

修士論文

RARiS における Λ_n 相互作用測定実験のための
新飛行時間測定器の開発と性能評価

Development and performance evaluation of
a new time-of-flight detector for the Λ_n
interaction measurement at RARiS

遠山 翔太

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻
原子核物理研究室

2025

RARiS における Λn 相互作用測定実験のための 新飛行時間測定器の開発と性能評価

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 原子核物理研究室
遠山 翔太

我々は、陽子と中性子との間にはたらく核力を拡張し、ストレンジクォークを含んだバリオンであるハイペロンを含めたバリオン間力を研究することで、原子核の構成に寄与する力をより深く理解しようとしている。

核力については、核子どうしを散乱させる NN 散乱実験を通して、高精度な研究が行われてきたが、ハイペロンと核子の相互作用 (YN 相互作用) は十分に理解が進んでいない。これは、ハイペロンの寿命が 10^{-10} s 程度と非常に短いことにより、YN 散乱を直接測定することが非常に困難だからである。散乱実験以外の手法として、ハイペロンを含んだ原子核であるハイパー核を生成し、その束縛エネルギー等を測定することで、間接的にバリオン間力を研究する方法も取られているが、相互作用の詳細な構造に直接感度をもつ散乱実験によって得られるデータは重要である。

そこで我々は、ハイペロンが生み出された直後に核子と反応させるために、 $\gamma + d \rightarrow K^+ + \Lambda + n$ 反応の終状態相互作用を測定する実験 (NKS2 実験) を東北大学先端量子ビーム科学研究センター (RARiS) にて計画している。

この実験では、 K^+ および Λ 粒子の崩壊によって生じる陽子と π^+ を識別可能であることが重要だが、現在設置されている、標的からの距離 1200 mm、固有時間分解能 $\sigma \sim 200$ ps の測定器では困難であった。先行研究では、測定器の位置をそのままとした場合、固有時間分解能を $\sigma \sim 125$ ps にすることで、 $\pi/K/p$ それぞれの 3σ の領域に他の粒子が混入する確率を 5% 以下にできることが確かめられた。本研究では、この固有時間分解能を達成する新たな飛行時間測定器を開発することを目標とした。

我々は、プラスチックシンチレータおよび SiPM を使用した試作器 (図 1) を複数製作し、宇宙線および陽電子ビームを用いて性能評価を行った。図 2 は陽電子ビームを用いた実験セットアップを示しており、ビーム軸に対して垂直な面上で検出器を任意に移動させることでビーム照射位置依存性を測定した。その結果として、最も位置依存性が小さく、時間分解能が良いものとして $\sigma = 110.2 \pm 2.2$ ps 以上 $\sigma = 140.6 \pm 0.8$ ps 以下の検出器が得られた。この検出器を用いた場合、標的から 2050 mm の場所に並べることで、 $\pi/K/p$ を 3σ で分離可能であることが確認された。

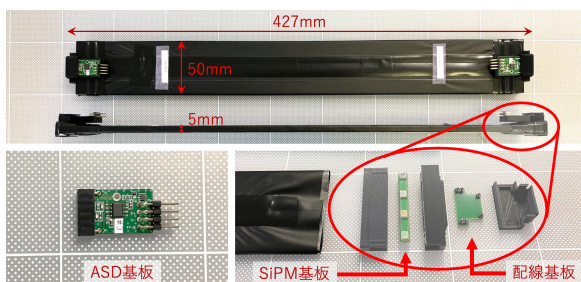


図 1: 新飛行時間測定器のシンチレータとその周辺機器

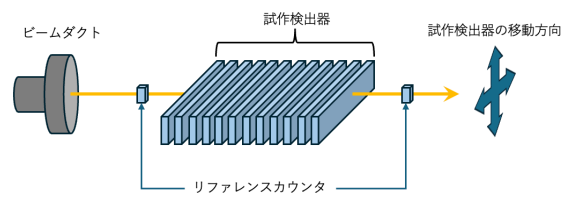


図 2: ビームを用いた実験のセットアップ

目次

第 1 章	序論	1
1.1	ハイペロン	1
1.2	ハイペロン生成手法	2
1.3	ハドロン間力の測定実験	4
1.4	NKS2 実験	5
第 2 章	新飛行時間測定器の設計	8
2.1	開発の動機	8
2.2	新飛行時間測定器の構成	8
第 3 章	宇宙線を使用したテスト	20
3.1	実験概要	20
3.2	解析手法	20
3.3	セットアップ A	24
3.4	セットアップ B	26
3.5	結果と考察	29
第 4 章	陽電子ビームラインでのテスト	32
4.1	目的	32
4.2	実験セットアップ	32
4.3	解析手法	36
4.4	結果と考察	36
第 5 章	新飛行時間測定器の配置の検討	52
5.1	配置の検討手法	52
5.2	計算と結果	55
第 6 章	本研究のまとめ	60

参考文献

61

目次

1.1	標準模型の素粒子一覧	1
1.2	クォークレベルでの反応図	3
1.3	各ハイパー核生成反応の運動量依存性 [2]	4
1.4	$\gamma + d \rightarrow K^+ + \Lambda + n$ 反応の模式図	5
1.5	BST リングおよび光子標的化装置、NKS2 スペクトロメータの位置関係	6
1.6	NKS2 を俯瞰した概念図	7
2.1	過去の実験で得られた質量二乗分布のヒストグラム	9
2.2	OH の概念図	10
2.3	フォトダイオードの動作原理の概念図	10
2.4	アバランシェフォトダイオードの動作原理の概念図	11
2.5	SPAD と MPPC の構造	11
2.6	S13360-3050PE の画像	13
2.7	プラスチックシンチレータの端面	13
2.8	MPPC の配置	14
2.9	ASD 基盤	14
2.10	ASD の回路図	15
2.11	LTSpice を用いた、増幅器系の出力部分での波形のシミュレーション (#1 から #4)	16
2.12	#1 増幅器系の出力部分をオシロスコープで観測し、シミュレーションと重ねたもの	16
2.13	LTSpice を用いた、増幅器系の出力部分での波形のシミュレーション (#5 から #7)	17
2.14	LTSpice で設定した MPPC から増幅器系へ伝わるシグナル	17
2.15	#5 増幅器系の出力部分をオシロスコープで観測し、シミュレーションと重ねたもの	18

2.16	#3の増幅器系の出力部分をオシロスコープで観測したもの。発振している。	19
3.1	検出器を粒子が通過する様子の概念図	21
3.2	time walk の概念図	23
3.3	slewing correction の例	24
3.4	セットアップ A の案 1	25
3.5	セットアップ A の案 2	25
3.6	セットアップ A の案 3	26
3.7	setupA のデータ収集系の概念図	27
3.8	セットアップ B の実際の画像	27
3.9	セットアップ B の概略図	28
3.10	setupB のデータ収集系の概念図	28
3.11	セットアップ A の時間分解能測定結果	29
3.12	セットアップ B の時間分解能測定結果	29
3.13	OHB と OHS の光路差	30
4.1	RARiS 三神峯事業所のビームライン	33
4.2	ビームを用いた実験のセットアップ	34
4.3	リファレンスカウンタの設置の様子	34
4.4	ビームの照射位置調整のための機構	35
4.5	ビーム照射点	35
4.6	データ収集系の概念図	36
4.7	0.2V の場合の各照射点での時間分解能 (1/2)	37
4.8	0.2V の場合の各照射点での時間分解能 (2/2)	38
4.9	各検出器の時間分解能の最大値から最小値までの分布	39
4.10	0.2V の場合の各照射点での検出効率 (1/2)	40
4.11	0.2V の場合の各照射点での検出効率 (2/2)	41
4.12	OHS と #5 の検出効率を抜粋したもの	42
4.13	各検出器の検出効率の最大値から最小値までの分布	43
4.14	0.2V の場合と 0.15V の場合の比較 (1/3)	45
4.15	0.2V の場合と 0.15V の場合の比較 (2/3)	46
4.16	0.2V の場合と 0.15V の場合の比較 (3/3)	47
4.17	0.15V、0.2V の各場合の時間分解能の比較	48
4.18	0.15V、0.2V の各場合の検出効率の比較	48

4.19	ASD 固定し、OH 本体を取り替えた場合の時間分解能および検出効率	50
4.20	ASD または OH を固定した時の時間分解能の散布図およびレンジチャート	51
5.1	π 、 K 、 p の運動量と運動量分解能の関係	54
5.2	$\gamma + d \rightarrow K^+ + \Lambda + n$ 反応に対する、 K^+ の運動量および角度の相関	56
5.3	$\pi/K/p$ を 3σ で分離する検出器の設置位置	57
5.4	標的からの距離と K^+ の到達確率	58

表目次

2.1	S13360-3050PE の仕様	12
2.2	回路定数の一覧	15
4.1	各検出器の時間分解能の最大最小	39
4.2	各検出器の検出効率の最大最小	43
5.1	標的からの IH、ドリフトチェンバーの終端、OH までの K^+ の到達確率	59

第1章

序論

1.1 ハイペロン

我々の世界を形成している物質の最小単位は素粒子であり、それらは図 1.1 に示すように強い相互作用を受ける素粒子 (クォーク) と強い相互作用を受けない素粒子 (レプトン)、力を媒介するゲージ粒子などで構成される。

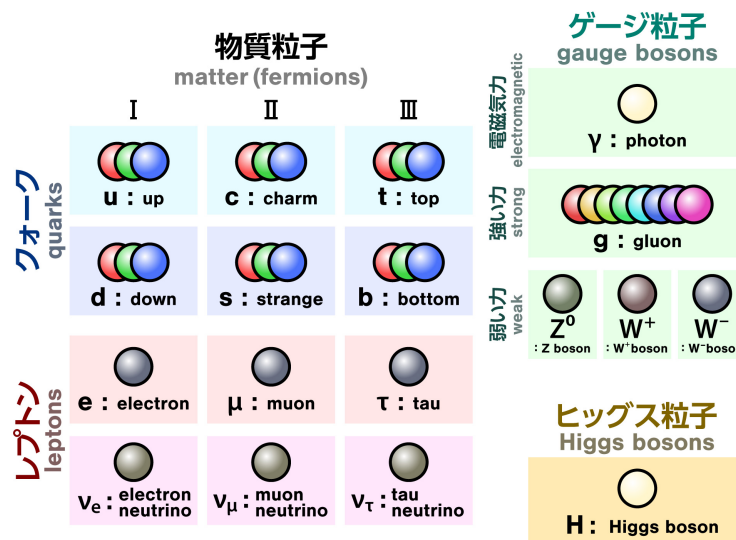


図 1.1: 標準模型の素粒子一覧 [1]

クォークは世代が I、II、III と上っていくにつれ、質量が大きくなる。そのため、身の周りにある物質には u 、 d (アップクォーク、ダウンクォーク) が使われており、高エネルギー下でなければ、II、III 世代のクォークは出現しない。

クォーク間に働く力はその距離が離れるほど強くなる性質を持っているため、クォークは単体では取り出せず、複数個のクォークが結合した状態になる。複数個

のクォークで構成されている粒子をハドロンと呼ぶ。ハドロンには主に、クォーク3つからなるものとクォーク2つからなるものがあり、前者をバリオン、後者をメソンと呼ぶ。バリオンの代表例として、陽子はアップクォーク2つとダウルクォーク1つ、中性子はアップクォーク1つとダウルクォーク2つで構成されている。また、メソンの代表例としては、アップクォークと反ダウルクォークからなる π^+ 中間子が挙げられる。

現在の原子核物理が解明すべき課題の一つに核力の理解がある。核力とは陽子や中性子と言った核子の間に働く力で、原子核を構成するために不可欠な力である。核力には、短距離 (< 1 fm) で反発し合う斥力芯があること、陽子・中性子を入れ替えても性質が変わらないこと (荷電対称性) などの特徴がある。これらの特徴は、核力のこういった性質から起きるものかは十分に理解されていない。そこで、アップクォークとダウルクォークからなる核子だけでなく、ストレンジクォーク (s) を含んだバリオンにまで研究対象を広げて、核力をバリオン間力として調べ、バリオン間力から核力の性質を解明することが原子核物理の目的の一つである。

ストレンジクォークを含んだバリオンのことを総称してハイペロンと呼び、その中でも、アップクォークとダウルクォークとストレンジクォークを1つずつ含んだハイペロンを、 Λ 粒子と呼んでいる。

1.2 ハイペロン生成手法

最も軽いハイペロンである Λ 粒子の生成反応としては、 (K^-, π^-) 、 (π^+, K^+) 、 (e, eK^+) 反応がある。本節では以上の反応に加えて、我々が NKS2 実験で利用する (γ, K^+) 反応も含めて、これらの反応の特徴をここでは述べる。

1.2.1 (K^-, π^-) 反応

標的原子核中の中性子に対し、 K^- 中間子を入射し、 Λ 粒子を得る反応である。入射するビームである K^- 中間子に予めストレンジクォークが含まれているので、これを中性子のダウルクォークと交換することによって標的核に含まれる中性子を Λ 粒子へ変換する (図 1.2)。この反応は吸熱反応であることから、ビーム粒子である K^- 中間子の運動量が 0 の場合にも反応を起こすことができる (図 1.3)。 K^- ビームは、陽子などの 1 次ビームを金標的や白金標的に照射し、標的と 1 次ビームとの反応から生成された K^- を取り出して集めることで 2 次ビームとして用いる。

1.2.2 (π^+ , K^+) 反応

標的原子核中の中性子に対し、 π^+ 中間子を入射しストレンジクォークと反ストレンジクォークの対生成によって、標的核に含まれる中性子を Λ 粒子へ変換する反応である (図 1.2)。この反応は発熱反応であることから、 π 中間子の運動量として $\sim 900 \text{ MeV}/c$ の反応閾値が存在する (図 1.3)。 Λ 粒子への運動量移行が大きいことから、反応前の中性子とは異なる軌道角運動量状態を取る確率が大きくなる。このことから、角運動量状態を大きく変化させて、原子核に深く束縛されるような状態を取ることも可能である。

1.2.3 (e , eK^+) 反応

電子ビームを標的原子核に照射し、標的核中の陽子と散乱する際の仮想光子によりストレンジクォークと反ストレンジクォークが対生成され、その結果としてハイペロンを生じる反応である (図 1.2)。この反応は電磁相互作用によって媒介されるため、強い相互作用に比べて理論的理解が進んでいるという利点を持っている。さらに、1次電子ビームをそのまま利用できることから、2次ビームを利用する (K^-, π^-) 反応、(π^+ , K^+) 反応よりもビームレートを高くすることが可能であり、その分だけ小さい標的でも収量を確保できるため、標的内でのエネルギー損失による分解能の悪化を軽減することができる。また、光子はスピン 1 を持っているため、反応前の核子と反応後のハイペロンのスピンの向きが反転する spin-flip 状態を作り出すことができる。

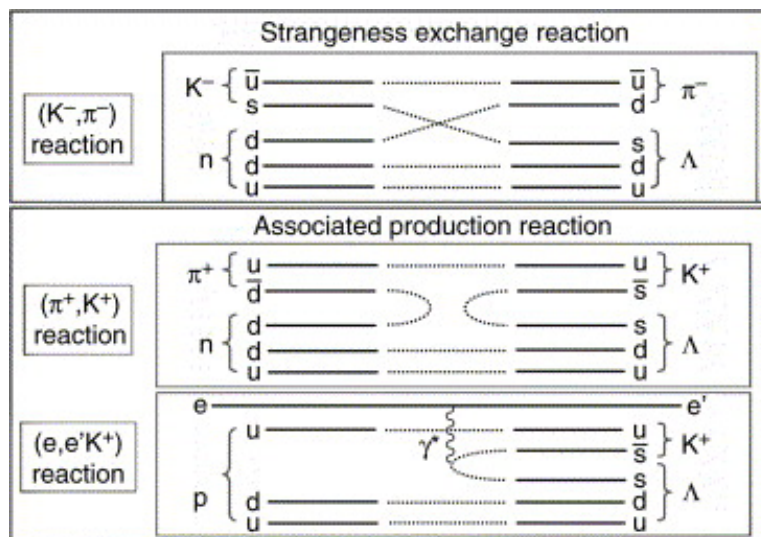


図 1.2: クォークレベルでの反応図 [2]

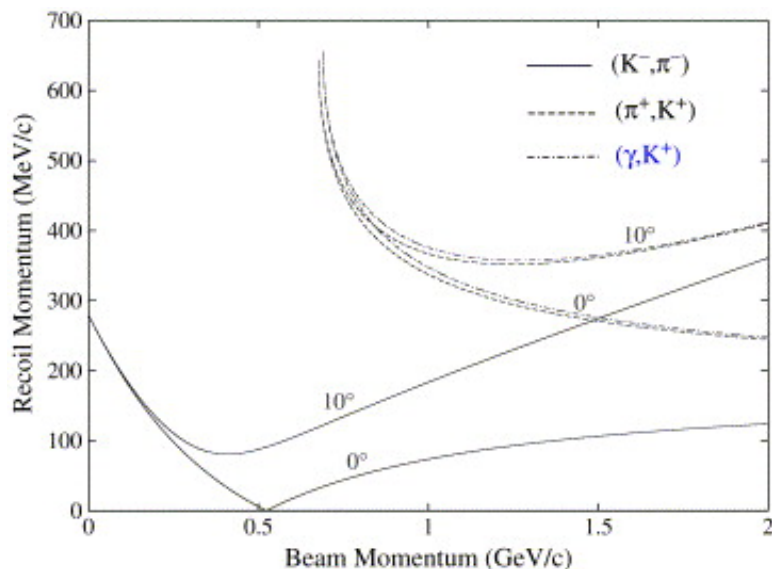


図 1.3: 各ハイパー核生成反応の運動量依存性 [2]

1.2.4 (γ, K^+) 反応

本反応は原理的には (e, eK^+) 反応と同じであり、仮想光子ではなく実光子 γ が標的中の陽子と相互作用し、 K^+ とハイペロンが生成される。 (γ, K^+) 反応における入射光子は、電子ビームを用いた制動放射や逆コンプトン散乱によって生成されることが多い。NKS2 実験においても、RARiS 三神峯の第 2 実験室内において、周回する電子に炭素繊維標的を挿入し、制動放射によって光子を取り出す。実光子を用いる場合、仮想光子を介する (e, eK^+) 反応とは異なり、光子の四元運動量が

$$q^2 = 0 \quad (1.1)$$

を満たすため、反応の運動学および断面積の振る舞いを、よりシンプルに表すことができる。一方で、1 次ビームではなく 2 次ビームを利用することになるので、 (e, eK^+) 反応のような高レートの実験ができないという不利な点もある。

1.3 ハドロン間力の測定実験

核子間相互作用を理解するために、核子-核子 (NN) 散乱実験はこれまでに膨大な数が行われてきた。陽子-陽子散乱および中性子-陽子散乱に関しては、広いエネルギー領域にわたって高精度な微分断面積やスピン依存量が測定されており、これらのデータを基に現象論的ポテンシャルや有効理論が構築されてきた。その結果、NN 相互作用については、現在では高い精度で理解が進んでいる。

一方で、ハイペロン-核子 (YN) 散乱実験は、NN 散乱実験と比較して極めて限ら

れている。その主な理由は、ハイペロンの寿命が 10^{-10} s 程度と非常に短く、十分な強度を持つハイペロンビームを用意することが技術的に困難である点にある。この制約のため、これまでに行われた YN 散乱実験のデータ数は少なく、測定されたエネルギー領域や角度範囲も限定されている。その結果、YN 相互作用に関する散乱データは十分とは言えず、NN 相互作用と同程度の詳細な理解には至っていない。このような背景から、直接的な YN 散乱実験の不足を補う手段として、ハイペロンを含んだ原子核であるハイパー核を生成し、その束縛エネルギー等を測定することで、間接的にバリオン間力を研究する方法も取られてきた。しかしながら相互作用の詳細な構造に直接感度をもつ散乱実験によって得られるデータは、バリオン間力を理解し、ハイパー核の構造やストレンジを含む核物質の性質を明らかにする上で不可欠である。

1.4 NKS2 実験

YN 相互作用実験の中でも Λn 散乱は、ビームと標的の双方が電荷をもっていないことから、現在まで測定データが十分に得られてこなかった。そこで我々は、ハイペロンの生成反応直後における粒子間の相互作用である、終状態相互作用を測定する実験を $\gamma + d \rightarrow K^+ + \Lambda + n$ 反応 (図 1.4) に対して行う予定である。

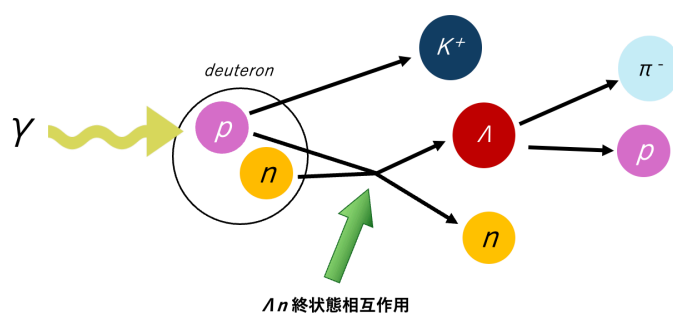


図 1.4: $\gamma + d \rightarrow K^+ + \Lambda + n$ 反応の模式図

1.4.1 Λn 散乱を測定するための要請

$\gamma + d \rightarrow K^+ + \Lambda + n$ 反応を用いて Λn 終状態相互作用実験を行う際、重要になるのは以下の 3 点である。

1. K^+ 、および Λ 崩壊による π^- 、 p などの荷電粒子を測定できること
2. 散乱角度 0° の超前方領域だけでなく、広い角度領域を覆えること
3. エネルギー $E_\gamma = 900\text{--}1000$ MeV 程度の光子ビームの条件では Σ がほとん

ど生成されず、純粋に Λn 終状態相互作用の効果が測定できるため、そのエネルギー領域の光子ビームを使用できること

以上の3点が挙げられる。1 および 2 に関しては、RARiS 三神峯に設置されている Neutral Kaon Spectrometer 2 (NKS2) が条件を満たしている。これらの詳細については次節で述べる。3 に関しては、NKS2 を用いて $E_\gamma = 0.8\text{--}1.26\text{ GeV}$ の条件で実験を行った実績がある。以上より、 Λn 終状態相互作用実験を RARiS 三神峯で行うことに有意性があると言える。

そこで我々は、RARiS 三神峯において Λn 終状態相互作用測定実験を行うための研究を行っている。次節では、RARiS 三神峯に設置されている NKS2 スペクトロメータ等の設備についての概要を紹介する。

1.4.2 設備

実験で使用する光子ビームは、RARiS 三神峯の BST リング内で加速された最大 1.3 GeV の電子ビームに炭素繊維標的を挿入し、制動放射によって得る。取り出した光子のエネルギーは、制動放射の際の散乱電子が失ったエネルギーから特定する。具体的には、制動放射を起こした電子は、その直後の偏向電磁石内を、本来の軌道よりも内側に曲がった経路で進むため、その軌道から散乱電子のエネルギーを算出することが可能となる。このための光子標的化装置を偏向電磁石内部に設置している。(図 1.5)

取り出した光子は、空気中を進み、NKS2 スペクトロメータ内に設置された重水素標的に照射される。

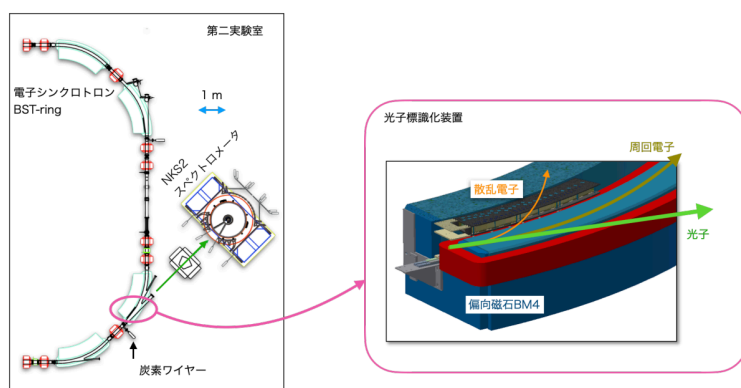


図 1.5: BST リングおよび光子標的化装置、NKS2 スペクトロメータの位置関係。[3] より引用

NKS2 スペクトロメータ (Neutral Kaon Spectrometer) は、RARiS 三神峯の第二実験室内に設置されているスペクトロメータである。図 1.6 は、NKS2 の水平方

向の断面図である。元々は生成閾値領域での $n(\gamma, K^0)\Lambda$ 反応測定に特化した中性 K 中間子スペクトロメータとして設計されたが、NKS2 は K^0 生成領域をほとんどすべて覆っており、また Λ 粒子に対しても感度を持っているため、電磁相互作用によるストレンジネス生成機構の研究に再利用することが可能である。

NKS2 は双極電磁石の 680 マグネット、飛行時間測定のために用いられる Inner Hodoscope (IH)、Outer Hodoscope (OH) と呼ばれるプラスチックシンチレーションホドスコープ、飛跡のトラッキングや反応点及び崩壊点の測定のために用いられている Cylindrical Drift Chamber (CDC)、Vertex Drift Chamber (VDC) と呼ばれるドリフトチェンバー、標的部分、標的からの電子陽電子対生成によるバックグラウンドを抑制するための Electron Veto (EV) と呼ばれるプラスチックシンチレーションカウンターなどで構成されている。

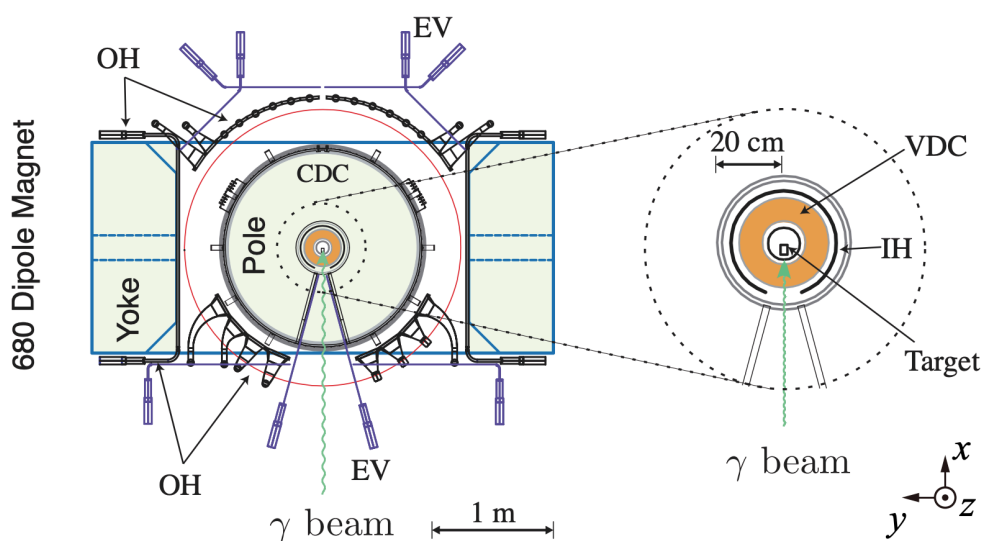


図 1.6: NKS2 を俯瞰した概念図。[4] より引用。

680 マグネットは、磁極半径 800 mm、磁極間距離 680 mm の双極電磁石で、中心磁場 0.42 T である。マグネット上部には直径 20 cm の穴が垂直に開いており、そこから液体重水素標的を挿入する。IH は、マグネットの中心からおよそ 170 mm の位置に設置された検出器であり、従来のものはプラシンチレータおよび PMT で構成されていたが、固有時間分解能の向上のために新しくプラシンチレータおよび SiPM による検出器が開発され、固有時間分解能 $\sigma \sim 100$ ps を達成している。OH は、マグネットの中心からおよそ 1200 mm の位置に設置された検出器であり、従来のものはプラシンチレータおよび PMT で構成された固有時間分解能 $\sigma \sim 200$ ps の検出器である [4]。

第 2 章

新飛行時間測定器の設計

2.1 開発の動機

現在の NKS2 セットアップで Λn 終状態相互作用を測定するには課題がある。それは、NKS2 セットアップでは K^+ 、 p 、 π^+ を飛行時間から識別できないことである。これらの粒子は質量に違いがあるので、測定したデータから質量を算出することで粒子を識別する。粒子の質量は式 2.1 のように運動量 (p)、飛行時間 (t)、飛行距離 (l) から求めることが出来る。 β は速度を光速 c で割ったものである。

$$m^2 = p^2 \left(\frac{1}{\beta^2} - 1 \right) = p^2 \left(\frac{c^2 t^2}{l^2} - 1 \right) \quad (2.1)$$

過去に NKS2 を使用した実験で得られた質量二乗分布を図 2.1 に示した。緑の点線で示された領域は、期待される K^+ の質量二乗分布位置を指しているが、 K^+ 生成の断面積が小さいために統計量が p や π^+ に比べて少ないこともあり、現行の NKS2 のセットアップでは K^+ を識別することが出来ない。

そこで、モンテカルロシミュレーションを行ったところ、現在の NKS2 における飛行時間分解能が $\sigma \sim 300$ ps (OH – IH 間) などところを、 $\sigma \sim 160$ ps まで向上させることで、質量二乗分布のヒストグラムの上で K^+ に対する π^+ の混入率を 5% 以下にして識別することが可能であることが見積もられた。[5]

IH については、固有時間分解能が $\sigma \sim 100$ ps を達成しているため、OH の固有時間分解能が $\sigma \sim 125$ ps を達成することで、飛行時間分解能が $\sigma \sim 160$ ps となり、 K^+ 、 p 、 π^+ を識別することが可能になる。

2.2 新飛行時間測定器の構成

OH を複数のセグメントからなる検出器として設計し、そのセグメント単体を図 2.2 のように、シンチレータの長さ方向両端に SiPM(Silicon Photo Multiplier) を

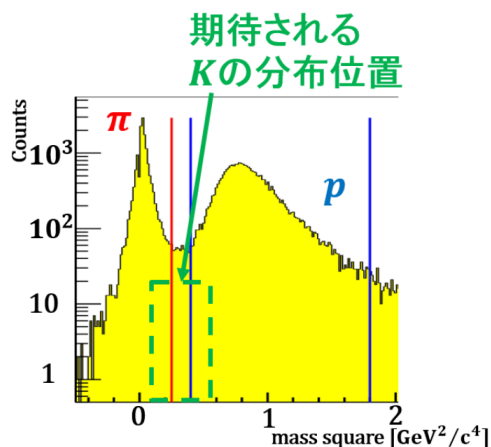


図 2.1: 過去の実験で得られた質量二乗分布のヒストグラム。[5] から引用。

取り付ける構成とした。以下では、使用した SiPM および SiPM の取り付け位置、SiPM からの出力を増幅・整形・デジタル化する ASD について説明する。

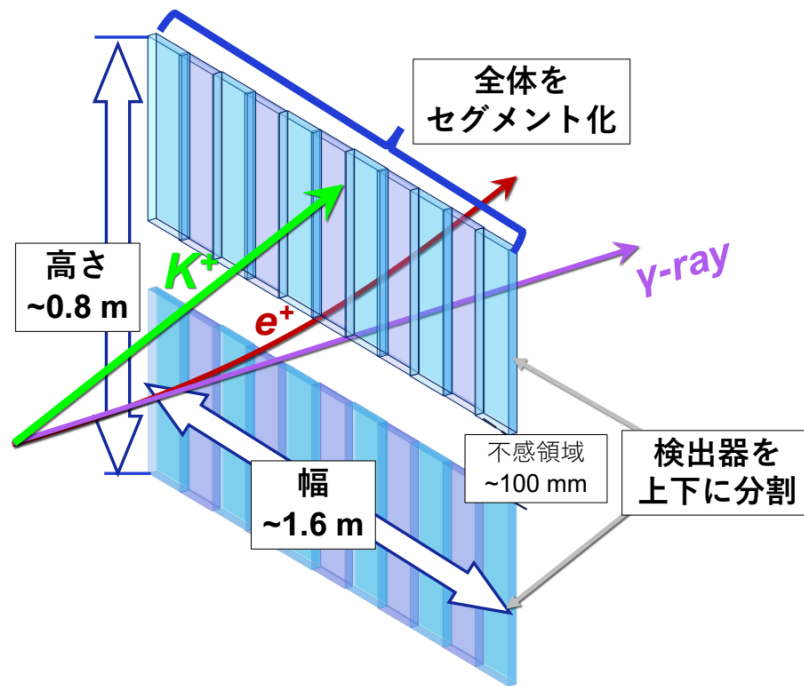
2.2.1 MPPC

本研究では、光検出器として MPPC (S13360-3050PE[8]) を使用した。MPPC とは Multi-Pixel Photon Counter の略であり、浜松ホトニクス株式会社 [7] が開発した SiPM (Silicon Photomultiplier) の一種である。

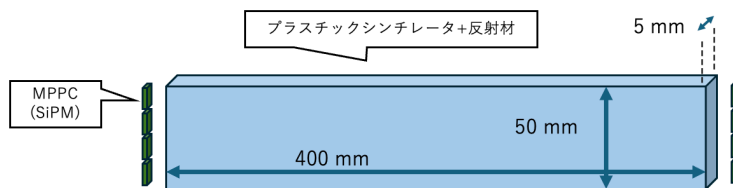
動作原理

MPPC の動作原理を説明する前に、フォトダイオード (Photodiode: PD) とアバランシェフォトダイオード (Avalanche Photodiode: APD) について説明する。p 型半導体と n 型半導体を接合したダイオードは、p 側から n 側へ正孔が移動し、n 側から p 側へ電子することで、p 側には負のイオン、n 側には正のイオンが残って電位差を生じるとともに、接合面付近で欠乏層というキャリアが少ない領域が生まれる。欠乏層に禁制帯よりも大きなエネルギーを持った光子が入射すると、電子の励起が起こる。欠乏層は、自由キャリアが少なく電場が強い領域であるために、電子と正孔の対が再結合しにくく、電子は n 側へ、正孔は p 側へ移動する。こうして、光子の到来を電流として検出する装置がフォトダイオード (PD) である (図 2.3)。

フォトダイオードの量子効率を上げる手法として、有感領域である欠乏層を広げることと、生じた電子を増幅することが挙げられる。欠乏層を広げる方法の 1 つは、p 型半導体と n 型半導体の間に、ドーピングのない単体からなる真性半導体を



(a) OH の検出器全体の概念図。[6] から引用。



(b) OH のセグメント単体の概念図。

図 2.2: OH の概念図。

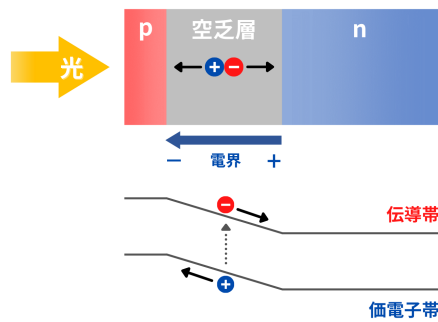
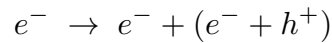


図 2.3: フォトダイオードの動作原理の概念図。[10] から引用。

加えることである。真性半導体は自由なキャリアが少ないため、欠乏層を形成しやすい。欠乏層を広げるもう1つの方法は、逆バイアスをつけることである。逆バイアスにより、p側の正孔はさらにp側へ引き戻され、n側の電子はさらにn側へ引き戻されるため、欠乏層を広げることができる。

さらに、逆バイアスが一定以上であれば、発生した電子が強く加速されて原子に衝突し、



というように次々と新しくキャリアを生成することで、電流を大きくすることができる(図2.4)。これをアバランシェ増幅(雪崩増幅)といい、アバランシェ増幅が起こる最低電圧をブレイクダウン電圧という。

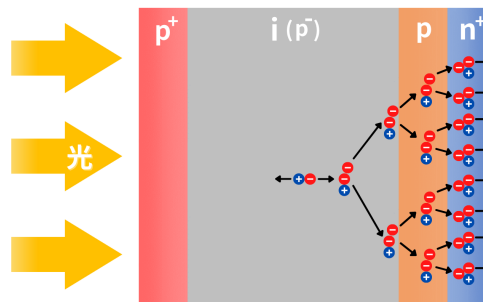


図2.4: アバランシェフォトダイオードの動作原理の概念図。iは真性半導体、 p^+ と n^+ は高濃度ドープ領域で、それぞれ負極・正極として機能する。[10]から引用。

MPPCは、多数の微小なAPDを二次元的に並べた構造になっており、それぞれのAPDのセルはブレイクダウン電圧をわずかに超える逆バイアスで動作させられている。この状態はガイガーモードと呼ばれている。アバランシェ増幅は、外部からの制御なしには停止しないため、MPPCでは各ピクセルにクエンチ抵抗が直列に接続されており、この1セットをSPADと呼ぶ(図2.5)。アバランシェ電流が流れることでピクセル両端の電圧が低下し、電圧がブレイクダウン電圧未満になることでアバランシェは自発的に停止する。

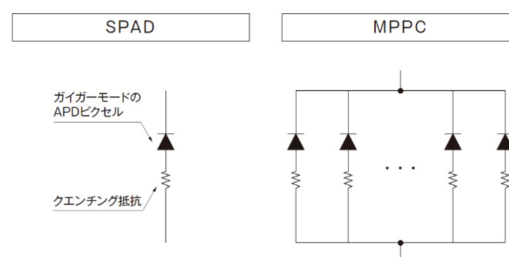


図2.5: SPADとMPPCの構造。[9]から引用。

特性

MPPC の特性について、特に、従来の OH で使用されていた光検出器である光電子増倍管 (photomultiplier tube : PMT) と比較してまとめる。

MPPC の利点としては、小ささ、耐磁場性、低電圧駆動が挙げられる。小ささは多チャンネル化を容易にし、検出器自体を高密度に配置することで、実験に必要な時間を短くすることができる。また、本研究で求める検出器は、双極電磁石の近傍に設置するため耐磁場性は好ましい特性である。また、PMT を動作させるには数 100 から数 1000 V の外部電源が必要であるが、MPPC は数 10 V で動作可能である [9]。

MPPC の欠点としては、暗電流によるノイズが PMT よりも大きいこと、増幅率に温度依存性があること、放射線に長時間さらされると内部の結晶構造に乱れが生じてしまい、劣化してしまうというものがある。

本実験で使用する MPPC (S13360-3050PE) は以下の表 2.1 ような仕様である。また、実際の画像が 2.6 である。

表 2.1: S13360-3050PE の仕様 [8]

項目	仕様
パッケージタイプ	ガラスエポキシ
チャンネル数	1 ch
有効受光面サイズ/ch	3 × 3 mm
ピクセル数/ch	3600
ピクセルサイズ	50 μm
感度波長範囲	320~900 nm
最大感度波長 (typ.)	450 nm
端子間容量/ch (typ.)	320 pF
増倍率 (typ.)	1.7×10^6
測定条件	$T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
ブレイクダウン電圧 V_{break} (typ.)	$53 \pm 5 \text{ V}$
推奨印加電圧 V_{op}	$V_{break} + 3 \text{ V}$

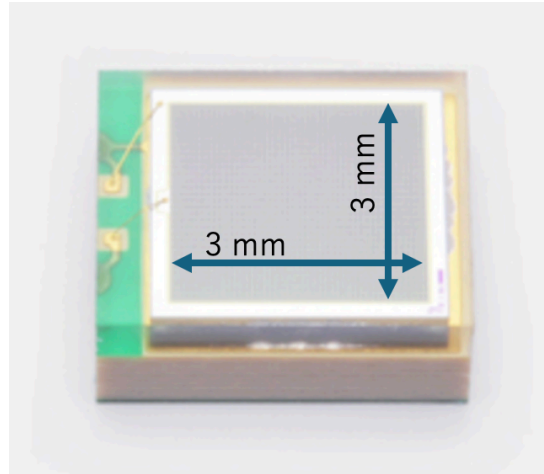


図 2.6: S13360-3050PE の画像。[8]

2.2.2 MPPC の取り付け位置

試作した OH に使用したプラスチックシンチレータの端面は図 2.7 のように、5 mm × 50 mm の長方形となっており、ここに有感領域 3 mm × 3 mm の MPPC(S13360-3050PE) を 4 つ配置する。

4 つの MPPC に光子が同時に入射したとして、MPPC が隣接している場合と間隔を空けた場合で、4 つの MPPC からの信号が重なった時の波形が代わり、分解能に影響する可能性を考えたため、MPPC の配置を 2 種類考案した。

そのうちの 1 つは、MPPC 4 つを中央に揃えるもので (図 2.8(a))、もう 1 つは MPPC 4 つを等間隔に配置するものである (図 2.8(b))。今後、前者を OHB (MPPC が束 (bunch) になっていることから)、後者を OHS (MPPC を分散 (spread) させていることから) と呼ぶことにする。また、以降ではプラスチックシンチレータに反射材を巻き、遮光し、MPPC を取り付けした状態、すなわち、後述する ASD を取り付けしていない状態を、OH 本体と呼ぶことにする。

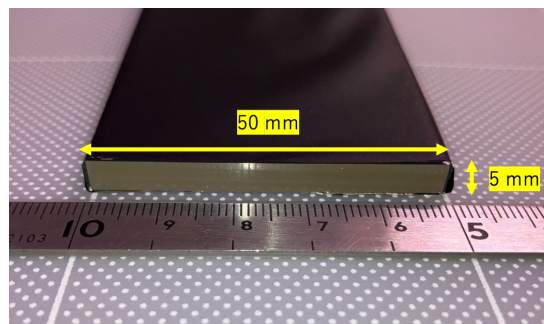


図 2.7: プラスチックシンチレータの端面。アルミマイラーとブラックシートで遮光を施している。

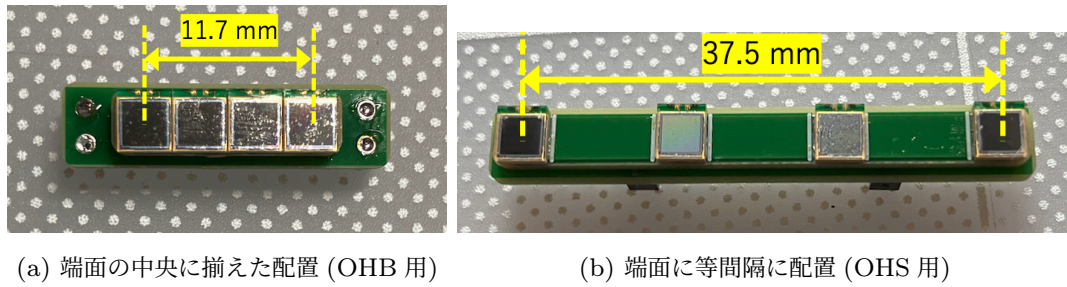


図 2.8: MPPC の配置

2.2.3 ASD

ASD (Amplifier & Shaper & Discriminator) は MPPC からの微弱な信号を増幅して整形し、デジタル信号として、TDC 等の後段の計測装置に送る電子回路である。本研究では、1つの基盤上に ASD を納め、プラグ、ソケットを配して簡単に着脱できるようにした (図 2.9)。このようにするメリットは、性能評価の際にプラスチックシンチレータと ASD の組み合わせを即座に変更することが可能な点である。

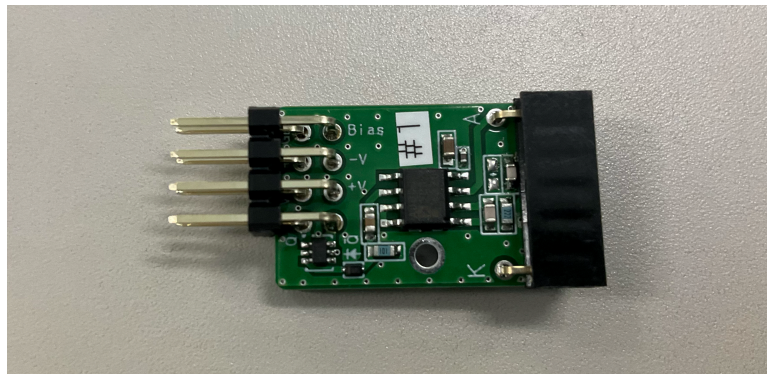


図 2.9: ASD 基盤

ASD の回路図を図 2.10 に示す。左下の MPPC_Anode_out から入力信号を得て、オペアンプを用いた増幅回路、微分回路、コンパレータを経て LVDS 信号として Q/Qbar から出力される。図中には描かれていないが、今回用いるコンパレータ LTC6754 は正の電圧に対して動作する [11] ので、電圧が負の方向に振れるオーバーシュートを取り除くために、コンパレータの直前にダイオードを挿入している。また、ダイオードを挿入することでオーバーシュートを取り除くとともに、信号のテール部分の成分とピーク部分の成分の比がピーク部分に傾き、同じ電荷量が流れても立ち上がりが大きくなり、時間分解能が向上するという結果が先行研究 [6] で得られている。

また、増幅回路においては、C4 と R4 だけであれば、微分増幅回路として機能する

が、リングングを抑制するために位相補償機構を付加してる。それが図 2.10 中の C5 および R3 である。C5 のみでも位相補償の効果があるが、 $R4 : R3 = C4 : C5$ となるように C4 を加えるとよりリングングを抑制の効果がある。

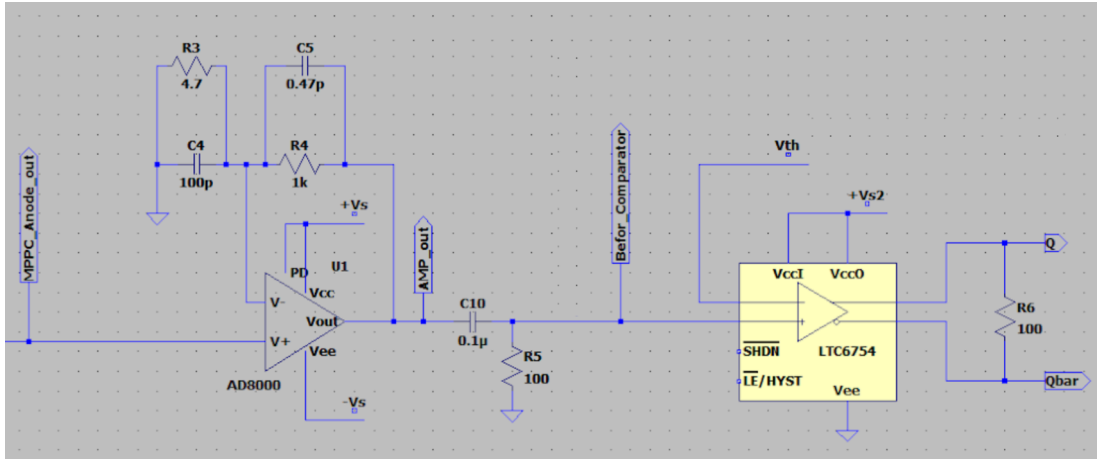


図 2.10: ASD の回路図。左下の MPPC_Anode_out から入力信号を得て、オペアンプを用いた増幅回路、微分回路、コンパレータを経て LVDS 信号として Q/Qbar から出力される。

2.2.4 位相補償機構

位相補償機構の差が時間分解能に与える影響を調査するために、7 種類の ASD を作成した。それぞれの C5 および R3 の有無と各値は、表の通りである。

表 2.2: 回路定数の一覧

No.	R3 [Ω]	C4 [pF]	R4 [Ω]	C5 [pF]
1		100	2.2k	0.47
2		100	2.2k	1.0
3		100	2.2k	2.2
4		100	2.2k	
5	22	100	2.2k	0.47
6	33	100	2.2k	0.47
7	47	100	2.2k	0.47

位相補償機構の差がコンパレータの入力に対してどのように作用するのかを確かめるべく、回路シミュレーションソフトウェア LTSpice[12] でシミュレーションをするとともに、宇宙線を用いて実際の波形を測定した。図 2.11 は表 2.2 の #1 から #4 までの ASD に対し、増幅器系の出力部分での波形をシミュレーションで推測

したものである。#1 から#4 は図中の 0.47pF、1.0pF、2.2pF、Inf に該当する。

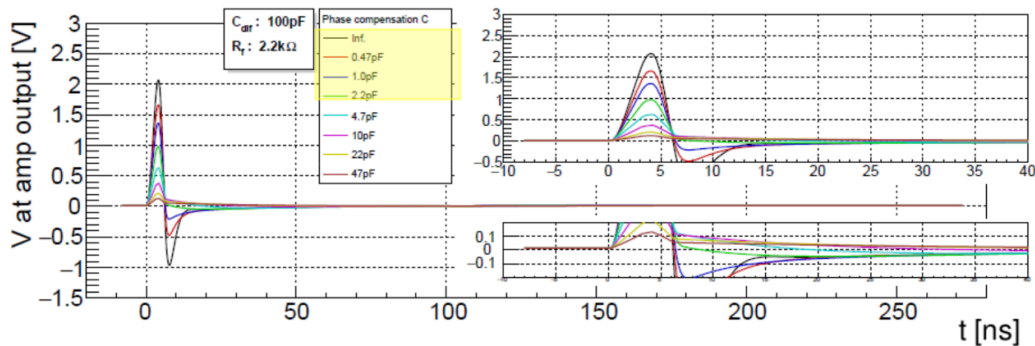


図 2.11: LTSpice を用いた、増幅器系の出力部分での波形のシミュレーションの前半。凡例の"Phase compensation C"の 0.47pF、1.0pF、2.2pF、Inf が#1 から#4 に当たる。

これに対し図 2.12 は、#1 を用いて宇宙線で実際の波形を測定したものに、シミュレーションの波形重ねたものである。シミュレーションの波形よりも実際の方が、ピークに対するオーバーシュートの比率が大きい。また、テールの長さは大きく変わらないように見える。

実際の波形にはリングングがあり、シミュレーションにはそれが見られない理由について、シミュレーションに際して、MPPC から増幅器系へ伝わるシグナルの波形を設定する際に、実際には存在するリングングを無視して、早いピーク成分およびテールのみを再現して利用したためである (図 2.14)。

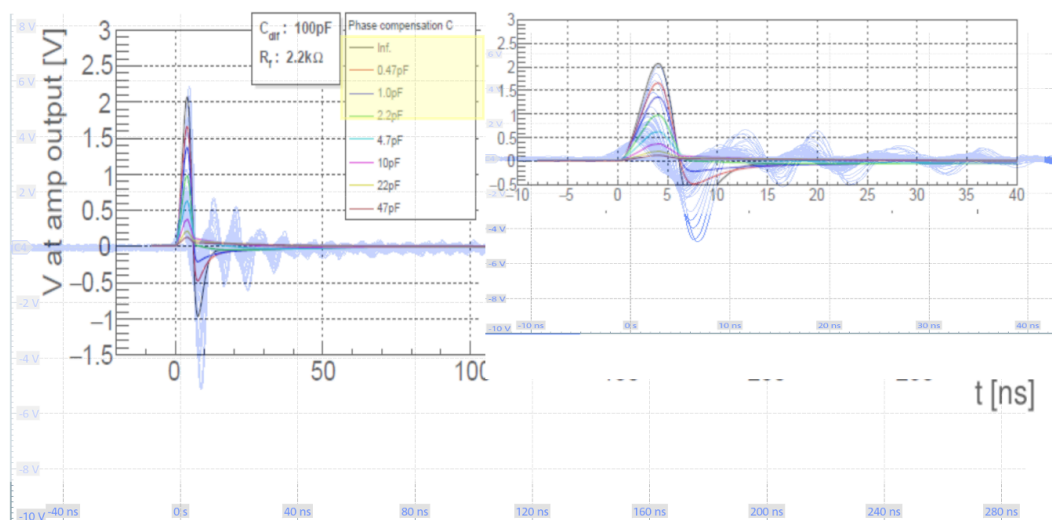


図 2.12: #1 増幅器系の出力部分をオシロスコープで観測し、シミュレーションと重ねたもの

図 2.13 は表 2.2 の#5 から#7 までの ASD に対し、コンパレータの入力部分での波形をシミュレーションで推測したものである。#5 から#7 は図中の R_3 : 22 Ω 、33 Ω 、47 Ω に該当する。

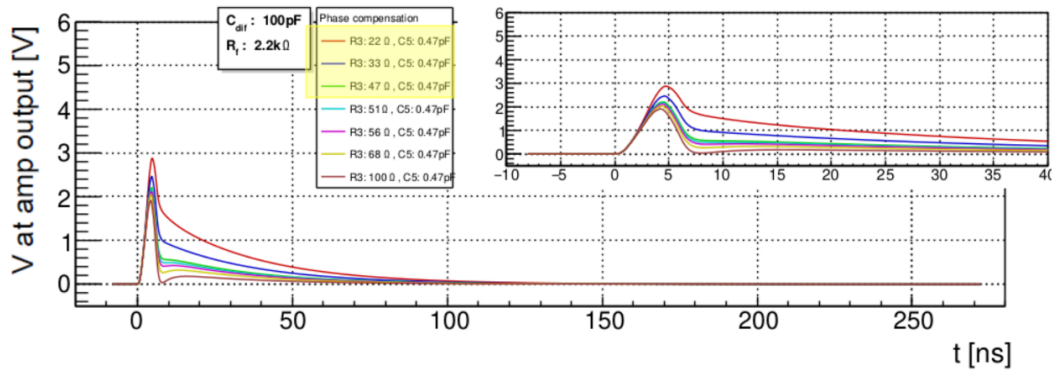


図 2.13: LTSpice を用いた、コンパレータの入力部分での波形のシミュレーションの後半。"Phase compensation "の R_3 : 22 Ω 、33 Ω 、47 Ω が#5 から#7)

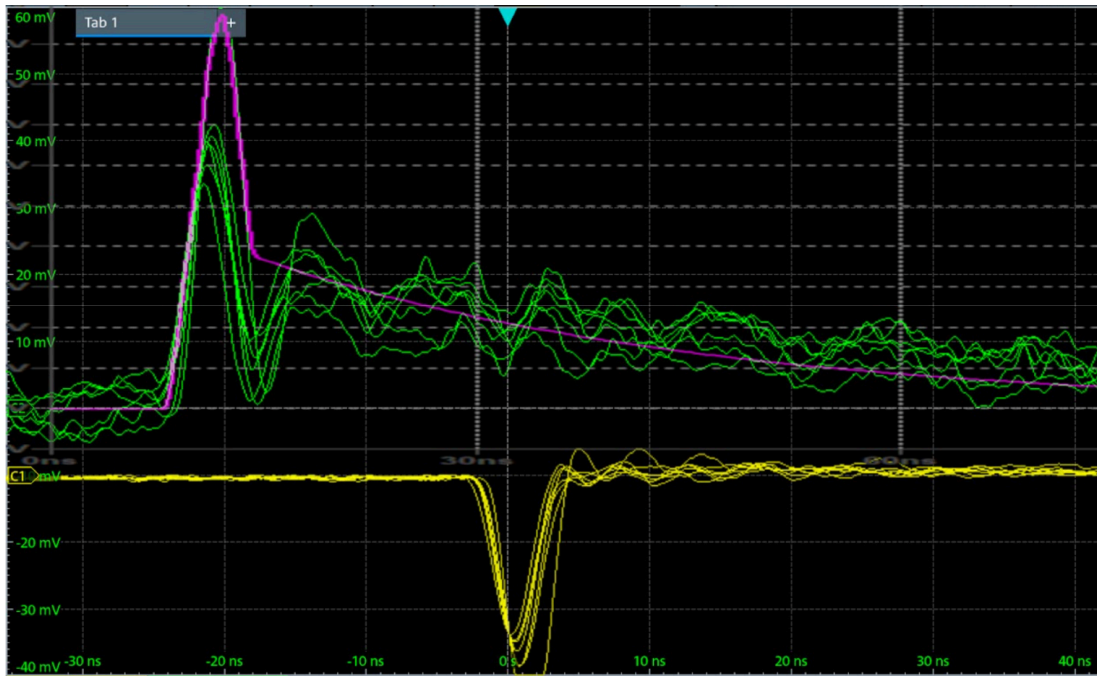


図 2.14: マゼンタの波形が、LTSpice で設定した MPPC から増幅器系へ伝わるシグナル。画像上半分の緑色の波形は、今回の試作検出器と同様に 5mm 厚シンチレータに 4 つの MPPC を取り付けした検出器に対して ^{60}Co の γ 線を当て、MPPC のアノード出力をプローブで観測したものであり、これをマゼンタの波形が再現するように設定した。再現の際にリングングは再現できなかった。

これに対し図 2.15 は、#5 を用いて宇宙線で実際の波形を測定したものに、シミュレーションの波形重ねたものである。シミュレーションと実測の波形を見比べ

ると、リングングを除けば、立ち上がりからテールまでの波形、波長はうまく整合している。よって、シミュレーション通りに、オーバーシュートを抑制できていることが確認された。

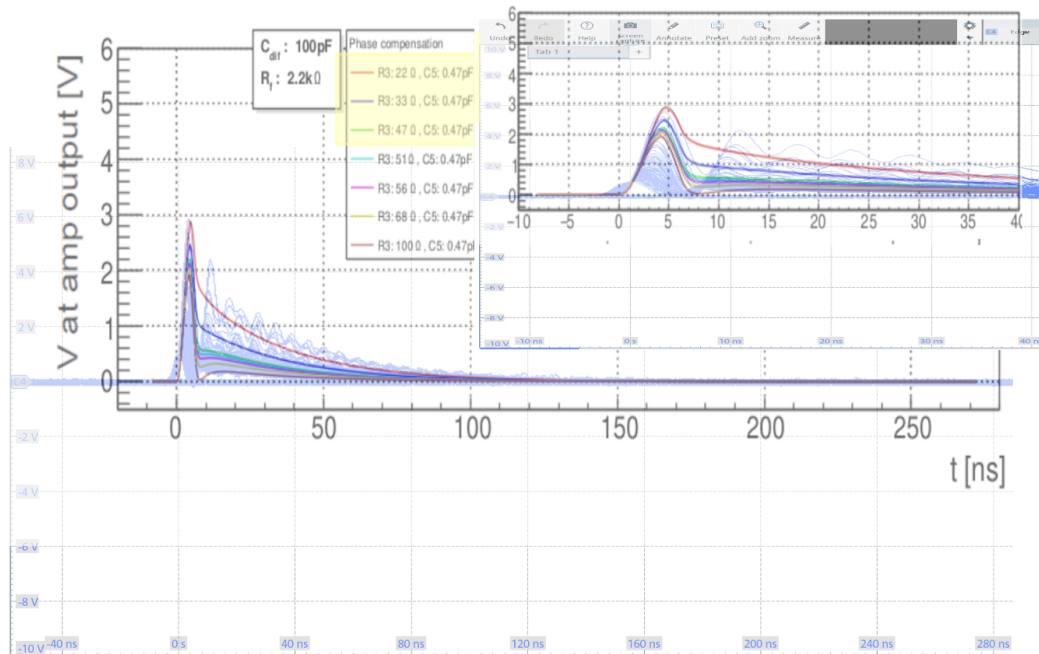


図 2.15: #5 増幅器系の出力部分をオシロスコープで観測し、シミュレーションと重ねたもの

図 2.16 は、#3 を用いて宇宙線で実際の波形を測定したものであるが、増幅器系の出力部分で発振が起こっているため、以降では使用しない。

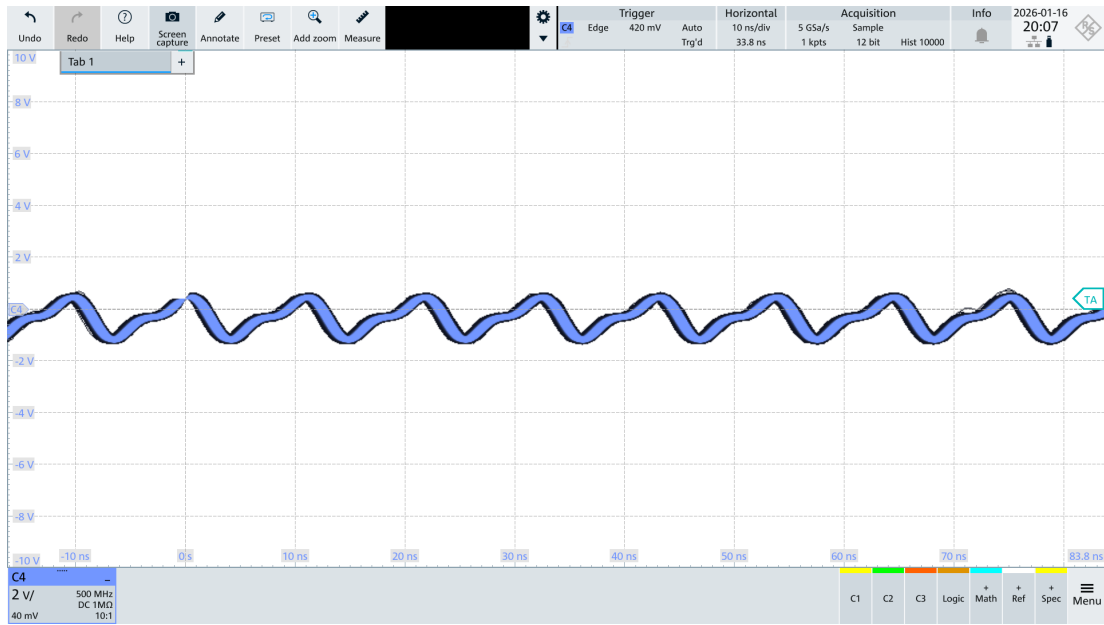


図 2.16: #3 の増幅器系の出力部分をオシロスコープで観測したもの。発振している。

第3章

宇宙線を使用したテスト

3.1 実験概要

制作した検出器の固有時間分解能を、宇宙線を用いて測定した。検出器は、それ単体では固有時間分解能を算出できないが、測定対象となる検出器と同程度以上の固有時間分解能を持つ検出器2枚とともに並べて（図 3.1）、同一の粒子を検出させることで、粒子の飛行時間を3組測定し、それらを誤差伝搬の式に当てはめて連立方程式を解くことで、それぞれの固有時間分解能を算出することが可能となる。具体的な算出方法は次節 3.2 に述べる。

本テストでは、3種類の異なるセットアップで測定を行った。1つ目のセットアップ（以下、セットアップ A）では、幅の狭い検出器を交差させたものをトリガーとして使用することで、固有時間分解能を測定したい試作検出器に入射する宇宙線の入射角を絞ったものである。2つ目のセットアップ（以下、セットアップ B）は、有感領域の広い検出器を平行に設置したものをトリガーとして使用しており、セットアップ A での欠点である、時間あたりの収量を優先している。

いずれのセットアップにおいても、本テストの目的は、OHS と OHB の 2 種類に対し、#1,2,4,5,6,7 の 6 種類の ASD を取り付けて固有時間分解能を測定し、MPPC の配置、ASD の種類、コンパレータの閾値が固有時間分解能に与える影響を評価することである。

3.2 解析手法

この節では、測定された 3 組の飛行時間から固有時間分解能を算出する方法について述べる。

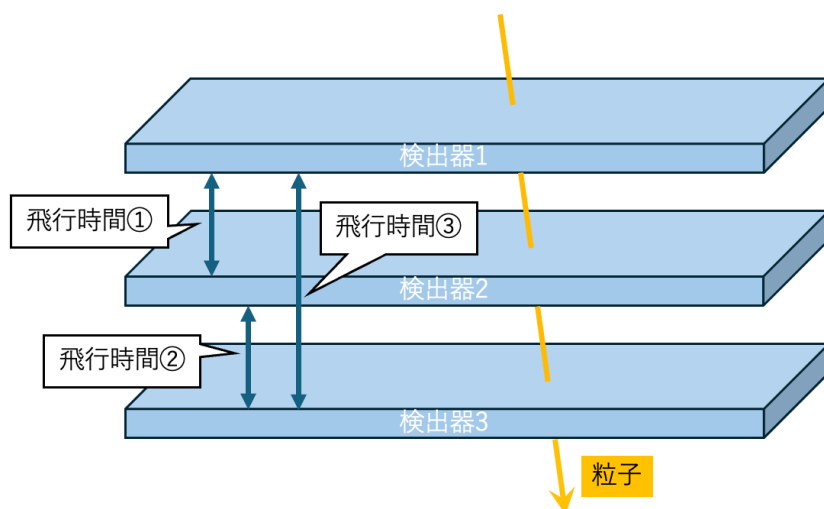


図 3.1: 検出器を粒子が通過する様子の概念図

3.2.1 時間分解能の算出

検出器の時間分解能は、同一事象に対して得られる信号の時間測定値のばらつきとして定義される。本研究では、複数の検出器間の飛行時間を用いて、各検出器の固有時間分解能を算出する。

まず、確率変数 A および B の差

$$X = A - B \quad (3.1)$$

を考える。分散の定義より、

$$\sigma_X^2 = \langle (X - \langle X \rangle)^2 \rangle \quad (3.2)$$

であり、 A と B が統計的に独立であると仮定すると、

$$\sigma_{A-B}^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 \quad (3.3)$$

が成り立つ。

この関係は、誤差伝搬の公式からも導出できる。一般に、 A および B の関数 $f(A, B)$ に対する分散は、一次のテイラー展開を用いることで

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial A} \right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B} \right)^2 \sigma_B^2 \quad (3.4)$$

と近似される。ここで $f(A, B) = A - B$ とすると、

$$\frac{\partial f}{\partial A} = 1, \quad \frac{\partial f}{\partial B} = -1 \quad (3.5)$$

であるため、

$$\sigma_{A-B}^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 \quad (3.6)$$

が得られる。

次に、3枚の検出器（検出器 1, 2, 3）を用いた場合を考える。それぞれの検出器の固有時間分解能を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ とすると、検出器間の飛行時間の分散は以下のように表される。

$$\sigma_{12}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \quad (3.7)$$

$$\sigma_{23}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \quad (3.8)$$

$$\sigma_{31}^2 = \sigma_3^2 + \sigma_1^2 \quad (3.9)$$

ここで σ_{ij} は検出器 i と j の飛行時間の標準偏差である。

これら3つの式は、未知数 $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$ に対する連立一次方程式となっており、代数的に解くことができ、

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{2} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{31}^2 - \sigma_{23}^2) \quad (3.10)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{2} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{31}^2) \quad (3.11)$$

$$\sigma_3^2 = \frac{1}{2} (\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 - \sigma_{12}^2) \quad (3.12)$$

と求められる。

このように、3枚以上の検出器を用いて飛行時間を測定することで、各検出器の固有時間分解能を算出可能である。

次に、これらから得られる各検出器の時間分解能 σ_i の不確かさを評価する。測定から得られる σ_{ij} には有限の統計誤差が存在するため、 σ_i の誤差は誤差伝搬の公式を用いて算出する。

例えば σ_1^2 を

$$g(\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}) = \frac{1}{2} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{31}^2 - \sigma_{23}^2) \quad (3.13)$$

とおくと、その分散は

$$\sigma_{(\sigma_1^2)}^2 = \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{12}} \right)^2 \sigma_{\sigma_{12}}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{31}} \right)^2 \sigma_{\sigma_{31}}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{23}} \right)^2 \sigma_{\sigma_{23}}^2 \quad (3.14)$$

で与えられる。各偏微分は

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_{12}} = \sigma_{12}, \quad \frac{\partial g}{\partial \sigma_{31}} = \sigma_{31}, \quad \frac{\partial g}{\partial \sigma_{23}} = -\sigma_{23} \quad (3.15)$$

であるため、

$$\sigma_{(\sigma_1^2)}^2 = \sigma_{12}^2 \sigma_{\sigma_{12}}^2 + \sigma_{31}^2 \sigma_{\sigma_{31}}^2 + \sigma_{23}^2 \sigma_{\sigma_{23}}^2 \quad (3.16)$$

となる。

最終的に、 $\sigma_1 = \sqrt{\sigma_1^2}$ の不確かさは

$$\sigma_{\sigma_1} = \frac{1}{2\sigma_1} \sigma_{(\sigma_1^2)} \quad (3.17)$$

として求められる。同様の手順により、 σ_2 および σ_3 の不確かさも算出した。

3.2.2 Slewing correction

時間測定においては、信号波形の立ち上がり特性が時間情報の取得に大きな影響を与える。一般に、時間情報は一定の閾値を超えた時刻を基準として定義されるが、この方法では信号振幅の違いに起因する系統的な時間ずれが生じる。この現象は time walk と呼ばれる。

MPPC からの出力信号は、入射光子数やゲイン揺らぎの影響により、イベントごとに振幅が異なる。同一の立ち上がり形状を仮定した場合でも、振幅が大きい信号ほど立ち上がりの傾きが急峻となり、固定された閾値をより早い時刻で超える。その結果、振幅の大きな信号の方が早いタイミングで論理信号が出力され、振幅の小さな信号は遅れて出力されることになる。この振幅依存の時間ずれが、Time walk である (図 3.2)。

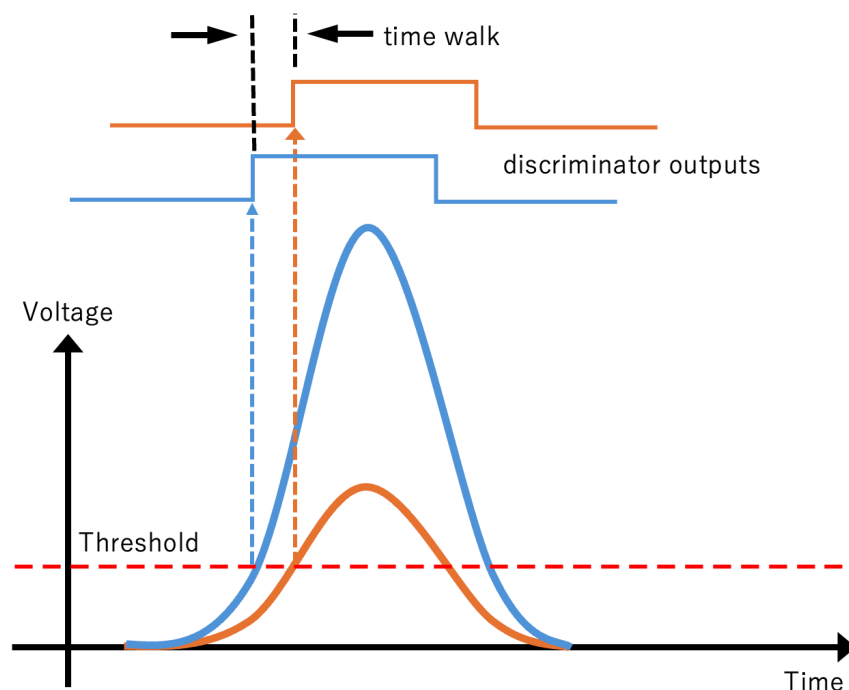


図 3.2: time walk の概念図。同時に立ち上がった相似な波形でも、波高が高いほど閾値を超えるタイミングが早いため、出力される論理信号にはズレが生じる。

Time walk は、時間差分布を広げる要因となり、結果として時間分解能を悪化さ

せるため、補正が不可欠である。time walk を補正することを slewing correction という。 Time walk を補正するためには、信号の振幅情報を併せて用いる方法が一般的である。例えば、QDC (Charge-to-Digital Converter) によって測定された電荷量や、ToT (Time over Threshold) によって得られるパルス幅は、信号振幅と強い相関を持つ。これらの量と時間差との相関を調べることで、振幅に依存した時間ずれを補正することが可能となる。 Slewing correction を適用することで、時間差分布の幅は大幅に改善され、検出器の本来の時間分解能を評価することが可能となる。本研究においては、以下のような手順で slewing correction を行った。

- ToT を取得し、累積ヒストグラム ToT_{integral} を作成する。 $(ToT_{\text{integral}}(w) = \frac{\sum_{\omega=0}^w C(\omega)}{\sum_{\omega=0}^{\infty} C(\omega)}$ すなわち、ToT = 0 から注目している ToT の値 (w) までのカウント数を、全カウント数で割ったもの。)
- ToT_{integral} と ToF (time-of-flight) との 2 次元ヒストグラムを作成する。
- この 2 次元ヒストグラムを ToT_{integral} 軸に垂直にスライスし、各スライスにおける ToF 分布の中心 (平均値) が一致するように、TDC データにオフセット補正を施す (3.3)。この際、他検出器との時間相関において補正が一方に偏らないよう、補正量を平均的に分配する。
- 補正後の ToF 分布を射影し、ガウス関数でフィットすることで飛行時間の分解能 σ を評価する。

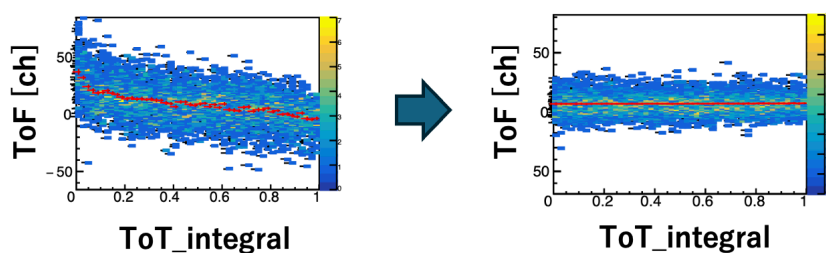


図 3.3: slewing correction の例。

3.3 セットアップ A

3.3.1 セットアップ A での検出器の配置

セットアップ A では、NKS2 実験において IH として使用予定の検出器をトリガーとして使用した。IH は OH よりも幅の狭い、380 mm × 50 mm × 20 mm のプラスチックシンチレータに MPPC およびアンプを取り付けたもので、固有時間分解能が $\sigma \sim 100$ ps であることが確認されている。今回測定したい試作検出器と IH

の並べ方について、3つの方法を試した。

一つ目は、図 3.4 のように試作検出器を 3 つ重ねたもの 2 つを、IH を 2 つ交差させたもの同士で挟んだものである。このセットアップで実際に測定を行ったところ、24 時間あたりに約 30 イベントと、時間あたりの収量が非常に少なく、測定に不適切であった。

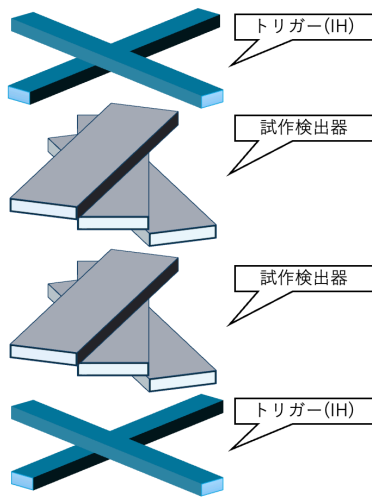


図 3.4: セットアップ A の案 1。試作検出器を 3 つ重ねたもの 2 つを、IH を 2 つ交差させたもの同士で挟んだもの。試作検出器を 3 つを、角度をつけて重ねているのは、ASD を取り詰める部分が干渉して余分に距離が離れることを防ぐため。

そこで、次に試したのが図 3.5 である。こちらは、1 つ目の方法 (図 3.4) での、最上段の IH の組みを試作検出器の下に移動したものであり、時間あたりの収量を多くする狙いがあった。このセットアップでは、24 時間あたりに約 3,000 イベントと、1 つ目の方法よりも時間あたりの収量が向上したものの、不十分であった。

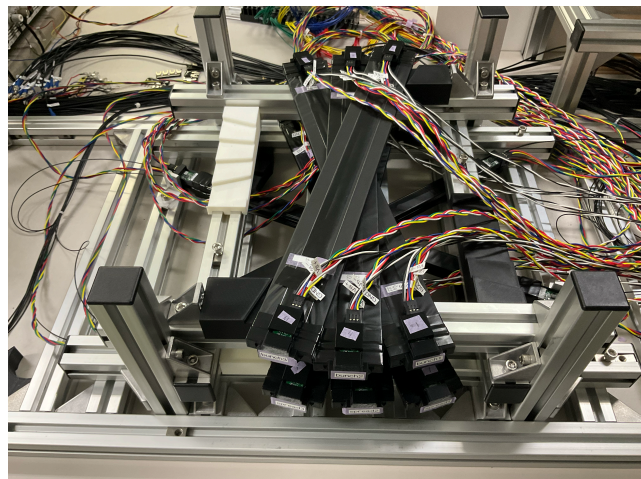
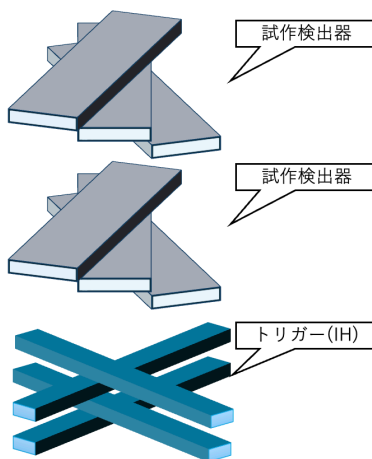


図 3.5: セットアップ A の案 2。案 1 から、最上段の IH を試作検出器の下に移動したもの。トリガー同士を近づけることで時間あたりの収量を多くする狙いがあった。

3つ目の方法は、図 3.6 のように IH3 本を少しずつずらしながら重ねたものをトリガーとし、その上に試作検出器を 3つ重ねたものである。このセットアップでは、24 時間あたりに約 10,000 イベントとなり、これを採用した。実際に測定した結果を??に示すが、データに抜けが多いのは、時間あたりの収量を多くするために、後述のセットアップ B に移行したためである。セットアップ B での 24 時間あたりのイベント数は約 100,000 であった。

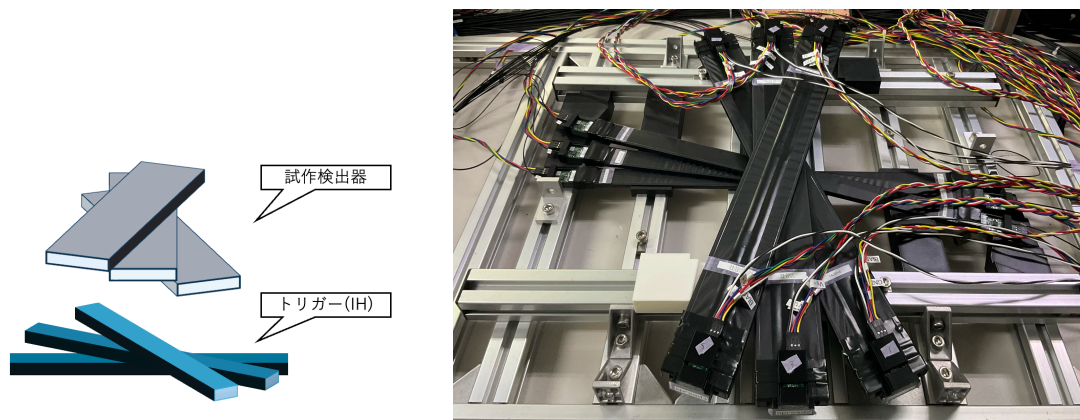


図 3.6: IH3 本を少しずつずらしながら重ねたものをトリガーとして最下部におき、その上に試作検出器を 3つ重ねたもの。

3.3.2 セットアップ A でのデータ収集系

図 3.7 はセットアップ A でのデータ収集系の概念図である。OH1、OH2、OH3 と書かれているものが今回測定したい対象であり、プラスチックシンチレータと MPPC、ASD から構成されている。IH1、IH2、IH3 と書かれているものがトリガーであり、プラスチックシンチレータと MPPC、AMP から構成されている。OH と IH からは TDC と ToT が取得でき、これらにより飛行時間の算出と slewing collection が行える。

3.4 セットアップ B

3.4.1 セットアップ B での検出器の配置

図 3.8 はセットアップの実際の様子であり、図 3.9 はその概略図である。本研究の試作検出器よりも大型のプラスチックシンチレータを用いた検出器を平行に配置したものをトリガーとし、その間に試作検出器を垂直に配している。トリガーとして仕様している検出器は、プラスチックシンチレータとライトガイドおよび PMT から構成されており、固有時間分解能が $\sigma \sim 100$ ps であることが確認されている。

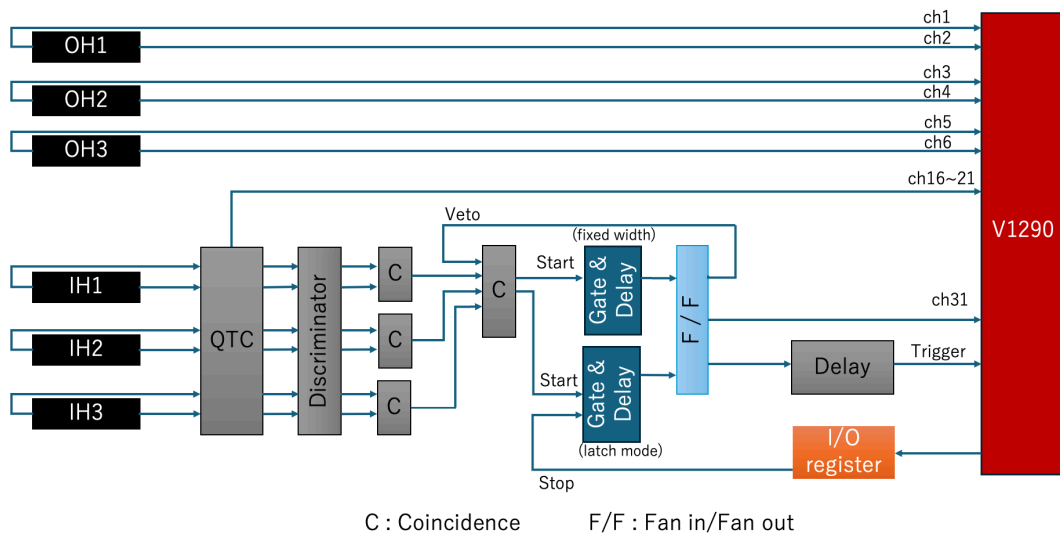


図 3.7: setupA のデータ収集系の概念図。図中では省略されているが、OH はプラスチックシンチレータと MPPC、ASD から構成され、IH はプラスチックシンチレータと MPPC、AMP から構成されている。



図 3.8: セットアップ B の実際の画像

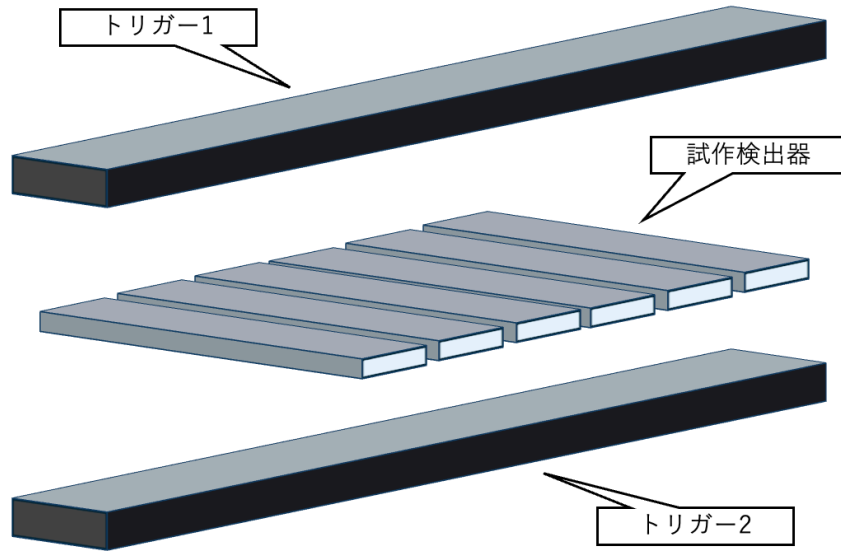


図 3.9: セットアップ B の概略図

3.4.2 セットアップ B でのデータ収集系

図 3.10 はセットアップ B でのデータ収集系の概念図である。OH と書かれているのが今回測定したい検出器であり、プラスチックシンチレータと MPPC、ASD から構成されている。PMT と書かれているのが今回のトリガーであり、PMT1 と PMT2 のコインシデンスをトリガーとしている。また、OH と PMT から TDC と ToT が取得でき、これらにより飛行時間の算出と slewing collection が行える。

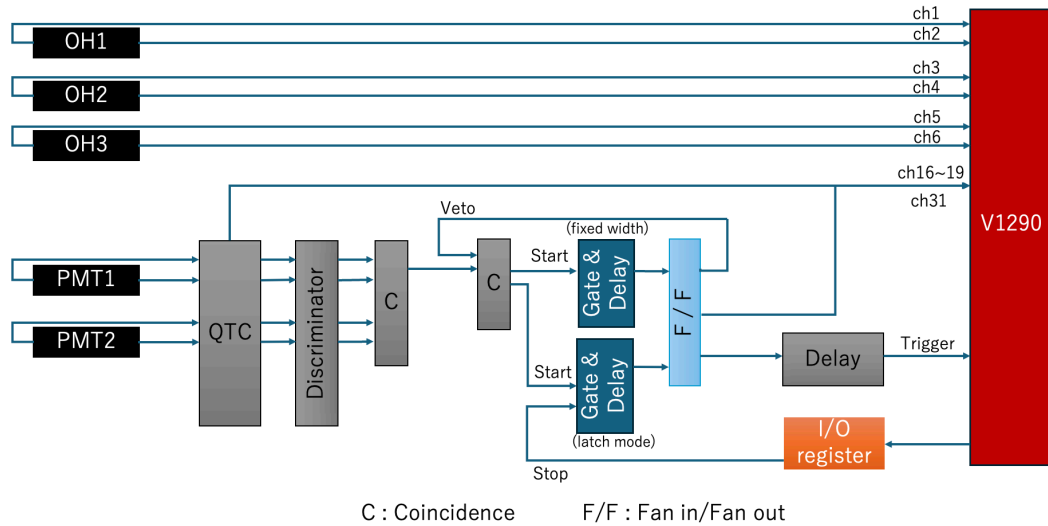


図 3.10: setupB のデータ収集系の概念図

3.5 結果と考察

セットアップ A では、コンパレータの閾値を 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 V に設定して測定を行った。続くセットアップ B では、コンパレータの閾値を 0.2, 0.4, 0.6 V に設定して測定を行った。セットアップ A での時間分解能の測定結果を図 3.11 に、セットアップ B でのものを図 3.12 に示した。図 3.11 にプロットの抜けが多いのは、先述の通り時間あたりの収量を確保するために、セットアップ A からセットアップ B に移行したためである。

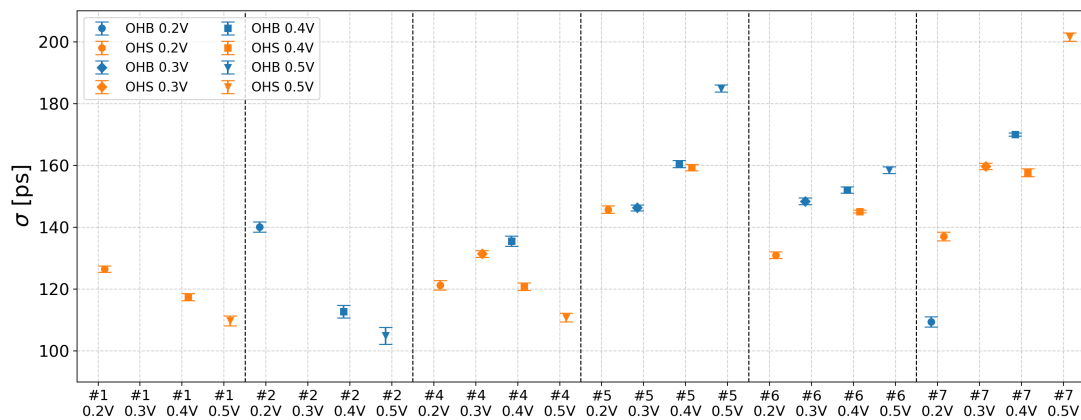


図 3.11: セットアップ A の時間分解能測定結果。縦軸が時間分解能、横軸が ASD の種類および閾値電圧を昇順に並べており、閾値電圧の違いをマーカーの形で、OHB と OHS の別をマーカーの色で分けている。

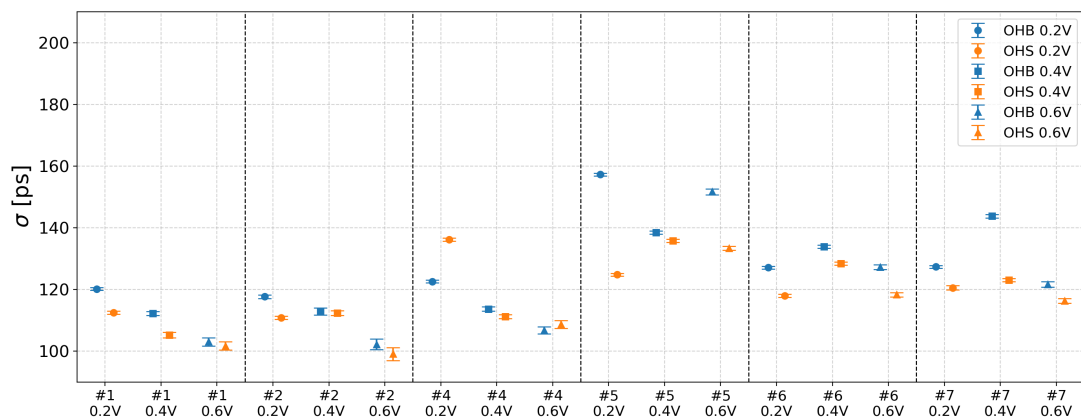


図 3.12: セットアップ B の時間分解能測定結果。縦軸が時間分解能、横軸が ASD の種類および閾値電圧を昇順に並べており、閾値電圧の違いをマーカーの形で、OHB と OHS の別をマーカーの色で分けている。

まず、OHB と OHS の差に着目すると、図 3.12 を見ると、#4 の 0.2V の場合と、

#4 の 0.6V の場合を除き、OHB よりも OHS の方が固有時間分解能が高いことがわかり、この傾向は図 3.12 でも確認できる。次に、ASD の種類ごとの傾向に着目すると、図 3.11、図 3.12 とともに、位相補償コンデンサ C5 (2.2.3 参照) を加えた #5 から #7 よりも、C5 を含まない #1 から #4 の方が固有時間分解能が優れている傾向がある。最後に、コンパレータの閾値電圧による変化に着目すると、#1 から #4 は閾値をあげるほど時間分解能が向上しており、#5 から #7 の場合、図 3.12 では明確な傾向は見られないが、図 3.11 では時間分解能が悪化する傾向が見られる。

OHB よりも OHS の方が時間分解能が良い傾向が生じるの理由について、それぞれの光路の違いによる影響を考えた。時間分解能とは、実際に事象が起こった時刻 t_0 と、それが認識された時刻 t_{obs} の差 $t_{obs} - t_0$ がどれくらいばらついているかということである。シンチレーションの同じ場所に同じ運動量を持つ同一の粒子が通過した場合でも、粒子が通過してからシンチレーション光が発されるまでの時間や、発生する光子の数、MPPC の量子効率、電気回路のノイズ等は揺らぐので、 $t_{obs} - t_0$ が常に一致するということはない。

ここではこれらに加えて、粒子が通過した点から MPPC までの距離、すなわち光路長の違いが $t_{obs} - t_0$ に与える影響を考える。例えば、図 3.13 のように、点 A と点 B のそれぞれに粒子が通過した場合を考えると、点 A から MPPC までの最短光路は OHB と OHS で変わらないため、理想的には $t_{obs} - t_0$ も変わらないが、点 B の場合は、OHS の方が光路が短く、理想的には $t_{obs} - t_0$ が小さくなる。この差が時間分解能に与える影響を考えた。

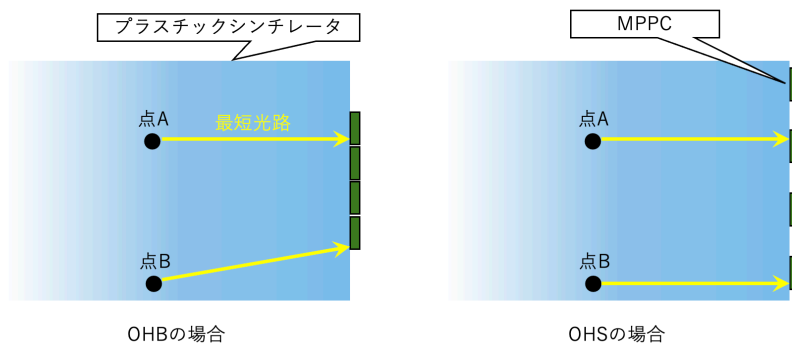


図 3.13: OHB と OHS の光路分布の違いを表したもの。OHB は光検出器が中央に束ねられているため、短手方向の端での事象を認識する時刻が OHS に対して遅れる。

セットアップ A、B とともに、OH を粒子が通過する点は、トリガーとの重なりから、シンチレータの中央付近に限定される。長手方向 400 mm の二等分線上に粒子が通過したとすると、短手方向の幅は 50 mm であるため、光路長の差は単純に見積もっても $\sqrt{200^2 + 25^2} - 200 \simeq 1.56$ mm が最大となる。プラスチックシンチレー

タ中の光速はおよそ $0.6c$ であるので、時間差にすると $\frac{1.56 \text{ mm}}{0.6c} \simeq 8 \text{ ps}$ となる。したがって、光路差の影響を除いた時間分解能が 120 ps であったとすると、光路差の影響を加えた時間分解能は、 $\sqrt{120^2 + 8^2} \simeq 120.3 \text{ ps}$ となり、影響はほとんどないことがわかる。よって、OHB よりも OHS の方が固有時間分解能が高い傾向は、光路差以外の要因によるものである。

一方、#1 から #4 に見られる、コンパレータの閾値電圧をあげるほど時間分解能が向上することについて、本来であれば、ノイズの影響を受けない範囲で、閾値を下げれば下げるほど、少ない光子数で閾値を超えるため、早い段階で事象を認識できることになり、時間分解能は向上するはずである。しかし、反対に閾値を上げていけば、閾値を超えないような弱い信号を無視することになり、分解能の悪い事象を捨てた結果、見かけの上で向上するということが起こりうる。この現象を調べるには、閾値のみを変えた測定で得られた検出効率や ToT の分布を比較し、どのような事象がどれだけ捨てられているかを分析することで影響を推測できると考えるので、今後の課題にしたい。

第 4 章

陽電子ビームラインでのテスト

4.1 目的

加速器によるビームを使用することで、検出器に粒子が当たる点を限定した上で効率よく性能を評価することができる。これにより、検出領域に幅をもつ検出器の、どの部分に粒子が当たった場合、どの程度の時間分解能と検出効率を発揮するのか、そのビーム照射位置依存性を確認することが目的である。

4.2 実験セットアップ

4.2.1 ビームライン

RARiS 三神峯の GeV - γ 照射室の陽電子ビームラインを利用した (図 4.1)。GeV - γ 照射室では、BST リング中の周回電子から制動放射によって取り出した光子ビームを、金属箔に照射することで電子・陽電子を対生成している。これを、RTAGX (双極電磁石) を用いて 30 度に運動量分析したものをビームとして用いる [13]。陽電子ビームの運動量は RTAGX に流す電流値によって設定することができるが、本実験では 350 A とした。これは、668.58 MeV/ c に対応している。

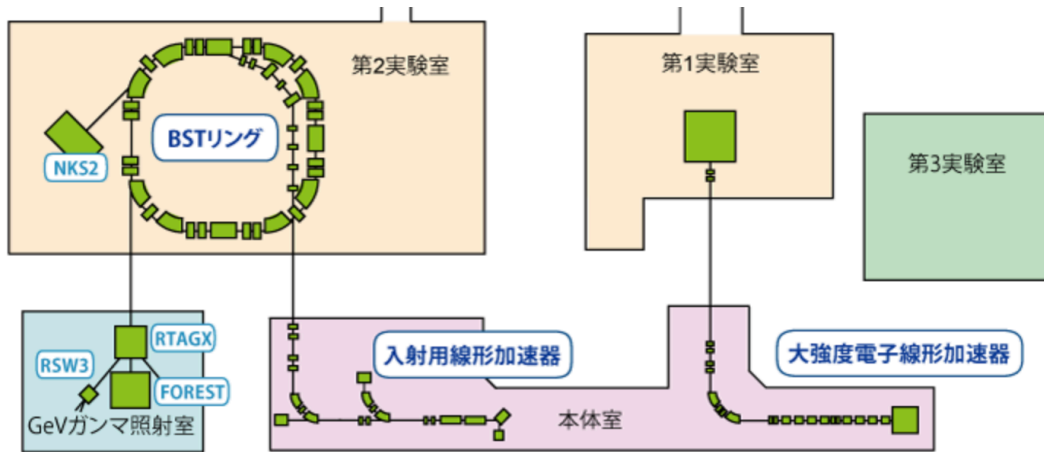
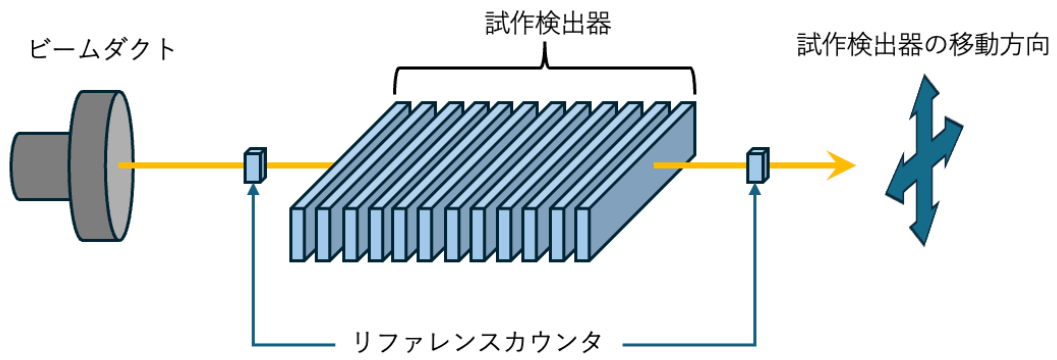


図 4.1: RARiS 三神峯事業所のビームライン

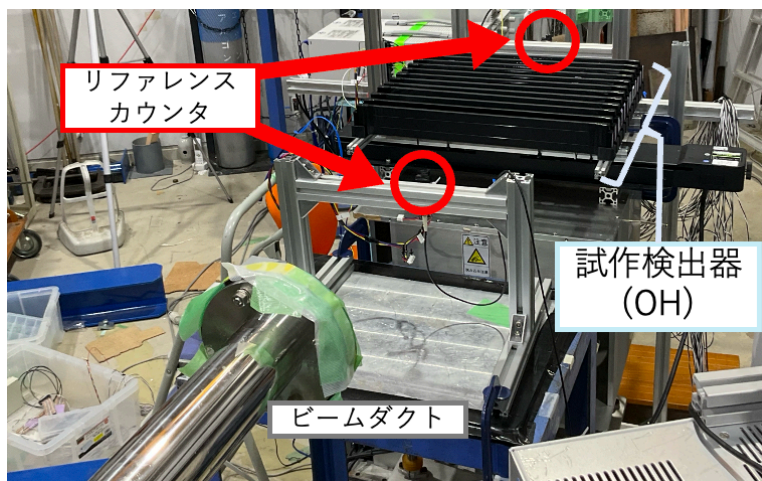
4.2.2 検出器群の配置

ビームライン上流から下流にかけて、OHBに#1、2、4、5、6、7の6種類のASDを取り付けたものと、OHSに同じく6種類のASDを取り付けたものの12種類を並べ、これらをリファレンスカウンタで挟んだ(図4.2)。ビームの照射位置を任意に調整するため、OHはビーム軸に垂直な方向に移動できるように、昇降台および一軸ステージの上に設置した(図4.4)。

リファレンスカウンタは、5 mm × 5 mm × 6 mm のプラスチックシンチレータとMPPCからなるもので、図4.3のようにビーム軸上に固定した。



(a) セットアップの概念図



(b) ビーム上流から見たセットアップの実際

図 4.2: ビームを用いた実験のセットアップ

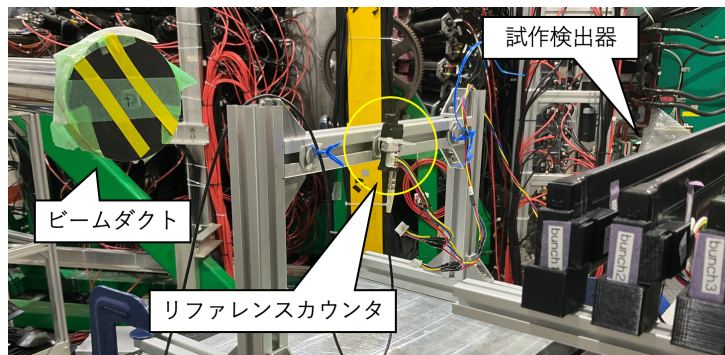


図 4.3: リファレンスカウンタの設置の様子。ビーム軸に乗るようにレーザー墨出し機を用いて位置を調整したのち、固定している。

からの出力をトリガーとして用いており、ビームが全検出器を透過したことを保証している。

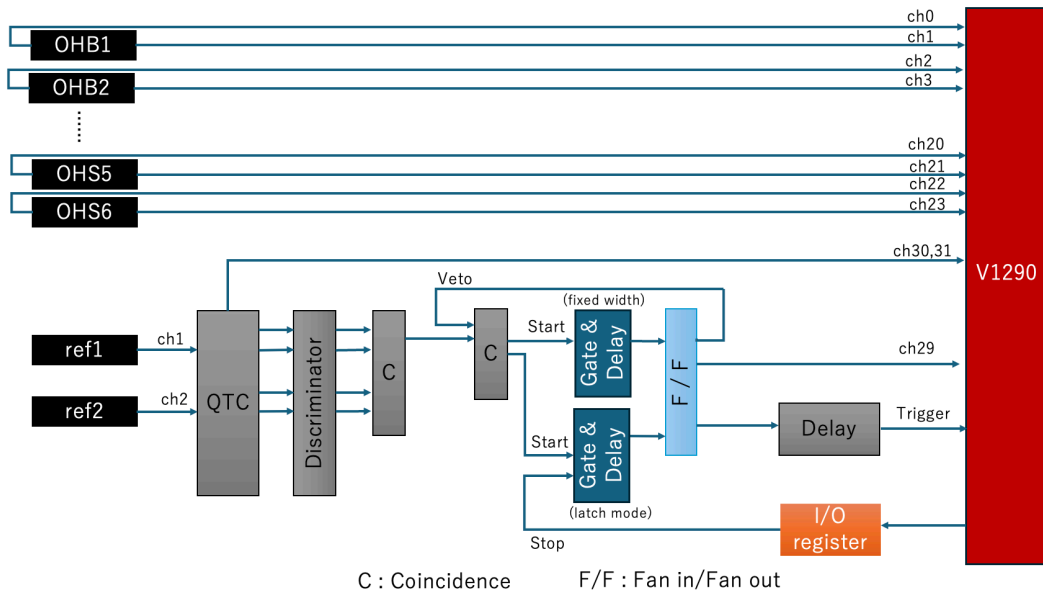


図 4.6: データ収集系の概念図。OH は、プラスチックシンチレータに MPPC および ASD を付加したものである。

4.3 解析手法

解析方法は 3 章と同じであるが、トリガーとして用いていた PMT の代わりに、OH どうして飛行時間の組みを 3 つ作り、slewing correction 行った上で連立方程式を解くことで固有時間分解能を算出する。

4.4 結果と考察

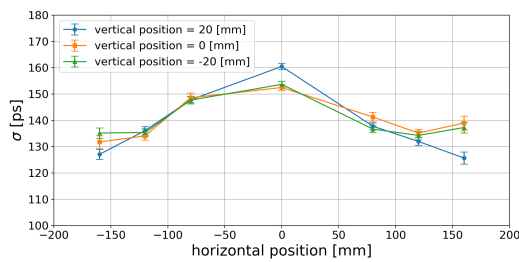
4.4.1 閾値依存性

コンパレータの閾値電圧を 0.15, 0.20, 0.4, 0.6 V で測定した。それぞれの時間分解能について述べる前に検出効率への影響に言及すると、0.4 V、0.6 V では検出効率が数 % と非常に低く、実用に耐えられないことがわかった。以下では 0.15, 0.2 V のみを対象として結果を示す。

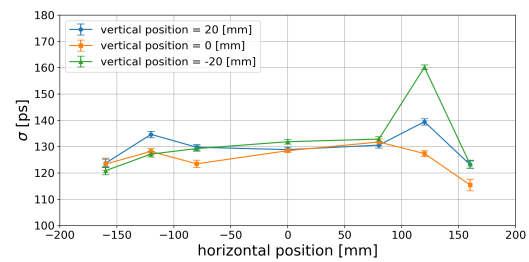
4.4.2 ASD 依存性およびビーム照射点依存性

固有時間分解能

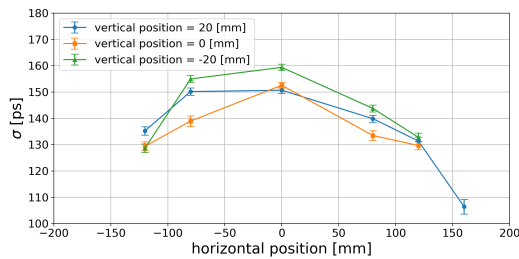
まず、0.2 V の場合の各照射点での固有時間分解能を算出し、それぞれの検出器ごとにプロットしたものを図 4.7、4.8 に示す。横軸は OH の長手方向の照射点であり、短手方向の違いはプロット点の色および形で示している。縦軸は固有時間分解能である。12 個のグラフを見比べると、有感領域の中心に近いほど時間分解能が悪くなる傾向を示すものが多い。



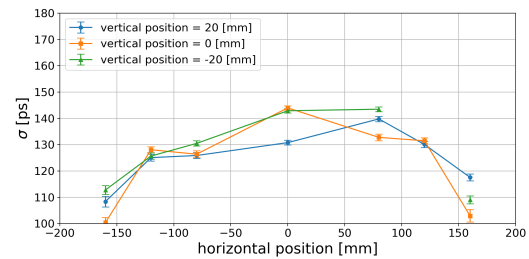
(a) OHB と #1



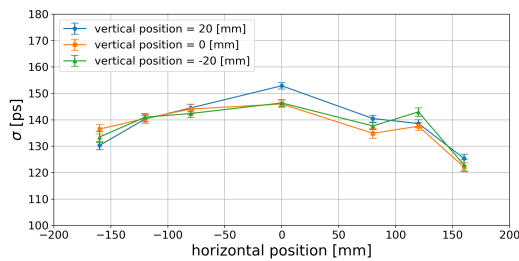
(b) OHS と #1



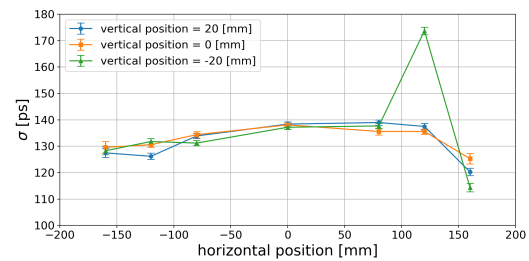
(c) OHB と #2



(d) OHS と #2



(e) OHB と #3



(f) OHS と #3

図 4.7: 0.2V の場合の各照射点での時間分解能 (1/2)

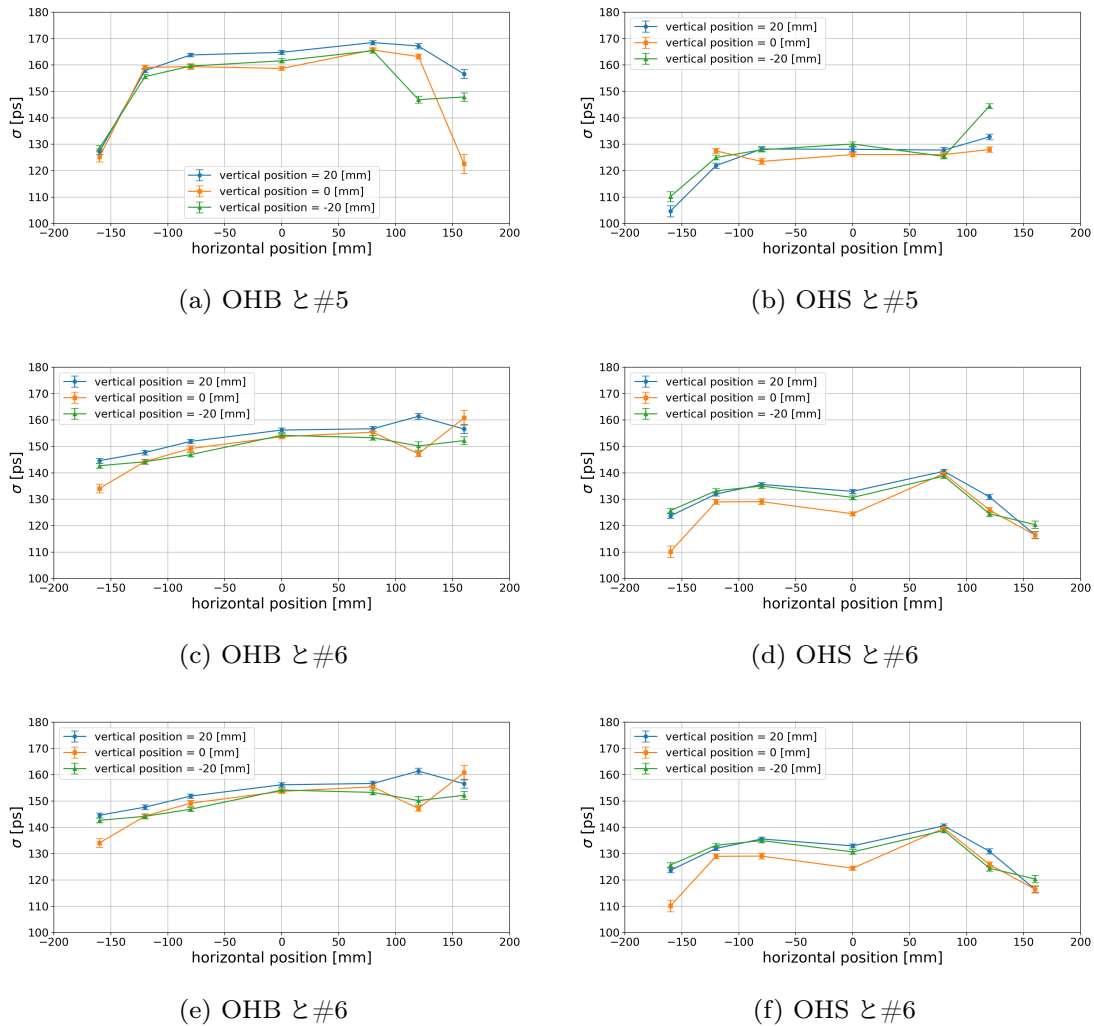


図 4.8: 0.2V の場合の各照射点での時間分解能 (2/2)

また、表 4.1 はそれぞれの検出器における固有時間分解能の最大値と最小値およびその差分をまとめたものであり、図 4.9 はそれぞれの検出器における固有時間分解能の散布図に、最大値から最小値までのレンジチャートを重ねたものである。MPPC の配置が異なる OHB と OHS では、OHS (プラスチックシンチレータの端面に等間隔に配置したもの (2.2.2 参照)) の方が時間分解能が高い傾向があるとわかった。この結果は、3 章の結果とも合致する。また、3.5 では OHB と OHS の光路差が時間分解能に与える影響について考察したが、図 4.7、図 4.8 を見ると照射点によらず全体的に OHB より OHS の方が時間分解能が高い傾向が見られるため、やはり光路差の影響ではないことが確認できる。

一方で、最も位置依存性が小さく、時間分解能が良いものとして OHS と #6 の組み合わせで、 $\sigma = 110.2 \pm 2.2$ ps 以上 $\sigma = 140.6 \pm 0.8$ ps 以下の検出器が得られた。これは、3 章では、#5 から #7 よりも #1 から #4 の方が固有時間分解能が優れている傾向があったことに反するため、再確認の必要がある。

表 4.1: 各検出器の時間分解能の最大最小

	最大 [ps]	最小 [ps]	最大-最小 [ps]
OHB #1	160.5	125.7	34.8
OHS #1	160.2	115.5	44.7
OHB #2	159.4	106.5	52.9
OHS #2	144.0	100.4	43.6
OHB #4	152.9	122.1	30.8
OHS #4	173.7	114.4	59.3
OHB #5	168.5	122.6	45.9
OHS #5	144.5	104.7	39.8
OHB #6	161.4	134.1	27.3
OHS #6	140.6	110.2	30.4
OHB #7	160.1	129.4	30.7
OHS #7	149.5	118.3	31.2

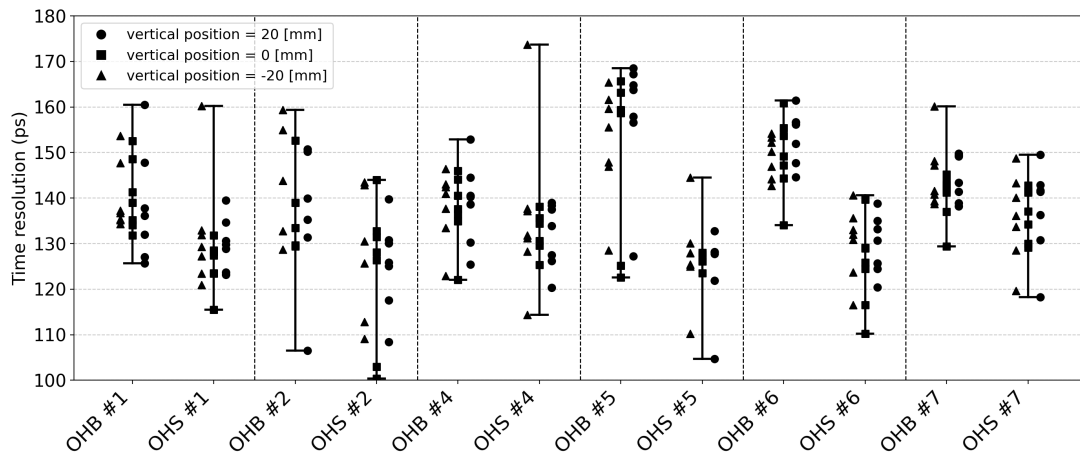
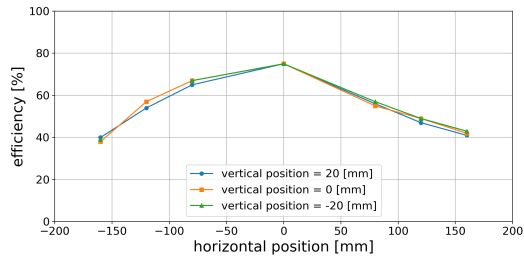


図 4.9: 各検出器の時間分解能の最大値から最小値までの分布。マーカーの形の違いは、図 4.7、4.8 と同様で短手方向の照射位置の違いを示しており、点が重ならないように左右にずらしてプロットしている。同一マーカーの各点は長手方向の照射点による時間分解能の違いを示している。

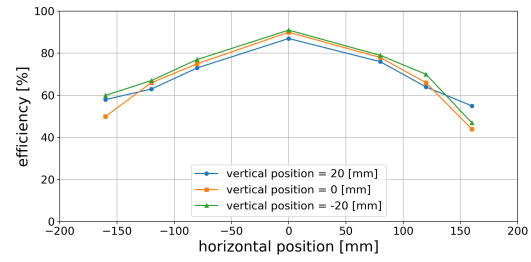
検出効率

続いて、検出効率の ASD 依存性およびビーム照射点依存性について図 4.10、4.11 に示す。検出効率とは、OH 群の前後に設置したリファレンスカウンタの双方からシグナルが得られた時に、各 OH の左右両方の読み出し口からもシグナルが得られる割合のことである。図 4.10 から 4.11 を見ると、12 本すべての OH で、有感領域

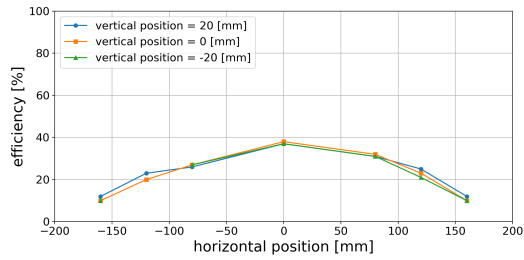
の中央に近づくほど高くなる傾向があることがわかった。



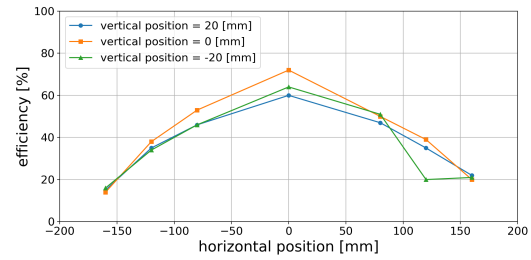
(a) OHB と #1



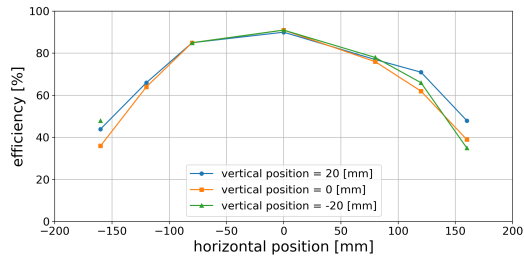
(b) OHS と #1



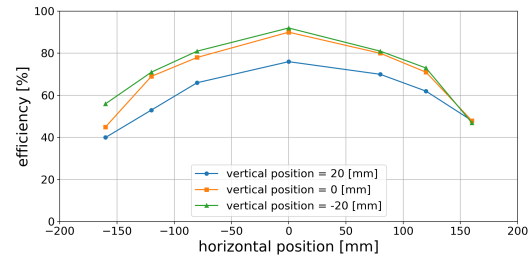
(c) OHB と #2



(d) OHS と #2



(e) OHB と #4



(f) OHS と #4

図 4.10: 0.2V の場合の各照射点での検出効率 (1/2)

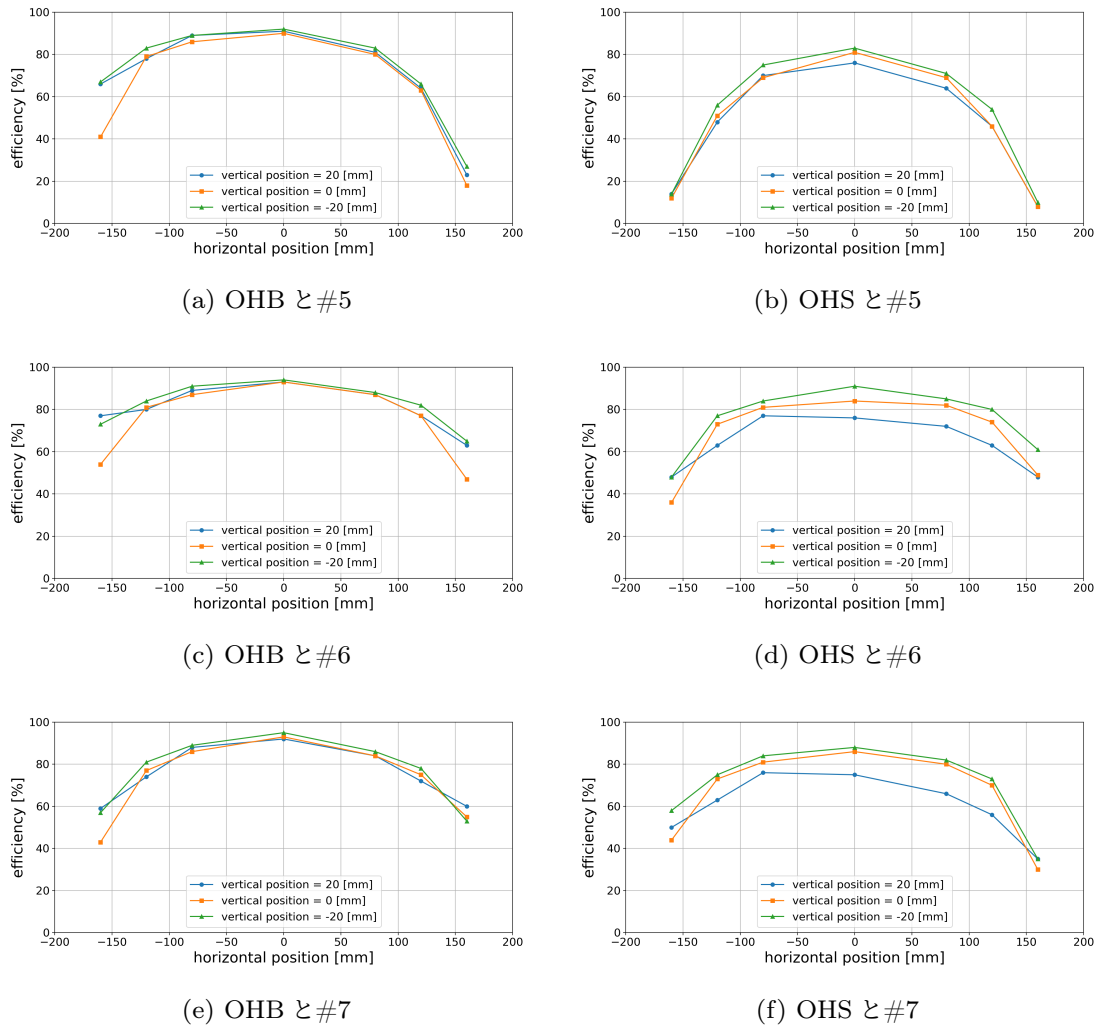


図 4.11: 0.2V の場合の各照射点での検出効率 (2/2)

有感領域の端にいくほど検出効率が落ちる原因について次のように考察する。図 4.12 は、検出効率の最大と最小の差が特に大きな、OHS と #5 の組み合わせについて、長手方向に 0, ± 80 , ± 120 , ± 160 mm、短手方向 0mm にビームを照射した時の検出効率について、両方の読み出し口の検出効率（上）および、片方の読み出し口の検出効率（下）を共にプロットしたものである。下の図を見ると、x 軸の正の向きの読み出し口と x 軸の負の向きの読み出し口はともに、照射位置が読み出し口から離れると検出効率を落とすことを示している。つまり、照射位置が読み出し口から遠いと、シンチレーション光が MPPC まで届きにくくなると考えられ、これを改善することで検出効率の位置依存性を減らすことが期待される。このような傾向は、OHS と #5 の組み合わせに限らず、すべての OH に見られた。

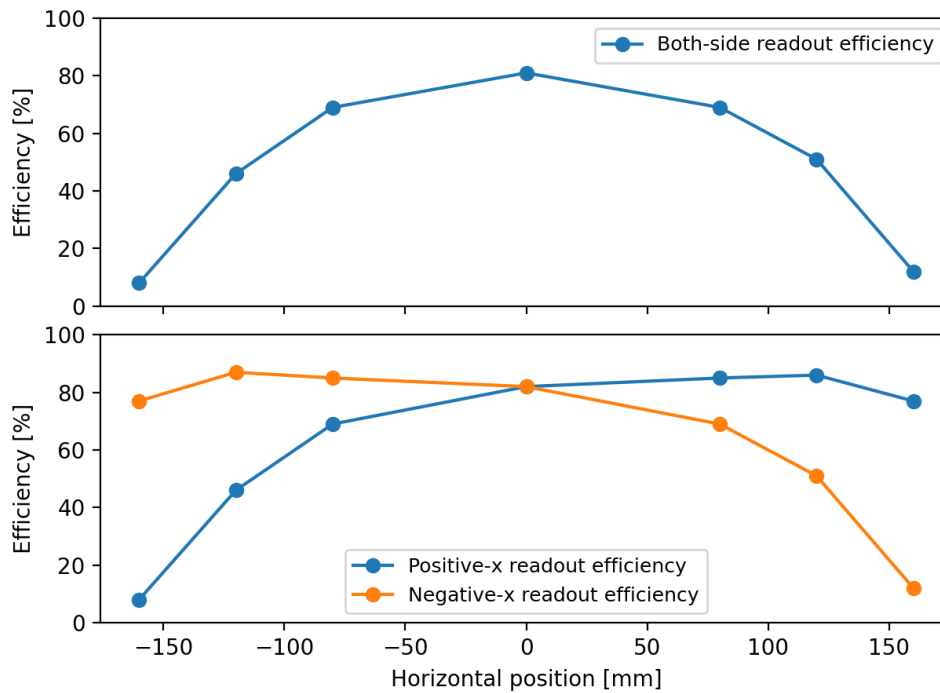


図 4.12: OHS と #5 の検出効率を抜粋したもの

表 4.2 および図 4.13 は、それぞれの検出器における検出効率の最大値から最小値までの差を示した表および、それぞれの検出器における検出効率の散布図に最大値から最小値までのレンジチャートを重ねたものである。これをみると、#2 を使用した OH は、OHB と OHS とともに検出効率が全体的に低い。これが ASD の特性によるものなのか、OH 本体の問題なのかは、4.4.4 で評価する。

表 4.2: 各検出器の検出効率の最大最小

	最大 [%]	最小 [%]	最大-最小 [%]
OHB #1	75	38	37
OHS #1	91	44	47
OHB #2	38	10	28
OHS #2	72	14	58
OHB #4	92	35	57
OHS #4	92	40	52
OHB #5	92	18	74
OHS #5	83	8	75
OHB #6	94	47	47
OHS #6	91	36	55
OHB #7	95	43	52
OHS #7	88	30	58

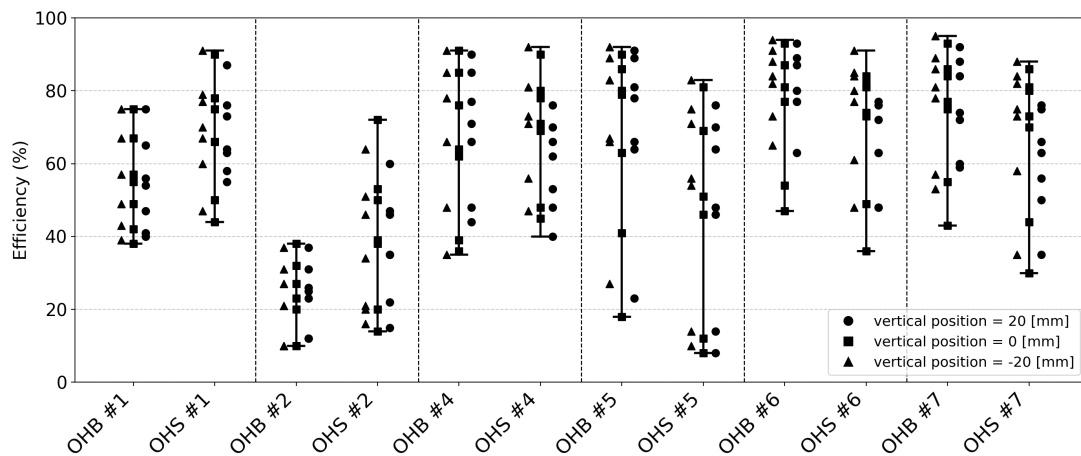


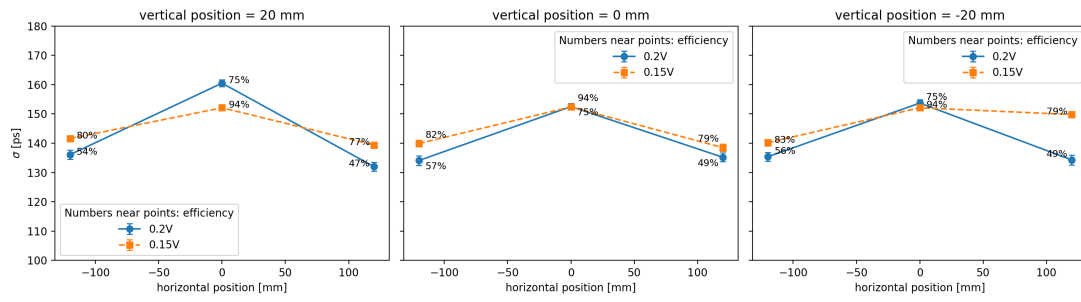
図 4.13: 各検出器の検出効率の最大値から最小値までの分布

4.4.3 0.2 V と 0.15 V での比較

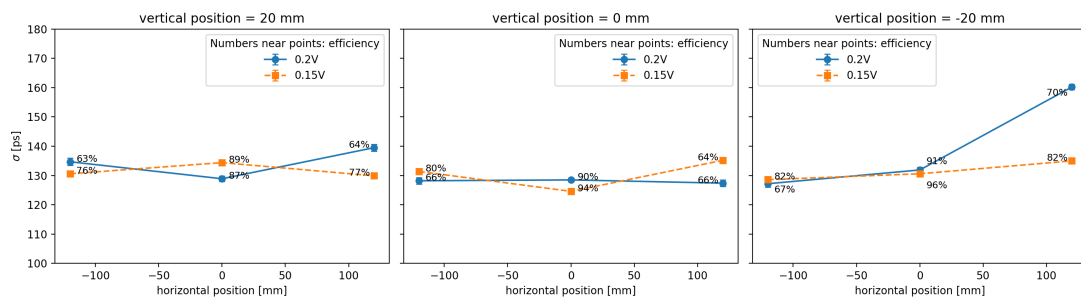
固有時間分解能および検出効率が、コンパレータの閾値電圧にどのように依存するかを評価する。0.15 V の場合では、長手方向に 0, ± 120 mm のみデータを取得した。これらについて 0.2 V の場合と比較した。図 4.14 から 4.16 は、0.2 V の場合と 0.15 V の場合の、時間分解能および検出効率を比較したグラフである。左、中、右に 3 つ並べられたそれぞれのグラフは短手方向の照射位置の違いを反映しており、各グラフの横軸は OH の長手方向の照射位置である。プロット点および縦軸は固有

時間分解能を示し、プロット点の横に記した数値は検出効率である。

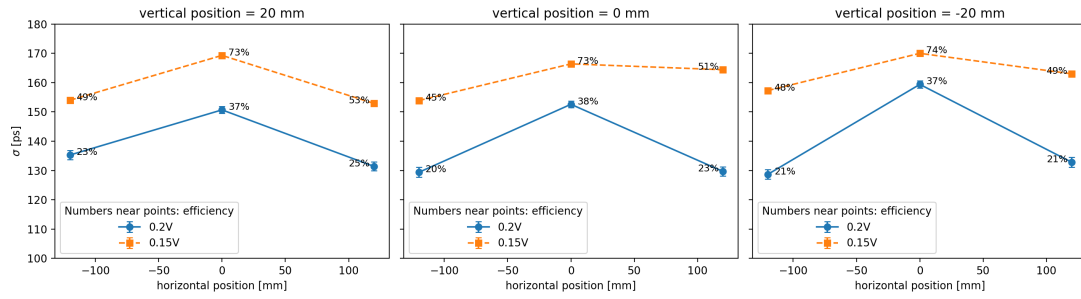
さらに、時間分解能に着目して散布図に最大値から最小値までのレンジチャートを重ねたものが図 4.17 であり、検出効率に着目したものが図 4.18 である。コンパレータの閾値を下げることにより、時間分解能および検出効率が向上することが期待されるが、図 4.17 を見ると、時間分解能については優位な向上が見られない。また、検出効率に関しては、#1 から#4 では向上しているように見えるが、#5 から#7 では反対にやや悪化している。



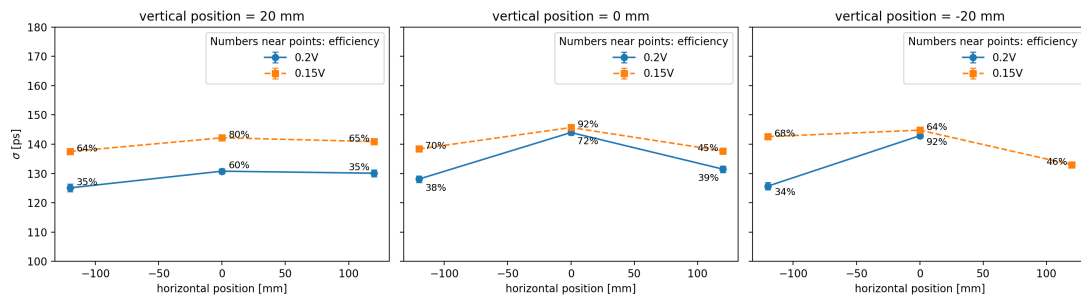
(a) OHB と #1



(b) OHS と #1

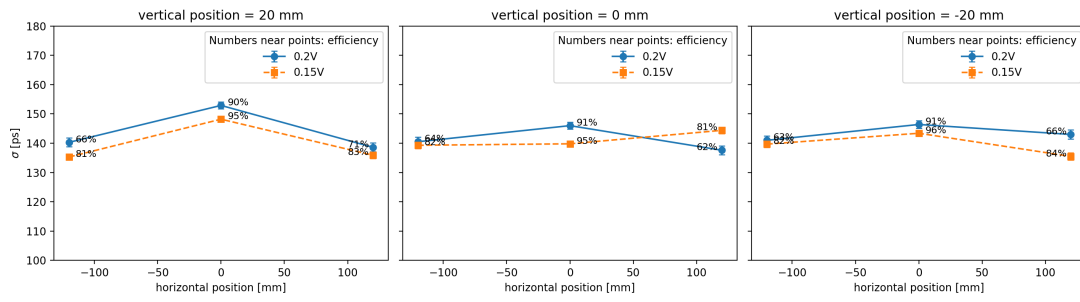


(c) OHB と #2

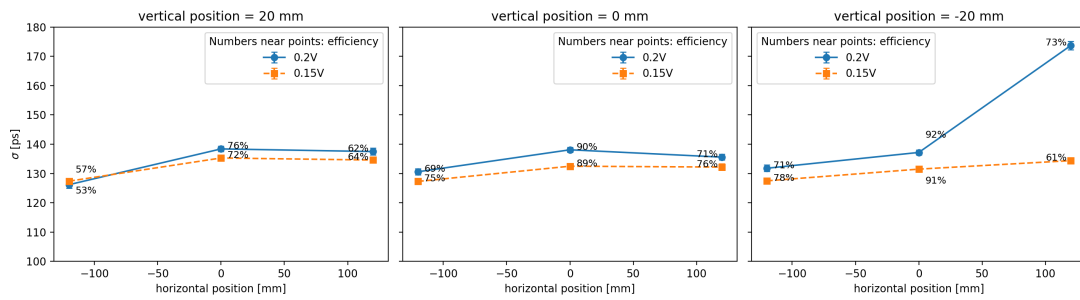


(d) OHS と #2

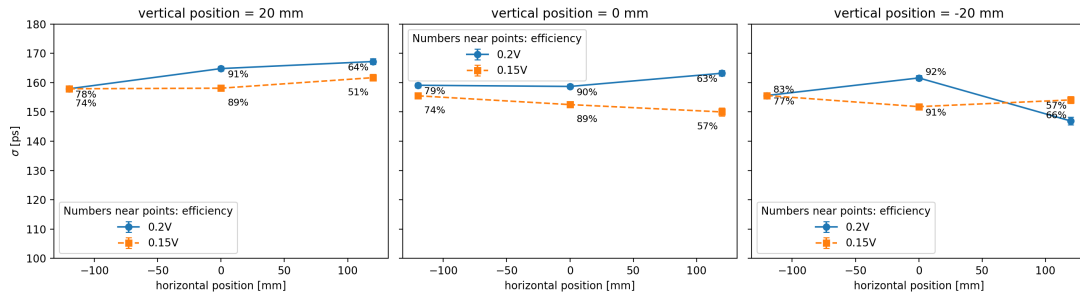
図 4.14: 0.2V の場合と 0.15V の場合の比較 (1/3)



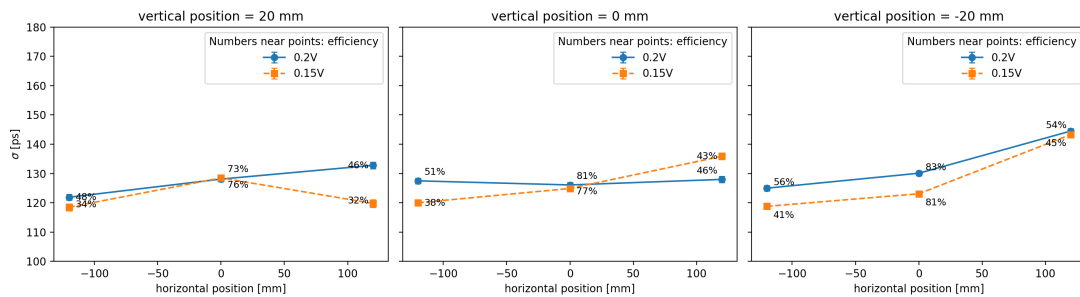
(a) OHB と #4



(b) OHS と #4

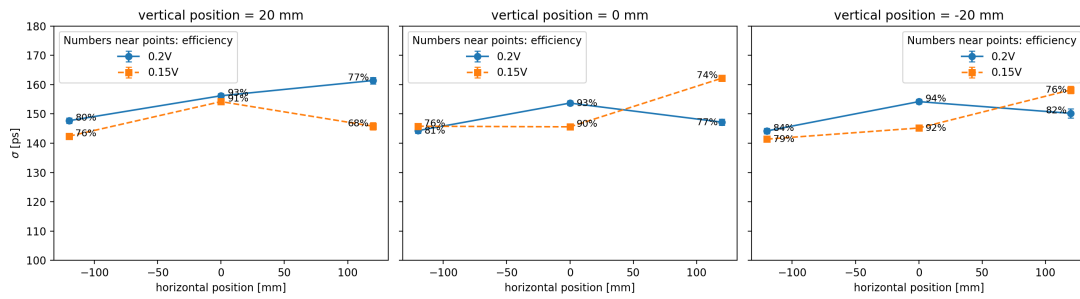


(c) OHB と #5

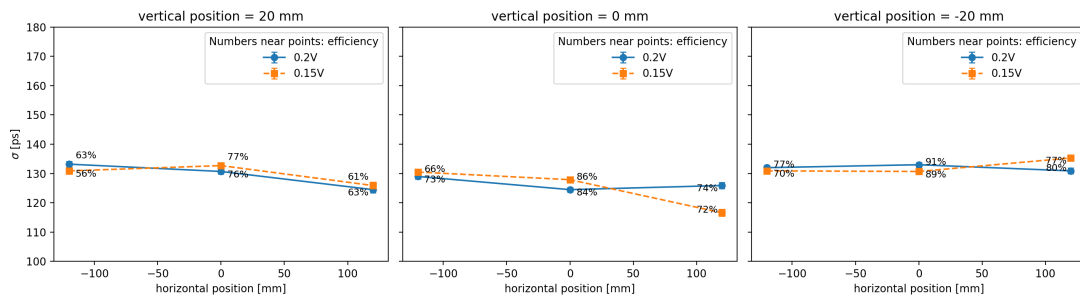


(d) OHS と #5

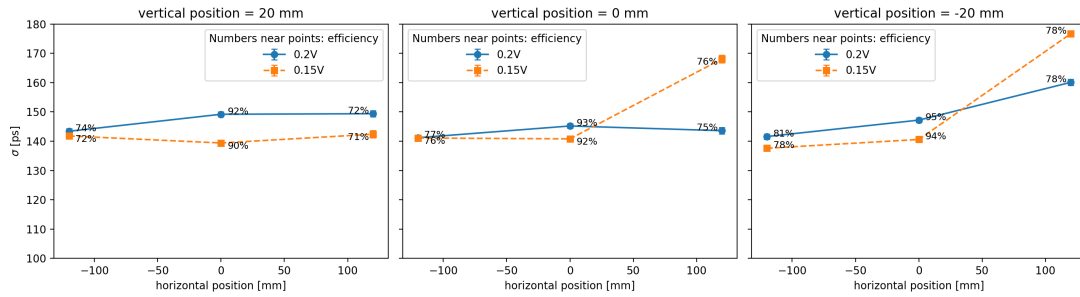
図 4.15: 0.2V の場合と 0.15V の場合の比較 (2/3)



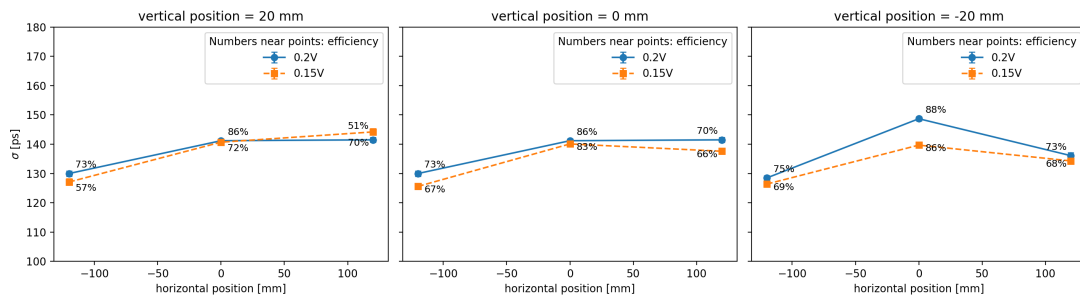
(a) OHB と #6



(b) OHS と #6



(c) OHB と #7



(d) OHS と #7

図 4.16: 0.2V の場合と 0.15V の場合の比較 (3/3)

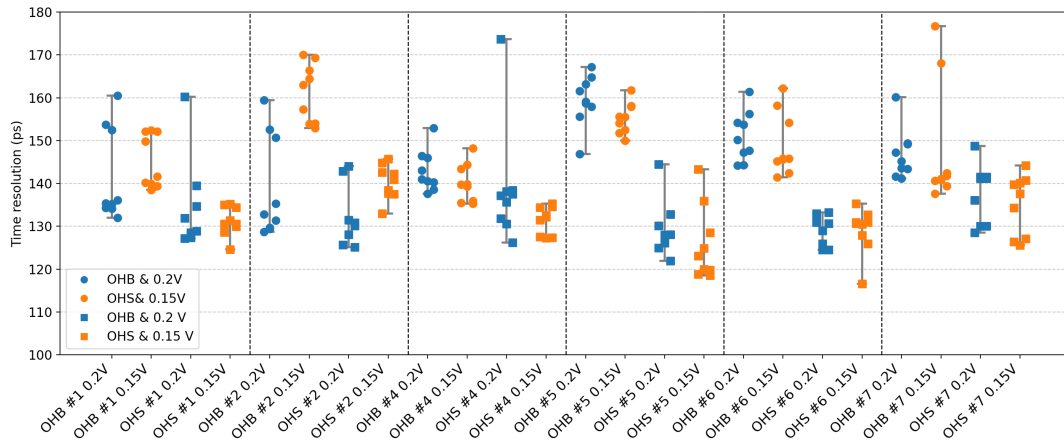


図 4.17: 0.15V、0.2V の各場合の時間分解能の比較

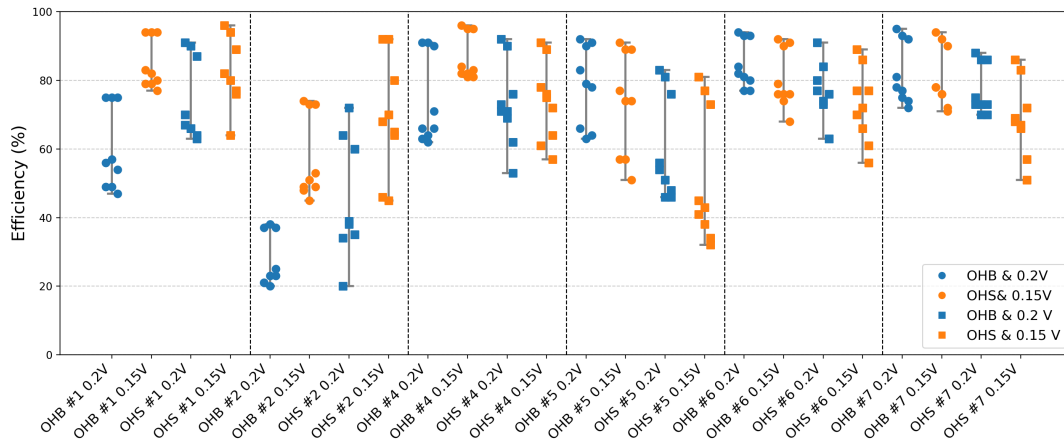


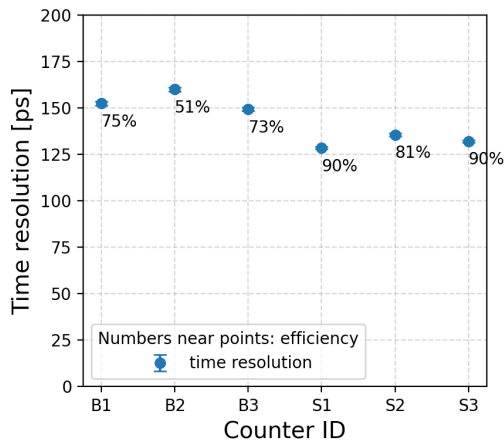
図 4.18: 0.15V、0.2V の各場合の検出効率の比較

4.4.4 OH 本体の個体差

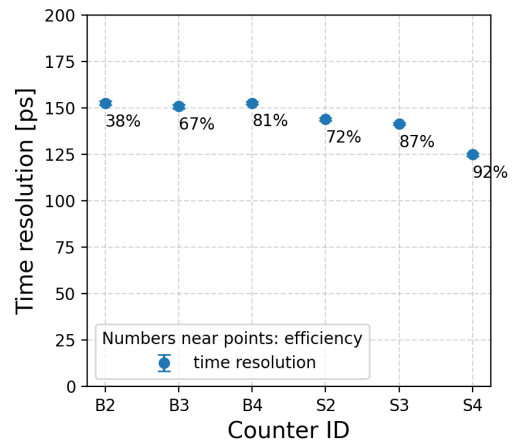
これまで分析してきた時間分解能や検出効率が、OH 本体の個体差に依るものかどうかを評価した。図 4.19 は ASD の種類を同じにし、OH 本体を取り替えた場合の時間分解能および検出効率をプロットしたものである。図 4.13 で見られた#2 の検出効率の悪さに着目する。まず、図 4.19 の (b) を見ると、検出効率の低い B2 とそれ以外では差がある。また、図 4.19 の (f) を見ると、OHB2、OHS2 であっても検出効率が低くない。これらの結果から、図 4.13 で見られた#2 の検出効率の悪さの原因は、ASD や OH 本体の特性ではなく、OH 本体と ASD の噛み合わせがもともと不十分であった可能性と、昇降台や一軸ステージの稼働に際して噛み合わせが悪化した可能性が考えられる。

OH 本体と ASD の噛み合わせがもともと不十分であった可能性について、MPPC と ASD を接続する配線基板では、ピンおよびソケットが手作業による半田付けで取り付けられているため、取り付け角度に個体差が生じ得る。その結果、今回の測定で使用した OH 本体と ASD の組み合わせにおいて、接触状態が不適切であった可能性がある。この点を検証するためには、同じ ASD の種類 (#2) であっても異なる個体を用いた測定を行い、結果を比較することが有効である。

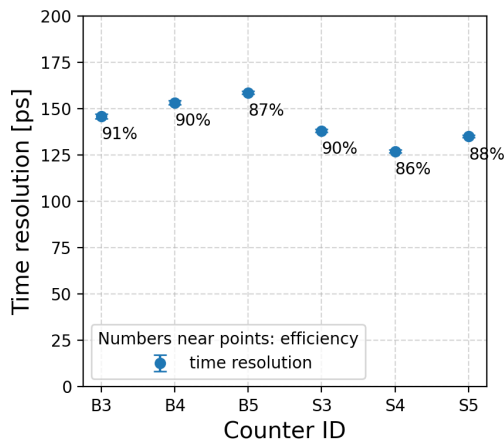
また、昇降台や一軸ステージの稼働に伴い、接続部の噛み合わせが測定中に悪化した可能性について、本実験では測定効率を優先し、OH 本体と ASD を容易に着脱できる構造としたが、その結果、重力や振動の影響を受けやすい構成となっていた。今後は、測定中に噛み合わせが変化しないようなジグを再設計する必要がある。



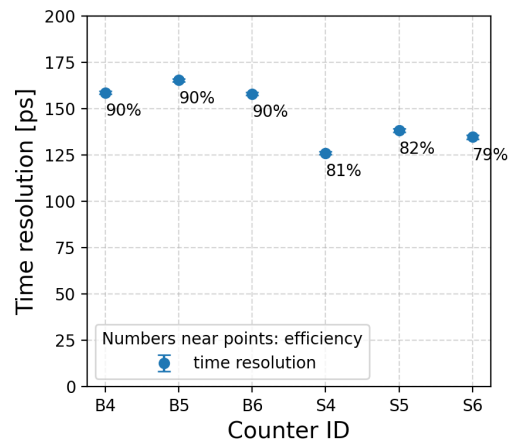
(a) ASD#1 に対して、OH 本体を B1,2,3,S1,2,3 を使用した場合の時間分解能および検出効率



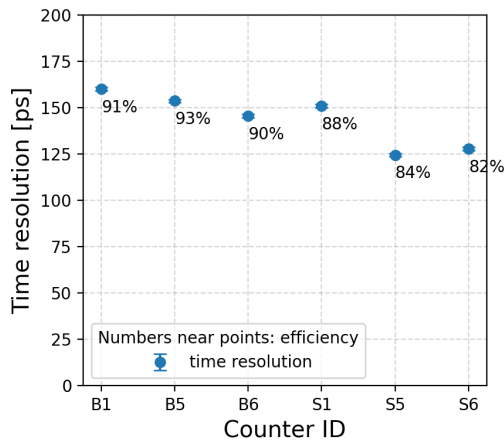
(b) ASD#2 に対して、OH 本体を B2,3,4,S2,3,4 を使用した場合の時間分解能および検出効率



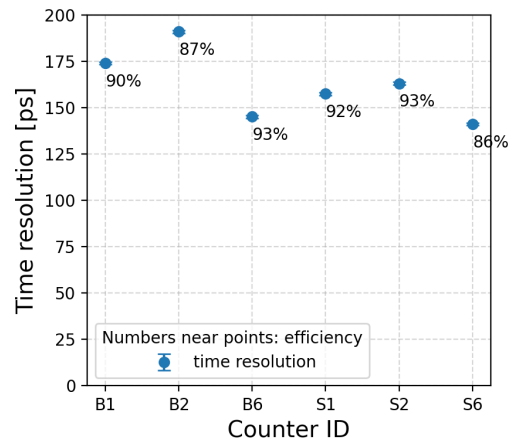
(c) ASD#4 に対して、OH 本体を B3,4,5,S3,4,5 を使用した場合の時間分解能および検出効率



(d) ASD#5 に対して、OH 本体を B4,5,6,S4,5,6 を使用した場合の時間分解能および検出効率



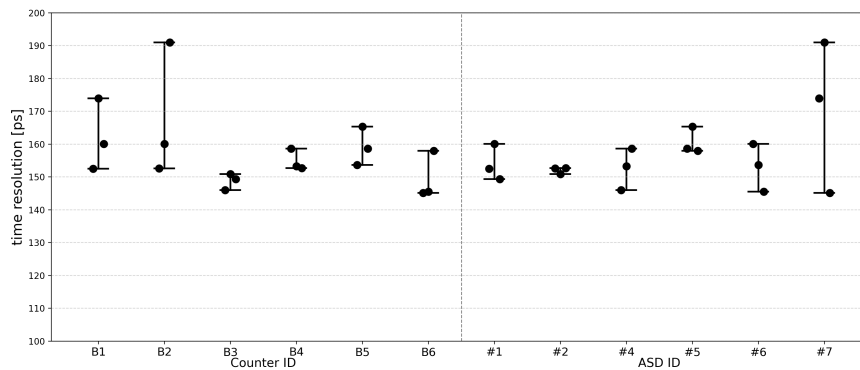
(e) ASD#6 に対して、OH 本体を B5,6,1,S5,6,1 を使用した場合の時間分解能および検出効率



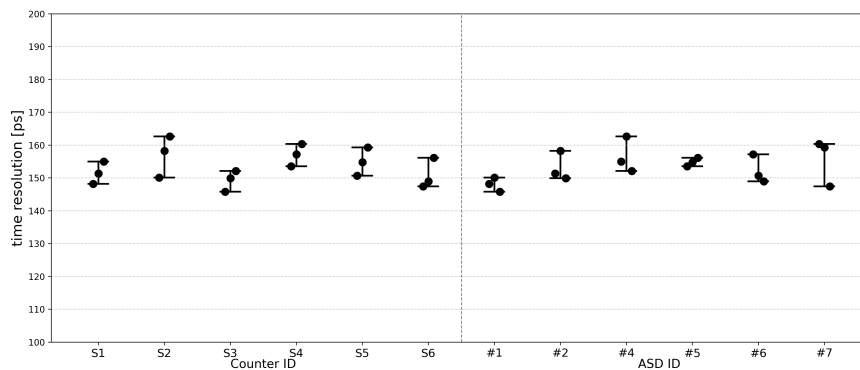
(f) ASD#7 に対して、OH 本体を B6,1,2,S6,1,2 を使用した場合の時間分解能および検出効率

図 4.19: ASD 固定し、OH 本体を取り替えた場合の時間分解能および検出効率

さらに、図 4.20 は、同じ OH 本体を用いて ASD を変えたもの、同じ ASD を用いて OH 本体を変えたものの時間分解能の散布図に最大値から最小値までのレンジチャートを重ねたものである。点線の左側は ASD の種類を変えたことによる時間分解能の変化量を示し、点線の右側は OH 本体を変えたことによる時間分解能の変化量を示している。例えば、もしも、OH 本体を変えたことによる時間分解能への影響が ASD の種類を変えたことによる影響よりも大きければ、点線の右側のレンジは大きく、左側のレンジは小さくなる。しかし、図 4.20 を見ると左右のどちらのレンジとも、数 ps から 50 ps であり、時間分解能の変化 ASD を変えたことによる要素と OH 本体を変えたことによる要素で切り分けることは難しい。



(a) OHB のみをまとめたもの



(b) OHS のみをまとめたもの

図 4.20: 同じ OH 本体を用いて ASD を変えたもの、同じ ASD を用いて OH 本体を変えたものの時間分解能の散布図にレンジチャートを重ねたもの。OHB と OHS で分けており、例えば (a) の B1 にある 3 点は図 4.19 の (a) の B1 と (e) の B1 と (f) の B1 であり、例えば (b) の #1 にある 3 点は図 4.19 の (a) の S1, S2, S3 である。

第5章

新飛行時間測定器の配置の検討

この章では、前章の測定結果を受けて、新飛行時間測定器をどの位置に配置することで、当初の目的である $\pi/K/p$ の識別が可能になるかを述べる。

5.1 配置の検討手法

質量二乗において、 $\pi/K/p$ を 3σ で分離することが可能な条件を求める。

5.1.1 質量二乗分布の分解能

2.1 節で述べたように、粒子の質量二乗は式 5.1 のように運動量 (p)、飛行時間 (t)、飛行距離 (l) から求めることが出来る。 β は速度を光速 c で割ったものである。

$$m^2 = p^2 \left(\frac{1}{\beta^2} - 1 \right) = p^2 \left(\frac{c^2 t^2}{l^2} - 1 \right) \quad (5.1)$$

この式により、測定された p 、 t 、 l から粒子の質量二乗分布を構成することができ、異なる粒子は異なる m^2 のピークとして観測される。粒子識別能力は、このピークがいかに分離できるかで評価される。誤差の伝搬を考えると、質量二乗分布の分解能 σ_{m^2} は式 5.2 のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_{m^2}^2 &= \left(\frac{\partial m^2}{\partial p} \sigma_p \right)^2 + \left(\frac{\partial m^2}{\partial t} \sigma_t \right)^2 + \left(\frac{\partial m^2}{\partial l} \sigma_l \right)^2 \\ &= \left[2p \left(\frac{c^2 t^2}{l^2} - 1 \right) \sigma_p \right]^2 + \left(2p^2 \frac{c^2 t}{l^2} \sigma_t \right)^2 + \left(-2p^2 \frac{c^2 t^2}{l^3} \sigma_l \right)^2 \end{aligned} \quad (5.2)$$

σ_{m^2} は運動量、飛行時間、飛行距離とそれぞれの分解能に強く依存することが分かるので、それらがどのように決定されていくかを次に述べる。

5.1.2 運動量

実際の NKS2 実験での運動量は、ドリフトチェンバーのトラッキング情報から求められるが、今回は、先行研究 [5] で行われたシミュレーションから導かれた、 σ_p と p の関係式を用いる。導出の手順は以下のようなものであった。

1. シミュレーションから、ある運動量 p_{gene} を持った粒子を生成する。
2. 生成したデータを実際の実験と同じ解析手法を用いて解析する。
3. トラッキングにより再構成した運動量 p_{rec} の分布に対してガウス関数でフィッティングする。得られたガウス関数の σ を $\sigma_{p_{\text{rec}}}$ と定義する。
4. p_{gene} に対する $\sigma_{p_{\text{rec}}}$ の比 $\sigma_{p_{\text{rec}}}/p_{\text{gene}}$ をトラッキングによる運動量分解能 [%] とする。
5. 手順 (1.) から (4.) を π 、 K 、 p の各粒子に対して様々な運動量で行う。

シミュレーションによって得られた図 5.1 に対し、式 5.3 でフィッティングすることで、 σ_p と p の関係式を得る。 a 、 b 、 c 、 d がフィッティングパラメータであり、 p_{gene} を x 、 $\sigma_{p_{\text{rec}}}/p_{\text{gene}}$ を $f(x)$ と表記した。

$$f(x) = a \exp(-x/b) + c + dx \quad (5.3)$$

π 、 K 、 p に対してフィッティングした結果が以下である。

$$\begin{aligned} f_{\pi}(x) &= 18.2 \exp(-x/0.05) + 0.89 + 4.11x \\ f_K(x) &= 2.15 \times 10^3 \exp(-x/0.03) + 1.66 + 3.30x \\ f_p(x) &= 5.98 \times 10^4 \exp(-x/0.03) + 2.83 + 2.11x \end{aligned} \quad (5.4)$$

5.1.3 飛行時間

飛行時間は粒子の飛行距離 l と速度粒子の速度 βc から、

$$t = \frac{l}{\beta c} = \frac{l}{c} \sqrt{1 + \frac{m^2}{p^2}} \quad (5.5)$$

と求めることができるため、運動量と飛行距離から決めることができる。飛行時間分解能は、4章で得られた最も位置依存性が小さく固有時間分解能の高い OH である、OHS と #6 の組み合わせにおいて、最も固有時間分解能の低い点の値 $\sigma = 140.6 \text{ ps}$ と、IH の固有時間分解能 $\sigma \sim 100 \text{ ps}$ より、 $\sqrt{(140.6)^2 + 100^2} \simeq 173 \text{ ps}$ を用いる。

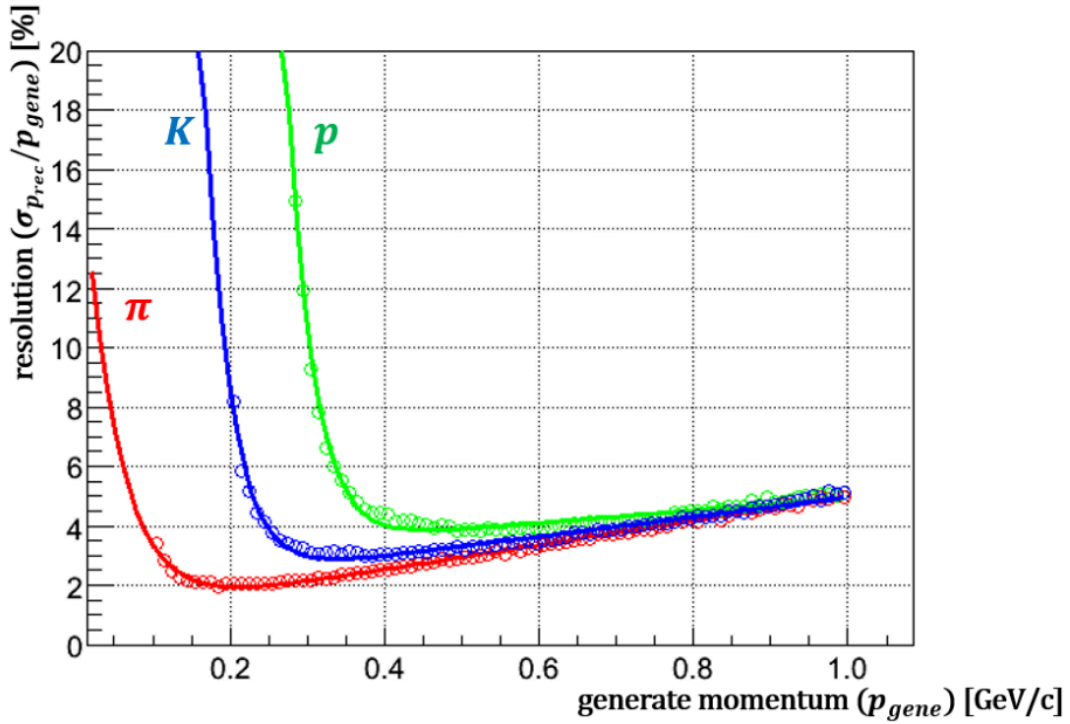


図 5.1: シミュレーションから得られた、 π 、 K 、 p の運動量と運動量分解能の関係。実線は式 5.3 でフィッティングしたものである。[5]

5.1.4 飛行距離

粒子が双極電磁石中をローレンツ力を受けて飛行することと、標的から IH（飛行時間を測定する OH のペア（参照））までがおよそ 170 mm 離れていることから、粒子が実際に飛行した道のり l_{gen} と、粒子が IH から OH の間を飛行した道のり l_{tof} と標的から飛行時間測定器までの距離 L を同じと考えることはできない。今回の計算では、第 0 近似として、双極電磁石中では磁場が一様であり、磁極の端 $L = 800$ mm から外側では磁場が無いとする。磁場強度を $B = 0.42$ T、粒子の電荷を q とすると、曲率半径 r は、

$$r = \frac{p}{0.3 q B} \quad (5.6)$$

で与えられるため、 $L \lesssim 800$ mm においては、 r 、 L 、 l の関係はそれぞれ円の半径、弦、弧の長さとなるため、

$$l = 2r \arcsin\left(\frac{L}{2r}\right) \quad (5.7)$$

と結ばれる。そして、粒子が磁極の端を通過すると直線運動を行う。このとき、

磁場中での飛行距離を l_B 、磁場外での直線飛行距離を $L - L_B$ とすると、 l_{gen} は

$$l_{gen} = l_B + (L - L_B) \quad (5.8)$$

と表される。ただし、磁場中の飛行距離 l_B は、磁場領域での直線長を $L_B = 800 \text{ mm}$ として、

$$l_B = 2r \arcsin\left(\frac{L_B}{2r}\right) \quad (5.9)$$

である。さらに、 l_{gen} から標的から IH までの道のりを差し引いた l_{tof} を $\sigma_{m^2}^2$ の算出には利用するから、

$$l_{tof} = l_{gen} - 2r \arcsin\left(\frac{170 \text{ mm}}{2r}\right) \quad (5.10)$$

である。

飛行距離分解能については、実際の実験では運動量と同様にトラッキング情報から決まるため、運動量分解能と相関がある。飛行距離分解能は運動量分解能と飛行時間分解能に比べて高いので、今回の計算では、0 としている。

5.2 計算と結果

5.2.1 粒子の到達可能性

粒子の平均飛行距離は、

$$\langle x \rangle = \beta\gamma c\tau \quad (5.11)$$

で与えられる。ここで γ はローレンツ因子、 τ は粒子の寿命である。運動量 p を用いると、

$$\beta\gamma = \frac{p}{m} \quad (5.12)$$

となるため、平均飛行距離は

$$\langle x \rangle = \frac{p}{m} c\tau \quad (5.13)$$

と書ける。

K^+ 、 p 、 π^+ が同一の運動量を持つ場合、寿命が最も短い K^+ [14] の平均飛行距離が最小となる。したがって、粒子の到達可能性の評価には K^+ に着目すれば十分である。

5.2.2 K^+ の運動量範囲

NKS2 を用いて $E_\gamma = 0.8\text{--}1.26\text{ GeV}$ の条件で実験を行った実績に対して、図 5.2 は $E_\gamma = 1250, 1150, 1050, 950\text{ MeV}$ の時の $\gamma + d \rightarrow K^+ + \Lambda + n$ 反応に対する、 K^+ の運動量および角度の相関を計算したものである。この図から、 K^+ の運動量上限は $0.92\text{ GeV}/c$ と与えられる。

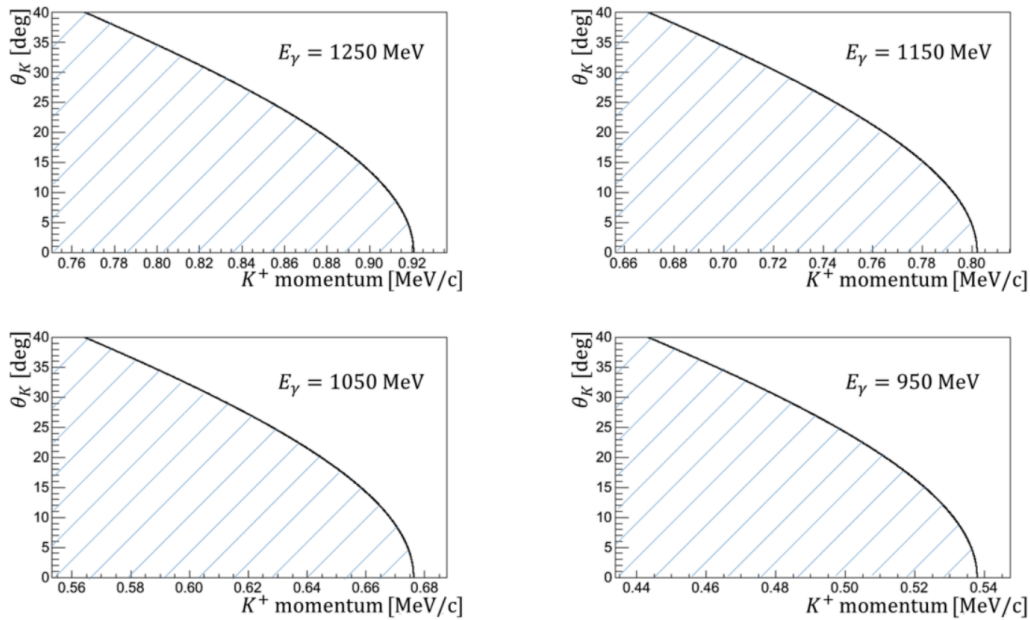


図 5.2: $E_\gamma = 1250, 1150, 1050, 950\text{ MeV}$ の時の $\gamma + d \rightarrow K^+ + \Lambda + n$ 反応に対する、 K^+ の運動量および角度の相関。黒線が Λn 生成閾値を表し、それより内側の斜線で示した領域が運動学的に生成しうる領域を表す。[5] より引用。

5.2.3 計算結果

粒子の運動量の範囲を $0.92\text{ GeV}/c$ 以下とし、 $\pi/K/p$ を 3σ で分離することが可能となる、標的から飛行時間測定器までの距離 L を、測定器が標的に近づける限界である、ドリフトチェンバーの外半径 800 mm 以上の範囲で計算したものが図 5.3 である。

図 5.3 から、最も分離が困難な条件である、運動量の上限 $0.92\text{ GeV}/c$ の場合でも、本研究で製作した新飛行時間測定器を $L = 2050\text{ mm}$ に並べることで、分離が可能であるとわかる。

ところで、 $L = 2050\text{ mm}$ に到達するのに必要な K^+ の運動量 p_{min} を算出したい。粒子の崩壊を考えなければ、磁場のある半径 800 mm の円を抜け出せさえすれば、その後直進して $L = 2050\text{ mm}$ に到達する。したがって、式 5.6 より、 $r = 400\text{ mm}$

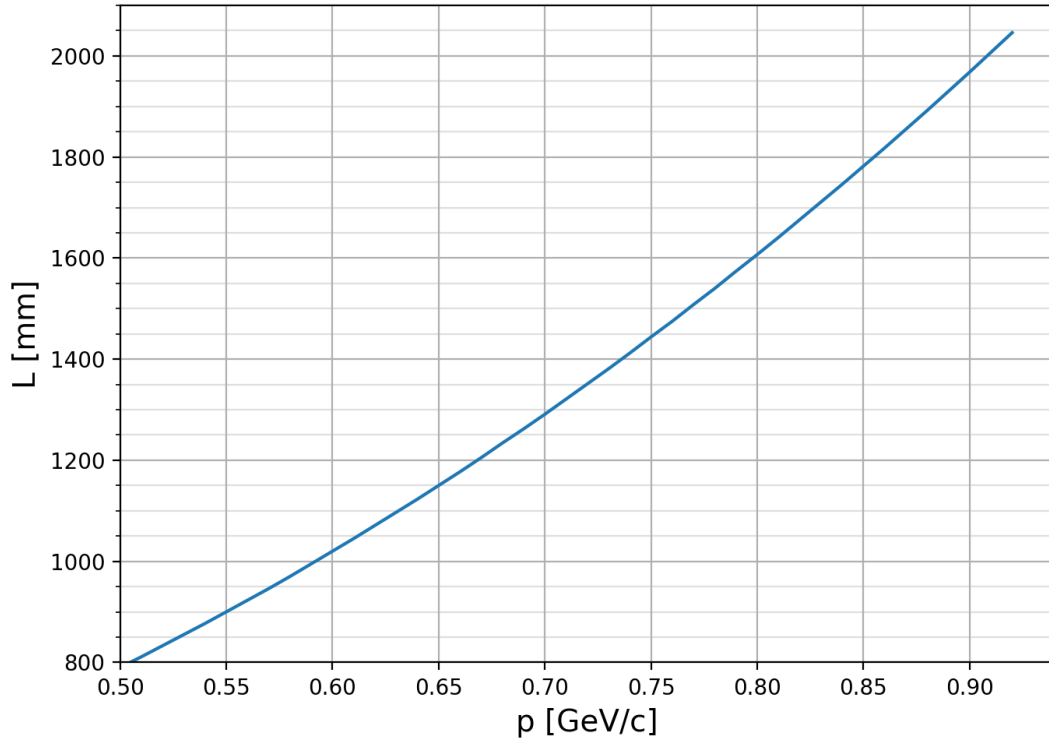


図 5.3: $\pi/K/p$ を 3σ で分離する検出器の設置位置。横軸は粒子の運動量であり、縦軸は、その運動量を持つ $\pi/K/p$ を 3σ で分離するために、検出器と標的が取らなければならない距離。

を代入して、 $p_{min} \sim 0.05 \text{ GeV}/c$ となる。

5.2.4 到達確率

最後に、OH を $L = 2050 \text{ mm}$ に設置した場合に、 K^+ が何 % 崩壊せずに残るのかを、運動量ごとに確認したい。 K^+ の平均寿命を τ 、質量を m 、運動量を p とすると、ローレンツ因子 $\gamma = \sqrt{1 + (p/mc)^2}$ により、飛行距離 l に対する到達確率 $P_{\text{surv}}(l)$ は

$$P_{\text{surv}}(l) = \exp\left(-\frac{l}{\gamma\beta c\tau}\right) \quad (5.14)$$

標的から OH までの道のり l_{gen} は、磁場領域中の円弧長と磁場外の直線距離の和で与えられるので、5.1.4 と同様に考えて、

$$P_{\text{surv}}(L) = \exp\left[-\frac{2r \arcsin\left(\frac{L_B}{2r}\right) + (L - L_B)}{\gamma\beta c\tau}\right] \quad (5.15)$$

となる。

本節では、 K^+ の運動量を 0.92, 0.80, 0.70, 0.60, 0.50, 0.40, 0.30, 0.20, 0.10 GeV/ c として、 $L = 0$ から 2050 mm の範囲で $P_{\text{surv}}(L)$ を計算した。その結果を図 5.4 に示す。ここで、 $L = 0$ における到達確率を 100% としている。

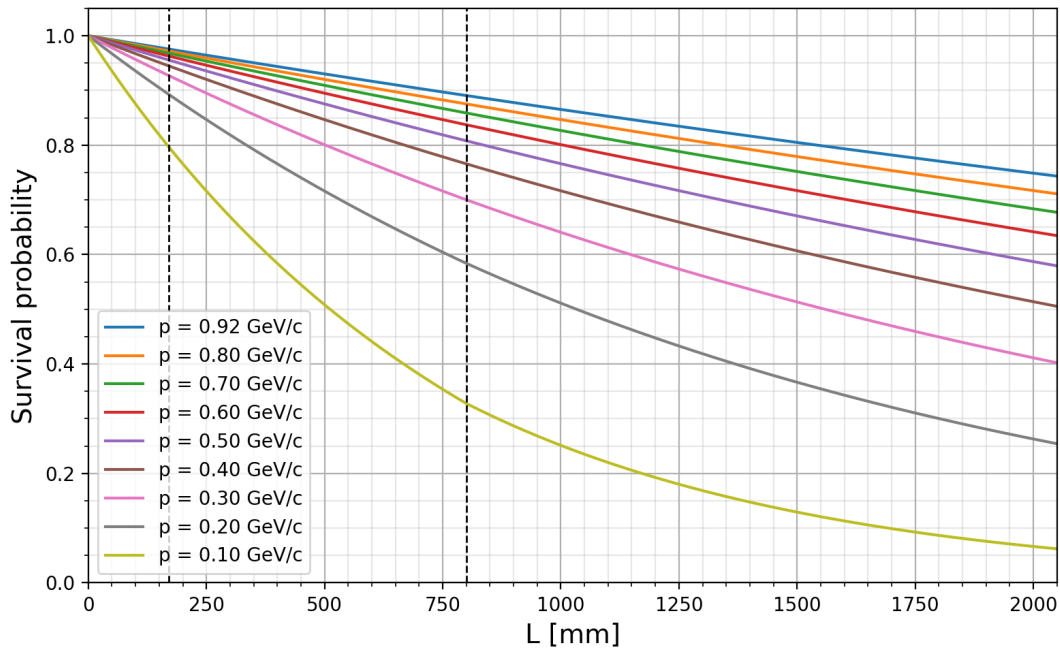


図 5.4: 標的からの距離と K^+ の到達確率。IH の設置される $L = 170$ mm およびドリフトチャンバーの外半径であり OH を設置可能な最小半径である $L = 800$ mm に点線を引いている。

また、図 5.4 から IH ($L = 170$ mm) までの到達確率、ドリフトチャンバーの終端 ($L = 800$ mm) までの到達確率、OH を設置すべき $L = 2050$ mm までの到達確率並びに、IH から $L = 2050$ mm までの到達確率、ドリフトチャンバーの終端から $L = 2050$ mm までの到達確率をまとめたものが表 5.1 である。

図 5.4 および表 5.1 から、現在提唱されている Λn 終状態相互作用のポテンシャルモデルのどれを支持し、どれを棄却するかを判断するために必要なビームタイムについて見積もることが可能となるが、今後の課題とする。

表 5.1: 標的からの IH、ドリフトチェンバーの終端、OH までの K^+ の到達確率および、IH から OH、ドリフトチェンバーの終端から OH までの K^+ の到達確率。

p [GeV/ c]	$P(170)$ [%]	$P(800)$ [%]	$P(2050)$ [%]
0.92	97.57	89.07	74.35
0.80	97.21	87.54	71.11
0.70	96.82	85.89	67.73
0.60	96.30	83.73	63.47
0.50	95.58	80.80	57.94
0.40	94.50	76.59	50.54
0.30	92.74	70.02	40.23
0.20	89.30	58.40	25.43
0.10	79.73	32.78	6.22

p [GeV/ c]	$P(2050)/P(170)$ [%]	$P(2050)/P(800)$ [%]
0.92	76.20	83.47
0.80	73.15	81.23
0.70	69.95	78.86
0.60	65.90	75.80
0.50	60.62	71.71
0.40	53.48	65.99
0.30	43.38	57.45
0.20	28.48	43.55
0.10	7.80	18.96

第6章

本研究のまとめ

我々は、 $\gamma + d \rightarrow K^+ + \Lambda + n$ 反応の終状態相互作用を測定する実験（NKS2 実験）を東北大学先端量子ビーム科学研究センター（RARiS）にて計画している。

この実験では、 K^+ および Λ 粒子の崩壊によって生じる陽子と π^+ を識別可能であることが重要だが、現在設置されている飛行時間測定器の組み合わせでは困難であった。先行研究では、測定器の位置をそのままとした場合、飛行時間分解能 $\sigma \sim 160$ ps の組み合わせに置き換えることで、 $\pi/K/p$ それぞれの 3σ の領域に他の粒子が混入する確率を 5% 以下にできることが確かめられた。また、続く研究で、2 層の飛行時間測定器のうち内側に設置する測定器を、固有時間分解能 $\sigma \sim 100$ ps に改善することができたため、飛行時間分解能 $\sigma \sim 160$ ps を達成するために、外側に設置する測定器に対し、固有時間分解能 $\sigma \sim 125$ ps を達成するものを新たに開発することを目標とした。

本研究では、プラスチックシンチレータと SiPM、ASD を組み合わせた試作器を複数種類製作し、宇宙線および陽電子ビームを用いて性能評価を行った。試作検出器の固有時間分解能および検出効率の粒子通過位置依存性を測定により把握し、その結果として、最も位置依存性が小さく、時間分解能が良い検出器として $\sigma = 110.2 \pm 2.2$ ps 以上 $\sigma = 140.6 \pm 0.8$ ps 以下のものが得られた。当初の目標であった $\sigma \sim 125$ ps を達成することはできなかったが、当検出器を用いた場合、標的からの距離を、従来およそ 1200 mm であったところを、本研究で作成した新飛行時間測定器を、2050 mm の場所に並べることで、 $\pi/K/p$ を 3σ で分離可能であることが確認された。

参考文献

- [1] HIggs_tan, 標準模型の基本粒子, <https://higgstan.com/standerd-model/>
- [2] O. Hashimoto and H. Tamura. Spectroscopy of Λ hypernuclei. *Progress in Particle and Nuclear Physics*
- [3] 水野 柁哉 東北大学 修士論文 (2021)
- [4] M. Kaneta et al., arXiv:1711.03653
- [5] 竹内大貴 東北大学 修士論文 (2017)
- [6] 藤原友正 東北大学 修士論文 (2021)
- [7] 浜松ホトニクス株式会社. <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/why-hamamatsu.html>
- [8] 浜松ホトニクス株式会社, MPPC S13360-3050PE. https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc_array/S13360-3050PE.html
- [9] 浜松ホトニクス株式会社, MPPC とは. https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html
- [10] Semi journal, 半導体解説, デバイス, イメージセンサ, フォトダイオードとは? デバイス構造と原理. <https://semi-journal.jp/basics/device/image-sensor/photodiode.html>
- [11] ANALOG DEVICES, LTC6754. <https://www.analog.com/jp/products/ltc6754.html>
- [12] ANALOG DEVICES, LTSpice. <https://www.analog.com/jp/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- [13] クォーク核物理研究部, 過去のページ, GeV γ ビームライン, <https://www1.lns.tohoku.ac.jp/hadron/bk/beamline.html>
- [14] particle data group, Summary Tables, Mesons. <https://pdg.lbl.gov/2025/tables/rpp2025-sum-mesons.pdf>