーを使用した。

2.2 Multi-Pixel Photon Counter

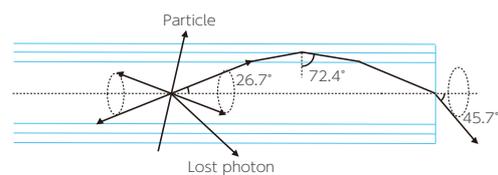
FT ではシンチレーション光の検出に、Multi Pixel Photon Counter (MPPC) を用いる。MPPC は浜松ホトニクス社の製品であり、ピクセル型半導体光検出器 (Pixed Photon Detector : PPD) の一種である。MPPC は受光面に Avalanche Photo Diode (APD) が敷き詰められており、APD はガイガーモードで動作する。

表 2.1: Kuraray 社製マルチクラッド・プラスチック・シンチレーション・ファイバー (SCSF-78M) の特性 [17]。

SCSF-78M	
Emission peak	450 nm
Decay time	2.8 ns
Attenuation length	4.0 m



(a) プラスチック・シンチレーション・ファイバーの断面模式図。



(b) シンチレーション光のファイバー端面までの輸送の模式図。

図 2.1: プラスチック・シンチレーション・ファイバーの構造模式図。core と 2 層のクラッドで構成されている。core で発生したシンチレーション光は全反射を繰り返すことでファイバーの端面まで輸送される。クラッドがあることでより全反射が起こり易くなり、検出される光子数が増える。

APDは高い逆電圧を印加することにより光電流が増幅される。MPPCはAPDとクエンチング抵抗のセットを基本単位(1ピクセル)として多数のピクセルを2次元的に配置し、電氣的に並列に接続した構造になっている。各ピクセルは1光子の検出時にほぼ同じ波高のパルスを出力する。複数のピクセルで発生したパルス電流は足し合わされて出力される。

MPPCは光電子増倍管(PMT)に匹敵する 10^6 程度の増倍率と優れた時間分解能を持ち、100 V以下のPMTよりは低電圧で動作するという特徴を持つ。FTはスペクトロメータの付近で使用されるため、漏れ磁場の影響を受けると予想される。MPPCは増幅領域が極短距離であるため、磁場中でも性能を落とさずに動作するといった利点がある。

FTでは多数のシンチレーション・ファイバーの光をコンパクトな構造で検出する必要があるため、アレイタイプのMPPC(S13361-1350AE-08)を用いた。図2.2にシンチレーション・ファイバー飛跡検出器で用いるアレイタイプのMPPCを示す。S13361-1350AE-08は、1.3 mm角のMPPCが 8×8 の64個アレイ状に並べられており、1つで64チャンネルの光信号の検出が可能である。ピクセル・ピッチは $50 \mu\text{m}$ である。

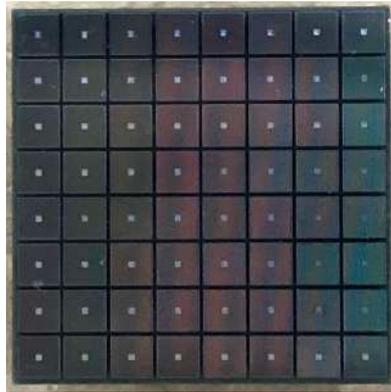


図 2.2: アレイタイプのMPPC (S13361-1350AE-08)。1.3 mm 角のMPPCが64個二次元的に並べられている。

2.3 シンチレーション・ファイバー飛跡検出器の構造

2.3.1 Prototype Fiber Tracker

Prototype Fiber Tracker (PFT)は、シンチレーション・ファイバー飛跡検出器の試作機として製作された。図2.3にその全体写真を示す。PFTには3 layerで1セットの検出面が4セットあり、全部で12 layerの検出面がある。3 layerをそれぞれ、x, u, v layerと呼ぶ。

図 2.4 に、構造の概略図を示す。x layer は鉛直方向にシンチレーション・ファイバーが並べられている。u, v layer は、x layer からそれぞれ $\pm 30^\circ$ ずつ傾いた方向に並べられている。シンチレーション・ファイバーの直径は 1.0 mm である。x layer は 12 本のシンチレーション・ファイバーが使用されており、u, v layer は 10 本のシンチレーション・ファイバーが使用されている。各 layer におけるシンチレーション・ファイバーは、中心をずらして 2 段に俵積みで重ねて並べられている。各 layer はファイバーの位置精度を保証するため、エポキシ系の樹脂でファイバーを固定している。隣り合うファイバー同士の間隔は 0.05 mm である。1 layer のシンチレーション・ファイバーに垂直な方向の有効幅は x layer で 6.5 mm、u, v layer で 5.5 mm である。1 セットの検出面は 32 本のシンチレーション・ファイバーで出来ている PFT は全部で 4 セットの検出面があり、128 本のシンチレーション・ファイバーで出来ている。検出面に並べられたシンチレーション・ファイバーは検出器下側の遮光された部分に伸びており、光信号の読み出しを行う。シンチレーション・ファイバーからの光信号の読み出しには、表面実装タイプの MPPC (s13360-1350PE) を使用し、1 本のファイバーを 1 つの MPPC で読み出す。図 2.5 に、PFT の信号読み出しに用いる MPPC と光信号読み出し部分の様子を示す。図 2.5(a) は、PFT の光信号を読み出す MPPC を 32 個搭載した基板である。図 2.5(b) は、PFT の信号読み出し部分である。検出面に並べられているシンチレーション・ファイバーの端面が、読み出し部分にまとめられている。

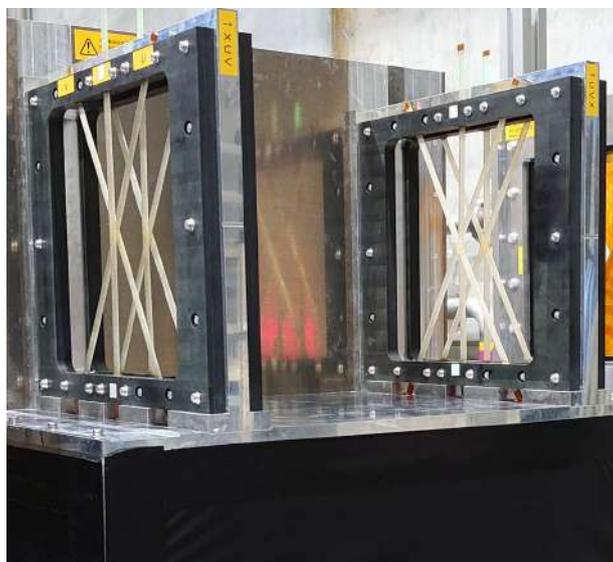
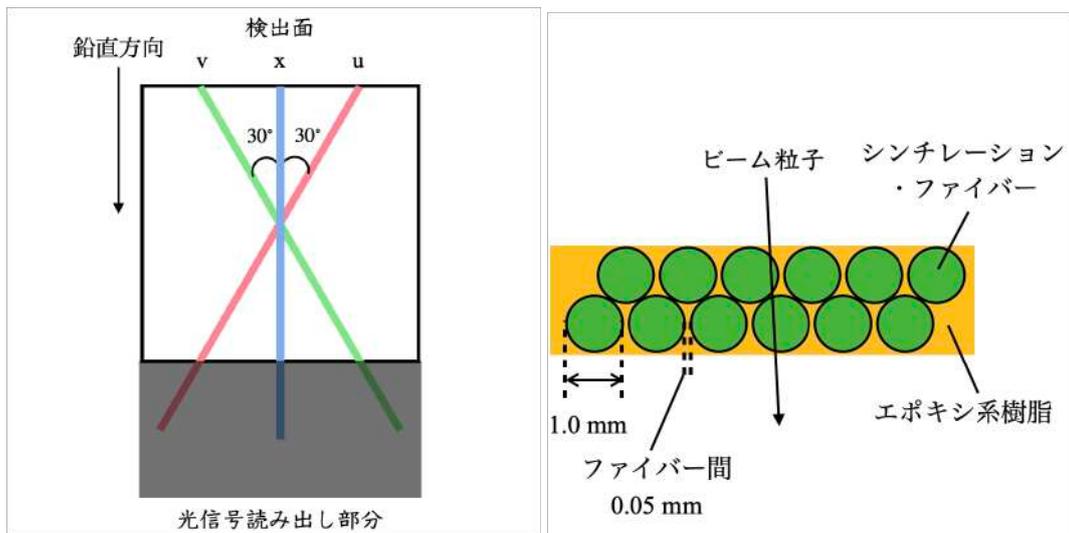
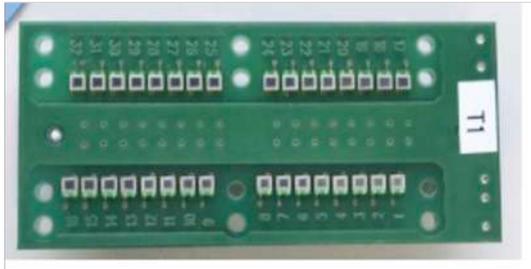


図 2.3: Prototype Fiber Tracker (PFT) の構造。x, u, v layer を 1 セットとする検出面が 4 セットある。128 本のシンチレーション・ファイバーで出来ている。検出器の下側は遮光されており、シンチレーション・ファイバーの光信号の読み出しを行う。



(a) PFTの検出面1セットの全体図概略図。(b) PFTのlayerのファイバー配列概略図。

図 2.4: PFT の構造概略図。検出面 1 セットの構造の概略図 (左図) と、1 layer の構造概略図 (右図) である。検出面は、x, u, v layer の 3 layer がセットで出来ている。検出面に並べられたシンチレーション・ファイバーは、下側の遮光された部分まで伸びており、光信号の読み出しを行う。x layer の検出面では、シンチレーション・ファイバーが 6 本ずつ 2 段に重ねられて、計 12 本のファイバーで 1 layer が出来ている。u, v layer では、それぞれ 10 本のファイバーが 2 段に重ねられている。



(a) PFT の光信号読み出し MPPC。

(b) PFT の光信号読み出し部分。

図 2.5: PFT に使用する MPPC と光信号読み出し部分。(a) は PFT の光信号に使用する MPPC が 32 個まとめられた基板である。(b) は PFT の光信号の読み出し部分である。シンチレーション・ファイバーが検出面から読み出し面に伸ばされている。

2.3.2 Focal plane Fiber Tracker

Focal plane Fiber Tracker (FFT) は、チャーム・バリオン分光実験において高運動量ビームラインの上流の焦点面に設置し、入射ビーム粒子のビームライン上流での飛跡検出によりビーム粒子の運動量測定を行う。FFT は 2 台設置し検出面は全部で 6 layer である。1 台あたりの構造を以下で説明する。

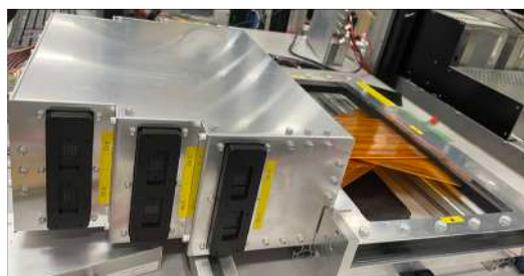
図 2.6 に FFT の全体図、及び、側面から見た図を示す。検出部分は左図の上側にあり、シンチレーション・ファイバーが一定間隔で並べられている。信号の読み出し部分は、検出面の前面にあるタイプと検出器の両側面に配置されているタイプの 2 種類がある。図 2.6 は両側面に読み出し部分が配置されているタイプである。

検出面はシンチレーション・ファイバーの方向の違う 3 layer (x, u, v layer) がある。実験室で配置された際に、鉛直方向にシンチレーション・ファイバーが並ぶ layer を x layer と呼ぶ。x layer から時計回りを正として、 $+30^\circ$ 傾いた方向を u layer、 -30° 傾いた方向を v layer とそれぞれ呼ぶ。検出部分の有効面積は $140 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$ である。

図 2.7(a) に、FFT を構成する 3 layer の方向を表す模式図を示す。x, u, v layer は、それぞれ 256 本のシンチレーション・ファイバーで構成されている。図 2.7(b) に検出面の 1 layer の構造の模式図を示す。シンチレーション・ファイバーは、入



(a) FFT の全体写真。

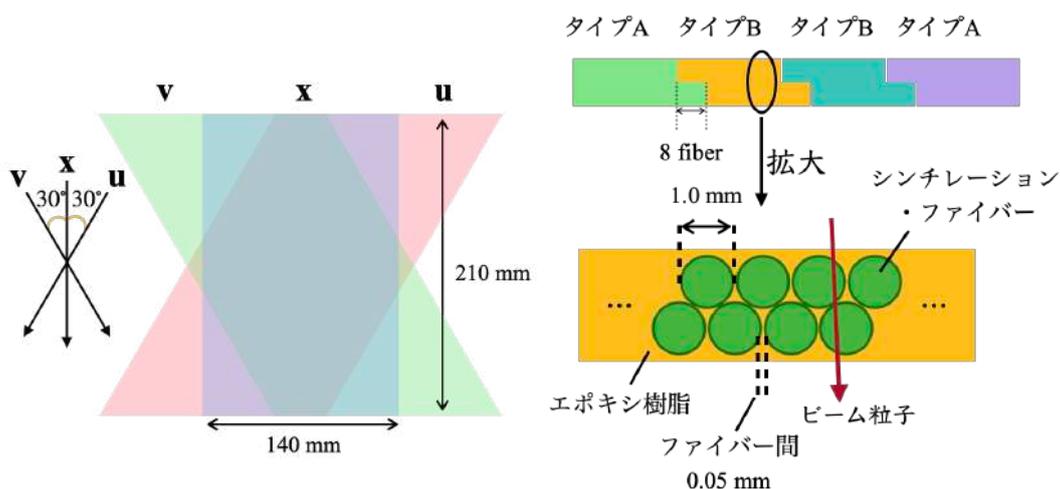


(b) FFT の側面写真。

図 2.6: Focal plane Fiber Tracker (FFT) の全体、及び、側面写真。FFT は、検出部分と信号の読み出し部分に分かれている。検出面にはシンチレーション・ファイバーが精度良く等間隔で並べられている。信号の読み出し部分は、この写真の FFT では側面部にあり、シンチレーション・ファイバーの端面が運ばれており、等間隔で配置されている。もう一台の FFT の読み出し部分は、検出器の前面にある構造をしている。

射ビームに垂直な方向に2本ずつ重ねられている。FFTに使用されているシンチレーション・ファイバーの直径は1.0 mmである。

検出面に隙間が出来ないように、2本のシンチレーション・ファイバーは、中心をずらして俵積みの構造で2段に重ねられている。隣り合う2本のシンチレーション・ファイバーの間には、0.05 mmの隙間がある。重ねられたシンチレーション・ファイバーは、エポキシ系の樹脂でシート状に固定されている。シンチレーション・ファイバー64本ずつで構成されるシートを4つ組み合わせて、256本の1 layerとなる。シートの構造は、layerの端を構成するもの(タイプA)とlayerの中間部分を構成するもの(タイプB)があり構造が異なる。タイプAは、重ねられている片方の段からシンチレーション・ファイバーが8本飛び出した構造になっている。タイプBは、重ねられている両方の段がそれぞれ別の方向に8本ずつ飛び出した構造になっている。飛び出した8本は、別のシートの飛び出した部分と組み合わせることで2段構造となる。この構造はx, u, v layerで共通である。



(a) FFT 検出面各 layer の模式図。

(b) FFT 検出面 1 layer の構造。

図 2.7: FFT 検出面の構造模式図。FFTにはx, u, v layerの3 layerが有り、x layerに対して、u, v layerはそれぞれ $\pm 30^\circ$ ずつ傾いている。1 layerは256本のシンチレーション・ファイバーで出来ている。1 layerは、4つのシートが組み合わさることで出来ている。1つのシートは64本のシンチレーション・ファイバーで出来ている。シンチレーション・ファイバーは、2段構造で俵積みになっており、エポキシ系の樹脂で固められている。シートにはlayerの端を構成するタイプ(タイプA)と、layerの中間を構成するタイプ(タイプB)の2種類がある。

検出面で固められていたシンチレーション・ファイバーは、読み出し部分まで伸びている。図 2.8(a)に、検出器内部におけるシンチレーション・ファイバーの配線の様子を示す。シンチレーション・ファイバーに負荷をかけないために、緩

いカーブとなるように配線しながら、読み出し部分へと伸ばしている。図 2.8(b) は、FFT の光信号読み出し部分の 1 つの写真である。読み出し部分では、シンチレーション・ファイバーの端面が 64 本ずつ均等な間隔 (1.3 mm 間隔) でまとめられている。この 64 本のシンチレーション・ファイバーは、同じシートを構成するものである。この読み出し部分に MPPC アレイ (図 2.2) をエアコンタクトで取り付けし、シンチレーション光の検出を行う。1 本のシンチレーション・ファイバーは、1 つの MPPC で光の検出を行う。それぞれのシンチレーション・ファイバーで発生したシンチレーション光を検出することで、粒子の飛跡の情報が得られる。x, u, v の 3 層それぞれの飛跡情報を組み合わせることで、3 次元の飛跡検出が可能である。



(a) FFT 内部でのシンチレーション・ファイバーの配線。 (b) FFT の光信号読み出し部分。

図 2.8: FFT の内部配線、及び、光信号読み出し部分。(a) 検出面で精度良く並べられているシンチレーション・ファイバーは、検出器内部を通り、光信号読み出し部分へと伸びている。(b) 光信号読み出し部分では、シンチレーション・ファイバーの端面が 64 本ずつ、等間隔で並べられている。MPPC アレイを使用することで、ファイバーで発生したシンチレーション光を検出する。1 本のシンチレーション・ファイバーの光は、1 つの MPPC で検出する。

2.3.3 Beam Fiber Tracker

Beam Fiber Tracker (BFT) は、標的のすぐ上流に設置し、入射ビーム粒子の飛跡検出を行う。BFT は 3 台設置し、計 9 層の検出面で三次元の飛跡検出を行う。基本的な構造、及び、検出器のサイズは FFT と同じである。図 2.9(a) に BFT の全

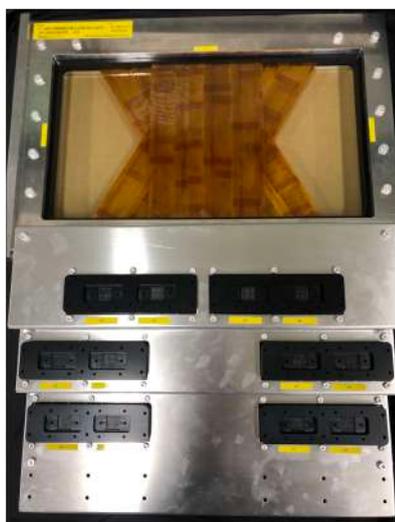
体写真を示す。検出面と読み出し部分が上下に分かれている。検出面はFFTと同様に3層構造 (x, u, v) となっている。検出部分の有効面積は 140 mm × 210 mm である。

図 2.10 に、検出面の構造の模式図を示す。使用しているシンチレーション・ファイバーの直径は 0.5 mm である。検出面にはシンチレーション・ファイバーが2段の俵積みで並べられている。隣り合うシンチレーション・ファイバーの間には 0.05 mm の隙間がある。1 layer はシンチレーション・ファイバー 128 本で構成されるシートを4つ組み合わせて作られており、合計 512 本のシンチレーション・ファイバーで出来ている。シートには layer の端を構成するタイプ (タイプ A) と layer の中間部分を構成するタイプ (タイプ B) の2タイプがある。タイプ A は2段重ねられているシンチレーション・ファイバーの内、片方の段の16本が飛び出した構造になっている。タイプ B は重ねられている両方の段がそれぞれ別の方向に16本ずつシンチレーション・ファイバーが飛び出した構造になっている。飛び出した16本は別のシートの飛び出した部分と組み合わせることで2段構造となる。この構造は x, u, v の3 layer で共通である。

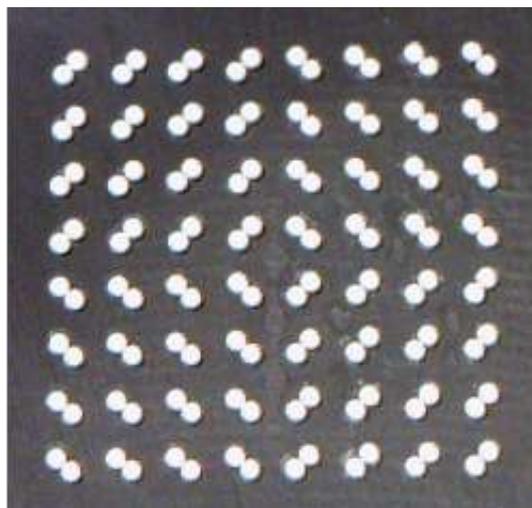
光信号の読み出し部分には、128本のシンチレーション・ファイバーの端面が配置されている。シンチレーション・ファイバーで発生した光の検出には、FFTと同様に図 2.2 に示す MPPC アレイを使用する。図 2.9(b) は BFT の光信号の読み出し部分の写真である。1つの読み出し部分には128本のシンチレーション・ファイバーの端面が集められている。シンチレーション・ファイバーの端面は、2本ずつ読み出し部分で結合されている。結合されている2本のファイバーは、ビームに対して垂直な面で隣り合うものである。MPPC アレイの1チャンネルで、結合された2本の光信号をまとめて検出する。そのため、MPPC の1チャンネルあたりのビームに対しての有効幅はFFTと同じ 1.0 mm である。

2.3.4 Scattering Fiber Tracker

Scattering Fiber Tracker (SFT) は、実験標的のすぐ下流に設置し散乱粒子の飛跡検出を行う。SFT は2台設置し、計6層で飛跡検出を行う。構造はBFTの拡張版のようなものになっており、検出面のサイズが大型化している。図 2.11 に SFT の全体写真を示す。SFT は上下に読み出し部分があり、中央部分に検出面がある。検出面の有効面積は 640 mm × 670 mm である。検出面は3 layer (x, u, v) ある。使用しているシンチレーション・ファイバーの直径は 0.5 mm である。検出面ではシンチレーション・ファイバーが2段の俵積み構造で並べられている。128本で構成されるシートを複数組み合わせることで1つの層を構成している。x layer は18個のシートが組み合わさっており、2304本のシンチレーション・ファイバーで出来ている。u と v layer は16個のシートが組み合わさっており、2048本のシンチレーション・ファイバーで出来ている。SFT1台で計6400本のシンチレーション・ファイバーが検出面に並べられている。光信号の読み出し部分では、BFTと同様



(a) BFT の全体写真。



(b) BFT の光信号読み出し部分。

図 2.9: BFT の全体写真、及び、光信号の読み出し部分。(a) 検出面と信号の読み出し部分は上下に分かれている。検出面には、シンチレーション・ファイバーが精度良く並べられており、方向の違う 3 layer がある。(b) 光信号の読み出し部分にはシンチレーション・ファイバーの端面が 2 本ずつまとめられ、64 セットが均等に配置されている。信号の読み出しは 64 チャンネルの MPPC アレイを使用し、2 本の隣り合うファイバーをまとめて 1 つの MPPC で検出する。1 チャンネルあたりのビームに対する有効幅は 1.0 mm である。

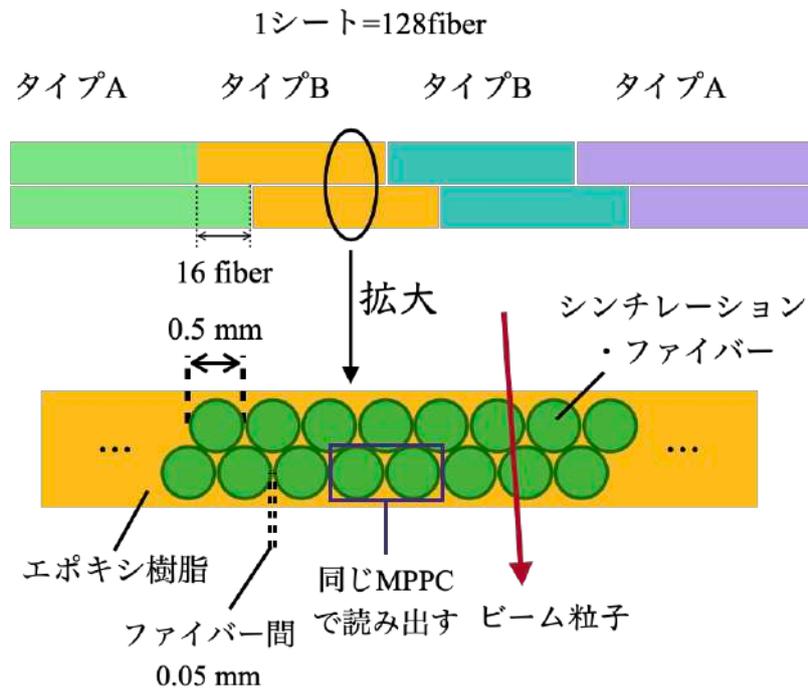


図 2.10: BFT 検出面の構造模式図。BFT には直径 0.5 mm のシンチレーション・ファイバーを使用している。1 layer は 512 本のシンチレーション・ファイバーで出来ている。1 layer は 4 つのシートの組み合わせで出来ており、1 つのシートはそれぞれ 128 本のシンチレーション・ファイバーで出できている。2 本のシンチレーション・ファイバーで発生した光をまとめて 1 つの MPPC で検出する。まとめられるのは、ビームに対して垂直な面で隣り合う 2 本である。ビームに対する 1 チャンネルあたりの有効幅は 1.0 mm である。

に2本の隣り合うシンチレーション・ファイバーが結合されている。2本のシンチレーション・ファイバーの光信号を1つのMPPCで読み出す構造になっており、SFT1台で3200チャンネルの読み出しがある。光信号の読み出し部分は読み出し部分の密集を避けるため検出面の上下に分けられている。粒子に対しての有効幅はBFTと同じ1.0 mmである。

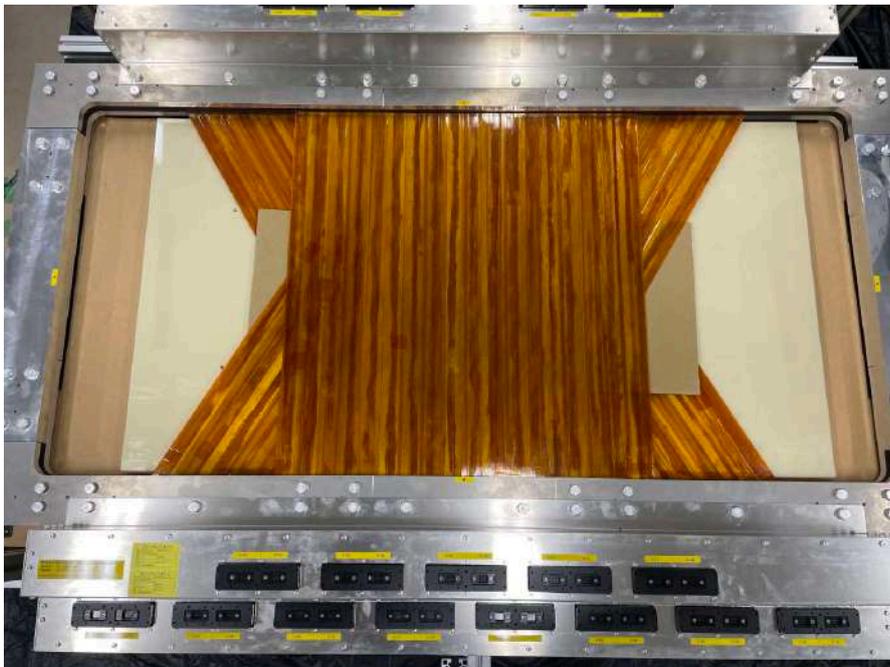


図 2.11: SFT の全体写真。検出器の中央に検出面があり、直径 0.5 mm のシンチレーション・ファイバーが6400本精度良く並べられている。検出面はx, u, v layerの3 layerが異なる方向に並べられている。検出面の大きさは縦640 mm×横670 mmである。光信号の読み出し部分は上下に配置されている。粒子に対しての1チャンネルあたりの有効幅は1.0 mmである。

2.4 高計数率環境下での要求性能

高運動量ビームラインにおけるビームサイズは100 mm (水平)×100 mm (垂直)で、最大ビーム強度は30 MHzである。このビームに対して入射粒子の飛跡測定を行うためにシンチレーション・ファイバー飛跡検出器 (FT) を用いる。FTにおける想定される最大強度は1 MHz/channelである。この条件下におけるFTの要求性能は以下の通りである。

- 位置分解能：200 μm

FTはビーム粒子と散乱粒子の飛跡検出器として使用し飛跡検出の精度が

ビームの運動量分解能に直結するため、ワイヤーチェンバーと同程度の位置分解能が求められる。

- 検出効率：97 %以上
検出効率は1レイヤーあたり97 %以上が求められる。
- 時間分解能：1.0 ns 以下
高計数率環境下では偶発的な検出器信号が増加する。そのため、同期した正しい事象を選択するためには時間分解能は1 ns 以下が求められる。

第3章 シンチレーション・ファイバー飛跡検出器の宇宙線試験

3.1 研究目的

シンチレーション・ファイバー飛跡検出器 (FT) は、チャーム・バリオン分光実験のために新たに製作された検出器である。チャーム・バリオン分光実験では、FT のデータ取得の閾値を 3.5 p.e. に設定する。本研究ではこの閾値に対して、十分な光量が検出されているかを評価した。また、検出効率の評価も行った。

3.2 実験セットアップ

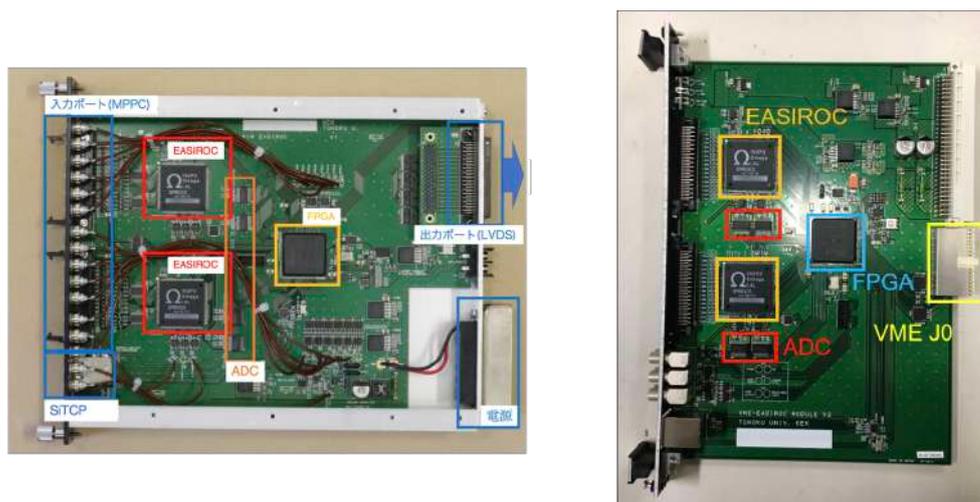
宇宙線を用いた試験は、Focal plane Fiber Tracker (FFT)、Beam Fiber Tracker (BFT)、Scattering Fiber Tracker (SFT) の三種類に対して行った。FT の構造は 2.3.2–2.3.4 章に示してある。FFT と BFT の 2 つと SFT では有効面積に違いがあるため、宇宙線試験のセットアップも異なる。FFT と BFT は NIM-EASIROC モジュール [3] を使用しデータ収集を行った。SFT は VME-EASIROC [4] を使用しデータ収集を行った。また、検出される光電子数を評価する際のセットアップと、検出効率を評価する際のセットアップも異なるためそれぞれについて説明する。

3.2.1 EASIROC チップ搭載モジュール

NIM-EASIROC、及び、VME-EASIROC モジュールは EASIROC と呼ばれる ASIC を搭載したモジュールである。EASIROC は Weeroc 社により開発された多チャンネル PPD の信号読み出し用の ASIC である、どちらのモジュールも 1 台に 2 つの EASIROC チップを搭載しており、64 チャンネルの MPPC の制御、及び、信号の処理を一括で行うことが出来る。

図 3.1 にそれぞれのモジュールを示す。大まかには同じ構成であるため、簡単にその構成を示す。1 つのモジュールには 2 つの EASIROC チップの他に、ADC、及び、FPGA が搭載されている。MPPC からのアナログ信号は EASIROC チップの内部で増幅され、電荷測定経路と時間測定経路によって整形される。電荷測定経路では外部から信号 (hold 信号) を入力することで、信号の波高情報が EASIROC 内部の

コンデンサに保存する。コンデンサに保存した波高情報は、ASIC 外部に搭載された ADC においてデジタル信号に変換し出力する。時間測定経路では、EASIROC チップ内部のディスクリミネータによってタイミング信号を生成し、ASIC の外部に出力する。それぞれの経路から出力したデジタル信号は FPGA に送られ、ADC と TDC の情報が取得される。TDC の時刻の基準となる信号 (common stop 信号) は、hold 信号と同様に外部から入力する。取得された情報はイーサネット経由で PC へと送られる。



(a) NIM-EASIROC モジュール [3]。 (b) VME-EASIROC モジュール [4]。

図 3.1: EASIROC 搭載モジュール。どちらのモジュールも 1 台に 2 つの EASIROC チップを搭載している。1 台で 64 channel の MPPC の制御、及び、処理が可能である。ADC 測定用の hold 信号と、TDC 測定用の common stop 信号を外部から入力する必要がある。この図は [12] と [16] から引用した。

3.2.2 FFT と BFT の光電子数評価の際のセットアップ

セットアップの模式図を図 3.2 に示す。FT の検出面が水平となるように設置し、その上下にプラスチックシンチレータに光電子増倍管 (PMT) を取り付けたトリガー検出器を設置した。プラスチックシンチレータのサイズは 100 mm 角で厚みは 5 mm である。PMT は浜松ホトニクス [18] の H3167 を使用した。トリガー検出器は上段と下段にそれぞれ 2 台ずつの合計 4 台使用した。上段のトリガー検出器をトリガー検出器 1, 2、下段のトリガー検出器をトリガー検出器 3, 4 と呼ぶ。FT の光信号の検出には MPPC アレイを使用した (図 2.2)。MPPC アレイには読み出し基板を接続し、フラットケーブルで NIM-EASIROC モジュールに入力した。FT のデータ収集は各 layer ごとに分けて行った。1 layer は 256 channel であり、

NIM-EASIROC モジュール 4 台を使用した。閾値電圧は 3.5 p.e. となるよう設定した。

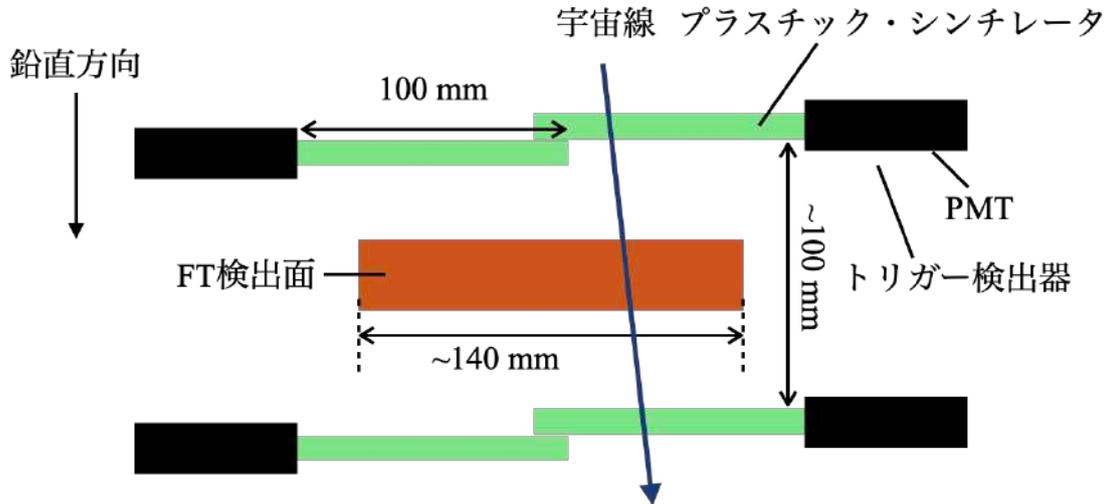


図 3.2: FFT、及び、BFT の宇宙線試験のセットアップ概略図。上段と下段にはそれぞれ 2 台ずつトリガー検出器を設置した。トリガー検出器はプラスチックシンチレータと PMT を組み合わせた検出器である。FT の検出面はトリガー検出器で上下を挟むように設置した。上段のトリガー検出器を 1, 2、下段のトリガー検出器を 3, 4 とした。トリガー検出器で FT の検出面より広い範囲を覆うことで、FT の全チャンネルの信号が取得できるようにした。

回路図を図 3.3 に示す。上段と下段のトリガー検出器は、それぞれディスクリミネータでロジック信号に変換した。ロジック信号は論理回路に入力し、上段と下段のトリガー検出器それぞれで OR 信号を出力した。2 つの OR 信号はコインシデンスモジュールに入力し、上段と下段のコインシデンスを出力した。この信号をトリガー信号とした。トリガー信号は 2 つに分岐し、1 つは delay モジュールを用いて 200 ns 程度遅らせた後、NIM-EASIROC モジュールの TDC の common stop に入力した。もう一方は ADC の hold 信号として NIM-EASIROC モジュールに入力した。hold 信号は MPPC からの信号のピークとタイミングが合うようにケーブルの長さで調節した。

3.2.3 FFT と BFT の検出効率評価の際のセットアップ

図 3.4 と図 3.5 にセットアップの概略図を示す。トリガー検出器は上下のそれぞれ 2 台ずつを完全に重ねて設置した。検出面に対して垂直な方向から見た際に、トリガー検出器が FT の検出面の大きさより狭い範囲に収まっている。図 3.6 に回路図を示す。データ収集のトリガーはノイズやバックグラウンドのガンマ線による

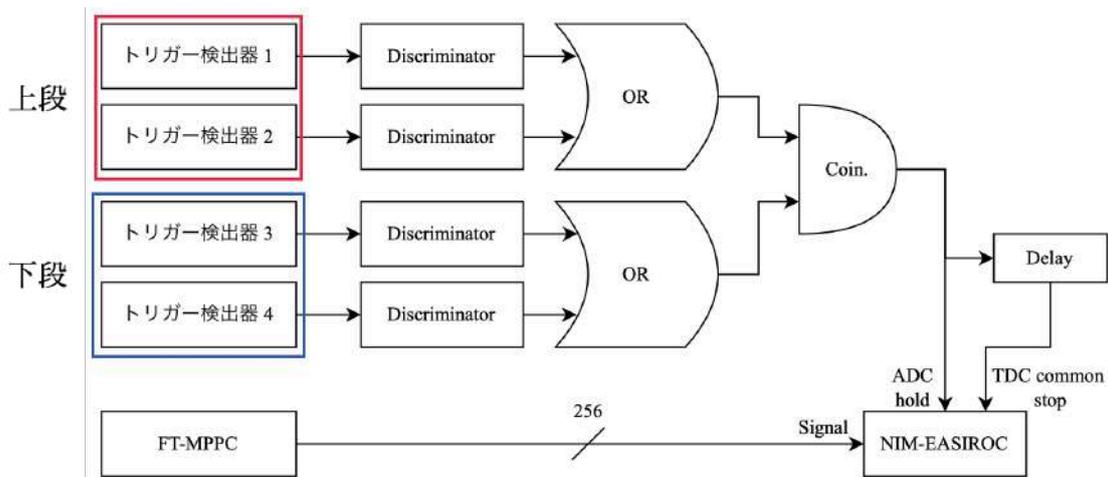


図 3.3: FFT、及び、BFT の宇宙線試験の回路図。トリガー検出器の信号をロジック信号に変換し、論理回路を使用することでトリガー信号とした。FT の光検出に使用した MPPC の信号は NIM-EASIROC に入力した。4 台の NIM-EASIROC モジュールを使用し、1 layer (256 チャンネル) ごとにデータ収集を行った。

事象を除去し、宇宙線の通過事象のみを選択するため 4 つのトリガー検出器のコインシデンスをとった。このコインシデンスをトリガー信号としてデータ収集を行った。トリガー信号は光量評価の際と同様に 2 つに分岐し、common stop 信号と hold 信号として NIMEASIROC モジュールに入力した。4 台の NIM-EASIROC モジュールを使用し、1 layer (256 channel) ずつデータ収集を行った。

3.2.4 SFT 光量評価の際のセットアップ

SFT は他の FT と比較して検出面の有効面積が大きいいため、別のトリガー検出器を使用しデータの収集を行った。図 3.7 に SFT のデータ収集に用いたトリガー検出器の構造の概略図を示す。SFT に用いたトリガー検出器として、大きさが 200 mm×1600 mm のプラスチックシンチレータの片側に MPPC (S13360-6075CS) をエアコンタクトしたものを製作した。トリガー検出器は 6 台製作した。図 3.8 にトリガー検出器の配置の概略図を示す。SFT の検出面を地面と水平に設置し、その上下を 3 台ずつのトリガー検出器で挟むように設置した。上段に設置したトリガー検出器を 1, 2, 3 とし、下段に設置したトリガー検出器を 4, 5, 6 とした。

データ収集には VME-EASIROC モジュールを使用した。データ収集は 1 layer ごとに行った。x layer (1152 チャンネル) には 18 台、u, v layer (各 1024 チャンネル) には 16 台の VME-EASIROC モジュールをそれぞれ使用した。図 3.9 に回路図を示す。6 台のトリガー検出器の信号をそれぞれディスクリミネータに入力し、ロジック信号に変換した。上段と下段のトリガー検出器によるロジック信号は、それぞれ別の論理回路で OR 信号を取った。2 つの OR 信号をコインシデンス

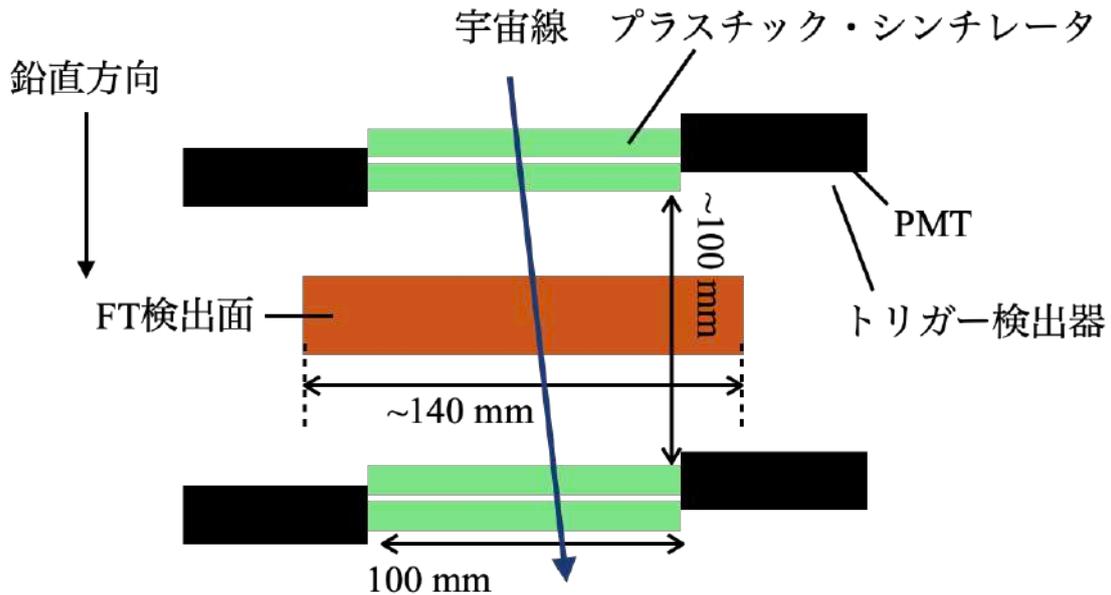


図 3.4: 水平方向から見た際の検出効率評価のセットアップ概略図。上下それぞれで2つずつのトリガー検出器を重ね、4つのトリガー検出器のコインシデンスをトリガー信号とした。

モジュールに入力し、その出力をトリガー信号とした。トリガー信号は2つに分岐し、1つはdelay モジュールを用いて 200 ns 程度遅らせた後、VME-EASIROC モジュールの TDC の common stop に入力した。もう一方は ADC の hold 信号として VME-EASIROC モジュールに入力した。hold 信号は MPPC からの信号のピークとタイミングが合うようにケーブルの長さで調節した。

3.3 解析と結果

宇宙線を用いた実験における FT で検出される光電子数、及び、検出効率の評価のための、解析方法と結果について述べる。

3.3.1 解析に用いる値とその分布

解析に用いる値とその分布を示す。宇宙線試験では EASIROC チップ搭載モジュールを使用し、ADC と TDC を取得した。それぞれの分布を図 3.10 を示す。図 3.10(a) は FFT のあるチャンネルにおける TDC 分布の例である。横軸は TDC [channel] であり、縦軸はカウント数である。大きく見えるピークが、宇宙線が通過することで発生したシンチレーション光を検出した際の TDC である。ピークを含む TDC の範囲でカットをかけることにより、シンチレーション光を検出した事象を選択す

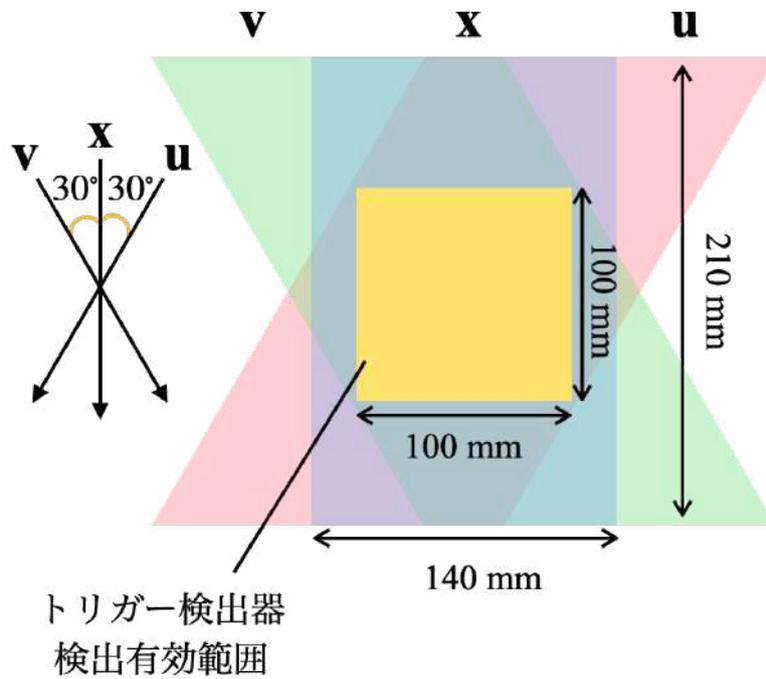


図 3.5: 鉛直方向から見た際の検出効率評価のセットアップ概略図。トリガー検出器の検出有効面積が FT の検出面 (x, u, v) のすべてに同時に収まるように設置した。

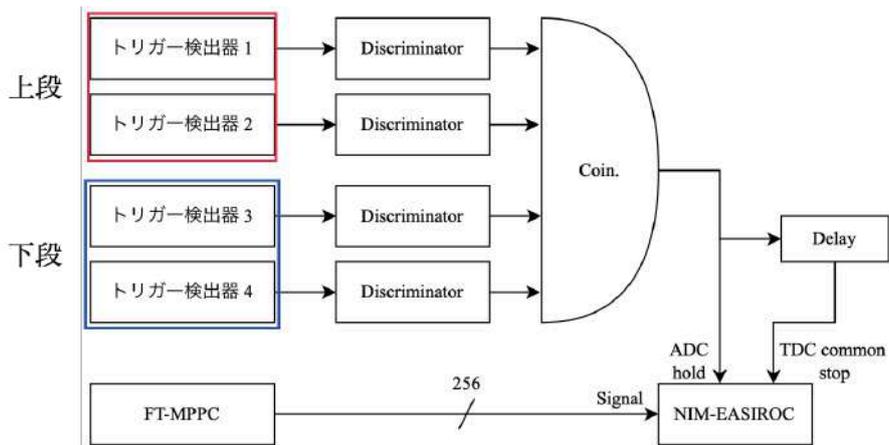


図 3.6: 検出効率評価の際の回路図。光量評価の際と異なり、トリガー信号はトリガー検出器 4 台のコインシデンスにした。

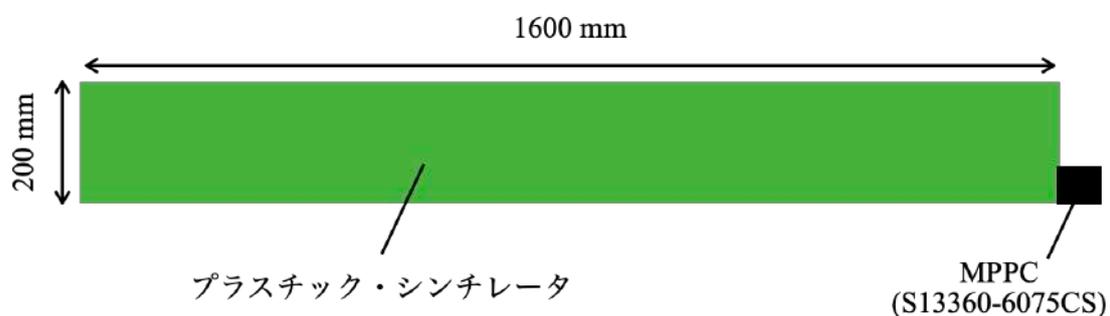


図 3.7: SFT データ収集に用いたトリガー検出器の模式図。プラスチック・シンチレータのサイズは 200 mm(幅)×1600 mm (長さ)である。片側に MPPC (S13360-6075CS) をエアコンタクトで設置し、光検出を行う。

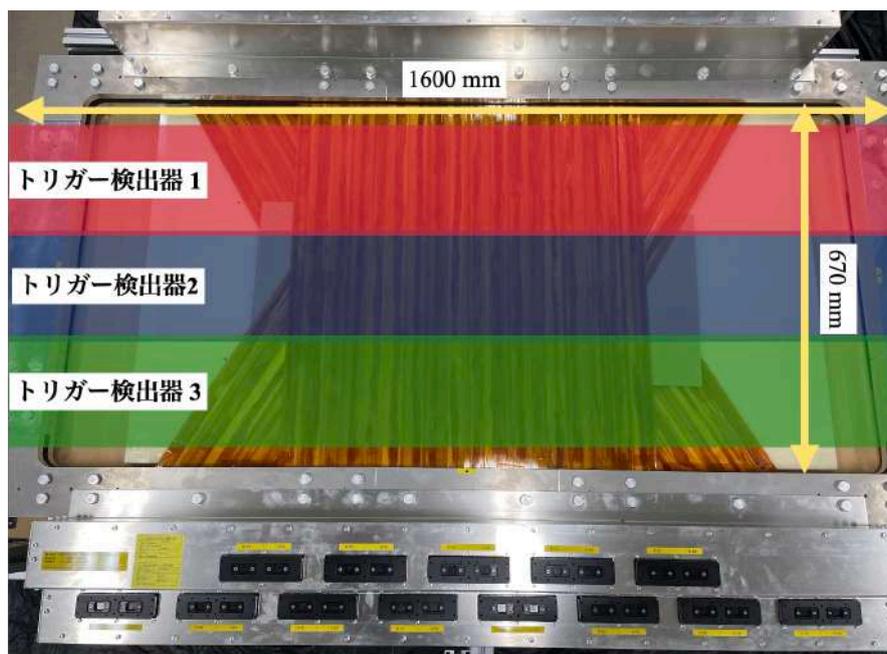


図 3.8: SFT データ収集の際のトリガー検出器の配置の模式図。SFT の検出面を水平に設置し、上下にトリガー検出器を 3 台ずつ設置した。トリガー検出器は端を少し重ねて設置し、検出面を覆うようにした。図には上段のトリガー検出器の位置を赤、青、緑の図形で表現しているが、下段にも同様に 3 台のトリガー検出器を設置した。合計で 6 台のトリガー検出器を配置した。

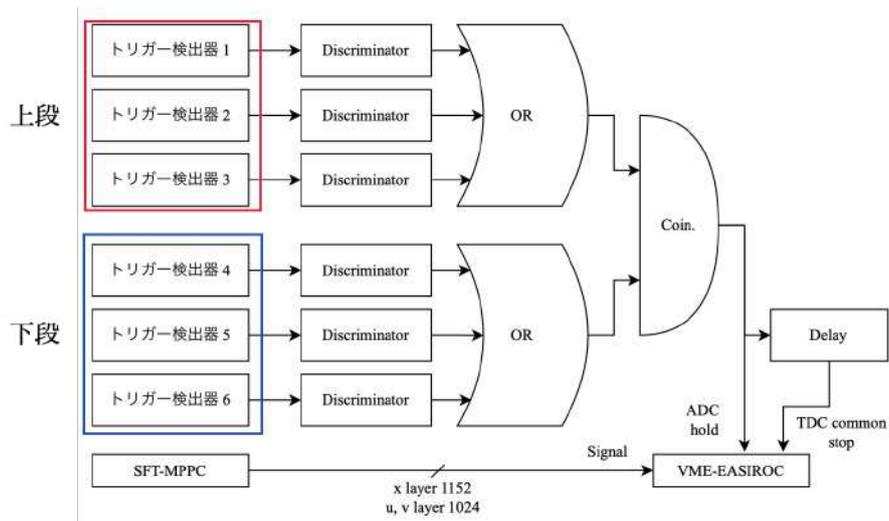


図 3.9: SFT データ収集の際の回路図。上下 3 台ずつのトリガー検出器の信号を使用してトリガー信号とした。SFT の光検出を行う MPPC の信号は、VME-EASIROC に入力してデータ収集を行った。

ることができる。TDC の分布はセットアップを変えるとピークの位置が変化するため、それぞれのセットアップごとに範囲を決定した。例えば、図 3.10(a) では、250–275 channel の範囲で TDC のカットを行った。図 3.10(b) は、図 3.10(a) と FFT のチャンネルにおける ADC 分布の例である。横軸は ADC [channel] であり、縦軸はカウント数である。この分布は TDC の値によるカットを行っている。FT で発生したシンチレーション光の分布を得ることができた。

次に、FT の読み出しチャンネルの番号の振り分け方法について述べる。FT には多数の読み出しチャンネルがあるため、それら 1 つ 1 つにチャンネル番号を振り分けて解析を行った。チャンネル番号の定義の模式図を図 3.11 に示す。緑丸は 1 チャンネルを表しており、中の数字はそのチャンネル番号を表す。BFT と SFT では 2 本のシンチレーション・ファイバーをまとめて 1 つの MPPC で読み出す構造になっているため、2 本のシンチレーション・ファイバーをまとめて 1 つの緑丸で表している。検出面の各 layer の端にあるシンチレーションファイバーをチャンネル 1 として、そこから順にチャンネル番号を振り分けた。各 layer はシンチレーション・ファイバーが二段重ねになっているため、上段と下段を交互にチャンネル番号を振り分けた。

次にヒットパターン分布の例を示す。TDC の値が TDC 分布のピーク付近にある事象をヒットと判定した。そして layer ごとにヒットパターンの分布を作成した。図 3.12 に BFT の x layer におけるヒットパターンの例を示す。横軸は BFT x layer のチャンネル番号であり、縦軸はカウント数である。いくつかのチャンネルにおいてくぼみが見られる。これはシンチレーション光が上手くファイバーの端面に

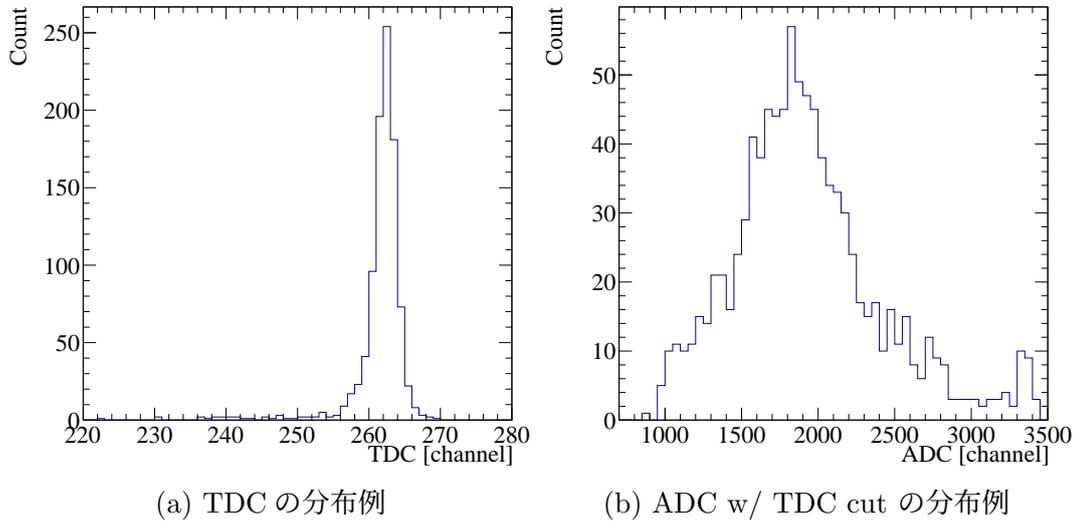


図 3.10: 宇宙線試験における TDC 分布と ADC 分布。(a) は FFT のあるチャンネルにおける TDC 分布である。横軸は TDC [channel] であり、縦軸はカウント数である。(b) は (a) と同じチャンネルの ADC 分布であり、TDC によるカットをかけている。横軸は ADC [channel] であり、縦軸はカウント数である。

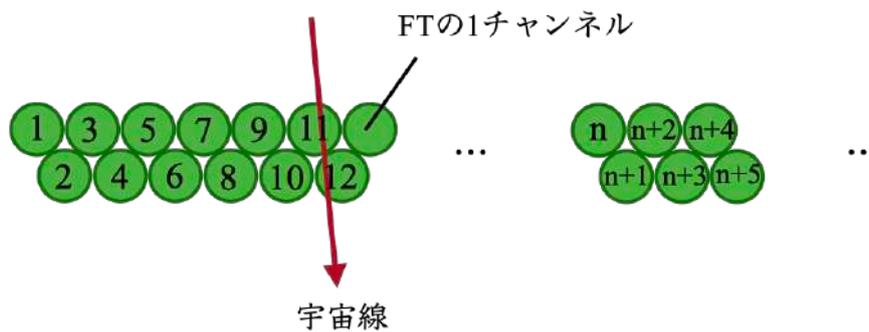


図 3.11: FT のチャンネル番号の定義。layer の端にあるファイバーから順に、チャンネル番号を振り分けた。各 layer はシンチレーション・ファイバーが二段重ねになっているため、上段と下段を交互にチャンネル番号を振り分けた。

輸送されず、検出できていない為であると考えられる。

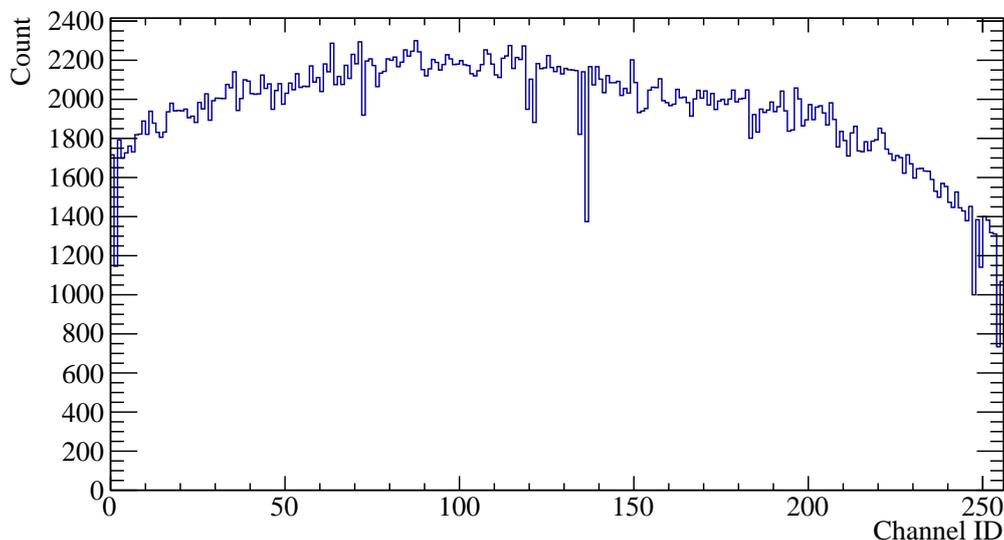


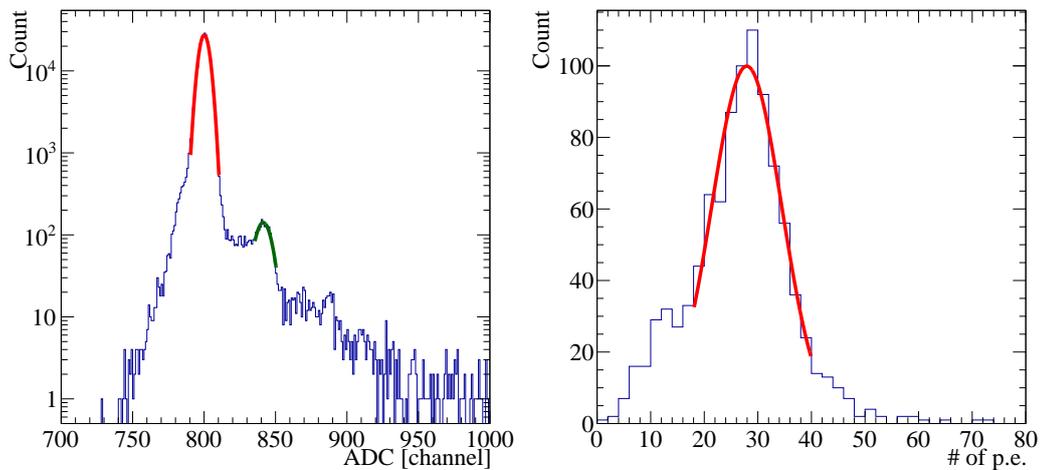
図 3.12: BFT xlayer のヒットパターンの分布。横軸は BFT x layer のチャンネル番号であり、縦軸はカウント数である。

3.3.2 光電子数評価の解析方法

光電子数の評価を行うために ADC の分布を光電子数の分布に変換した。そのためにまず、ADC 分布の pedestal と 1 p.e. の channel の値をガウス関数のフィッティングから決定した。図 3.13(a) に、FFT のあるチャンネルにおける pedestal と 1 p.e. の channel 決定の例を示す。赤線が pedestal、緑線が 1 p.e. に対するガウス関数を用いたフィッティングの結果である。このフィッティングの結果から、pedestal と 1 p.e. のピーク中心の値を取得した。フィッティングは FT の全てのチャンネルに対して行った。得られた pedestal と 1 p.e. の値を用いて式 (3.1) から ADC の値を光電子数 [# of p.e.] に変換した。

$$\# \text{ of p.e.} = \frac{ADC[\text{channel}] - \text{pedestal}[\text{channel}]}{1 \text{ p.e.}[\text{channel}] - \text{pedestal}[\text{channel}]} \quad (3.1)$$

図 3.13(b) は、FFT のあるチャンネルにおける光電子数の分布である。この分布は TDC カットをかけた ADC 分布を式 3.1 を用いて光電子数分布に変換したものである。横軸は光電子数であり、縦軸はカウント数である。そして全てのチャンネルにおいて光電子数の分布に対してガウス関数でフィッティングを行うことで、出された光電子数を決定した。赤線はガウス関数によるフィッティングの結果である。



(a) Pedestal、及び、1 p.e. のフィッティン グ。 (b) 光電子数分布とそのフィッティング。

図 3.13: 検出される光電子数の評価方法。(a) FFT のあるチャンネルにおける pedestal と 1 p.e. の分布である。横軸は ADC [channel] であり、縦軸はカウント数である。pedestal と 1 p.e. の分布に対してガウス関数を用いてフィッティングを行い、それぞれのチャンネルの値を決定した。赤線は pedestal に対するフィッティングであり、緑線は 1 p.e. に対するフィッティングの結果である。(b) 取得した pedestal と 1 p.e. の値を用いて、ADC [channel] を光電子数に変換した結果である。横軸は光電子数であり、縦軸はカウント数である。赤線でガウス関数によるフィッティングを重ねてある。

3.3.3 光電子数評価の結果

まず BFT について結果を示す。BFT の x layer に対しては MPPC に印加するバイアス電圧の設定を 3 種類用意し、それぞれのバイアス電圧の際に検出した光電子数を比較した。バイアス電圧は over voltage (V_{ov}) で 3, 4, 5 V とした。ここで、 V_{ov} は、MPPC への印加電圧から break down voltage を引いたものである。閾値電圧はバイアス電圧ごとに 3.5 p.e. に設定した。

チャンネル番号ごとの検出された光電子数の関係を図 3.14 に示す。横軸は BFT x layer のチャンネル番号であり、縦軸は検出された光電子数である。赤点は $V_{ov} = 3$ V、青点は 4 V、緑点は 5 V である。全体としてばらつきはあるものの、 V_{ov} を大きくすると検出される光電子数が増加している事がわかる。図 3.15 にバイアス電圧ごとの検出光電子数の分布を示す。横軸は検出された光電子数で、縦軸はチャンネル数である。赤線が $V_{ov} = 3$ V、青線が 4 V、緑線が 5 V の分布である。それぞれのバイアス電圧における光電子数の分布の平均値を表 3.1 にまとめた。表 3.1 の値を用いて、検出される光電子数の MPPC バイアス電圧に依る増加率を計算した。その結果、検出される光電子数は V_{ov} を 3 V から 4 V にすることで 1.17 倍、3V から 5V にすることで 1.38 倍増加する事がわかった。

図 3.16 に MPPC のカタログからとった検出効率、増幅率、及び、クロストークの割合のバイアス電圧依存を示す [18]。横軸が V_{ov} で、左の縦軸が増幅率、右の縦軸が検出効率、及び、クロストークの割合 [%] である。破線で書かれているのが波長が 450 nm の光信号に対するバイアス電圧 (V_{ov}) と検出効率 (%) の関係である。図 3.16 から、 V_{ov} が 3 V のときの検出効率が約 40% で、4 V のときが約 47%、5 V のときが約 51% である事がわかる。MPPC 自体の特性として検出効率が増加することで、 V_{ov} が 3 V から 4 V になるとおよそ 1.2 倍、3 V から 5 V になるとおよそ 1.3 倍になることが分かる。BFT で検出される光電子数のバイアス電圧依存は、この MPPC の検出効率のバイアス電圧依存である程度説明できる。

表 3.1: MPPC のバイアス電圧ごとの光電子数分布の平均値。

# of V_{ov} [V]	3	4	5
平均光電子数 [p.e.]	10.9 ± 0.1	12.7 ± 0.1	15.0 ± 0.1

次に、BFT の各 layer ごとの光電子数の分布を調べた。。MPPC のバイアス電圧は V_{ov} を 5 V に設定しデータの取得を行った。閾値電圧は 3.5 p.e. に設定した。

図 3.17 に x, u, v layer でのチャンネル番号ごとに検出された光電子数を示す。横軸は BFT の各 layer におけるチャンネル番号であり、縦軸は検出された光電子

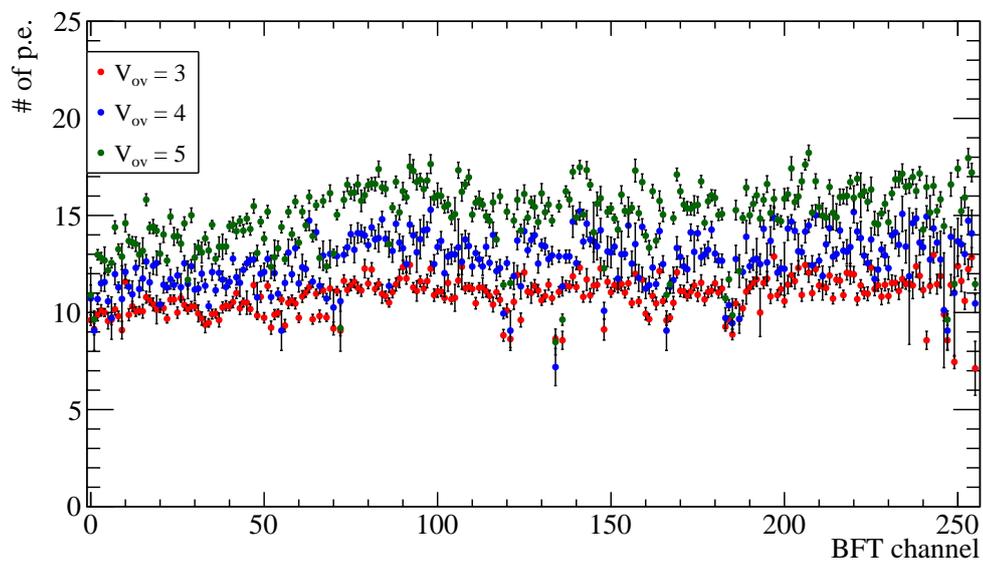


図 3.14: チャンネル番号ごとの検出光電子数。横軸は BFT x layer のチャンネル番号である。縦軸は検出光電子数 [p.e.] である。MPPC のバイアス電圧は赤点が $V_{ov}=3$ V、青点が 4 V、緑点が 5 V のプロットである。

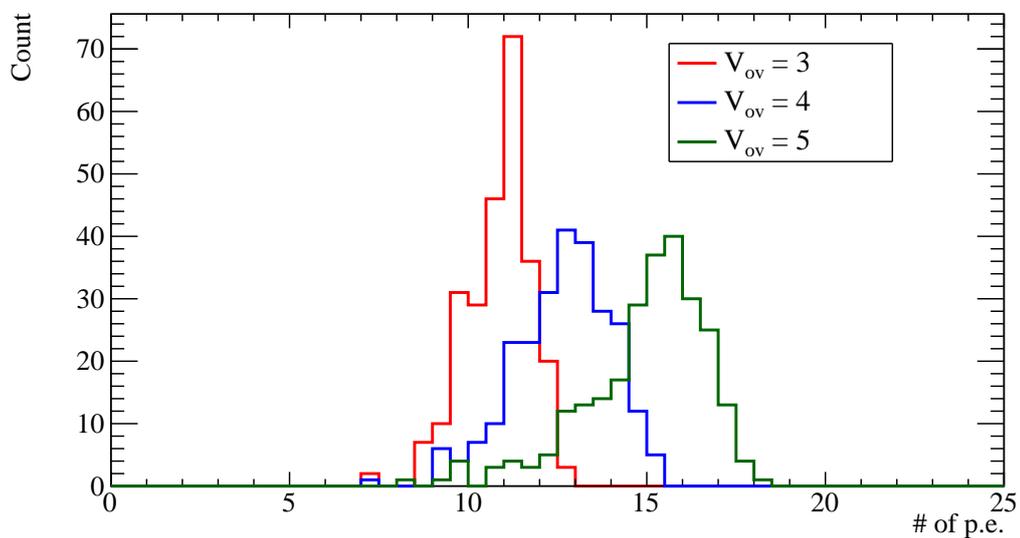


図 3.15: MPPC バイアス電圧ごとの検出光電子数の分布。横軸は検出光電子数 [p.e.] であり、縦軸はチャンネル数である。3 種類のバイアス電圧における検出光電子数の分布を重ねてある。バイアス電圧は赤線が $V_{ov}=3$ V、青線が 4 V、緑線が 5 V の分布である。

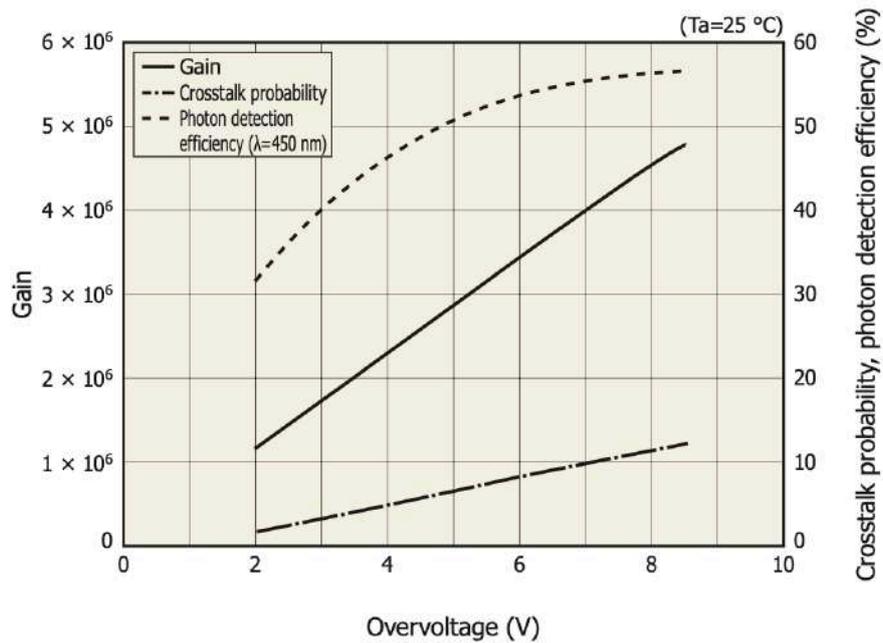


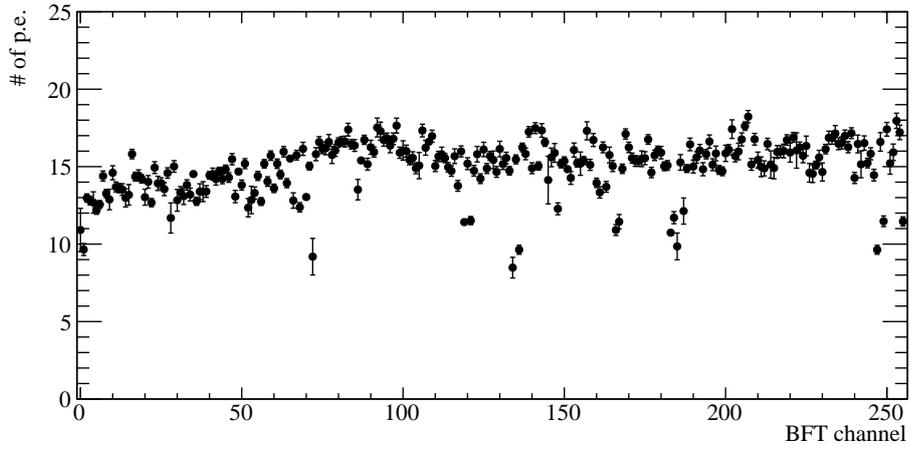
図 3.16: MPPC のカタログから得られた特性のバイアス電圧依存 [18]。横軸は MPPC のバイアス電圧 (V_{ov}) である。左の縦軸は増幅率 (Gain) であり、右の縦軸はクロストークの割合 (%), 及び、検出効率 (%) である。破線は検出効率、実線は増幅率、一点鎖線はクロストークの割合のバイアス電圧依存性をそれぞれ表している。

数である。光電子数が少なくなっているチャンネルがいくつかあることがわかる。図 3.18 に x layer におけるヒットパターンの分布と検出された光電子数を重ねて書いたものを示す。図 3.18 の青線は、BFT の x layer におけるヒットパターンの分布を一番高いところが 50 になるようにスケールしたものである。黒点は BFT x layer で検出された光電子数である。連続する 2 チャンネルのプロットを線で繋いでいる。ヒットパターンのくぼみに当たる検出効率が低くなっているとか思われるチャンネルにおいて、検出される光電子数が少なくなっている傾向が見られた。この原因として検出面から読み出し部分に伸びているどこかでねじれなどの構造上の負荷が生じ、発生したシンチレーション光がファイバーの端面まで上手く輸送されていない可能性があり、現在調査中である。図 3.19 は各 layer ごとの検出された光電子数の分布である。それぞれの分布の平均値を表 3.2 にまとめた。この値を平均値に持つようなポアソン分布を仮定し、閾値である 3.5 p.e. 以下となる割合を計算した。その結果 x layer では 0.05%、u layer では 0.10%、v layer では 0.06% となり、ポアソン分布を仮定した単純な計算では閾値以下となる割合は十分小さい事がわかった。一方でチャンネルごとに見ると検出される光電子数が他と比べ少なくなっているチャンネルがあり、v layer においては最低で約 7 p.e. である。検出される光電子数が 7 p.e. のチャンネルで閾値 3.5 p.e. 以下となる割合は 12.7% となってしまうであり、検出効率が要求性能を満たさない。しかし、BFT の 1 layer にはシンチレーション・ファイバーは俵積みの構造で二段に並べられているため、片方の段のチャンネルにおいて検出される光電子数が少ない場合でももう一方の段のチャンネルで補うことのできるため、実用上は問題ないと考えられる。

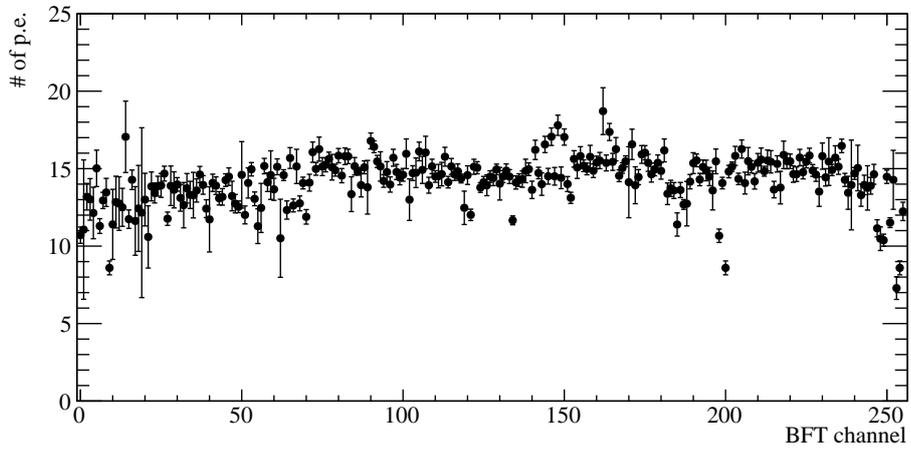
表 3.2: BFT の各 layer の光電子数分布の平均値。

layer	x	u	v
平均光電子数 [p.e.]	15.0±0.1	14.2±0.1	14.9±0.1

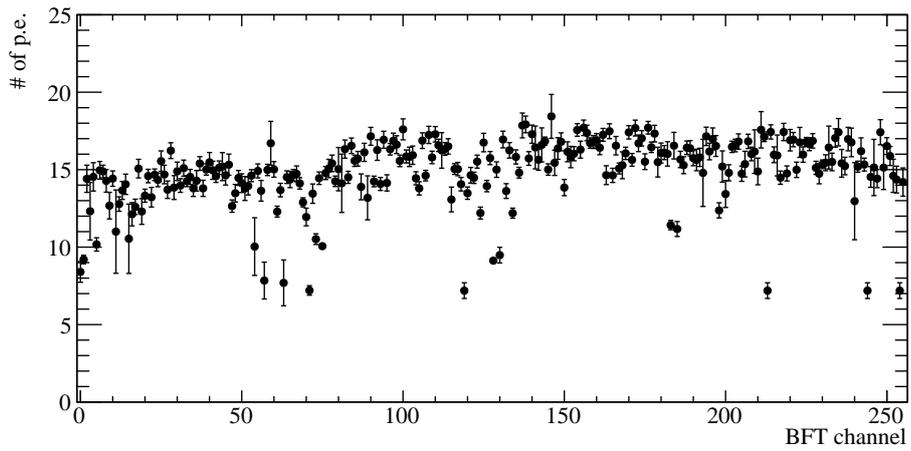
次に FFT の結果について示す。FFT のデータ収集は MPPC のバイアス電圧を V_{ov} で 3 V、閾値値電圧は 3.5 p.e. に設定し行った。図 3.20 は各 layer のチャンネルごとの結果を示す。横軸は FFT のチャンネル番号であり、縦軸は検出された光電子数である。検出される光電子数が少なくなっているチャンネルがいくつか見られるが、BFT の場合と比較して少ない。これは FFT に使用されているシンチレーション・ファイバーが 1.0 mm と BFT の 0.5 mm より太いことや、FFT の方が後に製作されたため製作技術が向上し、ファイバーに負荷をかけないように読み出し面まで伸ばされているためであると考えられる。図 3.3 は各 layer ごとに検出光電子数の分布を見たものである。横軸は光電子数であり、縦軸はチャンネル数である。この分布の平均値から各 layer における平均光電子数を評価した。表 3.3 にその結果をまとめた。x layer に対して u, v layer で検出される光電子数が 2.5 p.e.



(a) BFT x layer



(b) BFT u layer



(c) BFT v layer

図 3.17: BFT のチャンネルごとの検出された光電子数。上から順に x, u, v layer の結果である。横軸は各 layer におけるチャンネル番号であり、縦軸は検出された光電子数である。

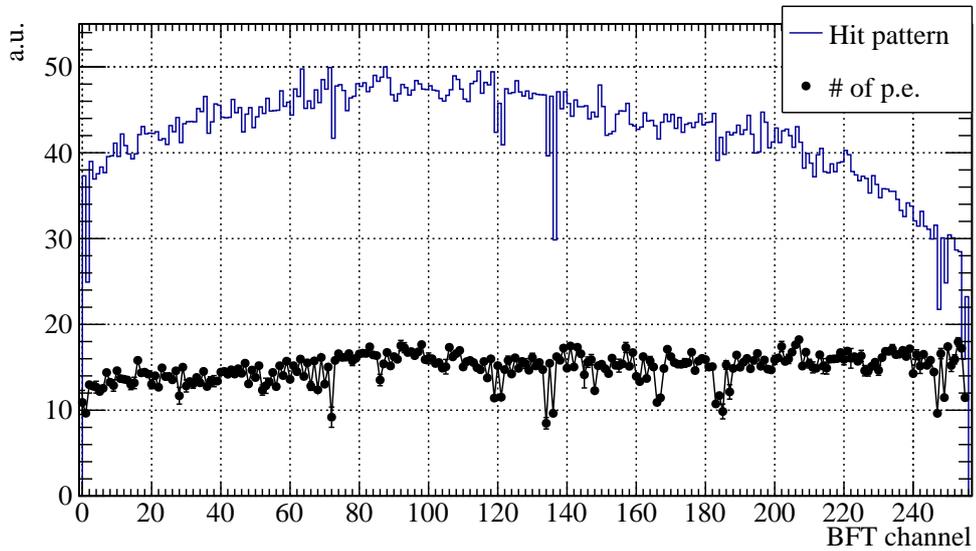


図 3.18: BFT x layer のヒット・パターンと検出光電子数の比較。BFT の x layer における、ヒット・パターンと検出光電子数を重ねて表示したものである。図の横軸は BFT のチャンネル番号である。青線はヒット・パターンの高さをスケールしたものであり、黒点は各チャンネルで検出された光電子数である。ヒット・パターンのくぼみに当たるチャンネルにおいて、検出される光電子数が少ないことが分かる。

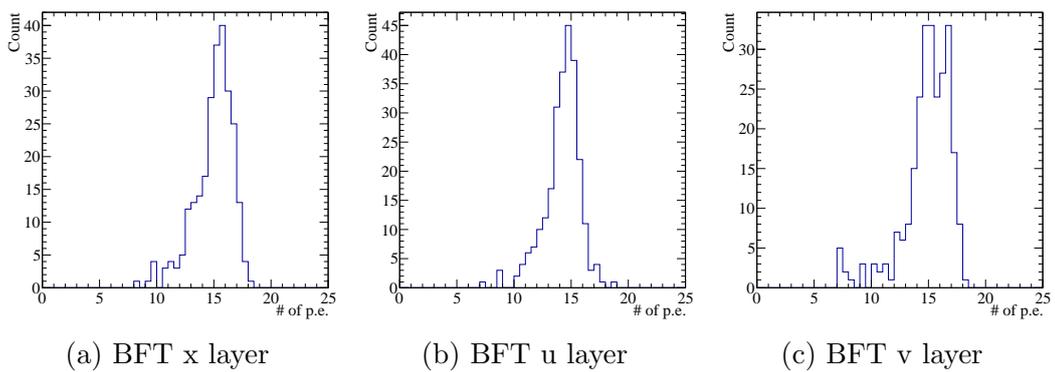


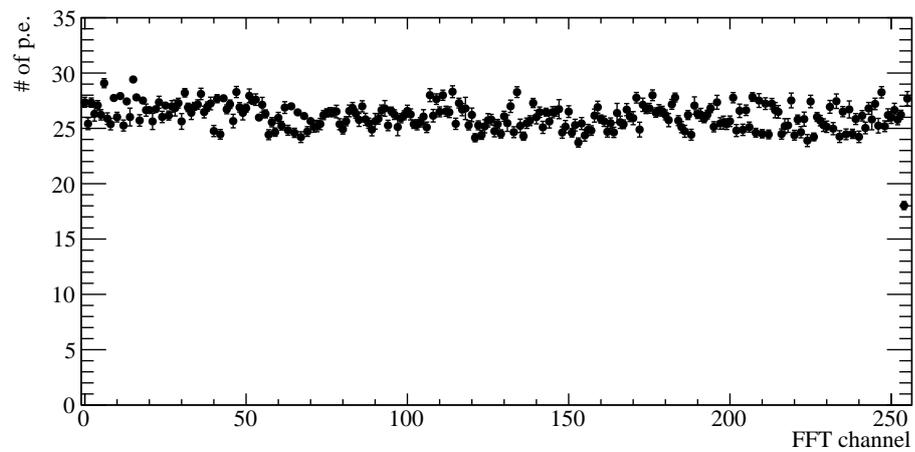
図 3.19: BFT の各 layer に対する検出された光電子数の分布。左から順に、x, u, v layer に対する分布である。横軸は光電子数であり、縦軸はチャンネル数である。

程度少ないことがわかった。この結果は x layer と u, v layer で読み出し部分に伸びている部分の構造が異なることによる可能性がある。使用した FFT の信号は検出器の側面部分で読み出している。検出面に並べられたシンチレーション・ファイバーは、負荷を軽減するため緩いカーブを描くように読み出し部分へと伸びている (図 2.8(a))。x layer と比べ u, v layer はその経路が長く、その差は約 150 mm である。使用しているシンチレーション・ファイバーの attenuation length は 4000 mm であるから、約 4% は u, v layer の方が検出される光電子数が少なくなる。したがって、約 1 p.e. の減少は使用しているシンチレーション・ファイバーの長さによるものである。残る 1.5 p.e. はシンチレーション・ファイバーを読み出し面まで伸ばす際のファイバーの曲率の違いなどに依るものである可能性がある。次に、layer ごとの検出される光電子数を平均値に持つようなポアソン分布を仮定し、閾値 3.5 p.e. 以下となる割合を考えたが十分無視できる事がわかった。

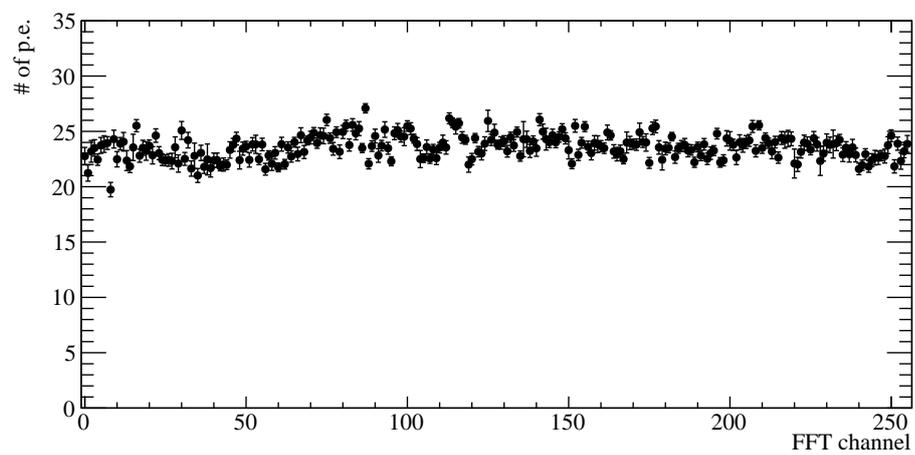
表 3.3: FFT の各 layer の光電子数分布の平均値。

layer	x	u	v
平均光電子数 [p.e.]	26.1±0.1	23.6±0.1	23.8±0.1

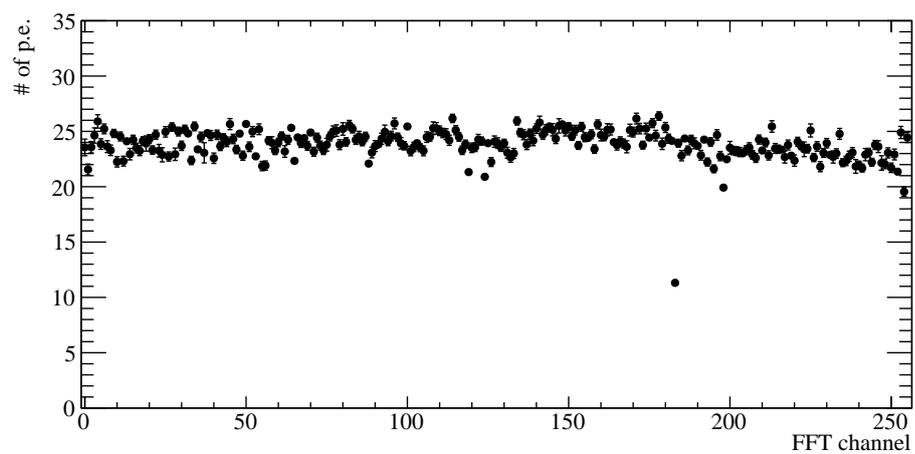
次に SFT の結果を示す。SFT のデータ収集は MPPC のバイアス電圧を V_{ov} が 3 V、閾値電圧は 3.5 p.e. になるように設定し行った。図 3.22 に各 layer のチャンネルごとの結果を示す。横軸はチャンネル番号であり、縦軸は検出された光電子数である。いくつか検出された光電子数が少ないチャンネルがある。これは他の FT と同様に、ファイバーのねじれなどの構造上の問題が影響していると考えられる。また、FFT の場合と比較し問題の生じているチャンネル数の割合が多いのは、SFT に使用しているシンチレーション・ファイバーが直径 0.5 mm のものであり、負荷に弱いためである可能性がある。図 3.23 に各 layer で検出された光電子数の分布を示す。左から順に、x, u, v layer の結果である。横軸は検出された光電子数であり、縦軸はチャンネル数である。それぞれの分布の平均値を表 3.4 に示す。同じ直径 0.5 mm のシンチレーション・ファイバーを使用している BFT と SFT を比較すると、SFT の方が約 1 p.e. 検出される光電子数が少ないことが分かった。これは検出器に使用しているファイバーの長さの違いが影響していると考えた。そこで BFT の x layer と SFT の x layer を比較した。BFT の x layer と比較して SFT の x layer では、検出面の中央から読み出し部分まで約 200 mm 長い。表 2.1 より attenuation length は 4000 mm であるから、SFT では BFT より約 5% 少ない光量が検出されると考えられる。BFT の x layer では 10.9 p.e. が検出されているため、BFT と SFT で検出される光電子数の内約 0.6 p.e. は、シンチレーション・ファイバーの長さの違いが影響していると考えた。SFT のデータ収集は MPPC のバイアス電圧を $V_{ov}=3$ V で行ったため、 V_{ov} を 5 V にすることで検出される光電子数は



(a) FFT x layer



(b) FFT u layer



(c) FFT v layer

図 3.20: FFT のチャンネルごとの検出された光電子数。上から順に x, u, v layer の結果である。横軸は FFT のチャンネル番号であり、縦軸は検出された光電子数である。

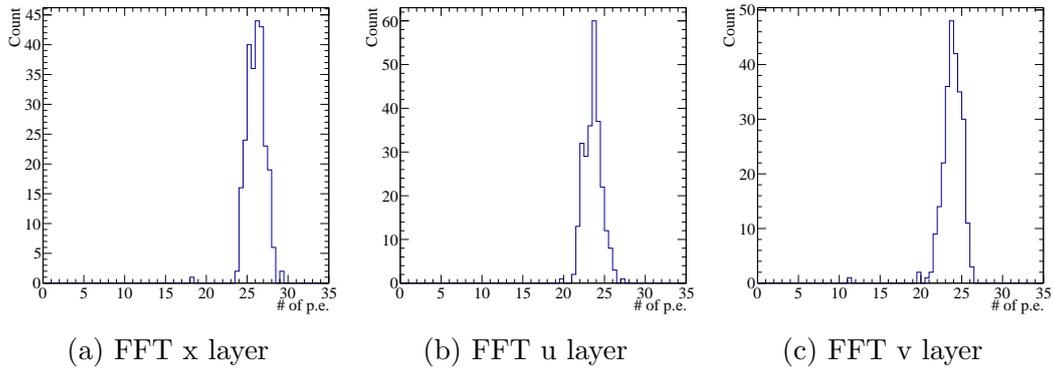


図 3.21: FFT の各 layer に対する検出された光電子数分布。左から順に x, u, v layer に対する分布である。横軸は検出された光電子数であり、縦軸はチャンネル数である。

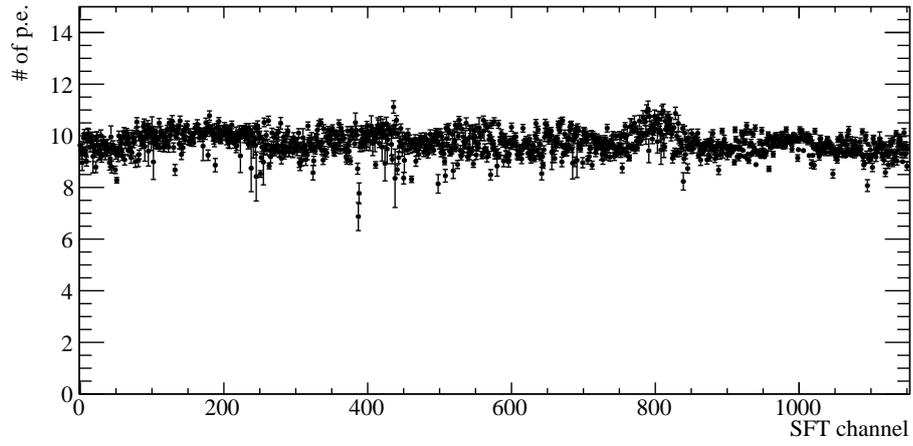
増加する。MPPC の特性から、MPPC のバイアス電圧を $V_{ov}=3$ V から 5 V にすることで、約 1.3 倍の光量を検出することが出来ることが分かったため、SFT は MPPC のバイアス電圧を $V_{ov}=5$ V にすることで、約 13 p.e. が検出できると考えられる。光量分布が 13 p.e. を平均値に持つようなポアソン分布であると仮定したとき、閾値を 3.5 p.e. にした際に閾値を下回る割合は 0.2% であると分かった。これは要求する検出効率に対して小さく、十分な光量が得られている事が分かった。

表 3.4: SFT の各 layer の光電子数分布の平均値。

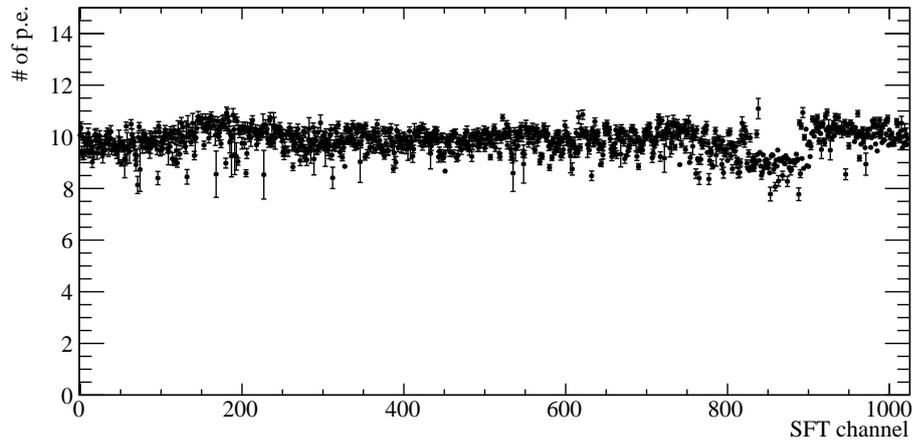
layer	x	u	v
平均光電子数 [p.e.]	9.72 ± 0.01	9.83 ± 0.02	9.79 ± 0.02

3.3.4 検出効率の解析方法

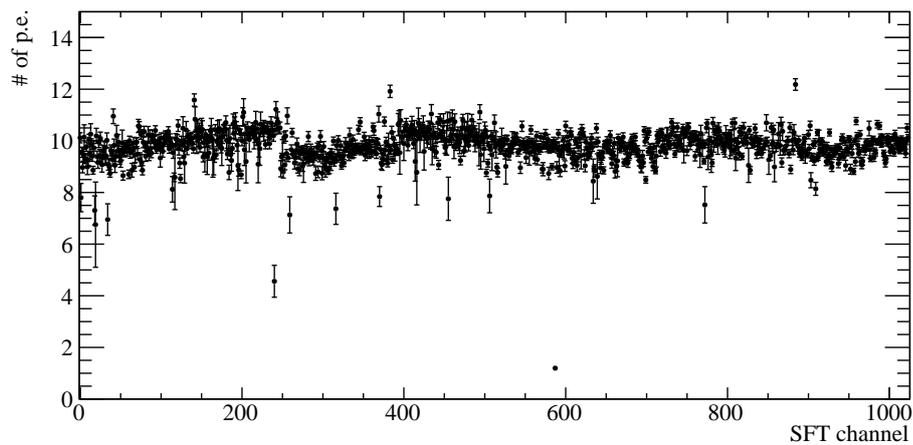
BFT と FFT に対して検出効率の評価を行った。セットアップは 3.2.3 章に示している通り、トリガー検出器が FT の検出面より狭い範囲に収まるように配置してある。検出効率を評価するために FT のヒットパターンを見た。図 3.24 に検出効率評価における FFT の x layer のヒットパターンの例を示す。横軸は FFT の x layer のチャンネル番号であり、縦軸はカウント数である。 V_{ov} を 3 V、閾値を 3.5 p.e. に設定した。山型の分布になっており、これがトリガー検出器で選べ荒れた粒子が通過する範囲にあたる FFT の x layer のチャンネルであると考えられる。山型の分布の左右にはトリガー検出器を通過したものとは別の放射線に依るアクシデ



(a) SFT x layer



(b) SFT u layer



(c) SFT v layer

図 3.22: SFT のチャンネルごとの検出された光電子数。上から順に x, u, v layer の結果である。横軸はチャンネル番号であり、縦軸は検出された光電子数である。

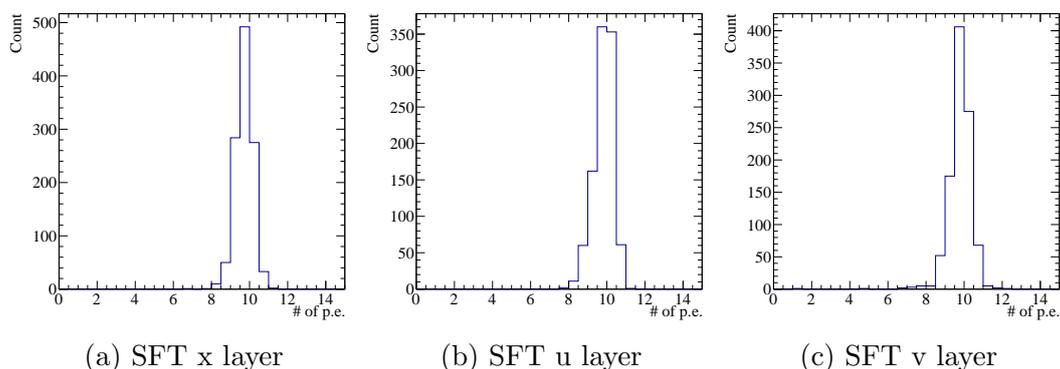


図 3.23: SFT の各 layer に対する検出された光電子数の分布。左から順に x, u, v layer に対する分布である。横軸は検出された光電子数であり、縦軸はチャンネル数である。

ンタルなイベントが見えている。この分布から山型分布の部分だけを選択し、検出効率を評価した。図 3.24 においては、30–230 チャンネルを山型分布の範囲として検出効率を求めた。検出効率の計算は式 (3.2) で行った。

$$Efficiency = \frac{N_{FT\ hit}}{N_{Trigger}} \quad (3.2)$$

$N_{Trigger}$ はトリガー信号の入力された回数である。 $N_{FT\ hit}$ はトリガー信号が入力されたイベントの内、ヒットパターンから見積もったトリガー検出器に挟まれている範囲の FT のチャンネルにおいて、ヒットがあるイベントの数である。

3.3.5 検出効率の結果

BFT の検出効率の評価の結果を示す。BFT は MPPC のバイアス電圧を $V_{ov}=5$ V、閾値は 3.5 p.e. と 2.5 p.e. の 2 種類で変更し検出効率を評価した。BFT の検出効率の結果を表 3.5 に示す。

FFT は MPPC のバイアス電圧を $V_{ov}=3$ V、閾値は 3.5 p.e. に設定しデータの収集を行った。検出効率の計算は式 (3.2) を用いた。FFT の検出効率の結果を表 3.6 に示す。

表 3.6 の結果から、FFT ではチャーム・バリオン分光実験における要求性能である 97% を満たすことが分かった。検出される光電子数から考えてもこの結果は妥当であると判断した。一方 BFT では表 3.5 の結果から閾値 3.5 p.e. に設定したときの BFT の検出効率は約 96% であることが分かった。また、閾値を 2.5 p.e. に設定した際には x layer と u layer では 97% を達成できるが、v layer では達成できなかった。検出される光電子数は全体として十分であったため、BFT の検出効率が

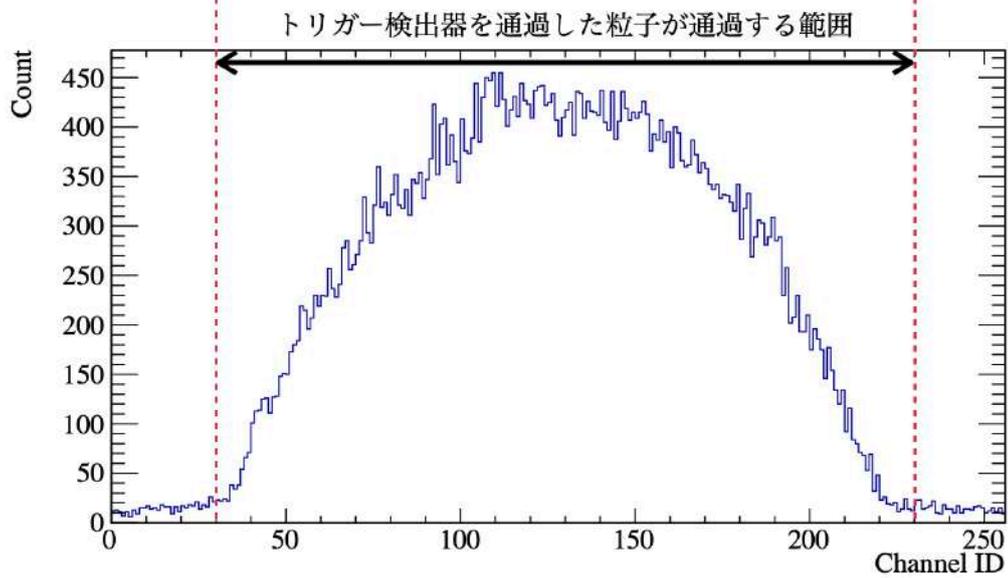


図 3.24: 検出効率評価に用いたヒット・パターン。FFT の x layer における、検出器評価の際のヒット・パターンである。横軸は FT のチャンネル番号であり、縦軸はカウント数である。山型の分布が見えており、これはトリガー検出器で選ばれた粒子が通る範囲であると考えた。赤点線で挟んだ範囲を山型分布の範囲として検出効率の評価に用いた。

表 3.5: BFT 検出効率。

layer	threshold [p.e.]	efficiency[%]
x	3.5	96.31±0.10
u	3.5	95.60±0.12
v	3.5	95.68±0.11
x	2.5	97.51±0.09
u	2.5	97.00±0.09
v	2.5	96.85±0.09

表 3.6: FFT 検出効率。

layer	threshold [p.e.]	efficiency[%]
x	3.5	99.60±0.04
u	3.5	99.22±0.06
v	3.5	99.26±0.04

要求性能を満たさなかった原因として、検出効率の低い特定のチャンネルに依る影響が大きいと考えた。図 3.25 に BFT の x layer におけるヒットパターンの分布を示す。横軸は BFT x layer のチャンネル番号であり、縦軸はカウント数である。FFT のヒットパターン (図 3.24) と比較して、ヒットパターンにくぼみが多く見られる。このくぼみに当たるチャンネルでは付近のチャンネルと比較してカウント数が少なく、検出効率が低くなっていると考えられる。そのため閾値 3.5 p.e. の x layer のヒットパターンにおいて、くぼみの部分が付近のチャンネルと同程度のイベント数があると考えて補正を行った。図 3.26 は閾値 3.5 p.e. での x layer のヒットパターンとくぼみの補正を行った際のヒットパターンの分布を重ねて表示してある。青線が元のヒットパターンであり、黒点が補正を行った際のヒットパターンである。このとき、トリガー検出器で選ばれた粒子が通過する 30–220 チャンネルに含まれるカウント数は、補正を行うことでおよそ 1.01 倍となった。閾値設定が 3.5 p.e. のときの BFT の x layer の検出効率は 96.31% であり、ヒットパターンのくぼみの寄与は約 1% であった。残りの検出効率の低下の原因として、シンチレーション・ファイバーを並べた際の 0.05 mm の隙間やクラッド部分を通過する場合などが考えられる。FFT と比較して BFT は使用しているシンチレーション・ファイバーの直径が小さく本数も多いため、ファイバーの直径に対する不感領域の割合が多くなっているためであると考えた。

得られた検出効率から、チャームバリオン分光実験において使用する際に飛跡を検出できる効率を考えた。チャーム・バリオン分光実験では飛跡の水平 (x)・垂直 (y) 位置とそれぞれの角度 (dx/dz , dy/dz) の 4 つのパラメータを得るため、最低限の自由度 1 で測定する場合は水平方向には x, u, v のレイヤーが最低 3 layer、垂直方向には u か v が最低 3 layer あればよい。高い検出効率で、かつ飛跡検出のための layer 数を確保するため、飛跡検出器の構成はより多くの layer 数を使用し冗長性があるように設計してある。そこで、FFT と BFT について宇宙線で得られた検出効率から、粒子の飛跡検出行う際にいくつの layer を要求することで検出効率がどれだけになるのかを調べた。チャーム・バリオン分光実験において FFT は 6 layer、BFT は 9 layer の検出面を使用して粒子の飛跡検出を行う。このとき、1 層の検出面における検出効率を ϵ 、検出面の layer 数を n とし、そのうち l 層以上を

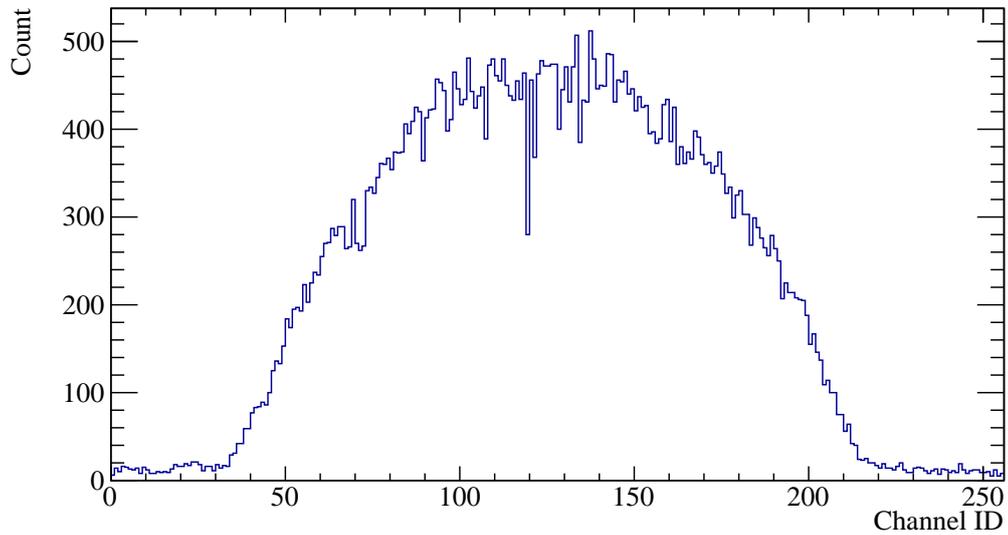


図 3.25: BFT x layer のヒットパターン。横軸は BFT x layer のチャンネル番号であり、縦軸はカウント数である。FFT のヒットパターン (図 3.24) と比較して、ヒットパターンにくぼみが多く見られる。

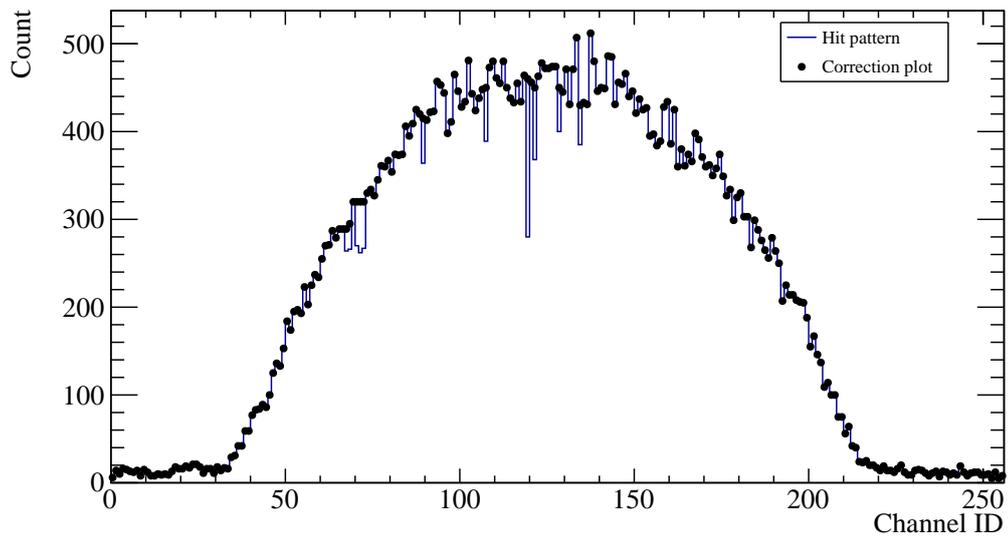


図 3.26: ヒットパターンの補正。BFT x layer の閾値 3.5 p.e. でのヒットパターン (青線) と、くぼみの補正を行った際のヒットパターン (黒点) である。

要求した際に飛跡を検出できる割合 E は式 (3.3) で表せる。

$$E = \sum_{k=0}^{n-l} {}_n C_k \epsilon^{n-k} (1 - \epsilon)^k \quad (3.3)$$

式 (3.3) を用いて FFT と BFT における飛跡検出が可能な割合を調べた。まず FFT について述べる。FFT の検出効率は 1 layer あたり 99% であるとして計算を行った。表 3.7 に要求する layer 数とその時の飛跡検出が出来る割合を示す。この結果全 6 layer の内 5 layer 以上を要求することで 99% 以上の粒子の飛跡検出が可能である事がわかった。この要求 5 layer の内には飛跡の水平・垂直方向のパラメータを得るための十分な x, u, v の layer 数が確保されている。

表 3.7: FFT における飛跡検出可能な割合。

要求する layer 数	飛跡検出が可能な割合 (%)
6	94.1
5	99.9
4 以下	~100

BFT の結果についても述べる。BFT の検出効率は、閾値設定 3.5 p.e. で一番検出効率が低かった u layer の値である 95.6% を 1 layer あたりの検出効率として使用し計算した。表 3.8 に要求する layer 数とその時の飛跡検出が出来る割合を示す。この結果 9 layer の内 7 layer 以上を要求することで 99% 以上の粒子の飛跡検出が可能であることが分かった。つまり、1 layer あたりの検出効率が 97% を満たさない場合でも複数の layer を設置することで、高い割合で粒子の飛跡検出が可能であると分かり、最低 7 layer であっても飛跡の水平・垂直方向のパラメータを得るための十分な x, u, v の layer 数が確保されている。

以上の結果より、FFT と BFT 双方において、飛跡検出は 99% 以上の検出効率で問題なく実施できる事がわかった。

表 3.8: BFT における飛跡検出可能な割合。

要求する layer 数	飛跡検出が可能な割合 (%)
9	66.7
8	94.3
7	99.4
6 以下	~100

3.4 第3章のまとめ

本研究ではFFT、BFT、及び、SFTに対して宇宙線を用いた性能評価を行った。FTの検出面を水平に配置し、その上下をトリガー検出器で挟みデータの収集を行った。測定にはEASIROCチップ搭載のモジュールを使用し、ADCとTDCを測定した。

それぞれのFTで検出される光量の評価を行った結果、チャーム・バリオン分光実験において予定されている閾値である3.5 p.e.に対してFTでは十分な発光量があることが分かった。また、BFTとSFTの一部のチャンネルにおいて検出される光量が少なくなっているものがあることが分かった。

検出効率の評価はFFTとBFTに対して行った。その結果FFTではlayerあたり99%以上の検出効率を得られた。一方、BFTでは閾値を3.5 p.e.に設定して検出効率を評価したとき、チャーム・バリオン分光実験における要求性能である97%を達成できない事がわかった。これは、特定のチャンネルにおける検出効率が低いことが一つの原因であると考えられた。この特定のチャンネルは検出される光量も少なくなっており、シンチレーション・ファイバーがBFTの読み出し部分に伸ばされる際にねじれなどの負荷がかかることで構造上に問題が生じている可能性があると考えた。これは、光量の少ない原因であるとも考えられ、原因を調査中である。得られた検出効率からチャーム・バリオン分光実験における飛跡検出可能な割合を計算した。その結果、FFTは全6 layerの内5 layerを要求することで99%以上の粒子の飛跡検出が可能であると分かった。また、BFTについては全9 layerの内7 layerを要求することで99%以上の粒子の飛跡検出が可能であることが分かった。この様に1 layerの検出効率が97%を満たさないBFTにおいても、複数のlayerを設置することで高い検出効率で粒子の飛跡検出が可能であると分かった。

第4章 シンチレーション・ファイバー飛跡検出器データ読み出しボードの高計数率試験

この章では、東北大学電子光理学研究センター (ELPH) で行った実験の概要について述べ、得られた実験データの解析からシンチレーション・ファイバー飛跡検出器に用いるデータ読み出しボード (Front-End Electronics : FEE) の性能評価を行った結果を述べる。

4.1 研究目的

シンチレーション・ファイバー飛跡検出器 (FT) は、チャーム・バリオン分光実験において高計数率環境下で使用する。チャーム・バリオン分光実験において FT が設置される実験標的付近、及び、ビーム上流でのビームの最大強度は 1 MHz/mm になると予想されており、その環境で使用される際に 2.4 章で示した要求性能を満たす必要がある。また、FT に使用される MPPC の制御、及び、アナログ信号の処理には ASIC を搭載した FEE を用いる。本研究では FT のデータ収集に用いる ASIC 搭載の FEE 性能の計数率依存性を調査するため実験を行った。得られた実験データからチャーム・バリオン分光実験におけるビームの最大強度である 1 MHz/mm における FEE の性能を評価する。

4.1.1 先行研究の結果

先行研究 [12] では MPPC の制御、及び、アナログ信号の読み出しに NIM-EASIROC モジュール [3] を使用し、高計数率条件下での Prototype Fiber Tracker (PFT) の性能評価を行った。NIM-EASIROC モジュールは多チャンネルの Pixelated Photon Detector (PPD) を読み出すために開発された ASIC である EASIROC チップが搭載されている。

先行研究の実験は本研究と同じく ELPH において行われ、ビーム強度を 1.3 kHz/fiber-1400 kHz/fiber の間で変更しストリーミング DAQ で TDC データを取得した。その結果 NIM-EASIROC モジュールを用いてデータ収集を行ったとき、

1 MHz/mm の環境下で時間分解能は要求性能である 1 ns を満たすことがわかった。しかし、検出効率においては 97%以上という要求を満たさないことがわかった。そしてその原因は MPPC ゲインの低下と信号のパイルアップによる数え落としであると結論付けられた。MPPC ゲインの低下については閾値電圧における信号幅である Time Over Threshold (TOT) 分布が、高計数率環境での減少として観測された。そして、MPPC ゲインの低下は高計数率環境下で EASIROC 内部への過電流により EASIROC の動作不良が起きた事によって生じたと考えられた。また、高計数率環境下で信号の間隔が短くなることで信号のパイルアップが生じ、信号の数え落としが生じた。信号の不感時間は約 48 ns であり、1 MHz/mm で 5% のパイルアップに依る数え落としがあることがわかった。

以上の先行研究の結果より、シンチレーション・ファイバー飛跡検出器の信号の読み出し ASIC には EASIROC 以外の ASIC を用いる必要があることがわかった。本研究では、CITIROC1A 及び PETIROC2A[15] という別の PPD 制御用 ASIC を使用し、それらを搭載した FEE の高計数率環境下における性能評価を行った。

4.1.2 CITIROC1A と PETIROC2A

本実験では FT に用いる MPPC の制御、及び、アナログ信号の処理を行う ASIC として CITIROC1A と PETIROC2A を使用した。CITIROC1A と PETIROC2A[15] は、どちらも Omega/IN2P3/Weeroc 社により開発された多チャンネル PPD の信号読み出し用の ASIC である。その構造について説明する。

CITIROC1A は EASIROC の改良版とされる ASIC である。図 4.1 に CITIROC1A のブロックダイアグラムを示す。CITIROC1A は 1 チップで 32 チャンネルの MPPC の制御と信号の処理を行うことができる。信号の入力部分には 8-bit の Digital to Analog Converter (DAC) が接続されている。この DAC は InputDAC と呼ばれ、直流電圧を供給することで光検出器のバイアス電圧を微調整する。

信号の増幅には low ゲインと high ゲインの 2 つのアンプラインがある。両ラインともプリアンプとスローシェイパー (SSH) を持ち、SSH は電荷測定に使用される。SSH を通過した信号は、SCA と PD と呼ばれるコンデンサに入力される。SSH の出力でこれらのコンデンサを充電し、あるタイミングで SSH から切り離すことで電圧をコンデンサに記憶することで電荷の測定を行う。SCA は外部信号を入力することで制御される。一方、PD は外部信号またはディスクリミネーターで生成された内部信号で制御される。

この他に、FSH と呼ばれる fast shaper がある。FSH で整形された信号は 2 つに分岐し、それぞれ次段に入力される。1 つはタイミング測定用である。もう 1 つは PD を制御するためのロジック信号である。FSB から並列に出力されるロジック信号の閾値電圧は、2 つの 10-bit DAC で制御されている。この 10-bit DAC は 1 チップの 32 チャンネル全部に共通のものであり、チャンネルごとに閾値電圧を微調整するために各チャンネルに 4-bit DAC が追加搭載されている。

CITIROC1A の特徴は、高精度の電荷測定が可能であることである。この特徴を利用することによって、MPPC のゲインの状態を精密に調整・監視することが可能である。

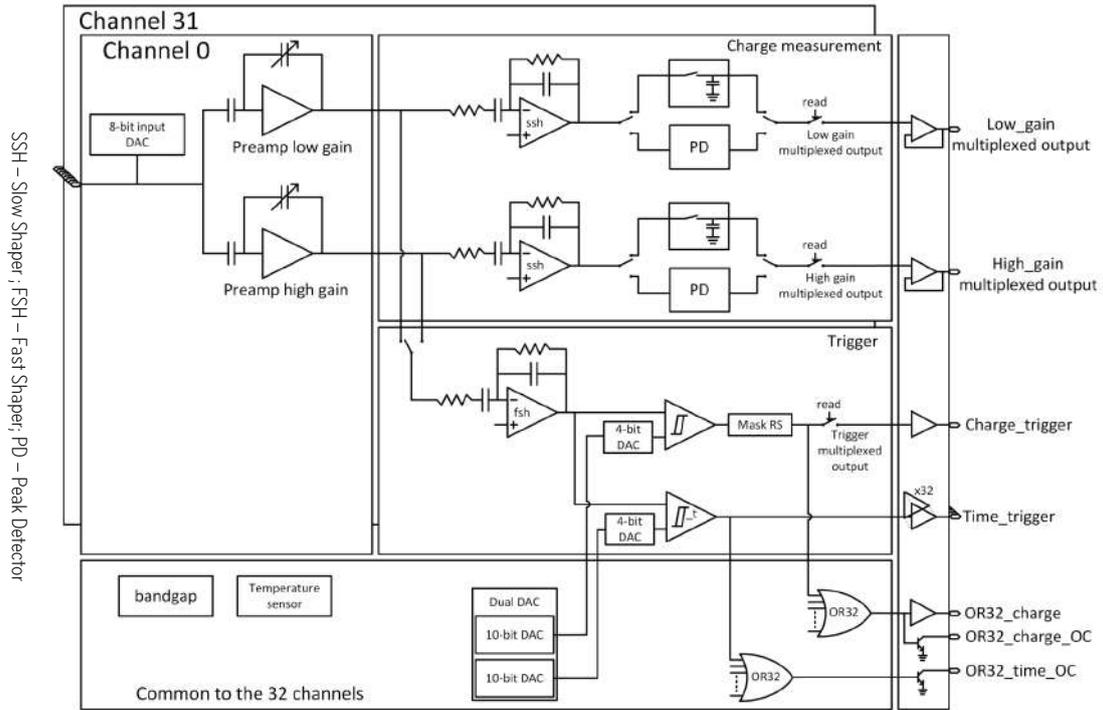


図 4.1: CITIROC1A のブロックダイアグラム [15]。CITIROC1A には 2 つのアンプラインが有り、それぞれ、スローシェイパー (SSH) につながっている。SSH には SCA と PD と呼ばれるコンデンサが接続されており、ここで電荷の測定を行う。FSH と呼ばれる fast shaper では、信号の識別を行うロジック信号を出力する。FSH の閾値電圧は、チップで共通の 10-bit DAC とチャンネルごとに異なる 4-bit DAC で調整される。

次に PETIROC2A の構造について述べる。図 4.2 に PETIROC2A のブロックダイアグラム [15] を示す。PETIROC2A は、CITIROC1A と同様に 1 チップで 32 チャンネルの PPD の制御と信号処理を行うことができる。PETIROC2A は PET Integrated ReadOut Chip の略であり、その名の通り Positron Emission Tomography (PET) で使用される医療用の ASIC として開発された。PETIROC2A も CITIROC1A と同様に 8-bit の Input DAC が内蔵しており、光検出器のバイアス電圧を微調整する。Input DAC の前には終端抵抗を内蔵している。CITIROC1A より帯域幅の広いプリアンプが使用されており、増幅率は 40 に固定されている。このプリアンプにより CITIROC1A と比較して信号の立ち上がり時間が速く、増幅された後の信号幅が狭くなることが期待される。電荷測定ラインはプリアンプの手前で分岐している。そのため、1 p.e. を見ることは困難である。ディスクリミ

ネータの閾値電圧は、32チャンネル全部で共通の10-bit DACとチャンネルごとの6-bit DACで調整される。出力されるロジック信号は並列である。また、ADCとTDCが内蔵されているが本実験においては使用しない。PET検査では無機シンチレータを使用し、511 keVのガンマ線で発生したシンチレーション光を検出する。PETIROC2AはPET検査で使用するために開発されたため、1 p.e.の測定には向かない。一方で、PET検査では2本のガンマ線の時間差測定が重要であり、PETIROC2Aは優れた時間分解能が期待できる。

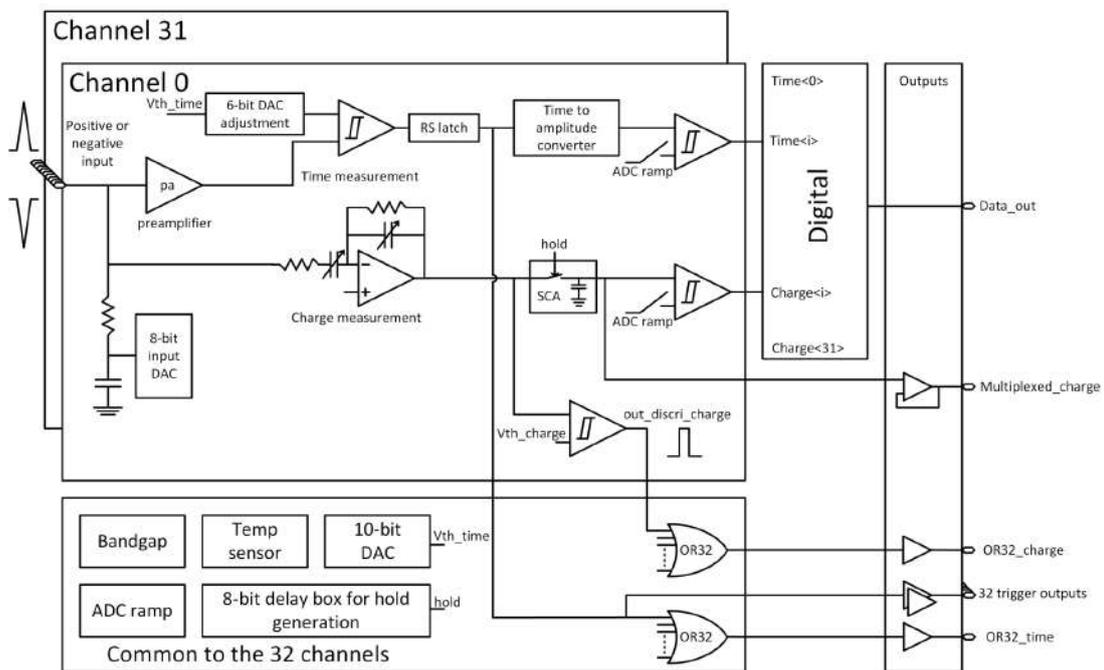


図 4.2: PETIROC2A のブロックダイアグラム [15]。PETIROC2A に搭載されているプリアンプの帯域は CITIROC1A より広いものである。閾値電圧は、1 チップで共通の 10-bit DAC とチャンネルごとに異なる 6-bit DAC が搭載されている。PET 検査で使用するための ASIC であり、電荷測定ラインがプリアンプの前で分岐しているため 1 p.e. の測定には向かない。

4.2 実験概要

4.2.1 東北大学電子光物理学研究センターの加速器施設

本実験は東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) [10] において実施した。ELPH の施設概要図を図 4.3 に示す。ELPH では 2 種類の加速器を組み合わせることで、電子を最大 1.3 GeV/c まで加速することができる。電子ビームはまず入射用電子

線形加速器で最大ビームエネルギー 100 MeV まで加速される。線形加速器で加速された電子はブースター・ストレージリング (BST リング) へと入射される。BST リングはシンクロトロン電子加速器であり、電子ビームを最大 1.3 GeV まで加速しリング中に貯蔵する事ができる。リングを周回している電子ビームの軌道上に非常に細い炭素ファイバーの輻射体を挿入することで、制動放射により高エネルギーのガンマ線が発生する。BST リングにはビームの取り出し口が2箇所あり、その1つは GeV ガンマ照射室に入射するための取り出し口である。本実験は図 4.3 に示す BST リングと GeV ガンマ照射室の間で行った。本実験では BST リングより取り出されたガンマ線をアルミニウムのフランジ (1 mm 厚) へと入射することで、電子対生成によって e^\pm ビームへと変換し使用した。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の輻射体を挿入する速度によって調整した。ビームの取り出しは 1 spill = 10 s であった。

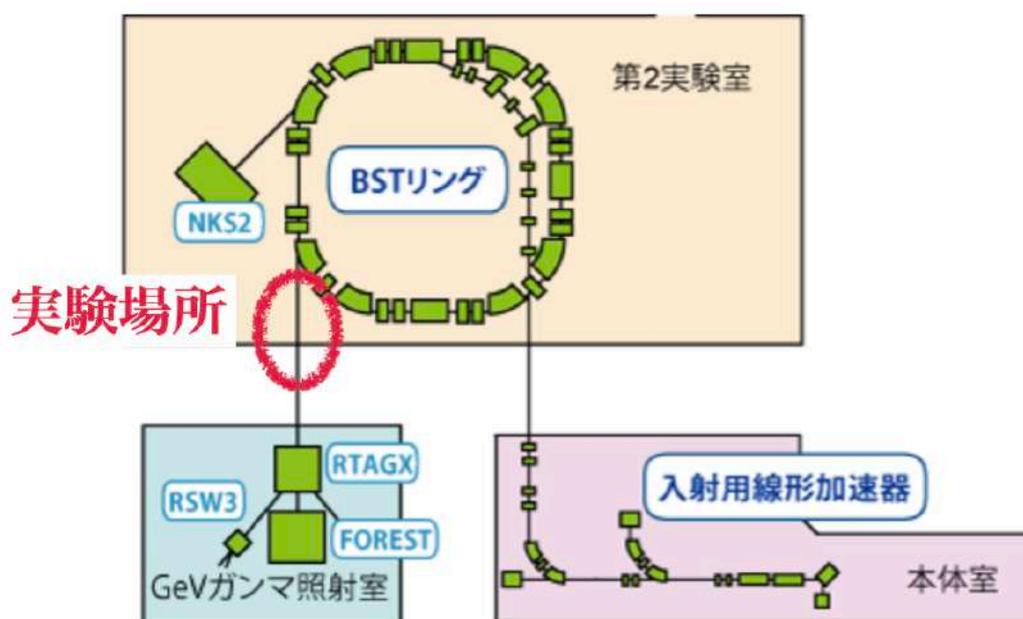


図 4.3: 東北大学電子光物理学研究センターの施設概要図。電子ビームはまず入射用電子線形加速器で 100 MeV まで加速し、BST リングへと入射される。BST リングは電子ビームを最大 1.3 GeV まで加速し、リング内に貯蔵することが出来るシンクロトロン電子加速器である。本実験は図の赤丸で示す BST リングと GeV ガンマ照射室の間で行った。BST リング内に炭素ファイバーの輻射体を挿入することでガンマ線が発生させ、このガンマ線をアルミニウムのフランジに入射させることで電子対生成によって e^\pm ビームへと変換し使用した。

4.2.2 ストリーミング DAQ システム

本実験ではデータ収集にストリーミング DAQ システムと呼ばれるトリガーレスの DAQ システムを使用した [2]。その概要について述べる。ストリーミング DAQ システムでは特定のトリガー検出器を必要とせず、全検出器におけるヒット情報を保存する。保存されたヒット情報からソフトウェア上でイベントの選択を行うこと解析を行う。ストリーミング DAQ システムでは FPGA を搭載した複数のモジュールを使用する。それぞれの FPGA にはストリーミング TDC と呼ばれる TDC が実装されており、FPGA に入力されるロジック信号の時間情報をデジタルに変換し取得する。そして取得された時間情報を PC に転送し保存する。それぞれのストリーミング TDC は master clock と呼ばれる 50 MHz のクロック信号により同期される。時間情報は Heart Beat Flame (HBF) と呼ばれるカウンターと、0.96 ns の時間精度をもつ TDC のカウンターに分けて保存される。HBF は 504 μ s に一度カウントされ、同時に TDC のカウンターはリセットされる。そのため、データ取得開始からの時間は HBF のカウンターから大まかに得ることができ、TDC のカウンターで 0.96 ns の精度で得ることが出来る。TDC のカウンターのみで J-PARC の 1 spill の時間情報を取得使用すると TDC のカウンターは過大な bit 数が必要であるため、2つのカウンターに分けて時間情報の取得を行う。

4.2.3 Front-End Electronics

本実験において FT のデータ収集は、CITIROC1A と PETIROC2A のどちらか片方を搭載した Front-End Electronics (FEE) で行った。1つの FEE で 32 チャンネルの MPPC の制御、信号の処理、データ収集、及び、PC への転送を行う。図 4.4 に FEE の構造を示す。FEE は ASIC を搭載したアナログボードと Field-Programmable Gate Array (FPGA) を搭載したデジタルボードの組合せで構成されている。FPGA には Xilinx Kintex-7[5] を使用している。ボード上の ASIC は FPGA によって制御される。FPGA はギガビット・イーサネットとパーソナルコンピュータ (PC) と通信する。FEE には 2つの光ファイバーモジュール (SFP) を搭載しているため、通信速度は最大 2 Gbps である。FEE には複数の FEE を同期させるためのクロック信号を受信するための RJ45 コネクタが搭載されている。FPGA にはストリーミング TDC が実装されており、ASIC から出力されるロジック信号から時間情報が取得される。取得された時間情報は PC へと転送され保存される。

4.2.4 実験セットアップ

BST リングと GeV ガンマ照射室間に置かれた本実験のセットアップの模式図を図 4.5 に示す。検出器群は Prototype Fiber Tracker (PFT)、Beam Fiber Tracker (BFT) と複数のリファレンス・カウンター (Reference 1, 2, 3, 4) から構成される。

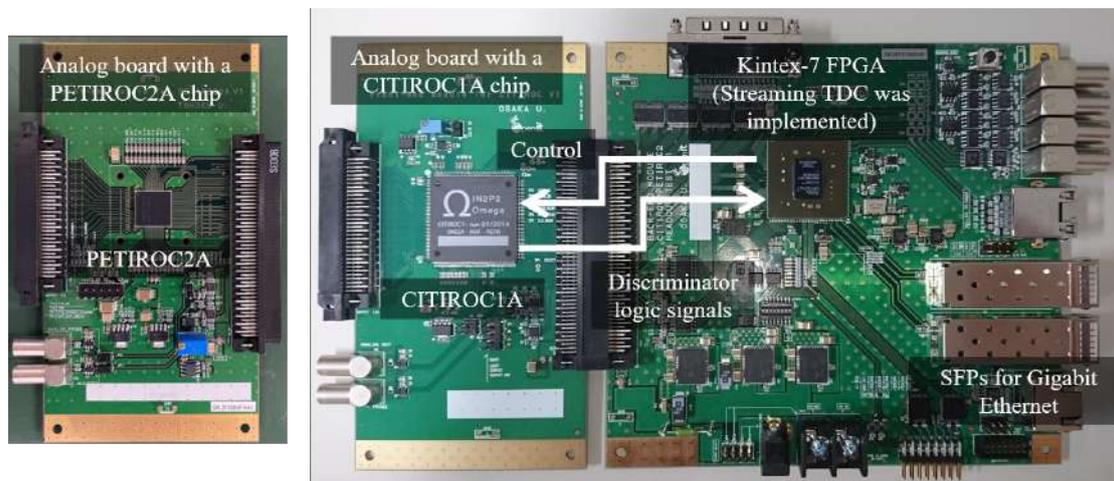


図 4.4: FEE ボードの構造図。FEE は 2 つのボードで構成されている。1 つ目は ASIC 搭載のボードで、2 つ目は FPGA を搭載したボードである。ASIC 搭載ボードには CITIROC1A と PETIROC2A のどちらかを搭載した 2 種類がある。FPGA にはストリーミング TDC が実装されており、ASIC で処理を行い出力するロジック信号から時間情報が取得される。取得された時間情報は PC へ転送し保存する。

PFT と BFT の構造は 2.3 章に示してある。PFT のデータ収集には 3 台の FEE を使用し、全 128 チャンネルの内 96 チャンネルのみのデータ収集を行った。BFT のデータ収集には 2 台の FEE を使用し、x layer の中心付近の 64 チャンネルのみのデータ収集を行った。

次に 4 台のリファレンスカウンターの構造について説明する。リファレンス・カウンターは FT を挟むようにビームの上流側と下流側に 2 台ずつ設置した。上流側から順にリファレンス・カウンター 1-4 と呼ぶ。1 台のリファレンス・カウンターは、プラスチックシンチレータと光電子増倍管を組み合わせたものである。プラスチックシンチレータ (EJ-228) は断面積が $3 \times 6 \text{ mm}^2$ 、長さが 150 mm の直方体となっている。シンチレーション光の検出にはメタルパッケージの光電子増倍管 (Hamamatsu Photonics R9880U-113) を用いた。上流側と下流側に 2 台ずつ設置したリファレンス・カウンターは、どちらも図 4.6 のような構造になっている。2 台のリファレンス・カウンターは、PFT の有効領域を覆うように交差角度が 60° で設置した。リファレンス・カウンターの信号はディスクリミネータを用いてロジック信号に変換し、Hadron Universal Logic モジュール (HUL) [8] に入力した。HUL とは J-PARC でのハドロン実験用に開発された FPGA 搭載の多目的モジュールである。

FEE、及び、HUL モジュールに搭載している FPGA には、ストリーミング TDC が実装されている。図 4.5 の赤線が、それぞれの FPGA への master clock の入力信号を表している。ストリーミング TDC で取得された時間情報は光ファイバーを

用いて PC (Intel Xeon E5-2630 v4 プロセッサ 2 台と 256 GB メモリ (DDR4-2400) 搭載) へと転送し保存した。

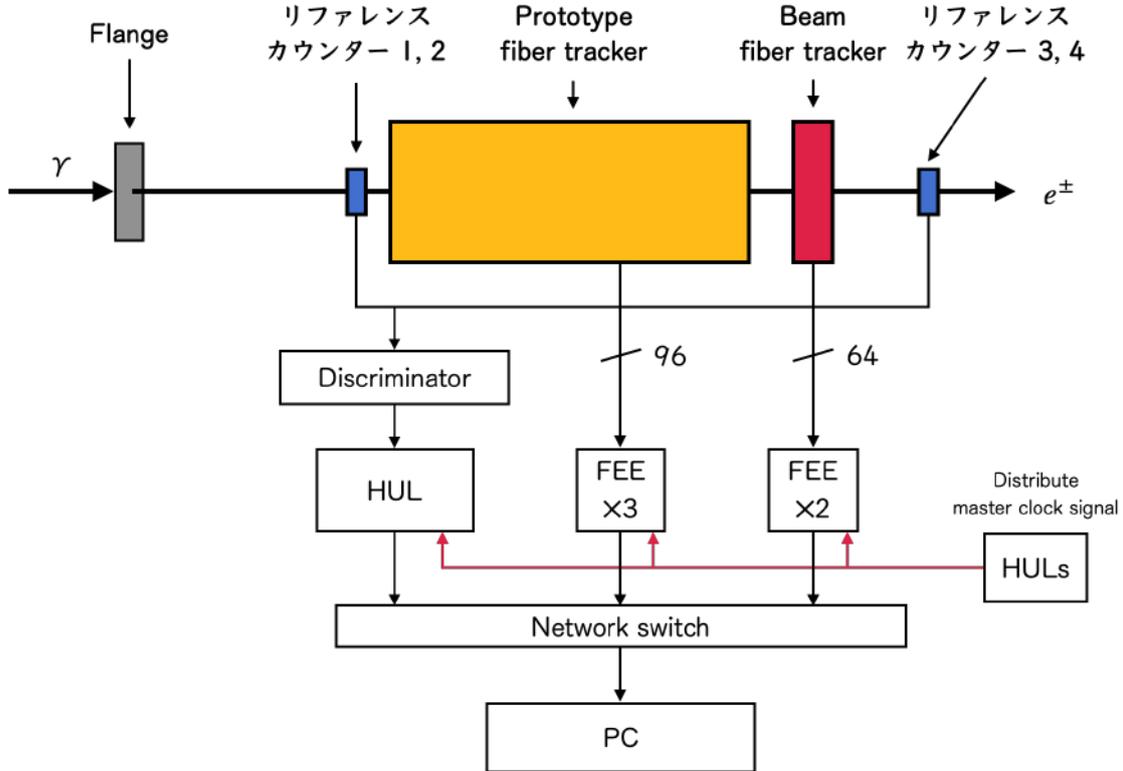


図 4.5: 実験セットアップの概略図。検出器はビームの上流からリファレンス・カウンター 1, 2、Prototype Fiber Tracker (PFT)、Beam Fiber Tracker (BFT)、リファレンス・カウンター 3, 4 の順で配置した。PFT には 3 台の FEE を接続し、合計 96 channel のデータ収集を行った。BFT には 2 台の FEE を接続し、合計 64 channel のデータ収集を行った。リファレンス・カウンター 1-4 の信号は、discriminator を用いてロジック信号へと変換し HUL モジュールに入力した。

4.2.5 測定条件

本実験では FEE の性能評価を行うために、表 4.1 と表 4.2 の測定条件のもと実験を行った。BFT と PFT のそれぞれに接続する FEE は、CITIROC1A 搭載のもの と PETIROC2A 搭載のものを入れ替えて使用した。それぞれの接続状態を簡略化して表現するために、BFT に CITIROC1A 搭載の FEE を接続した状態を BFT-CITIROC1A のように表記することにする。我々は 2 種類の MPPC バイアス電圧を用いた。バイアス電圧は over voltage (V_{ov}) で表示してある。 V_{ov} の値が小さい方を low ゲインとして、高い方を high ゲインとした。

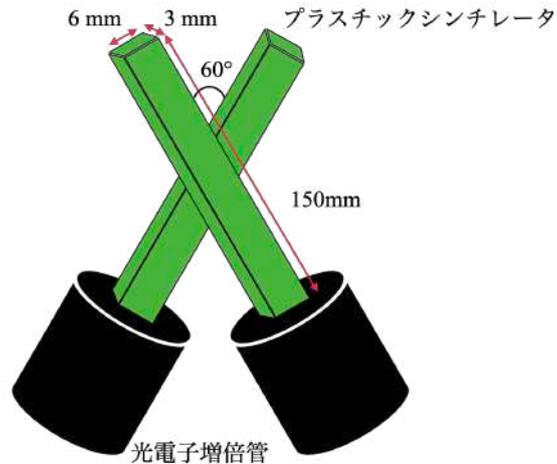


図 4.6: リファレンス・カウンターの構造図。リファレンス・カウンターは 6 mm (W)×3 mm (T)×150 mm (L) の直方体のプラスチックシンチレータ (EJ-228) と、メタルパッケージの光電子増倍管 (Hamamatsu Photonics R9880U-113) から構成されている。セットアップの上流と下流でそれぞれ 2 台ずつのリファレンス・カウンターが交差した構造になっている。2 つのプラスチック・シンチレータの交差角度は 60° である。

ASIC 内のディスクリミネータの閾値の設定は、CITIROC1A と PETIROC2A で異なる。CITIROC1A については 2 種類の V_{ov} において 1 p.e. の電圧値をそれぞれオシロスコープで確認し、閾値電圧が 3.5 p.e. の電圧値となるように threshold DAC 値を決定した。PETIROC2A についてはオシロスコープでは 1 p.e. の観測が困難であった。そのため大まかな 1 p.e. 電圧を決定し、3.5 p.e. における電圧値を仮定した。そして、仮定した 3.5 p.e. の電圧値に閾値がくる threshold DAC の値を基準として、その付近で 6 段階で DAC 値を変更してデータを取得した。

ビーム計数率はリファレンス・カウンターのカウント数をスケーラーで確認しながら 5 段階で変更させた。その結果、ビーム上流にある PFT はビーム計数率が最大の channel において 50–2500 kHz/mm の範囲で測定し、下流にある BFT では 5–1400 kHz/mm の範囲でデータを取得した。

4.3 解析と結果

4.3.1 ストリーミング DAQ におけるイベントの選択方法

本実験ではストリーミング DAQ システムを使用し、データの収集を行った。ストリーミング DAQ システムではストリーミング TDC を搭載した FPGA において、検出器から出力された信号の時間情報が取得される。取得される情報は信号の閾値電圧における 2 つのタイミング (リーディング・エッジ、トレーリングエッ

表 4.1: FT のセットアップ条件。

Detector	ASIC	V_{ov} [V]	閾値電圧
BFT	CITIROC1A	4.5, 5.5	3.5 p.e.
BFT	PETIROC2A	4.5, 5.5	6 段階変更
PFT	CITIROC1A	3.5, 4.5	3.5 p.e.
PFT	PETIROC2A	3.5, 4.5	6 段階変更

表 4.2: ビーム強度の条件。

Detector	ASIC	ビーム強度 [kHz/mm]
BFT	CITIROC1A	5, 50, 400, 800, 1300
BFT	PETIROC2A	5, 50, 400, 800, 1300
PFT	CITIROC1A	50, 200, 700, 1500, 2500
PFT	PETIROC2A	50, 200, 700, 1500, 2500

ジ) の時間情報である。ストリーミング DAQ システムでは全ての検出器におけるヒットの時間情報を、波形の小さいノイズを除き全て保存する。保存された時間情報は解析の際にソフトウェア上でイベントの選択を行う必要がある。本研究では、Trigger Detector 解析 (TD 解析) と、Non Trigger Detector 解析 (NTD 解析) の 2 種類のイベントの選択方法を使用し解析を行った。それぞれのイベント選択方法を説明する。

図 4.7 に TD 解析と NTD 解析の 2 種類のイベントの選択方法の模式図を示す。図の星印は各検出器におけるヒット情報を表しており、横軸はデータ収集中の時間である。まず、TD 解析について説明する。図 4.7 では、青枠で囲まれている部分が TD 解析で選択されるイベントを表している。TD 解析では、基準となる検出器 (trigger detector) のヒット情報をもとにイベントの選択を行う。まず基準となる検出器 (trigger detector) において、ヒット情報を確認する。trigger detector において時間的に近いところでヒット情報があった際に、その時間を中心としてある範囲における全ての検出器のヒット情報を解析用データファイルに書き出す。基準を設けてデータの書き出しを行うため、各種データのイベント情報が揃っており、相関を見ることが出来る。本実験ではリファレンス・カウンター 1-4 を trigger detector として、TD 解析を行った。次に NTD 解析を説明する。図 4.7 では赤枠が NTD 解析を表している。NTD 解析では、TD 解析の様に基準となる検出器は決まらずにデータの書き出しを行う。各検出器のすべてのヒット情報を解析用のデータファイルに書き出すため、その検出器にどれだけヒットがあったのかが分かる。

本研究ではNTD型解析を用いて、ビーム計数率の見積もりなどを行った。

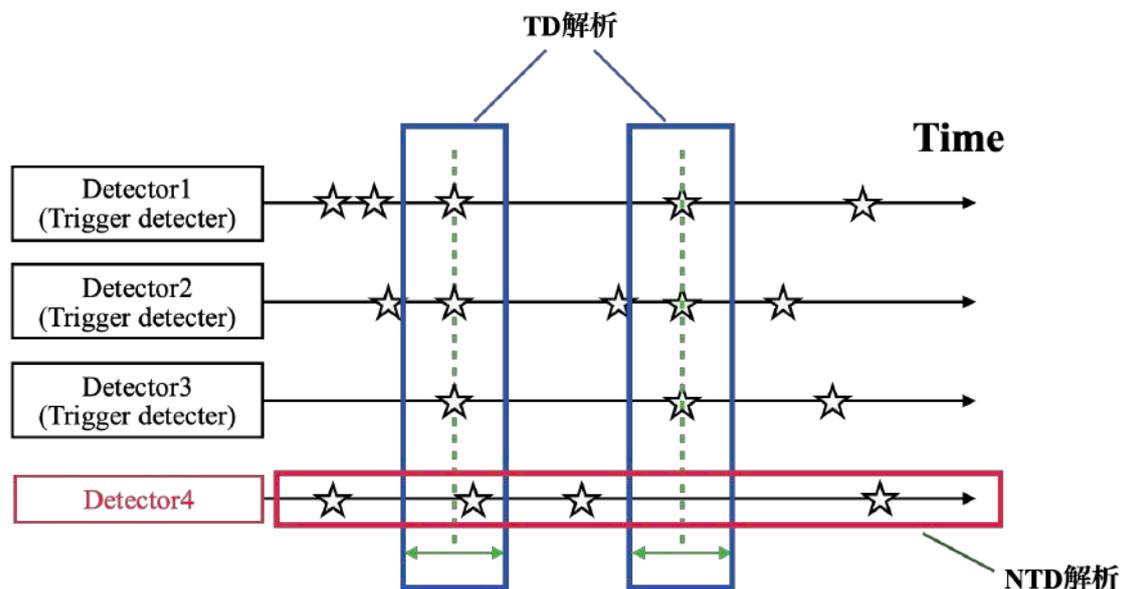


図 4.7: ストリーミング DAQ におけるデコード方法 (TD 解析・NTD 解析) の模式図。星印はヒット情報があることを表している。横軸はデータ収集中の時間である。青枠は TD 解析、赤枠は NTD 解析におけるヒット情報の選択範囲を表している。TD 解析では trigger detector を基準にデータの選択を行う。

4.3.2 解析に使用する時間情報の定義

ストリーミング DAQ では、信号の閾値電圧におけるリーディング・エッジの時間情報 (LTDC) とトレーリング・エッジの時間情報 (TTDC) が収集されている。TDC の時間精度は 1 ch \sim 0.96 ns である。解析では LTDC と TTDC の値からその他の値を定義し用いた。ここではそれらの値の定義についてまとめる。

1. Time Over Threshold (TOT) : 1 つの信号における LTDC と TTDC の値の差分を TOT として定義した。
2. ΔT : 検出器のそれぞれのチャンネルにおいて、連続した 2 つのヒットの LTDC の差分を ΔT として定義した。
3. Time Of Flight (TOF) : TOF は TD 解析のみで得られる値であり、リファレンス 2 の LTDC と他の検出器のヒットの LTDC の値の差分を TOF として定義した。

4.3.3 計数率依存解析のためのデータ分割

本研究ではFEEの計数率依存性を評価することが目的である。実験では1 spill (=10 s) をまとめてデータ収集を行ったが、spill 中にも計数率の変化が見られたため、1つのデータを3つに分割して解析を行った。分割の範囲の決定方法について述べる。ストリーミングDAQではHBFのカウンターの値からある1つのHBFの間にどれだけのヒットが存在するかがわかる。1 HBFの時間は504 μ sである。HBFに含まれるヒット数からHBFごとにカウント・レートの見積もりを行った。図4.8にBFTのある1つのチャンネルにおける1 spill 中の計数率の変動を示す。横軸はspill 中の時刻である。縦軸はHBF中に含まれるカウント数から見積もった count beam rate [MHz] である。時折値が0になっているのはデータの取りこぼしがあったHBFである。HBF中で取りこぼしがあった場合、そのフレームに含まれるを解析ですべて除外しているためである。図4.8から分かるようにspill 中で計数率が変動していた。そのため1 spill を spill start-1.5 s、1.5 s-6.5 s、6.5 s-spill end の3つの区間に分割して解析を行った。この分割をすることで1つのデータ当たりの計数率の変動が小さくなり、より正確に計数率依存性が評価できると考えた。

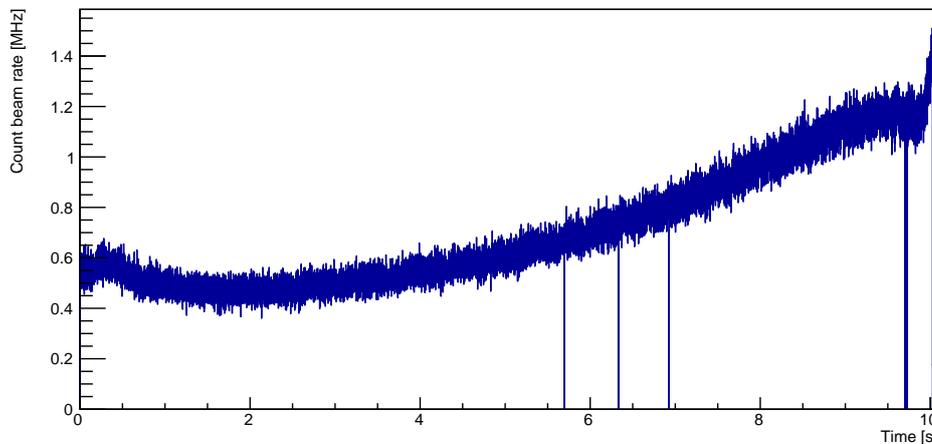


図 4.8: Spill 中のビーム計数率の変動。横軸はビームの1 spill 中の時刻である。縦軸は1つのHBF中に含まれるカウント数から見積もった count beam rate [MHz] である。

4.3.4 正確なビーム計数率の見積もり

FEEの性能の計数率依存性を評価するためにまず、ビーム計数率の見積もりを行った。その方法について示す。

NTD解析では、各検出器における全てのヒット情報を解析用ファイルに書き出す。そのため、図4.8の様にヒット情報のカウント数からビーム計数率の見積もりが可能である。しかし、カウント数を用いてビーム計数率の見積もりを行うと以下に示す2つの理由から正確では無いと考えた。

1つ目は、1つの信号に付随して2つ目の信号が検出される(ダブルパルス)による影響である。図4.9にダブルパルスの模式図を示す。ダブルパルスはある信号に付随して発生し連続で検出されるため、検出される間隔はある一定の値付近を取る。そのため、連続した2ヒットの時間差(ΔT)の分布を見ることでダブルパルスであるか判断できる。このようなダブルパルスはPETIROC2Aでデータ収集を行った際に多くに見られた。図4.10にPETIROC2Aの V_{ov} の設定がhighゲインのときの、あるチャンネルにおける ΔT の分布を示す。(a)はBFT-PETIROC2A、(b)はPFT-PETIROC2Aの組み合わせ時の ΔT 分布である。横軸は ΔT [channel]であり、縦軸はカウント数である。(a)では ΔT の値が45 channel付近、(b)では20 channelと190 channel付近にピークが見える。このピークがダブルパルスに依るものである。この様なダブルパルスの影響から、カウント数からビーム計数率を見積もると実際より多く見積もってしまうと考えた。

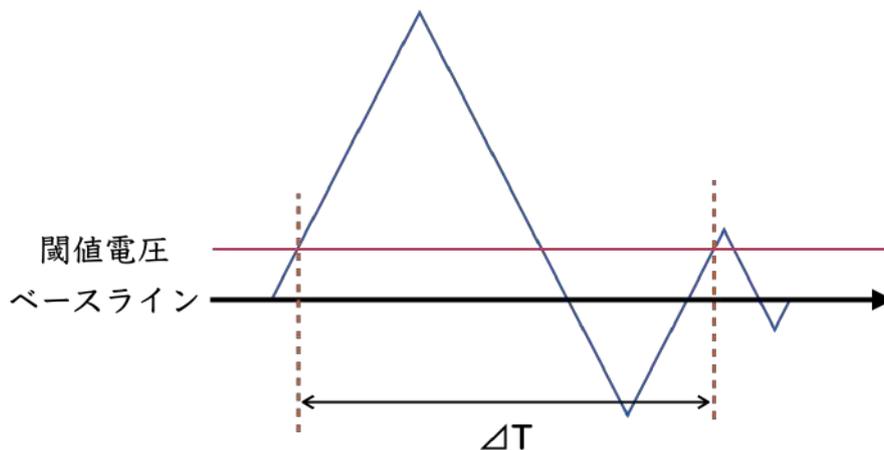


図 4.9: ダブルパルスの模式図。1つの信号に付随して発生する2つ目の信号(ダブルパルス)がある場合がある。このとき2つの信号の ΔT は、ほぼ一定の値を取る。

2つ目は、信号のパイルアップに依る数え落としの影響である。図4.11にパイルアップの模式図を示す。2つの信号がある時間間隔より短い間隔で発生すると信号のパイルアップが生じ、数え落としが生じる。数え落としが生じることでビーム計数率を少なく見積もってしまうと考えた。図4.12にBFT-CITIROC1Aの V_{ov} の設定がhighゲインの、あるチャンネルにおける ΔT の分布の例を示す。 ΔT の値が小さいところでヒットが見られない。これは信号がパイルアップすることで、数え落としが生じているためである。この様に ΔT の値が小さい範囲で、パイル

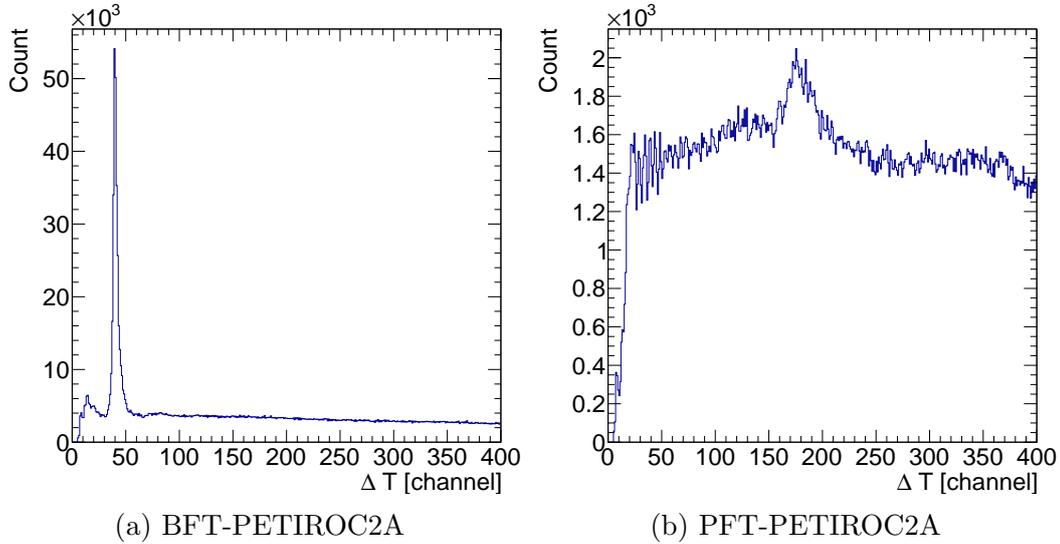


図 4.10: PETIROC2A 使用時の ΔT 分布。(a) が BFT-PETIROC2A、(b) が PFT-PETIROC2A の組み合わせである。横軸が ΔT [channel] であり、縦軸はカウント数である。

アップに依る信号の数え落としが生じていることから、信号のカウント数からビーム計数率を見積もると実際より小さい値となってしまう。

この様にダブルパルスと信号のパイルアップに依る影響で、信号のカウント数からビームレートを見積もってしまうと正確でないと考えた。そこで、 ΔT 分布に対するフィッティングを行うことで正確なビームレートの見積もりを行った。BFT-CITIROC1A の V_{ov} の設定が high ゲインのときの、あるチャンネルにおける ΔT 分布の例を図 4.13 に示す。 ΔT の分布はビーム計数率 R において式 (4.1) で表される分布に従う。

$$f = p_1 \exp(-R\Delta T) \quad (4.1)$$

ここで、 p_1 は任意のパラメータである。つまり、 ΔT 分布を式 4.1 の関数でフィッティングを行うことで、ダブルパルスや信号のパイルアップに影響されない正確なビーム計数率を見積もることが可能である。また、今回の本実験から得られた ΔT 分布は、ELPH で使用したビームのバンチ構造が周期的に見えていた。そのため、三角関数を含めた式 (4.2) で表される関数を用いてフィッティングを行った。

$$g = p_1 \exp(-R\Delta T) (1 + p_2 \sin(p_3 (\Delta T - p_4))) \quad (4.2)$$

ここで、 p_1 - p_4 は任意のパラメータである。 ΔT の値が小さい範囲ではダブルパルスのピークや信号のパイルアップが影響しているため、 $\Delta T > 250$ [channel] の範囲のみをフィッティングに使用した。図 4.13 における赤線がフィッティングの結果である。以降の解析では、ビーム計数率としてこのフィッティングから求めた R

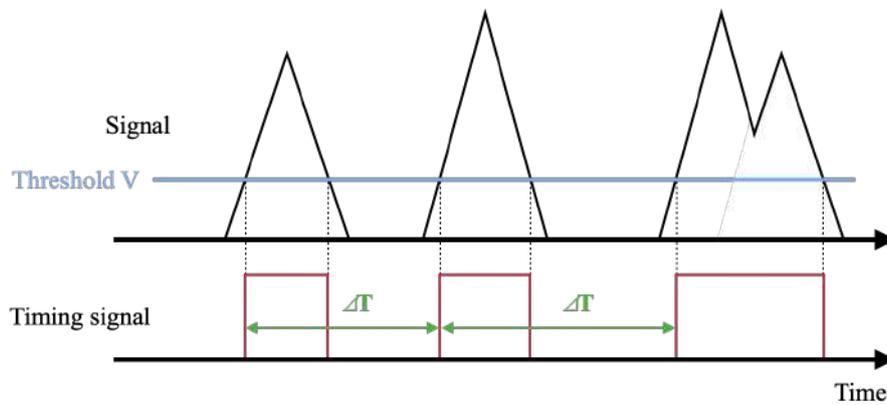


図 4.11: 信号のパイルアップによる数え落としの模式図。2つの信号がある一定の間隔以下で連続した場合、それら2つが合わさって1つの信号となる(パイルアップ)パイルアップが生じることで信号の数え落としが生じ、検出効率が低下する。

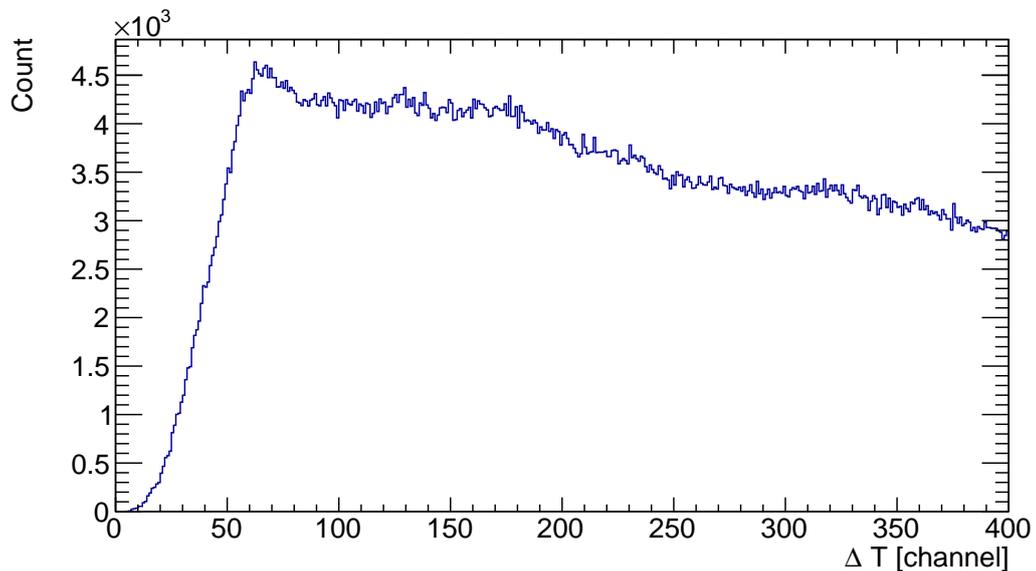


図 4.12: パイルアップに依る数え落としの例。BFT-CITIROC1A の組み合わせにおける ΔT 分布の例である。横軸は ΔT [channel] であり、縦軸はカウント数である。 $\Delta T \leq 60$ channel の範囲でカウント数が減少している。これはパイルアップに依る数え落としの影響である。

の値を使用した。

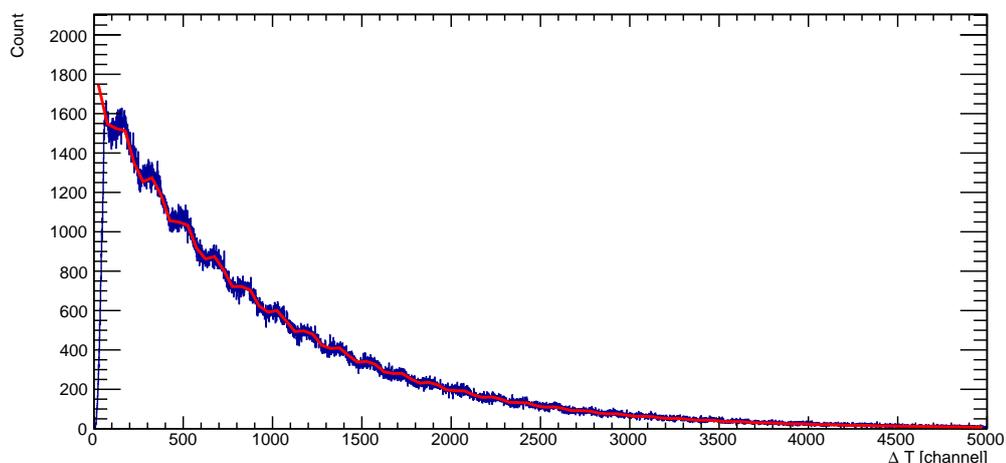


図 4.13: ΔT 分布とフィッティングによるビーム計数率の見積もり。横軸は ΔT [channel] であり、縦軸はカウント数である。赤線は式 (4.2) によるフィッティングである。

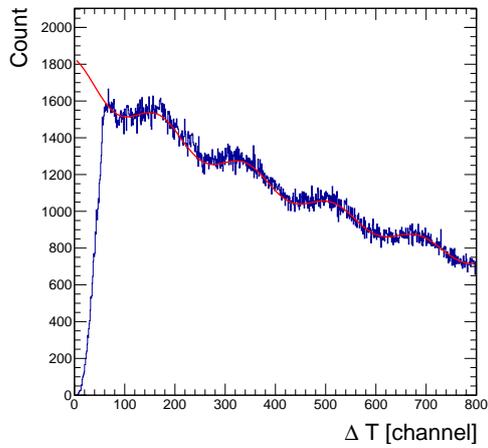
4.3.5 信号のパイルアップによる数え落とし

ΔT の分布を用いたビーム計数率の見積もりの際にも説明したが、 ΔT がある一定の値以下の範囲で信号のパイルアップに依る信号の数え落としが見られた。パイルアップに依る信号の数え落としが生じることで、検出効率が低下する。各 FT-ASIC の組み合わせに対して、パイルアップに依る信号数え落としを見積もり、その計数率依存性を評価した。図 4.14 に、各 FT の FEE の組み合わせにおけるあるチャンネルの ΔT 分布の例を示す。それぞれ V_{ov} の設定は high ゲインのものである。横軸は ΔT [channel] であり、縦軸はカウント数である。また、赤線はビームレートの見積もりを行った際のフィッティングの結果である。

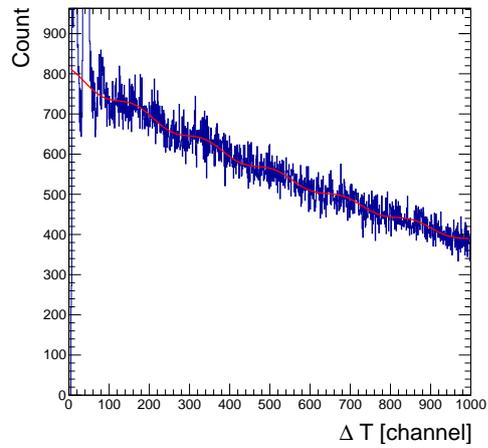
ΔT 分布からビーム計数率と見積もる際のフィッティングの結果を用いて、信号のパイルアップによる数え落としの割合を評価した。まず、パイルアップが生じている範囲 (pileup range) を図 4.14 の分布を見て設定した。表 4.3 にその範囲をまとめた。BFT-PETIROC2A の組み合わせでは、ダブルパルスの影響によりパイルアップによる数え落としを評価することが出来なかった。

図 4.14 の分布を見て設定した pileup range 内の分布を用いて、Survival ratio という値を計算した。Survival ratio は式 (4.3) のように定義した。

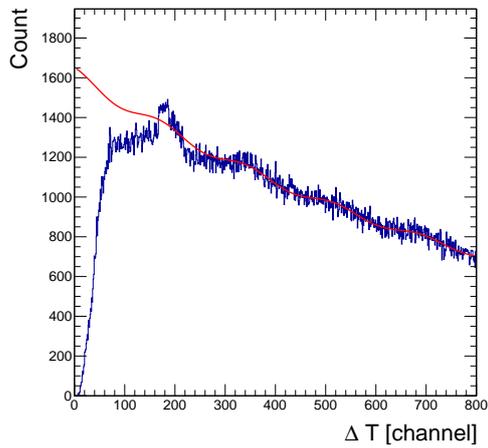
$$Survival\ ratio = 1 - \frac{S_{func} - S_{histo}}{S_{all}} \quad (4.3)$$



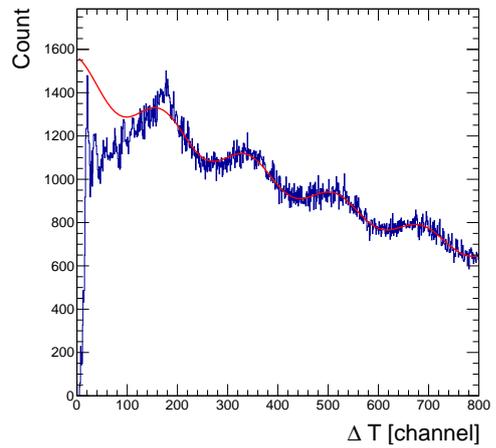
(a) BFT-CITIROC1A



(b) BFT-PETIROC2A



(c) PFT-CITIROC1A



(d) PFT-PETIROC2A

図 4.14: それぞれの FT-ASIC の組み合わせにおけるあるチャンネルの ΔT 分布の例。横軸は ΔT [channel]、縦軸はカウント数である。赤線はビーム計数率の見積もりの際のフィッティング関数である。

表 4.3: パイルアップが生じている ΔT の範囲。

Detector	ASIC	Pileup range [channel]
BFT	CITIROC1A	0-60
BFT	PETIROC2A	—
PFT	CITIROC1A	0-140
PFT	PETIROC2A	0-140

S_{func} は pileup range でのフィッティング関数の積分値である。 S_{histo} は pileup range における ΔT 分布の積分値である。つまり、 $S_{\text{func}} - S_{\text{histo}}$ がパイルアップにより数え落としが生じている数となる。 S_{all} はフィッティング関数の全範囲での積分値である。各ビーム計数率ごとに Survival ratio の値を見積もり、パイルアップによる数え落としの計数率依存性を見た。図 4.15 に survival ratio とビーム計数率の相関を示す。横軸がビーム計数率 [MHz]、縦軸が survival ratio [%] である。青点が low ゲイン、赤点が high ゲインにおけるプロットである。

ビーム計数率が高くなるとパイルアップによる数え落としが増加し、survival ratio が減少していることが分かった。そしてその様子は線形であると考えた。そこで survival ratio とビーム計数率の相関に対して線形のフィッティングを行い、チャーム・バリオン分光実験で想定されている 1 MHz/mm における信号のパイルアップに依る数え落としの割合を評価した。その結果、1 MHz/mm におけるパイルアップによる数え落とし (pileup loss) は、FT-ASIC の組み合わせそれぞれで表 4.4 のようになった。

PFT の場合には、CITIROC2A と比較して PETIROC2A の方がパイルアップによる数え落としは少ないことが分かった。これは PETIROC2A の方が信号の波形が鋭く、パイルアップが生じる割合が少ないためであると考えた。

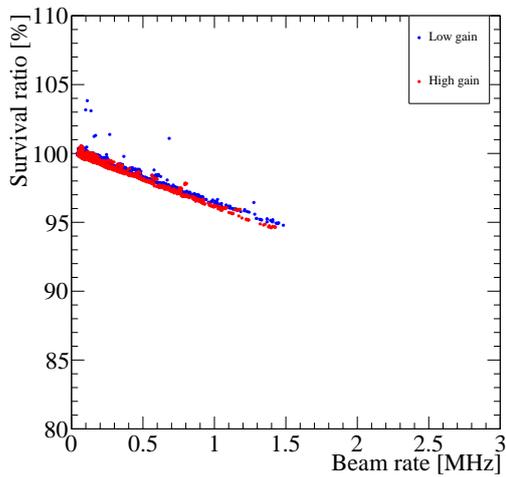
CITIROC1A では、BFT と PFT のどちらの FT に対しても low gain の方がパイルアップに依る数え落としは少ない事が分かった。これは信号の増幅率が小さいため信号幅も狭くなり、パイルアップが生じる割合が減るためである。また、BFT-CITIROC1A と PFT-CITIROC1 を比較すると、BFT-CITIROC1A の方がパイルアップに依る数え落としは少ない。この差は BFT と PFT に使用されているシンチレーション・ファイバーによる差であると考えられる。BFT では直径が 0.5 mm のシンチレーション・ファイバーを使用しており、PFT では直径 1.0 mm のシンチレーション・ファイバーを使用している。そのため、シンチレーション・ファイバーにおける発光量は BFT の方が少なく MPPC から出力される信号幅が狭くなる。その結果パイルアップが生じる割合が低くなっていると考えられる。

先行研究では、PFT-EASIROC において 1 MHz/mm におけるパイルアップに依る数え落としは、約 5%であった。PFT-CITIROC1A の結果と先行研究の結果を比較すると、ほとんど差がないことが分かった。

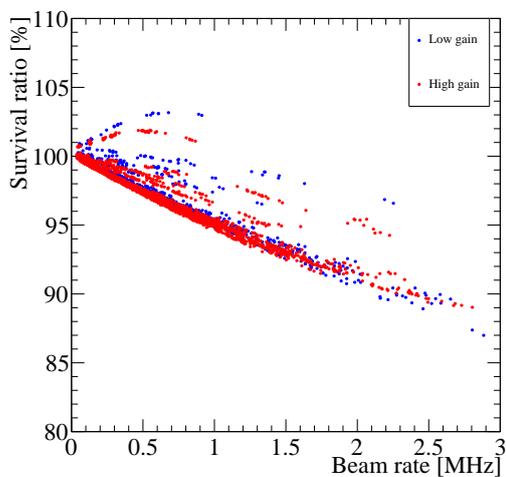
4.3.6 MPPC のゲイン変動

先行研究において高計数率環境になると MPPC のゲインが低下し、検出効率の低下が見られた。MPPC のゲイン変動は閾値電圧における信号幅 (TOT) を見ることで確認できる。MPPC のゲインが低下すると信号が小さくなるため TOT の値が減少する。本研究でも TOT の値のビーム計数率依存性調査し、MPPC ゲインの変動が生じていないか評価した。

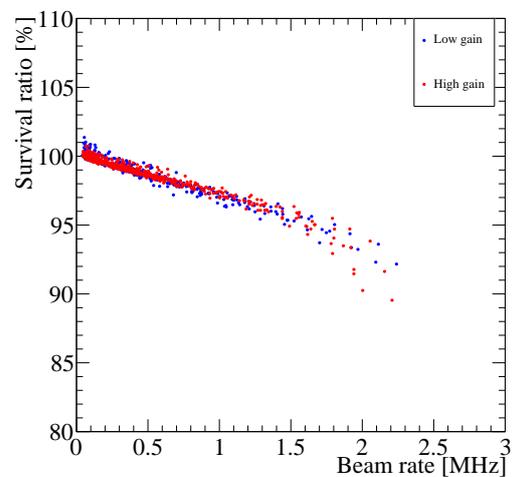
図 4.16 にそれぞれの FT-ASIC の組み合わせにおける、あるチャンネルの TOT



(a) BFT-CITIROC1A



(b) PFT-CITIROC1A



(c) PFT-PETIROC2A

図 4.15: 各 FT-ASIC の組み合わせごとの survival ratio の計数率依存。横軸はビーム計数率 [MHz] であり、縦軸は survival ratio [%] である。ビーム計数率が増加するとパイルアップの割合が増え、survival ratio が減少していることがわかる。

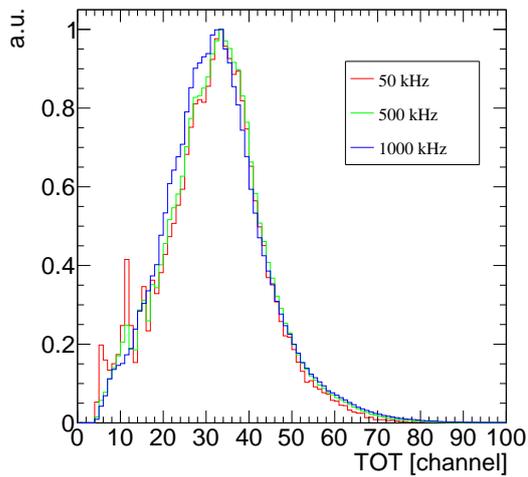
表 4.4: 1 MHz/mm のビーム計数率におけるパイルアップによる数え落としの割合。

FT	ASIC	gain	pileup loss[%]
BFT	CITIROC1A	low	3.8
BFT	CITIROC1A	high	3.9
BFT	PETIROC2A	low	–
BFT	PETIROC2A	high	–
PFT	CITIROC1A	low	4.7
PFT	CITIROC1A	high	5.1
PFT	PETIROC2A	low	3.3
PFT	PETIROC2A	high	3.0

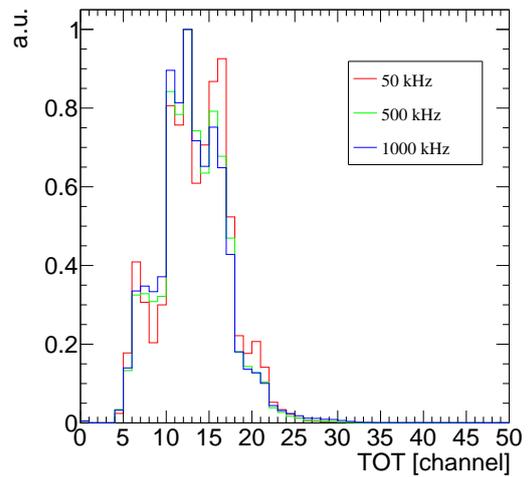
分布の例を示す。V_{ov} 設定は high ゲインのものである。それぞれ 3 種類のビーム計数率における TOT 分布を重ねて表示した。ビーム計数率は 50(赤)、500 (緑)、1000(青) kHz/mm である。横軸は TOT [channel] であり、縦軸はカウント数を分布の最大値を基準に規格化した値である。ビーム計数率に対応して TOT の値が変化している。そこで、TOT の変動を定量的に評価するため各ビーム計数率における TOT の代表値を決定し、TOT の値のビーム計数率依存性を見た。まず、TOT の代表値を決める方法を検討した。

BFT-CITIROC1A と PFT-CITIROC の組み合わせ (図 4.16(a) と (c)) においては分布の形が整っていたため、ガウス関数を用いたフィッティングを行った。フィッティングの結果からガウス関数のピークを TOT の代表値とした。PETIROC2A を使用した際の TOT 分布は分布の形がはっきりとしておらず (図 4.16(b) と (d))、フィッティングによる TOT の値の決定は厳しいと判断したため、分布の平均値を用いた。ダブルパルスの信号による TOT の値が見えたためその部分を除いた分布の平均値を使用した。ダブルパルスの信号に依る TOT の値は、 ΔT と TOT の相関から決定した。図 4.17 に PETIROC2A を使用した際の BFT と PFT のあるチャンネルにおける ΔT と TOT の相関を示す。(a) は BFT-PETIROC2A、(b) は PFT-PETIROC2A の ΔT と TOT の相関である。横軸は ΔT [channel]、縦軸は TOT [channel] である。図 4.10 から、ダブルパルスは BFT-PETIROC2A においては $\Delta T \sim 45$ [channel]、PFT-PETIROC2A においては $\Delta T \sim 20, 190$ [channel] 付近にピークが見えた。図 4.17 の相関においても、その部分に相関が見える。この相関から、ダブルパルスの信号の TOT の値は $TOT \leq 8$ [channel] の範囲にあると考えた。この結果から、PETIROC2A を使用した際は $TOT > 8$ [channel] の範囲における分布の平均値を TOT の代表値として使用した。

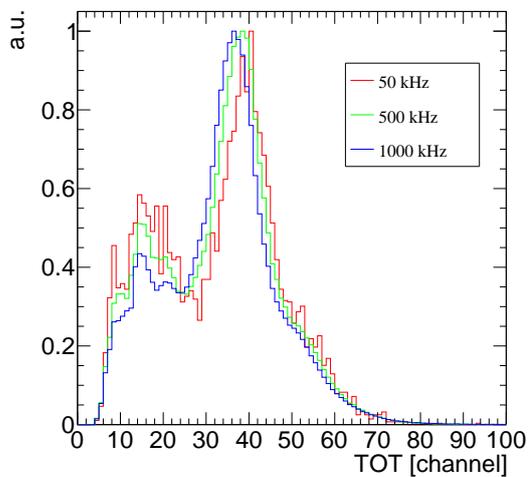
得られた TOT の代表値のビーム計数率依存を見た。図 4.18 にそれぞれの FT-



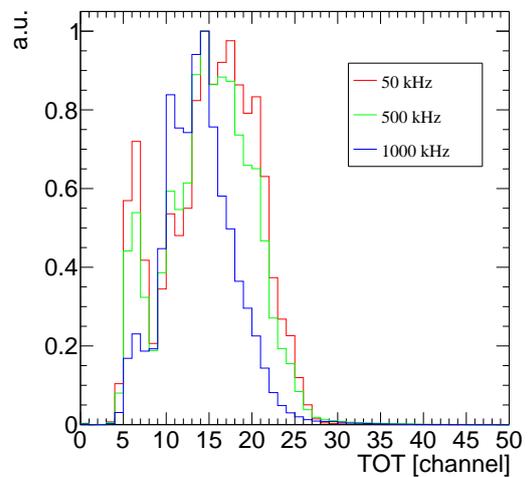
(a) BFT-CITIROC1A TOT 分布



(b) BFT-PETIROC2A TOT 分布



(c) PFT-CITIROC1A TOT 分布



(d) PFT-PETIROC2A TOT 分布

図 4.16: FT-ASIC の組み合わせごとの TOT 分布。3 種類のビーム計数率における TOT 分布を重ねてある。横軸は TOT [channel] であり、縦軸はそれぞれの分布の最大値を基準に規格化してある。低レートから順に、赤、緑、青線となっている。

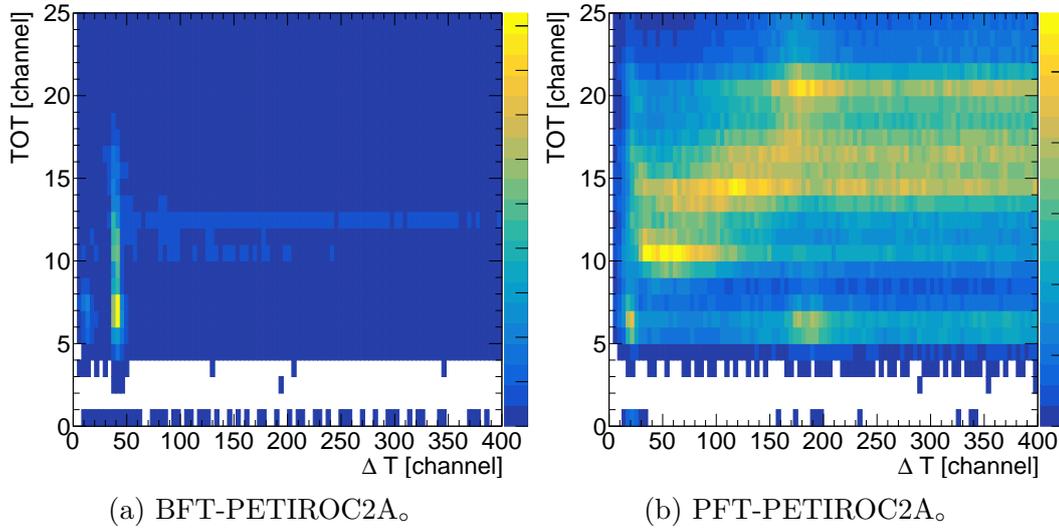
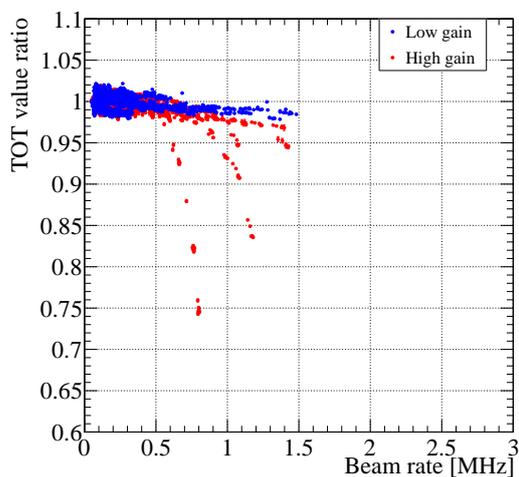


図 4.17: PETIROC2A 使用時の ΔT と TOT の相関。横軸は ΔT [channel] であり縦軸は TOT [channel] である。

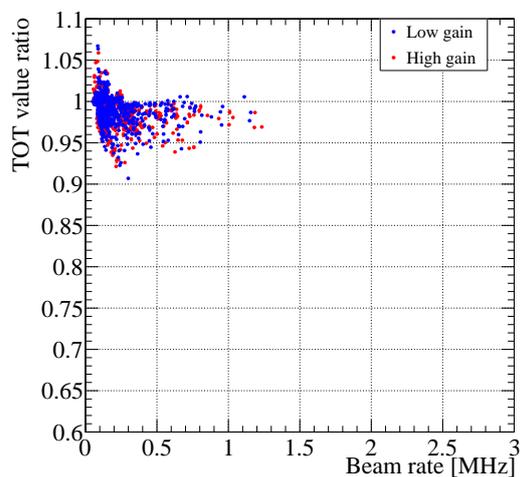
ASIC の組み合わせにおける、TOT とビーム計数率の相関を示す。グラフは BFT と PFT のそれぞれで、取得したすべてのチャンネルにおける結果をまとめてプロットした。横軸は ΔT 分布から求めたビーム計数率 [MHz] である。縦軸は各 FT のチャンネルにおいて、最低レートにおける TOT の代表値を基準として規格化した値 (TOT value ratio) である。

青点が low ゲイン、赤点が high ゲインのときのプロットである。CITIROC1A における相関 (図 4.18(a), (c)) は、全チャンネル一様な線形の変化が見える。しかし、 V_{ov} の設定が high ゲインのときの一部のチャンネルにおいて急激に TOT の値が変化していることが分かる。図 4.19 に BFT-CITIROC1A の V_{ov} の設定が high ゲインときの、大きく TOT の値が減少しているチャンネルとその隣に当たるチャンネルの TOT とビーム計数率の相関を示す。図 4.19 の (a) は、TOT の値が大きく変動しているチャンネルであり、(b) はその隣のチャンネルである。隣り合う 2 つのチャンネルであるから、ビーム計数率は近いはずである。(a) では最大ビームレート 1.4 MHz/mm であるのに対して、(b) では 0.8 MHz/mm と明らかに低く、TOT の値の変動と同時に検出効率もかなり下がっていると考えられる。

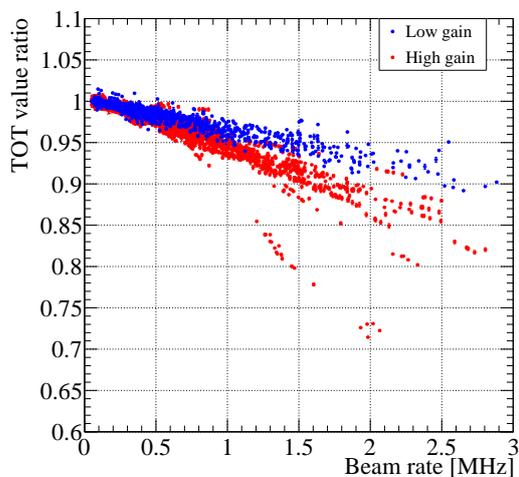
PETIROC2A を使用した際は BFT と PFT のどちらに対しても、全チャンネルに共通した統一的な変動の様子は見られなかった。



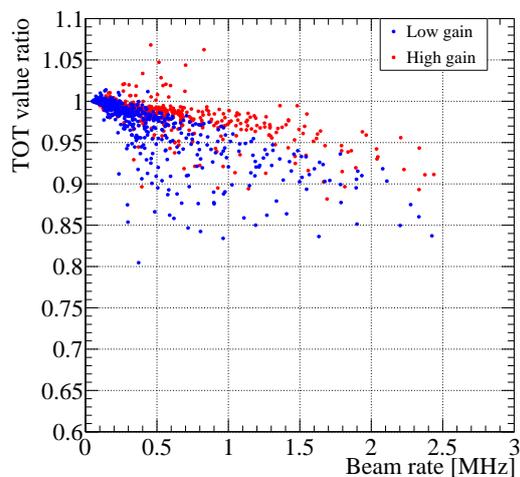
(a) BFT-CITIROC1A



(b) BFT-PETIROC2A

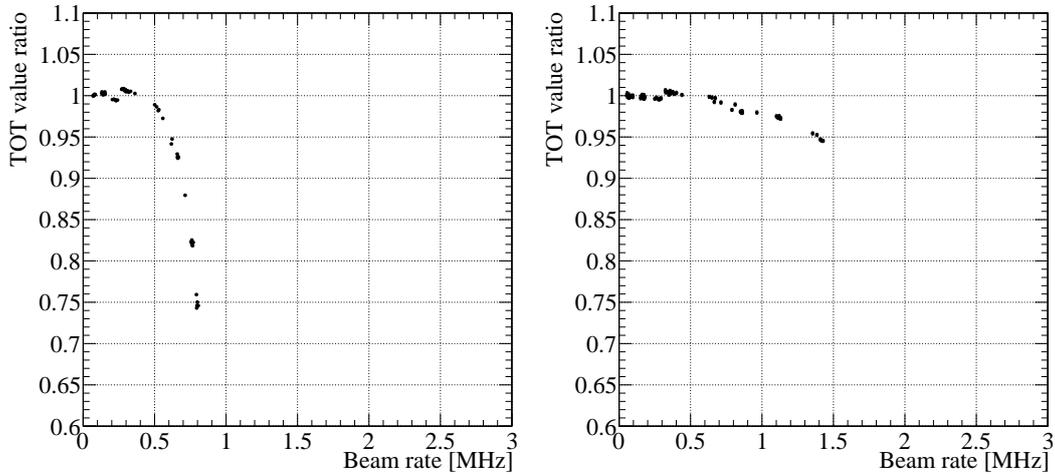


(c) PFT-CITIROC1A



(d) PFT-PETIROC2A

図 4.18: FT と ASIC の組み合わせごとの TOT とビーム計数率の相関。横軸は、ビーム計数率 [MHz] である。縦軸は、各チャンネルごとの低レートでの TOT の値を基準に規格化した TOT value ratio である。青点は low ゲイン、赤点は high ゲインである。



(a) TOT 変動が大きいチャンネル。

(b) (a) と隣り合うチャンネル。

図 4.19: BFT-CITIROC1A の high ゲインにおける TOT 変動。(a) は TOT の変動が大きいチャンネルにおける、ビーム計数率と TOT value ratio のグラフである。(b) はその隣のチャンネルにおける同様のグラフである。(a) の最大ビーム計数率は 0.8 MHz/mm であり、(b) の最大ビーム計数率は 1.4 MHz/mm である。

4.3.7 時間分解能

それぞれの FT-ASIC の組み合わせについて時間分解能のビーム計数率依存を評価した。時間分解能を評価するにあたって、TD 解析における TOF を使用した。TOF はリファレンス・カウンタ 2 とそれぞれの FT における Leading TDC の差分である。時間分解能を評価するにあたって、2 つの解析を行った。1 つ目は time walk correction であり、2 つ目は TOF の基準となっているリファレンス・カウンタの時間分解能の評価とそれをを用いた補正である。まず time walk correction について説明する。シンチレーション・ファイバーが円形である影響や物質中でのエネルギー損失は確率事象である影響などで、MPPC から出力されるシンチレーション光に対応する信号の大きさにはばらつきが生じる。図 4.20 に示すように閾値電圧を超えている時間幅 time over threshold (TOT) は信号の大きさと相関を持つ。また、粒子の飛行時間はリーディング・エッジの時間情報を用いているため、信号の大きさによってタイミングにずれが生じる (time walk)。この効果を補正することを time walk correction と呼ぶ。

time walk correction には一般的に TOT ではなく ADC の値を用いるが、今回の本実験では ADC の値を取得していないため TOT の値を用いて補正を行った。補正関数には式 (4.4) を用いた。

$$TOF = p_1 + \frac{p_2}{TOT} + \frac{p_3}{\sqrt{TOT}} + p_4 \times TOT \quad (4.4)$$

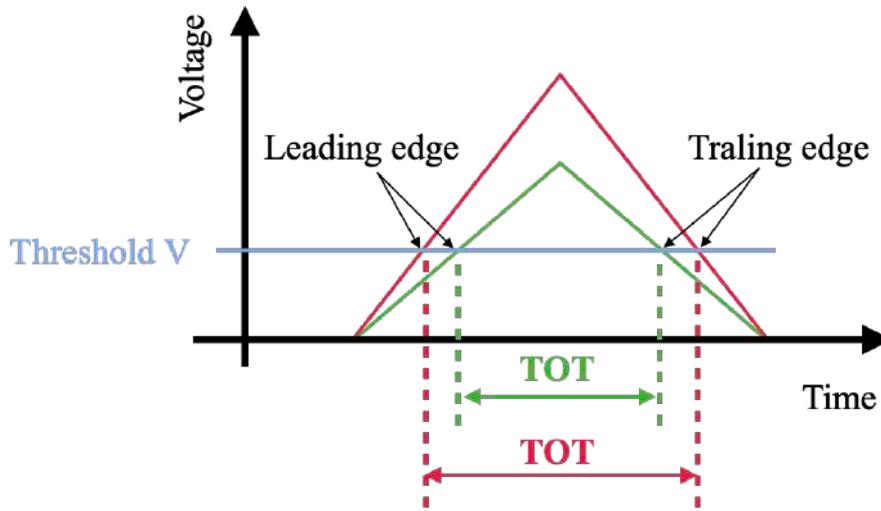


図 4.20: Time walk の模式図。縦軸に電圧値、横軸に時間を示す。信号の波高によって閾値電圧における信号幅である TOT の値が変化する。Leading edge のタイミングにも違いが生じ、TOF の値に time walk が生じる。

ここで、 p_1-p_4 は任意のパラメータであり、TOT と TOF の分布をフィッティングすることで p_1-p_4 の値を決定した。図 4.21、及び、図 4.22 は補正をする前後の TOT と TOF の相関である。図 4.21 は CITIROC1A を使用した際の TOT と TOF 相関であり、図 4.22 は PETIROC2A を使用した際の相関である。横軸が TOT [channel]、縦軸が TOF [channel] である。左側が補正前、右側が補正後の相関である。補正前の TOT と TOF の相関図には赤線で補正関数を重ねてある。PFT-CITIROC1A の組み合わせでは相関の形が他の組み合わせと異なったため、式 (4.4) だけでは補正できなかった。そのため TOT の範囲に応じて別の補正関数を用いた。式 (4.5) と式 (4.6) が PFT-CITIROC1A に対しての補正関数である。

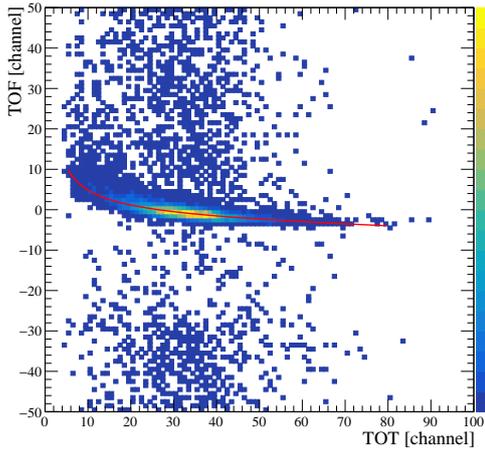
$$(TOT < p_1) \quad TOF = p_2 + p_3 \times TOT \quad (4.5)$$

$$(TOT \geq p_1) \quad TOF = p_4 + \frac{p_5}{TOT} + \frac{p_6}{\sqrt{TOT}} + p_7 \times TOT \quad (4.6)$$

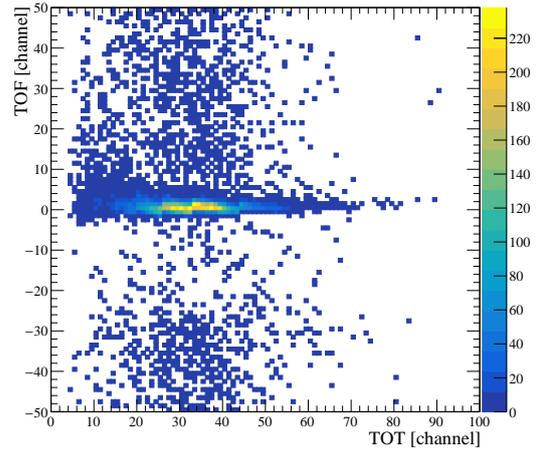
ここで p_1-p_7 はそれぞれ任意のパラメータである。TOT と p_1 の値の大小で補正関数を使い分けた。BFT と PFT の全てのチャンネルごとに 50 kHz/mm 付近となっているデータを使用し、補正関数のパラメータを決定した。

図 4.23 に補正後の TOF 分布の例を示す。それぞれの FT-ASIC の組み合わせにおける、1 MHz/mm のときの TOF 分布の例である。横軸は TOF [channel] であり、縦軸はカウント数である。この補正された TOF 分布をガウス関数でフィッティングを行った。フィッティングの結果からガウス関数の標準偏差の値を取得し、時間分解能とした。

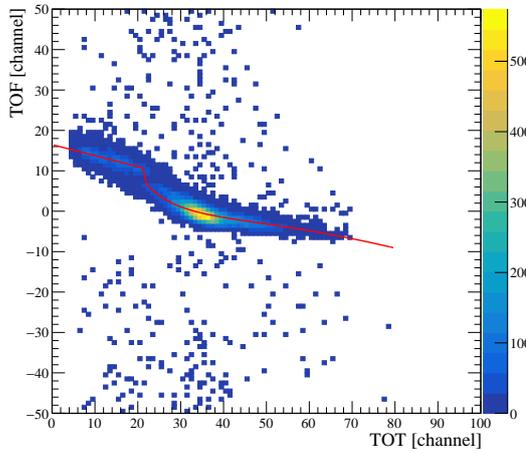
次に TOF の基準となるリファレンス・カウンターの時間分解能の評価とそれを



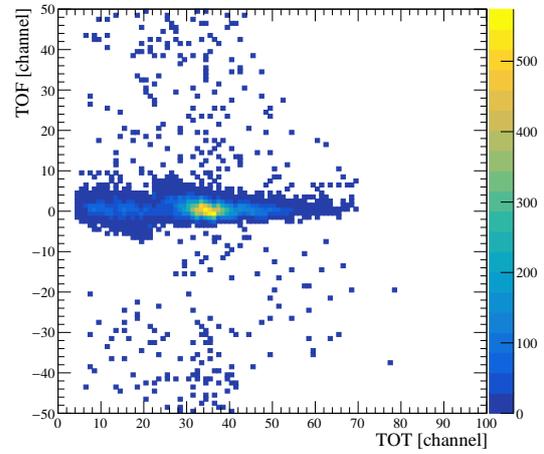
(a) BFT-CITIROC1A 補正前



(b) BFT-CITIROC1A 補正後

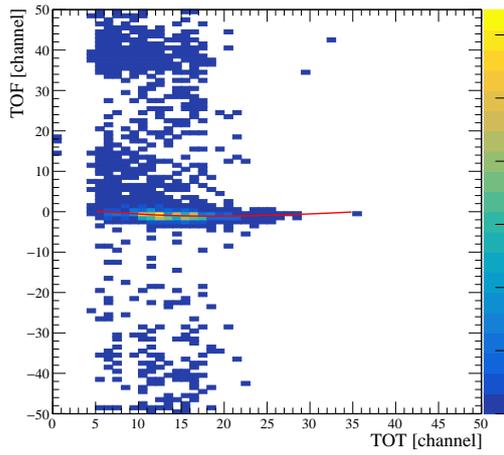


(c) PFT-CITIROC1A 補正前

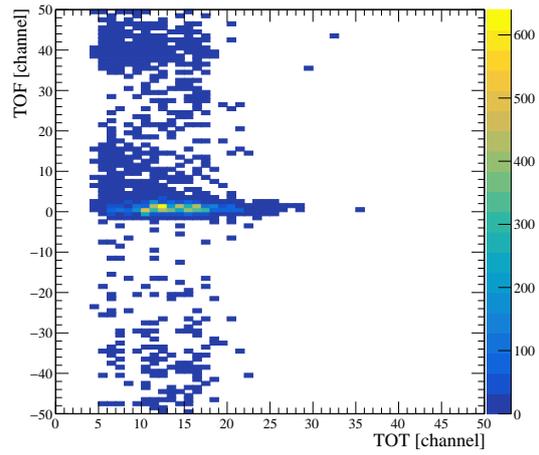


(d) PFT-CITIROC1A 補正後

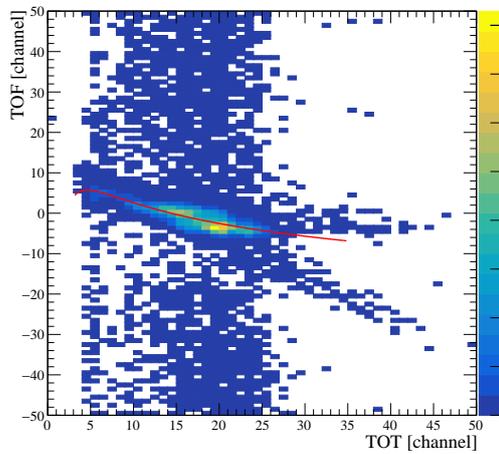
図 4.21: CITIROC1A 使用時の TOT と TOF の相関。



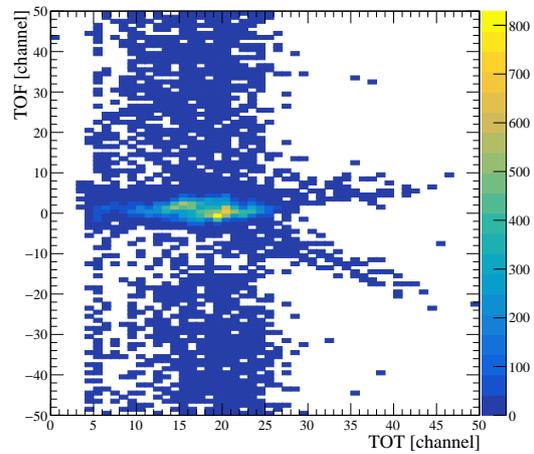
(a) BFT-PETIROC2A 補正前



(b) BFT-PETIROC2A 補正後

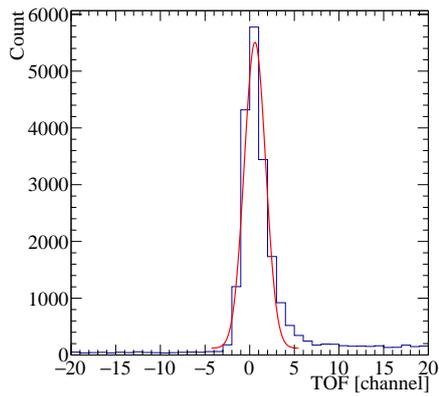


(c) PFT-PETIROC2A 補正前

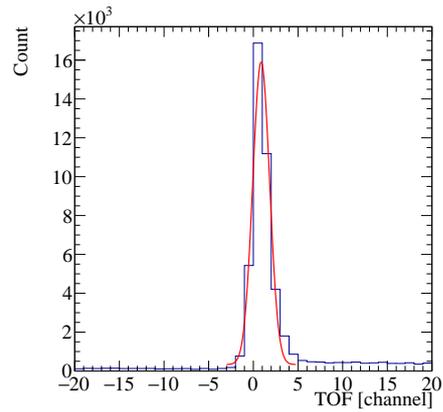


(d) PFT-PETIROC2A 補正後

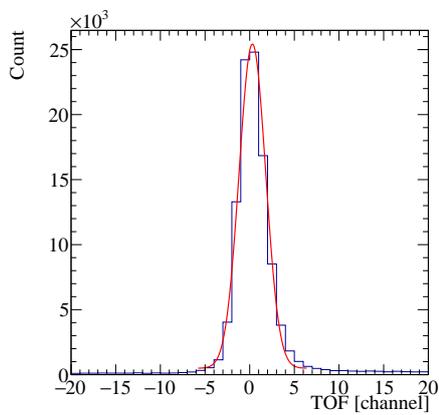
図 4.22: PETIROC2A 使用時の TOT と TOF の相関。



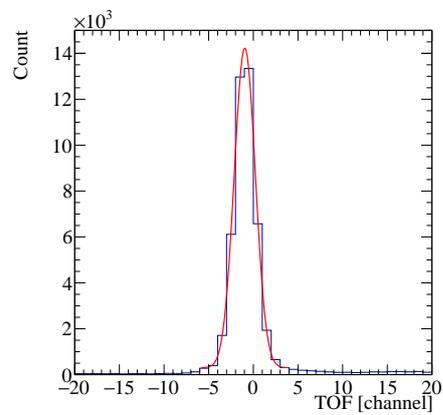
(a) BFT-CITIROC1A TOF 分布
(補正後)



(b) BFT-PETIROC2A TOF 分布
(補正後)



(c) PFT-CITIROC1A TOF 分布
(補正後)



(d) PFT-PETIROC2A TOF 分布
(補正後)

図 4.23: Time walk 補正後の TOF 分布。それぞれの ASIC-FT の組み合わせにおけるビーム計数率 1 MHz/mm のときの TOF 分布の例である。

用いた補正について説明する。各 FT までの TOF の時間分解能 ($\sigma_{TOF_{FT}}$) には、FT-ASIC の時間分解能 ($\sigma_{FT-ASIC}$) と TOF の基準としているリファレンス・カウンタ 2 の時間分解能 (σ_{R2}) が含まれる。そこで式 (4.7) より FT-ASIC 単体での時間分解能を評価する必要がある。

$$\sigma_{FT-ASIC} = \sqrt{\sigma_{TOF_{FT}}^2 - \sigma_{R2}^2} \quad (4.7)$$

式 (4.7) の計算を行うために、まずリファレンス・カウンタ 2 の時間分解能の評価を行った。リファレンス・カウンタ 2 の時間分解能の評価のためには、リファレンス・カウンタ 4 に対する TOF (TOF_{R4}) 分布から TOF_{R4} の時間分解能 ($\sigma_{TOF_{R4}}$) を調べた。リファレンス・カウンタ 2 と 4 は同じ構造の検出器であり、時間分解能も同じであると仮定できる。そのためリファレンス・カウンタ 2 の時間分解能 (σ_{R2}) は $\sigma_{TOF_{R4}}$ を用いて、式 (4.8) の様に表すことが出来る。 $\sigma_{TOF_{R4}}$ は、R4 までの TOF の分布をガウス関数でフィッティングを行うことでガウス関数の標準偏差から決定した。

$$\sigma_{R2} = \frac{\sigma_{TOF_{R4}}}{\sqrt{2}} \quad (4.8)$$

式 (4.8) から得られた σ_{R2} とビーム計数率の相関を見た。図 4.24 に BFT のあるチャンネルにおけるビーム計数率と σ_{R2} の関係を示す。横軸は BFT のあるチャンネルにおけるビーム計数率である。縦軸はリファレンス・カウンタ 2 の時間分解能 (σ_{R2}) である。ビーム計数率に対して依存性が見られたため、線形でフィッティングを行った。PFT と BFT のそれぞれのチャンネルにおいてこのプロットを作成し、線形でフィッティングを行った。それぞれのフィッティングの結果を用いて各 FT のチャンネルにおけるビーム計数率と σ_{R2} の関係を決定し、得られた関係性から $\sigma_{TOF_{FT-ASIC}}$ の値を補正した。

図 4.25 に FT-ASIC 単体の時間分解能 ($\sigma_{FT-ASIC}$) とビーム計数率依存性を示す。(a)–(d) はそれぞれの FT-ASIC の組み合わせにおける結果である。横軸はビーム計数率 [MHz] であり、縦軸は FT-ASIC の時間分解能 [ns] である。青点が V_{ov} の設定が low ゲインのときの結果であり、赤点が high ゲインのときの結果である。1 MHz/mm の環境下で BFT-CITIROC1A の low ゲインと、BFT-PETIROC2A の low, high ゲインのときに要求性能である 1 ns 以下を満たすことがわかる。BFT-CITIROC1A の low ゲインでの時間分解能は約 1 ns であり、BFT-PETIROC2A の 2 つのゲインでは約 0.7 ns であった。PETIROC2A は CITIROC1A より時間分解能が良いことが分かった。BFT-CITIROC1A の high ゲインのときは、TOT のビーム計数率依存性が大きかったチャンネルにおいて時間分解能も悪化していた。PFT を用いた際は、どちらの ASIC を用いても時間分解能は 1 ns よりも良くなることがわかった。

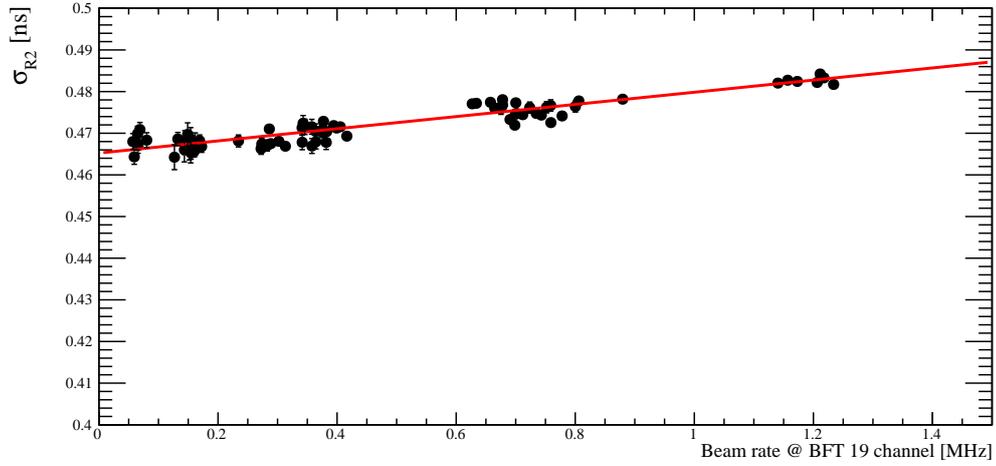


図 4.24: リファレンス・カウンターの時間分解能。横軸は FT のある 1 つのチャンネルにおけるビーム計数率であり、縦軸はその時のリファレンス・カウンター 2 の時間分解能 (σ_{R2}) [ns] である。赤線は線形のフィッティングの結果を示す。

4.3.8 検出効率

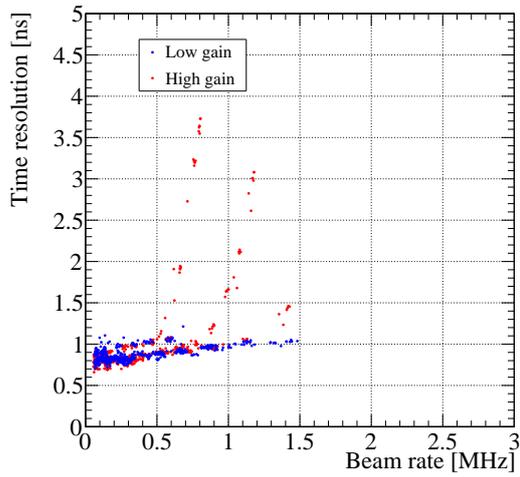
BFT について検出効率のビーム計数率依存性を調べた。その解析方法と結果について述べる。

検出効率 (Efficiency) の計算は式 (4.9) を用いた。

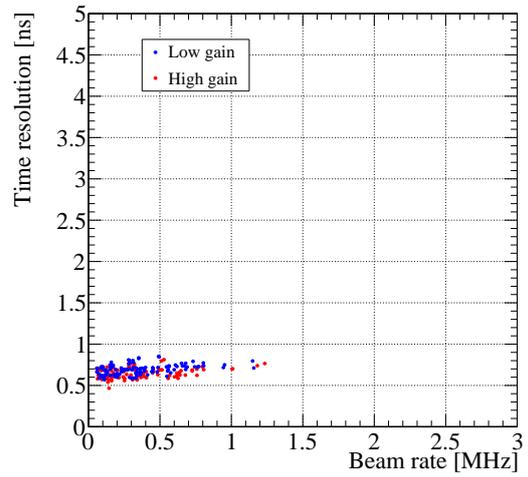
$$Efficiency = \frac{N_{FThit}}{N_{reference}} \quad (4.9)$$

このとき $N_{reference}$ リファレンス・カウンター 1, 3, 4 の全てにおいて粒子のヒットが検出されているイベント数である。 N_{FThit} は、 $N_{reference}$ のイベントの内 FT において粒子が検出されているイベント数である。それぞれの値の決定方法について述べる。まず $N_{reference}$ について述べる。リファレンス・カウンターにおける粒子のヒットの判定を行うためにそれぞれの TOF の分布をガウス関数でフィッティングを行うことで、TOF 分布のピーク値と標準偏差を決定した。決定された TOF 分布のピーク値と標準偏差の値から、リファレンス・カウンター 1, 3, 4 における TOF が全て $peak \pm 2.6\sigma$ の範囲にあるイベント数を $N_{reference}$ とした。

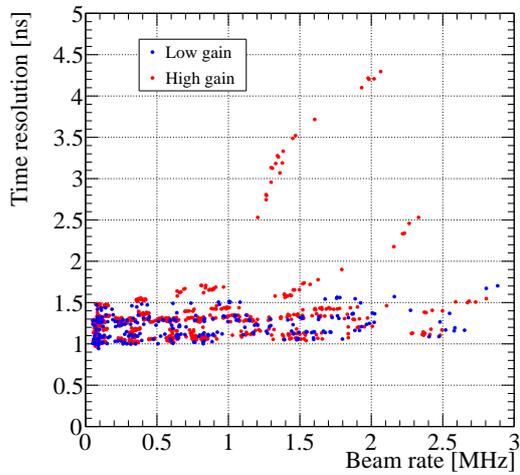
次に N_{FThit} について述べる。リファレンス・カウンターの大きさは BFT の検出面に対して小さい。そのため、リファレンス・カウンターを通過した粒子が検出される BFT のチャンネルは限られてくる。そこでまずリファレンス・カウンターに挟まれている BFT のチャンネルを考えた。図 4.26 にリファレンス・カウンターの構造とその範囲に挟まれている BFTx layer の模式図を示す。図 4.26(a) のようにリファレンス・カウンターは 6 mm 幅のプラスチックシンチレータが交差角度



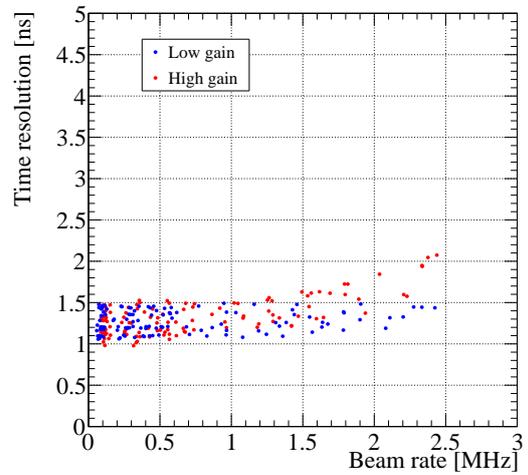
(a) BFT-CITIROC1A



(b) BFT-PETIROC2A



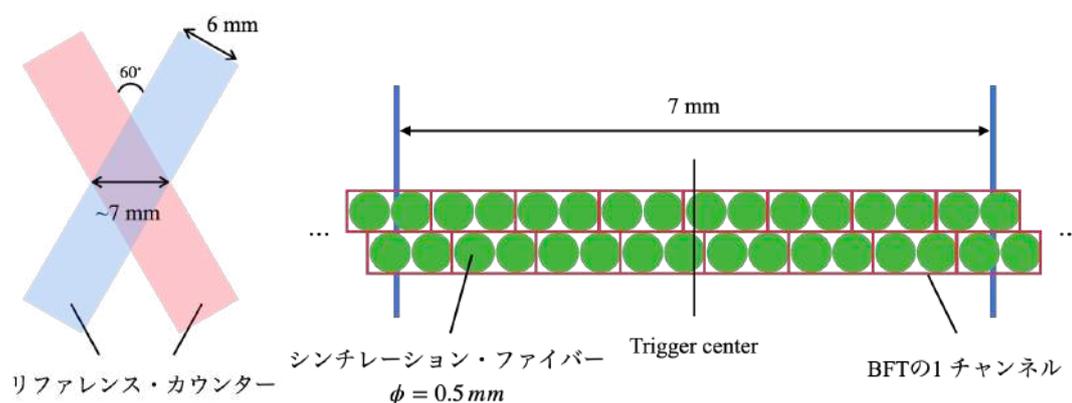
(c) PFT-CITIROC1A



(d) PFT-PETIROC2A

図 4.25: FT-ASIC の時間分解能。横軸はビーム計数率 [MHz] である。縦軸は $\sigma_{FT-ASIC}$ [ns] である。

60°で交差している。そのため x layer 方向に対するは 7 mm である。つまり、図 4.26(b) のように、BFT の x layer においてリファレンス・カウンターに挟まれるチャンネルは全部で 16 チャンネルである。この 16 チャンネルにおいてヒットがあるイベント数を N_{FThit} とした。BFT におけるヒット判定は time walk 補正後の TOF 分布を用いて行った。補正後の TOF の分布に対して時間分解能の評価の際に行ったガウス関数のフィッティングの結果から得られたピーク値と標準偏差の値を用いて、 $peak \pm 3\sigma$ に TOF の値が収まっているときをヒットと判定した。



(a) リファレンス・カウンターの構造 (b) BFT のリファレンス・カウンターに挟まれている範囲。

図 4.26: リファレンス・カウンターの構造とその範囲の模式図。(a) はリファレンス・カウンターの構造の模式図である。6 mm 幅のプラスチックシンチレータが交差角度 60°で交差している。BFT x layer の方向に対する広がり 7 mm である。(b) は BFT の x layer おけるリファレンス・カウンターの範囲である。緑丸はシンチレーション・ファイバーを表しており、赤枠が 1 チャンネルである。

式 (4.10) から efficiency ratio という値を計算しビーム計数率との依存性を調べた。低レートでの検出効率で規格化を行うことで、ASIC での検出効率の低下を調べられると考えた。

$$Efficiency\ ratio(rate) = \frac{Efficiency(rate)}{Efficiency(rate = 50kHz)} \quad (4.10)$$

図 4.27 にその結果を示す。(a) は BFT-CITIROC1A、(b) は BFT-PETIROC2A の組み合わせにおける結果である。横軸はビーム中心にあるファイバーのビーム計数率 [MHz]、縦軸は efficiency ratio である。青点が low ゲイン、赤点が high ゲインのときの結果である。この結果から CITIROC1A と PETIROC2A ではどちらも低レートと比較して 1 MHz/mm においては約 3% 検出効率が低下することが分かった。先行研究の EASIROC における約 5% の減少より改善することが分かった。

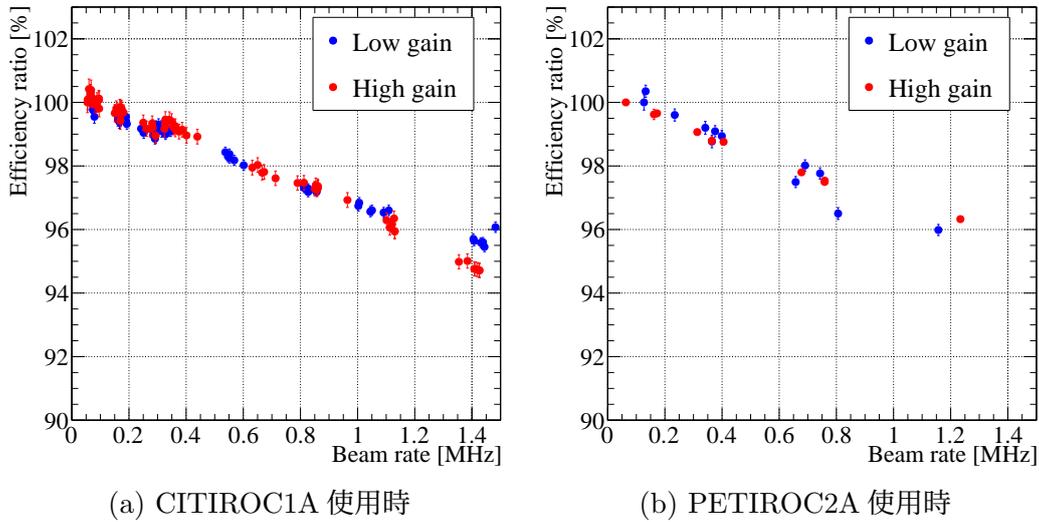


図 4.27: BFT-ASIC の efficiency ratio のビーム計数率依存性。CITIROC1A 使用時 (左図) と PETIROC2A 使用時 (右図) の efficiency ratio とビームレートの依存性である。横軸はビーム計数率 [MHz]、縦軸は efficiency ratio [%] である。青点が low ゲイン、赤点が high ゲインにおける結果である。

4.4 第4章のまとめ

本研究では、FT のデータ読み出しのための FEE に搭載する ASIC として CITIROC1A と PETIROC2A の 2 種類を使用し、東北大学電子光理学研究センターで高計数率のビーム実験を行った。その結果、時間分解能については BFT-CITIROC1A と BFT-PETIROC2A の組み合わせでチャーム・バリオン分光実験の要求性能である 1 ns を満たすことが分かった。1 MHz/mm の計数率環境下での時間分解能は CITIROC1A では low ゲインで約 1 ns であり、PETIROC2A は約 0.7 ns であった。CITIROC1A と PETIROC2A を比較すると PETIROC2A の方が良い時間分解能を示した。また、検出効率についてはビーム計数率が低レートから 1 MHz/mm に変化する中で、CITIROC1A と PETIROC2A のどちらも約 3% 減少することがわかった。

第5章 まとめ

我々は、J-PARCのハドロン実験施設内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) を計画している。E50 実験では、液体水素標的に π^- 粒子ビームを入射し、チャームバリオン (Y_c^{*+}) を $\pi^- + p \rightarrow Y_c^{*+} + D^{*-}$ の反応で生成する。同時に生成される D^{*-} は2つの π^- と1つの K^+ へと崩壊する。これら3つの粒子と入射 π^- 粒子の四元運動量を測定することによって、欠損質量法からチャーム・バリオンの質量スペクトルを再構成する。得られた質量スペクトルからダイクォーク相関の確立を目指す。

E50 実験では標的付近が高計数率環境 (30 MHz) となることが想定されており、標的付近で使用する検出器群には高レート環境下で安定に動作することが要求される。実験標的付近での粒子の飛跡検出には、シンチレーション・ファイバー飛跡検出器 (FT) を用いる。FTはシンチレーション・ファイバーと1.3 mm角のMPPCを組み合わせた飛跡検出器であり、速い応答特性が期待される。我々は3種類のFTを製作した。1つはビームラインの上流における飛跡からビーム粒子の運動量を測定する Focal plane Fiber Tracker (FFT)、2つ目は実験標的の上流で入射ビーム粒子の飛跡検出を行う Beam Fiber Tracker (BFT)、3つ目は実験標的の下流で散乱粒子の飛跡検出を行う Scattering Fiber Tracker (SFT) である。

本研究では、3種類のFTに対して宇宙線を用いた試験を行った。宇宙線試験で得られたデータからFTで検出される光量、及び、検出効率を評価した。その結果、検出される光量はチャーム・バリオン分光実験で予定されている3.5 p.e.の閾値に対して、十分な発光量があることが分かった。検出効率についてはFFTで約99%、BFTでは約96%であることが分かった。これは特定のチャンネルにおいて構造上の負荷等によって検出効率が低下していることが原因である可能性があると考えた。

また、本研究ではFTのデータ収集に用いるASIC搭載モジュール (Front-End Electronics : FEE) の高計数率環境での性能評価を行うため、東北大学の電子光物理学研究センター (ELPH) でビーム実験を行った。FEEにはCITIROC1AとPETIROC2Aの2種類のASICを搭載したものを使用した。その結果、TOTの変動はCITIROC1Aでは全チャンネルで共通する変動が見られた。一方PETIROC2Aはチャンネルごとのばらつきが大きく、統一的な変動は見られなかった。時間分解能はBFTにおいてはCITIROC1AとPETIROC2Aのどちらもチャーム・バリオン分光実験における要求性能である1 nsを満たすことが分かった。ビーム計数率が1 MHz/mmのときBFT-CITIROC1Aの時間分解能は約1 nsであり、BFT-

PETIROC2A では約 0.7 ns となり、PETIROC2A の方が時間分解能は良いと分かった。検出効率はこちらの ASIC においても 1MHz/mm では低レートと比較して 3% 減少することが分かった。そして先行研究の EASIROC における約 5% の減少より改善することが分かった。

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とを心から感謝致します。

指導教官である阪口篤志 教授には研究における物の考え方を大変指導して頂きました。先生のもとで勉強させて頂き、とても良い経験となりました。心から感謝致します。

RCNPの白鳥昂太郎 助教には研究生活において様々な場面で面倒を見て頂きました。また、様々な実験に参加する機会も与えて頂き、大変良い経験をさせて頂きました。ありがとうございました。

KEKの本多良太郎 准教授にはELPHでの実験から大変お世話になりました。遠隔ながら時間を作って熱心に指導して頂き、とても勉強になりました。ありがとうございました。

RCNPの野海博之 教授には出張中に特にお世話になりました。野海教授のおかげで出張がとても有意義で楽しいものになりました。ありがとうございました。

テスト実験行うにあたっては東北大学電子光理学研究センターのスタッフの皆様に大変お世話になりました。中でも石川貴嗣 助教にはE50 コラボレーションのミーティングなどでも度々お世話になりました。ありがとうございました。

東北大学の三輪浩司 准教授にはVME-EASIROCの使用にあたって大変お世話になりました。おかげさまで無事データを取り切ることが出来ました。ありがとうございました。

研究室の川畑貴裕 教授には日頃の研究室での生活において大変お世話になりました。修士の2年間研究室のイベントは少なかったですが、普通の何気ない生活をとても楽しいものにして頂きました。ありがとうございました。

研究室の同期の皆さんにも大変感謝しています。たくさんの同期がいることで研究生活はとても楽しいものになりました。

中でも辰巳凌平君は学部一年から常に隣にいて、研究室もグループも一緒と気持ち悪いくらい一緒にいました。辰巳君のおかげで大学生活をより一層楽しめました。ありがとうございました。

後輩の徳田恵君と戸田匡哉君にも大変お世話になりました。二人と一緒にグループで大変楽しかったです。ありがとうございました。

研究室の皆様にも大変お世話になりました。大所帯の研究室故に書き出すとすごい長文の謝辞になってしまうので割愛させて下さい。皆様のおかげでとても有意義に研究生活を過ごせました。川畑研に入って良かったです。ありがとうございました。

いました。

これまで関わりのあった全ての方々のおかげで研究生活を楽しむことが出来ました。皆様本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] H. Noumi et al., Charmed Baryon Spectroscopy via the (π, D^{*-}) reaction, KEK/J-PARC - PAC, 2012-19.
- [2] R. Honda et al., Continuous timing measurement using a data-streaming DAQ system, Prog.Theor.EXP.Phys.2021, 123H01.
- [3] NIM-EASIROC module. (available at:<http://openit.kek.jp/project/MPPC-Readout-Module/public>)[in Japanese]
- [4] VME-EASIROC module. http://openit.kek.jp/project/vme_easiroc/public/vme_easiroc-public[in Japanese]
- [5] Xilinx Inc. (available at:<https://japan.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/kintex-7.html>)
- [6] E. Hirose et al., Installation of a giant spectrometer magnet with a weight of 300 tons at J-PARC hadron experimental facility, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2017.
- [7] T.N. Takahashi et al., Development of Prototype for the Streaming Data Acquisition System of the Charmed Baryon Spectroscopy at J-PARC.
- [8] Hadron Universal Logic Module. (available at<http://openit.kek.jp/project/HUL/HUL>)[in Japanese]
- [9] T.N. Takahashi et al., Development of a FPGA-based high resolution TDC using Xilinx Spartan-6, RCNP annual report 2016.
- [10] 東北大学電子光理学研究センター (ELPH). (available at:<https://www.lns.tohoku.ac.jp>)
- [11] 赤石 貴也, チャーム・バリオン分光実験用ビームタイミング検出器の開発, 修士論文, 大阪大学大学院理学研究科物理学専攻, 2019.
- [12] 荒巻 昂, $\pi^- p \rightarrow K^{*0} \Lambda$ 反応を用いた Λp 散乱実験におけるシンチレーション・ファイバー飛跡検出器および読み出しシステムの研究, 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2020.

- [13] 岡 真, ハドロン物理の目指すもの. (available at:http://www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/sansha/2011/lecture_files/OKA=intro-hadron-physics.pdf)
- [14] 熊野 俊三, KEK 物理学シリーズ 2 原子核物理学.
- [15] OMEGA/IN2P3/Weeroc, (available at:<https://www.weeroc.com>)
- [16] 石川 勇二, ハイパー核 γ 線分光実験のための核種同定検出器の研究, 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2018.
- [17] kuraray 社, プラスチックシンチレーション・ファイバーカタログ. (available at:https://www.kuraray.co.jp/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf)
- [18] 浜松ホトニクス社. (available at:<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/>)
- [19] T. Aramaki et al., ELPH annual report 2018, Tohoku University, 44 (2019).