

修士学位論文

LEPS2実験に用いる Time Projection
Chamber の性能評価



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

古田 悠稀

2020年3月1日

概要

兵庫県西播磨郡に位置する大型放射光施設 SPring-8 において LEPS2(Laser Electron Photon experiment at SPring-8) 実験が進められている。LEPS2 実験は専用ビームラインにて、 10^7 個/s、最大 3 GeV という高輝度高エネルギーの γ 線を標的に照射し、光生成反応を測定する実験であり、ペンタクォークハドロンとされている Θ^+ の探索及び、メソンバリオン束縛状態である可能性が示唆されている $\Lambda(1405)$ の構造分析を主たる目的としている。

$\gamma p \rightarrow K^{*+} \Lambda(1405)$ 反応における K^{*+} 及び $\Lambda(1405)$ の崩壊粒子や、 $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+$ 反応における K^- 及び Θ^+ の崩壊により崩壊し生成され、大散乱角に放出される粒子を全て検出するため、ほぼ 4π の立体角を覆う内径 2.2 m の大型ソレノイド型スペクトロメータを設計し、各検出器の開発を進めている。

前方に放出された荷電粒子は Drift Chamber (DC) 及び Forward Barrel Resistive Plate Chamber (FRPC) で検出する。側方に放出された荷電粒子は Time Projection Chamber (TPC), Barrel RPC (BRPC), Aerogel Cherenkov Counter(AC) 及び Barrel γ Counter で検出する。本研究では TPC の性能評価を行った。

本研究ではドリフト速度が正常時よりも半分近く遅い TPC について、固有位置分解能の評価及び TPC における荷電粒子のエネルギー損失の計算方法の最適化を行った。このエネルギー損失はパッドに誘起された電荷量に比例するが、ランダウ分布に従うため分布のテールがエネルギー損失の計算精度を悪くしている。そこで各トラックごとの全ヒットの中で電荷量の大きいヒットを除いてエネルギー損失を計算することで計算精度の向上を試みた。

TPC は 3 次元的に荷電粒子の飛跡を検出する検出器である。本実験での運用に当たって、TPC には LEPS2 実験の主たる目的である $\Theta^+ \rightarrow K_s^0 p$ の不変質量分解能が $6 \text{ MeV}/c^2$ 以下という性能が要求されている。位置分解能の性能評価実験は γ 線を CH_2 標的及び Cu 標的に照射して行った。

本論文では TPC の構造、3 GeV γ 線を用いた実験の詳細及び性能評価の手法と結果について述べる。

目次

第 1 章	イントロダクション	3
1.1	LEPS2 実験の物理的動機	3
1.1.1	$\Lambda(1405)$ の構造分析	3
1.1.2	ペンタクォーク粒子 Θ^+ の探索	4
1.2	本研究の目的	4
第 2 章	LEPS2 実験施設及び検出器	6
2.1	大型放射光加速器施設 SPring-8	6
2.2	LEPS2 ビームライン	6
2.3	逆コンプトン散乱による高エネルギー γ 線の生成	7
2.4	LEPS2 スペクトロメータ	8
2.4.1	Start Counter (SC)	8
2.4.2	Drift Chamber (DC)	8
2.4.3	Time Projection Chamber (TPC)	10
2.4.4	Resistive Plate Chamber (RPC)	10
2.4.5	Aerogel Cherenkov Counter (AC)	10
2.4.6	Barrel γ Detector	11
第 3 章	TPC の構造と動作原理	12
3.1	TPC の動作原理	12
3.2	ガスの種類	13
3.3	TPC の構造	13
3.4	位置分解能	14
3.4.1	パッド平面成分の分解能	16
3.4.2	ドリフト方向成分の分解能	18
3.5	Θ^+ 探索に必要な質量分解能	20
第 4 章	TPC 性能評価実験のセットアップ	21
4.1	実験セットアップ	21
4.1.1	読み出し回路	21
4.1.2	FADC ボード	21
4.1.3	トリガー	23
4.1.4	ポリエチレン標的	24
4.1.5	Cu 標的	24

第 5 章	TPC の性能評価	26
5.1	ドリフト速度異常	26
5.1.1	ドリフト速度の評価	27
5.1.2	ドリフト速度異常の原因	28
5.2	位置分解能の評価	29
5.2.1	パッド平面の位置分解能の評価方法	29
5.2.2	ドリフト方向の位置分解能の評価方法	30
5.2.3	TPC 分解能の各依存性	30
5.2.4	パッド平面における位置分解能のドリフト距離依存性	31
5.2.5	パッド平面における位置分解能の θ 依存性	32
5.2.6	ドリフト方向の位置分解能のドリフト距離依存性	33
5.2.7	ドリフト方向の位置分解能の dip angle 依存性	34
5.2.8	TPC 固有の位置分解能の評価方法	35
5.3	エネルギー損失の計算方法の最適化	36
5.3.1	エネルギー損失の dip angle 依存性	36
5.3.2	エネルギー損失の θ 依存性	39
5.3.3	評価関数	41
5.3.4	各ヒット点における評価方法	43
5.3.5	各飛跡におけるエネルギー損失の評価方法	46
5.4	結論	48
5.4.1	TPC の固有位置分解能	48
5.4.2	TPC における荷電粒子のエネルギー損失の評価方法	50
第 6 章	まとめと今後の展望	51
Appendix		52
A	運動量の θ 依存性	52

第1章 イントロダクション

1.1 LEPS2 実験の物理的動機

本論文では、大型放射光施設 SPring-8 の LEPS2 ビームラインにて高エネルギー γ 線を用いた TPC の性能評価について述べる。この章では LEPS2 実験の主目的である高エネルギー γ 線による Θ^+ 探索実験及び $\Lambda(1405)$ の構造分析について述べる。

1.1.1 $\Lambda(1405)$ の構造分析

クォーク模型によれば、 $\Lambda(1405)$ は u,d,s クォークからなる、スピンパリティが $\frac{1}{2}^-$ のバリオンの共鳴状態である。しかし、観測された質量はスピン多重項である $\Lambda(1520)$ と比較すると非常に小さく、スピン軌道相互作用では説明できない。そこで $\Lambda(1405)$ が反 K 中間子と核子が束縛した分子状態である可能性が示唆されている [1]。また、メソン-バリオンの相互作用を記述したカイラルユニタリ模型に基づいた計算により、 $\Lambda(1405)$ のエネルギー領域において 2 つの極の存在が示唆された。1 つは、 $\pi\Sigma$ と強く結合した幅の広い極 $z_1 = 1390 - 66i$ MeV、もう 1 つは $K\bar{N}$ に結合した幅の狭い極 $z_2 = 1426 - 16i$ であると考えられている [2]。

そこで LEPS2 実験では、 $\gamma p \rightarrow K^{*+}\Lambda(1405)$ 反応の観測を行い、 $\Lambda(1405)$ の遷移形状因子を測定することで、 $\Lambda(1405)$ の内部構造が 3 クォーク状態なのか、それともメソンバリオンの分子状態なのか特定することを目的の一つとしている。

陽子標的を用いた光生成反応では $\Lambda(1405)$ と同じ $\Sigma\pi$ への崩壊モードを持つ $\Sigma(1385)$ を生成し、その崩壊幅が質量差に比べて大きいため区別するのは困難である。そこで $\Lambda(1405)$ と $\Sigma(1385)$ のアイソスピンの違いを利用する。 $\Lambda(1405)$ は $I = 0$ なので、 $\Sigma^0\pi^0$ に崩壊できるが、 $\Sigma(1385)$ は $I = 1$ なのでこの崩壊が禁止される (図 1.1)。従って、 $\Sigma^0\pi^0$ への崩壊モードを観測することで、 $\Sigma(1385)$ によるバックグラウンドを抑制することが可能である。

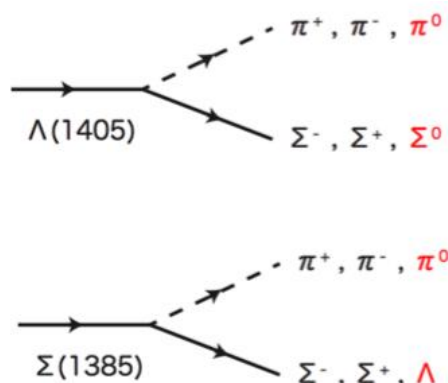


図 1.1. $\Lambda(1405)$ 及び $\Sigma(1385)$ の崩壊モード [13]。

1.1.2 ペンタクォーク粒子 Θ^+ の探索

Diakonov らによって、質量 $1530 \text{ MeV}/c^2$ 、崩壊幅 15 MeV の $uudd\bar{s}$ という 5 つのクォークから構成される未知の粒子の存在が示唆された [5]。LEPS2 実験の前身である、同じく SPring-8 で行われた LEPS 実験では $\gamma n \rightarrow K^+ K^- n$ 反応の γK^- の欠損質量分布からこのペンタクォークと思われるピークが発見され、 Θ^+ と命名された [3][4]。

しかし、その後の Jefferson Laboratory で行われた CLAS 実験では LEPS と同じく光生成反応である、 $\gamma d \rightarrow K^+ K^- n$ 反応の nK^- の不変質量分布にはこのピークが見られず、LEPS の結果を否定する結果が示された [10]。現在では多くの追実験が行われ、このピークの存在を支持する結果 [7][8] と否定する結果 [9][11] の両方が報告されており、未だ結論が出ていない。

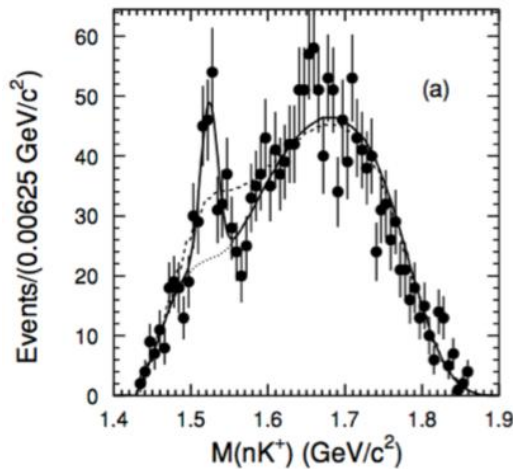


図 1.2. LEPS による γK^- の missing mass 分布 [4]。

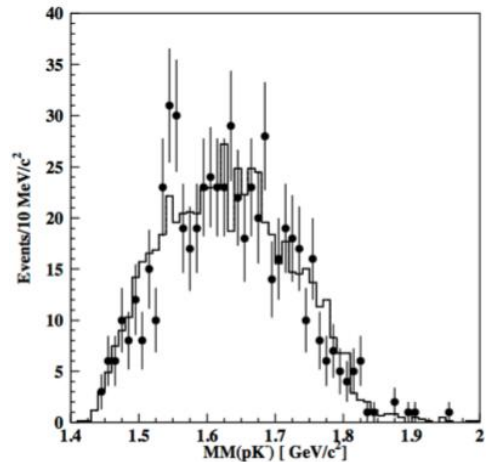


図 1.3. CLAS による nK^- の invariant mass 分布 [9]。黒点は過去のデータ [10]。

LEPS と CLAS の両実験では測定を行なった散乱粒子の散乱角の範囲が異なる (図 1.4)。LEPS では $\gamma n \rightarrow K^+ K^- n$ 反応における K^- のうち散乱角が前方の 20° 以内のものを検出しているが、CLAS ではそれよりも後方領域に放出した粒子を検出している。また、先行研究 [6] によって、 $\gamma d \rightarrow pK^- \Theta^+$ 反応の断面積計算が行われ、散乱角 30° 以下の前方領域では大きく、 30° 以上の後方領域では小さくなるという予測も立てられている (図 1.5)。仮に Θ^+ の光生成反応における生成断面積が散乱角に大きく依存し、前方領域では存在が確認できたが後方領域ではその存在が確認できなくなるほど生成断面積が小さいのであればこの結果を説明することができる。そこで LEPS2 実験では極角 5° – 120° を覆うスペクトロメータを製作し、 Θ^+ の生成実験を行う。

1.2 本研究の目的

本研究では、大立体角を覆う LEPS2 スペクトロメータの中で、側方領域の粒子の飛跡検出を行う Time Projection Chamber (TPC) について、1.1.2 で述べたペンタクォーク粒子 Θ^+ の探索実験で要求される不変質量分解能を満たしているか評価を行う。

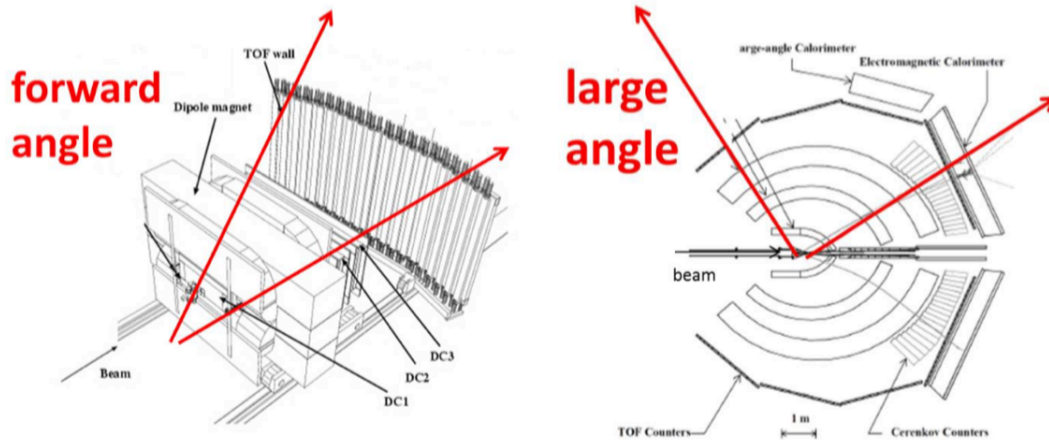


図 1.4. LEPS 実験 (左) と CLAS 実験 (右) のセットアップ比較 [24]。

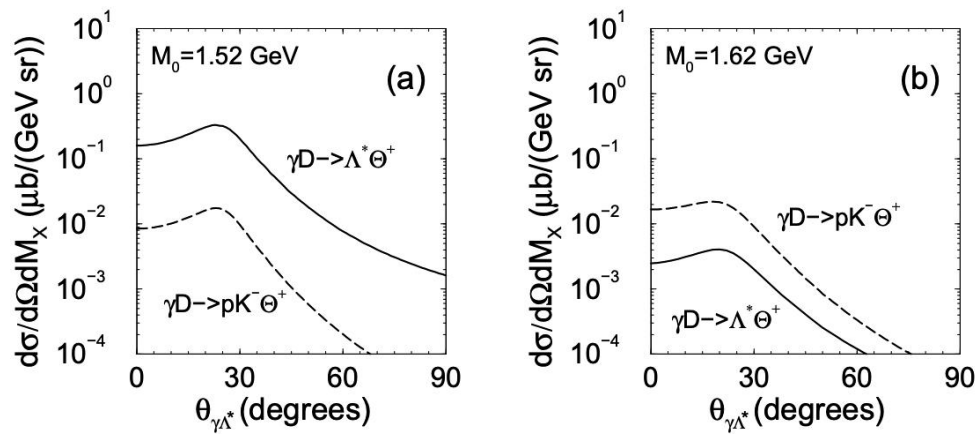


図 1.5. 2.1 GeV γ 線における、 $\gamma d \rightarrow p K^- \Theta^+$ 反応断面積の理論計算。左右の図はそれぞれ、 $K^- p$ の不変質量を 1.52 GeV、1.62 GeV と仮定した時の反応断面積を示している。実線は $\gamma d \rightarrow \Lambda^* \Theta^+ \rightarrow p K^- K n$ の共鳴の寄与、破線は $\gamma n \rightarrow p K^- K$ の非共鳴過程による寄与を示している [6]。

第2章 LEPS2 実験施設及び検出器

SPring-8 に建設された LEPS2 実験施設及びビームライン、LEPS2 スペクトロメータについて紹介する。

2.1 大型放射光加速器施設 SPring-8

SPring-8 は兵庫県佐用郡佐用町に位置する大型放射光加速器施設である [12]。電子銃により発生した電子が線形加速器によりおよそ 1 GeV にまで加速され、その後シンクロトロンで 8 GeV まで加速される。この 8 GeV まで加速された電子は蓄積リングに供給され、運転中はおよそ 100 mA の電子が蓄積されている。

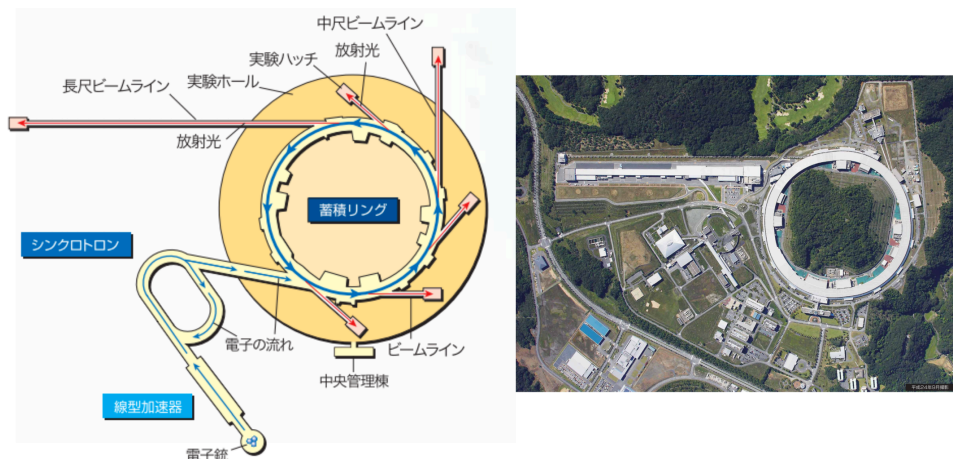


図 2.1. SPring-8 の蓄積リングの概念図及び航空写真 [12]。

2.2 LEPS2 ビームライン

LEPS2 ビームラインの外観を図 2.2 に示す。蓄積リングの中でも 30 m と長い直線部において逆コンプトン散乱を起こさせることで、電子の角度発散を $14 \mu\text{rad}$ と非常に小さく抑えることができている。そのため、高エネルギー、高輝度を保ちながら指向性の高いビームを生成でき、ビームラインを蓄積リングから 150 m 引き延ばしても、ビームの拡がりを $\sigma = 6 \text{ mm}$ まで抑制することに成功した。これにより、蓄積リング棟外におけるビーム照射実験が可能になったため、実験棟を新たに建設し、大型ソレノイド型スペクトロメータを導入することができ、ほぼ 4π を覆う大立体角での測定が可能になった。

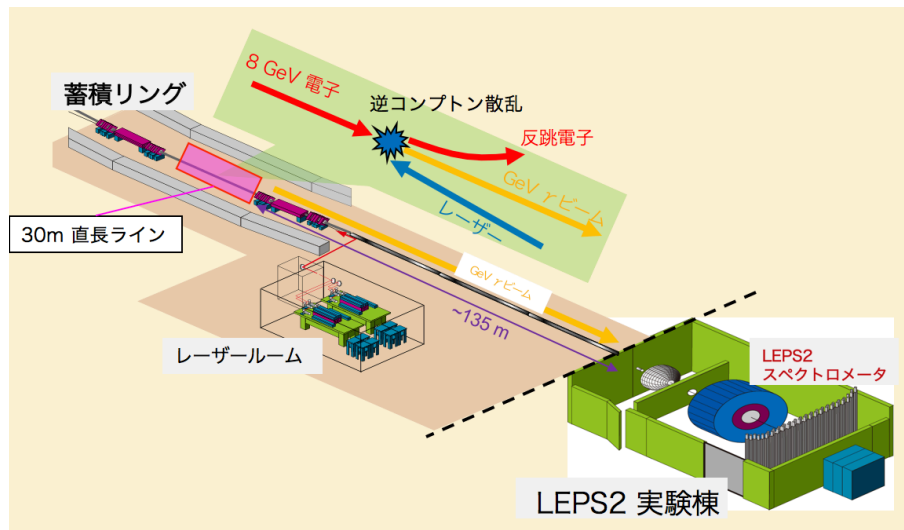


図 2.2. LEPS2 ビームライン。

2.3 逆コンプトン散乱による高エネルギー γ 線の生成

LEPS2 実験では蓄積リング中を 8 GeV で運動する電子に $\lambda = 266 \text{ nm}$ 及び $\lambda = 355 \text{ nm}$ のレーザー光を入射することで逆コンプトン散乱を起こさせ、高エネルギー γ 線を発生させ(図 2.3)、LEPS2 ビームラインで引き出している。LEPS2 実験では4台のレーザーを用いており、およそ 5 Mcps の強度で γ 線ビームを生成する。

蓄積リング中の電子のエネルギーを E_e 、速度を β 、入射レーザーの光子のエネルギーを E_1 、入射レーザー光と電子のなす角を θ_1 、電子と γ 線のなす角を θ_2 とすると、逆コンプトン散乱のエネルギー E'_γ は

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma(1 - \beta \cos \theta_1)}{(1 - \beta \cos \theta_2) + \frac{E_\gamma}{E_e}(1 - \cos(\theta_1 - \theta_2))} \quad (2.1)$$

と書くことができ、 $\lambda = 266 \text{ nm}$ の時は最大 2.9 GeV、 $\lambda = 355 \text{ nm}$ の時は最大 2.4 GeV のエネルギーの γ 線を生成する。

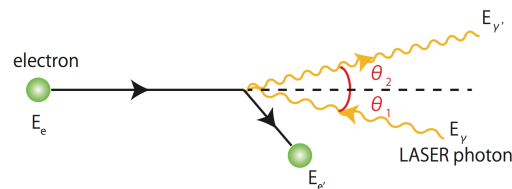


図 2.3. 逆コンプトン散乱の概念図 [13]。

2.4 LEPS2 スペクトロメータ

図 2.4 に LEPS2 スペクトロメータの概観を示す。内径 2.2 m、長さ 2.7 m の大型ソレノイド電磁石に中心磁場 0.9 T の磁場を励磁して測定を行う。ソレノイド内部には後述する Start Counter (SC), Drift Chamber (DC), Time Projection Chamber (TPC), Aerogel Cherenkov Counter (AC), Barrel Resistive Plate Counter (BRPC), Barrel γ Detector を設置する。また、ソレノイドのビーム下流側の端から 4.0 m の位置に Forward RPC (FRPC) を設置する。標的は SC の内部に、SC は TPC 内部に設置する。

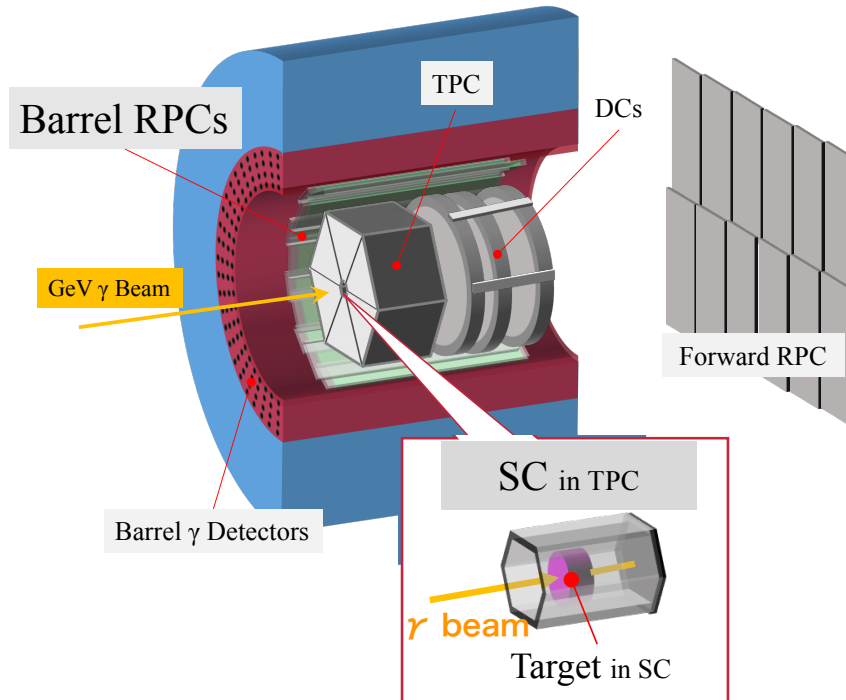


図 2.4. ソレノイドと各検出器の位置関係。

2.4.1 Start Counter (SC)

SC は 4 枚のプラスチックシンチレータを正六角形に組んだ Forward SC と、長方形のプラスチックシンチレータ 6 枚を合わせて六角柱型に組んだ Side SC により形成された検出器であり、Forward SC、Side SC それぞれでデータ取得のトリガー信号を生成することができる。各シンチレータの厚さは全て 3 mm で設計されている。また、標的は SC が散乱角 0° – 120° を覆うように設置される。

2.4.2 Drift Chamber (DC)

DC は前方に散乱角 0° – 30° で飛来した粒子の飛跡を測定するガス検出器である。ワイヤー面は内径 1280 mm の六角形の形状で、 $xx'(0^{\circ})$ 、 $uu'(60^{\circ})$ 、 $vv'(-60^{\circ})$ の 6 層で構成される (図 2.6)。この DC を 4 台並べて配置することで、3 次元的に飛跡を測定する。

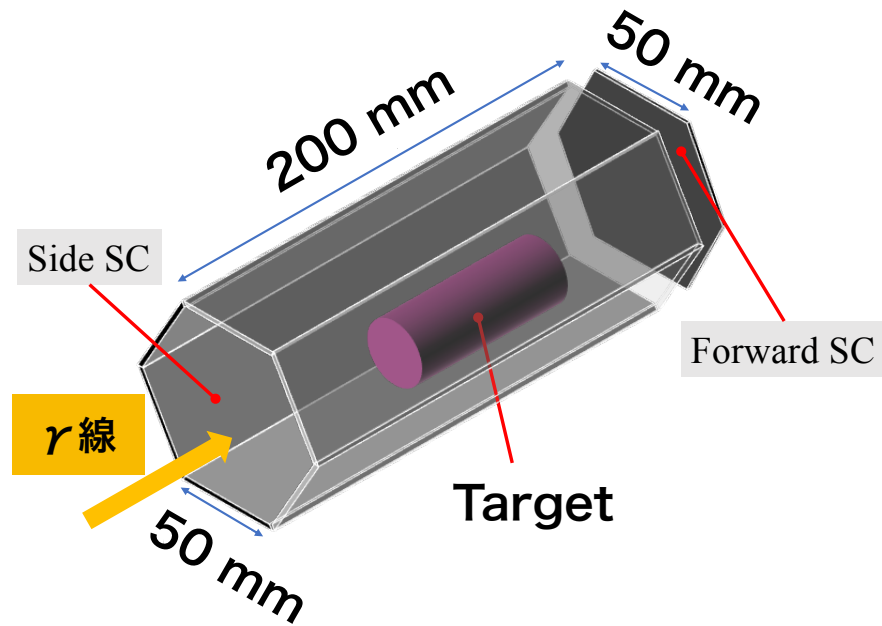


図 2.5. LEPS2 SC の概観図。正六角形の形の Forward SC と六角柱の形の Side SC の 2 つから成る。標的が SC 内部に設置されており、SC は TPC の内部に設置される。

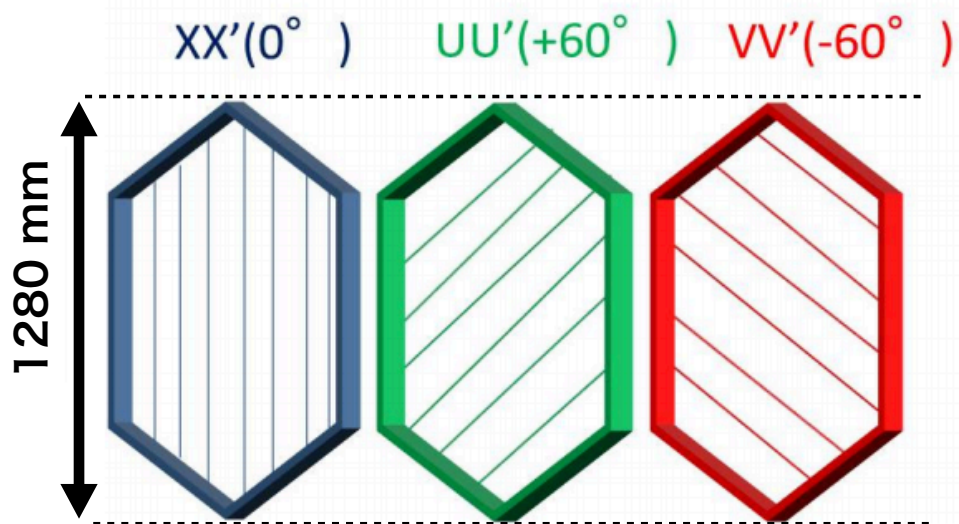


図 2.6. LEPS2 DC のワイヤー層の概念図。ワイヤー層がそれぞれ向きを変えて重なっている。[15]

2.4.3 Time Projection Chamber (TPC)

TPC は極角 50° – 115° の標的側方に放出された荷電粒子の飛跡を測定する。TPC の詳細については第 3 章で述べる。

2.4.4 Resistive Plate Chamber (RPC)

LEPS2 実験に用いる RPC は標的前方に放出された粒子を測定する 32 枚の Forward RPC と、標的側方に放出された粒子を検出する 25 枚の Barrel RPC がある。

RPC は散乱粒子の飛行時間を測定するガス検出器である。標的前方に放出された粒子は、DC によって測定された運動量と Forward RPC によって測定された飛行時間から、 π 中間子、 K 中間子、陽子のいずれであるかを同定する。標的側方に放出された粒子は TPC によって運動量、Barrel RPC によって飛行時間を測定し、前方と同様に粒子識別を行う。

RPC の構造の概観を図 2.7 に示す。ガラスの間にスペーサーを挿入することで数百 μm の空間を作り、そこに R134a(代替フロン、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$)+ SF_6 + C_4H_{10} (90:5:5) 混合ガスを充満させる。測定時は HV 電極に電圧を印加し、電極間に 9.0 V/cm の電場を生じさせる。荷電粒子が RPC を通過するとガスがイオン化され、生じた電子によるアバランシェ増幅が起こり、読み出しストリップに信号が誘起される。この信号から荷電粒子が RPC を通過した時刻を測定する。

先行研究 [25] で、LEPS2 実験に用いる BRPC のプロトタイプの時分解能評価が行われ、RPC の中心点で 60 ~ 70 ps の時間分解能を達成していることがわかった。

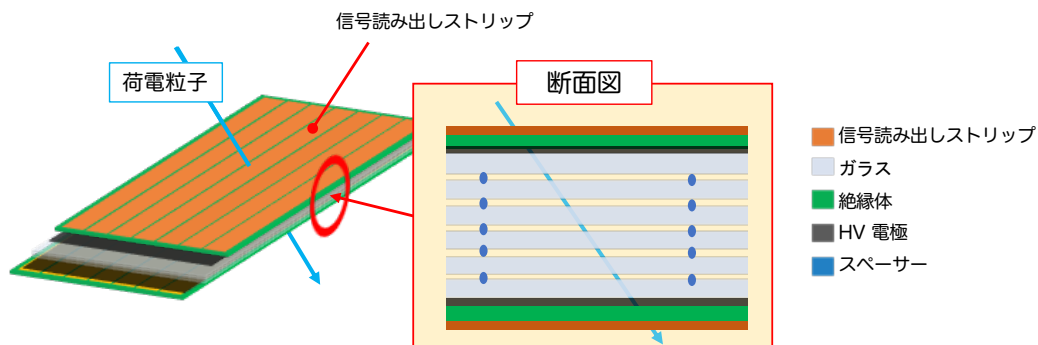


図 2.7. RPC の概念図 [24]。

2.4.5 Aerogel Cherenkov Counter (AC)

AC は輻射体にシリカエアロジェルを用いてチェレンコフ光を発生させ、光電子増倍管で検出する検出器である。入射 γ 線のエネルギーが 3.0 GeV のとき、Barrel RPC では前方 50° 以下に散乱された π 中間子及び K を 6σ 以上の精度の時間差で識別することが困難である [27]。LEPS2 実験では、TPC と DC1 の間に一層 (屈折率 $n = 1.05$)、DC1 と DC2 の間に一層 ($n=1.03$) の計二層設置し、チェレンコフ光の有無で π 中間子と K 中間子の識別を行う。

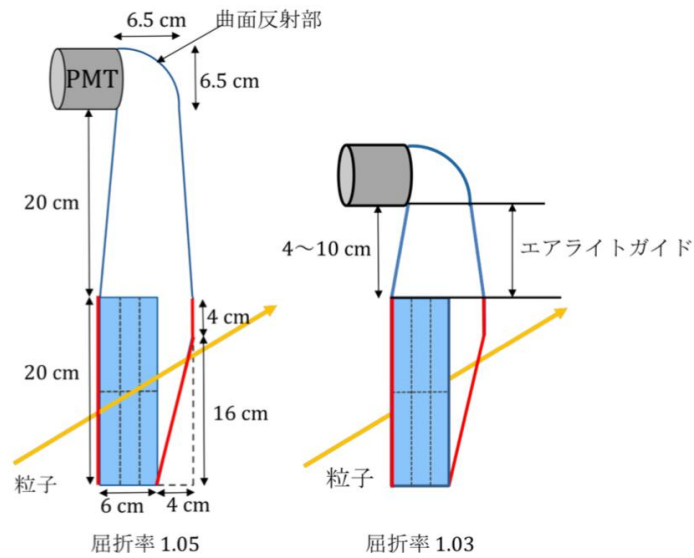
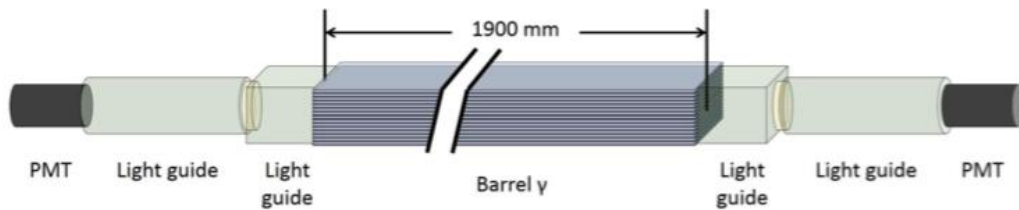


図 2.8. AC の概念図 [27]。

2.4.6 Barrel γ Detector

Barrel γ カウンターは 5 mm 厚のシンチレータ及び 16 ~ 21 層の 1 mm 厚の鉛板をスタックしたもので構成される。ソレノイド磁石内部に 192 本、計四層インストールされている。LEPS2 実験では反応で生じた γ 線のエネルギーを測定する。入射 γ 線が鉛板で起こした電子陽電子対生成をシンチレータ及び光電子増倍管で検出する。

図 2.9. Barrel γ の概念図 [19]。

第3章 TPCの構造と動作原理

第2章で述べたが、TPCは標的側方に放出された粒子の飛跡を測定する検出器である。この章ではTPCの設計と動作原理について説明し、その特性から生じる位置分解能への寄与を述べる。

3.1 TPCの動作原理

TPC内部に3.2節で後ほど詳細に述べる希ガス主体のガスを充満させ、読み出しパッドに向かってドリフト電圧をかける。荷電粒子が通過することでガスがイオン化しドリフト電場に沿ってドリフトする。TPC中のドリフト距離が数10 cm程度あり、電場と同じ方向に磁場をかけることで電子の拡散を抑制する。ドリフト電子はアノードワイヤーの作る強い電場がかかった領域まで来ると急激に加速され、アバランシェを発生しアノードワイヤーに電荷を落とす。この時発生した電荷量に比例した大きさの電荷がパッドに誘起される。パッド面を xy 面、ドリフト距離を z 方向にとると、この信号から得られる電荷中心から xy 面の2次元座標を、イオン化された粒子がアバランシェを起こし電荷を誘起するまでの時間情報から z 座標をそれぞれ得ることができ、結果三次元的に飛跡を再構成することができる。

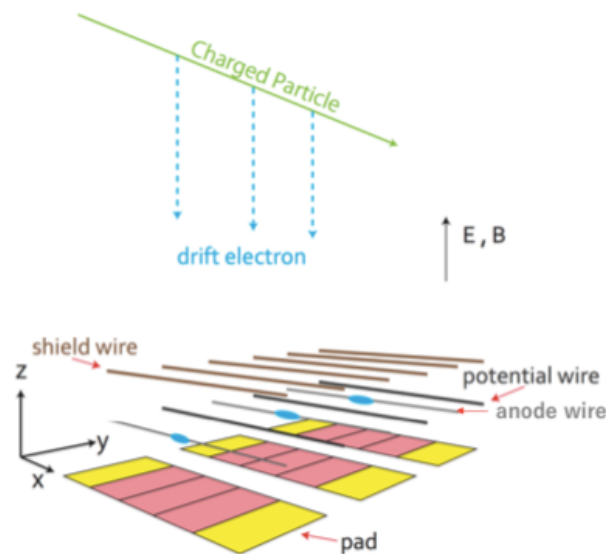


図 3.1. TPC の動作原理 [14]

3.2 ガスの種類

先行研究 [13] により LEPS 実験でも使用された安価でドリフト速度も速い Ar+CH₄(90:10) 混合ガス (P10 ガス) と、Ne+CH₄(90:10) 混合ガスの比較が行われた。Ne の方が質量数が小さく放射長が Ar に比べて長くなるため、多重散乱の効果による運動量分解能の悪化を抑制できることが期待されたが、LEPS2 実験の 1 T の磁場中でのオペレート下だと横方向の拡散の効果の方が大きく、かえって運動量分解能が悪化した。従って、LEPS2 実験でも引き続き P10 ガスを使用する。P10 ガス使用時の電子のドリフト速度の電場依存性を図 (3.2) に示す。電場の値は、電場に対して速度の変化が緩やかな振る舞いを示している 160 V/cm になるように、印加電圧は -11.6 kV と決定した。

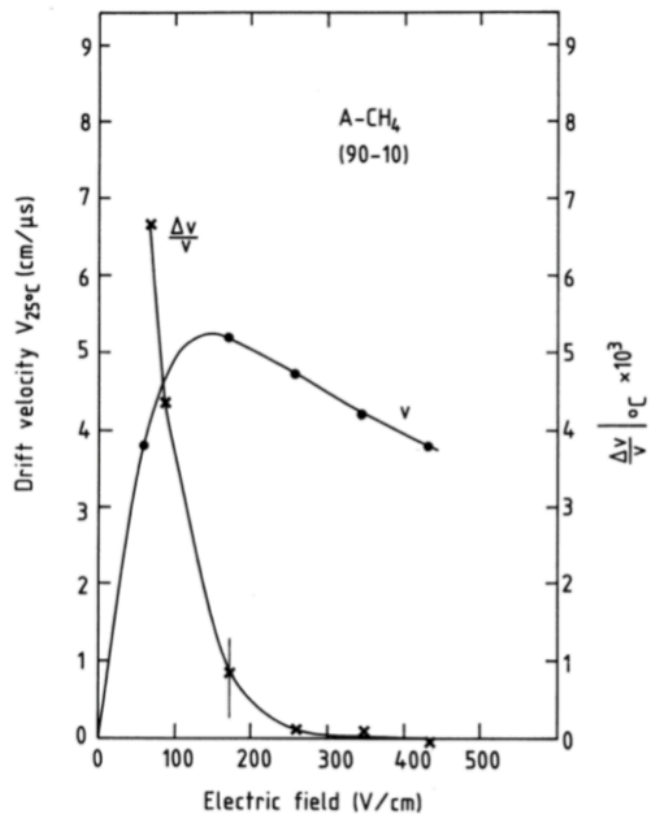


Fig. 59 Peisert and Sauli (1984)

図 3.2. P10 ガス使用時のドリフト速度の電場依存性 [29]

3.3 TPC の構造

TPC の外観を図 3.3 に示す。中央部分には貫通穴が空いており、標的を内包した SC を設置する。カソードパッド面はビーム上流側になるように設置する。

TPC 内部の概要図を図 3.4、3.5 に示す。有感領域の内接円の直径が 1190 mm、最大ドリフト距離 710 mm で、4.6 mm×10 mm のカソードパッドが 10422 個ある。ドリフト筐体のビーム下流側に高電圧面を設置し、-11.6 kV の電圧をかける。これだけでは、電極板の端付近の領域では電場が歪んでしまい、ドリフト方向に対して平行な電場を作ることができない。そこで TPC のドリフ

ト筐体の側面に 8 mm 幅のストリップ電極を 4 mm ずつずらして抵抗分割を行うことで電場を整えている (図 3.6)。

端面ワイヤーチェンバーでは、-90 V に印加された 2.5 mm 間隔でワイヤーが張られたシールドワイヤー面によってドリフト領域とアバランシェ領域を区別する。また、2.5 mm 間隔で、アノードワイヤーとポテンシャルワイヤーが交互に張られたセンスワイヤー面において、-1700 V に印加されたアノードワイヤーによってアバランシェ増幅及び読み出しパッドへの電荷の誘起が行われる。ポテンシャルワイヤーは 200 V に印加しアバランシェ領域における電場を整える。

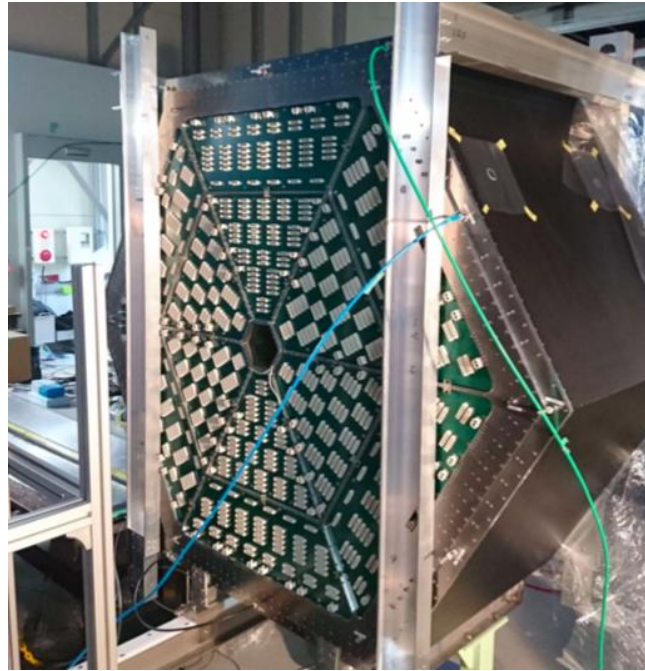


図 3.3. LEPS2TPC の外観。中央部は入射ビームを避ける用の穴が空いており、その中に標的及び SC を設置する。

表 3.1: LEPS2TPC の使用ワイヤー

ワイヤー	材質	ワイヤー径 (μm)
シールド	Au-BeCu	50
ポテンシャル	Au-BeCu	80
アノード	Au-W	25

3.4 位置分解能

TPC の位置分解能には様々な要因が寄与する。この節ではこれらの要因について詳しく述べる。

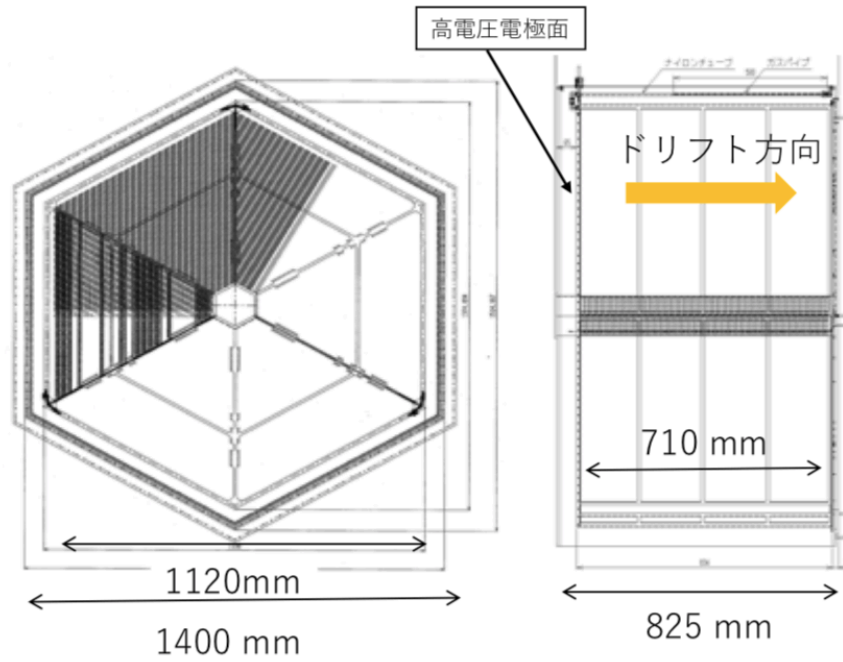


図 3.4. LEPS2TPC の概要図。[14]

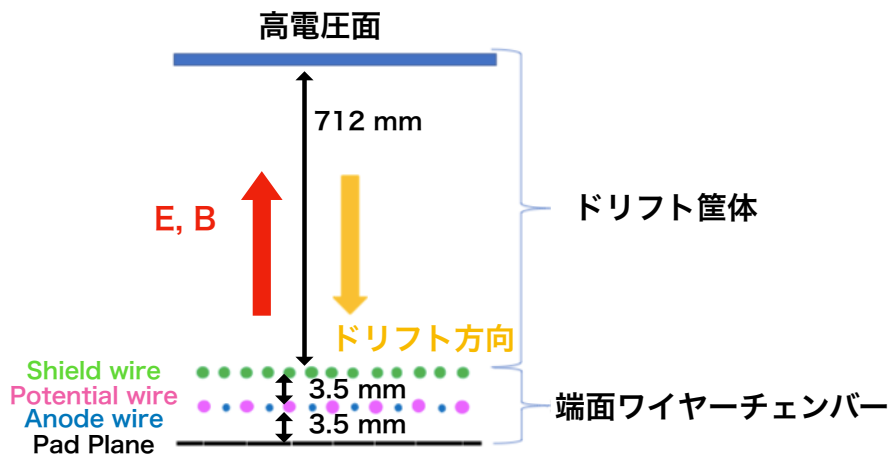


図 3.5. LEPS2TPC の構造

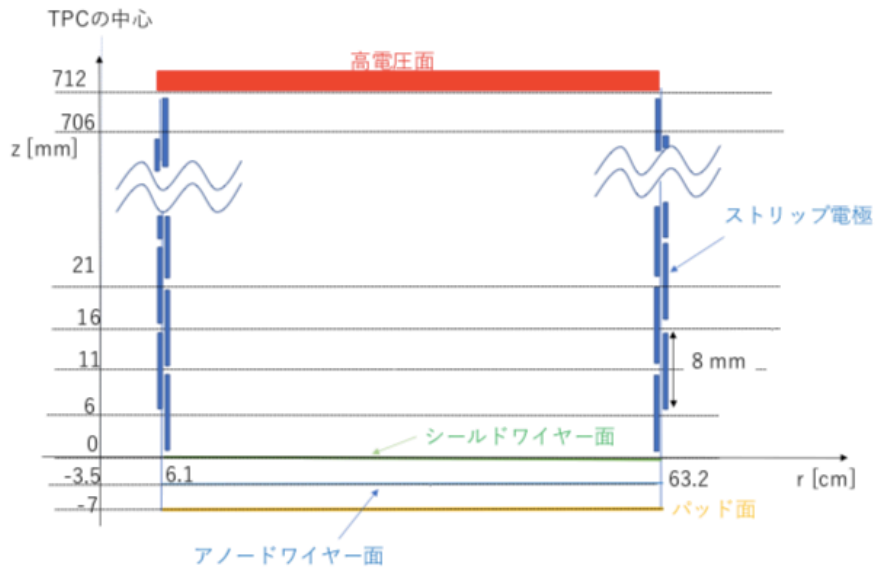


図 3.6. LEPS2TPC のストリップ電極の概要図

3.4.1 パッド平面成分の分解能

3.1 で述べたように、アノードワイヤーでアバランシェが起こるとカソードパッドに電荷が誘起される。この電荷分布を Pad Response Function (PRF) と呼ぶ。この PRF の幅 (σ_{PRF}) が TPC 位置分解能を評価するのに重要なパラメータである。様々な寄与を考慮すると、 σ_{PRF} は次のように分解できる [33]。

$$\sigma_{PRF}^2 = \sigma_0^2 + \sigma_D^2 + \sigma_W^2 + \sigma_P^2 \quad (3.1)$$

σ_0 はアノードワイヤーの 1 点にアバランシェの電荷が吸収されたとき、カソードパッドに誘起される電荷分布の幅である。本論文ではこれを TPC の固有分解能と定義し、この値を評価することで 3.5 節で述べる目標分解能に達しているかを調べる。

σ_D は電子のドリフトによる拡散の交換による項である。磁場 \mathbf{B} における拡散係数を $D_T(\mathbf{B})$ 、ドリフト距離を L_D とすると、

$$\sigma_D^2 = D_T^2(\mathbf{B})L_D \quad (3.2)$$

と書ける [33]。

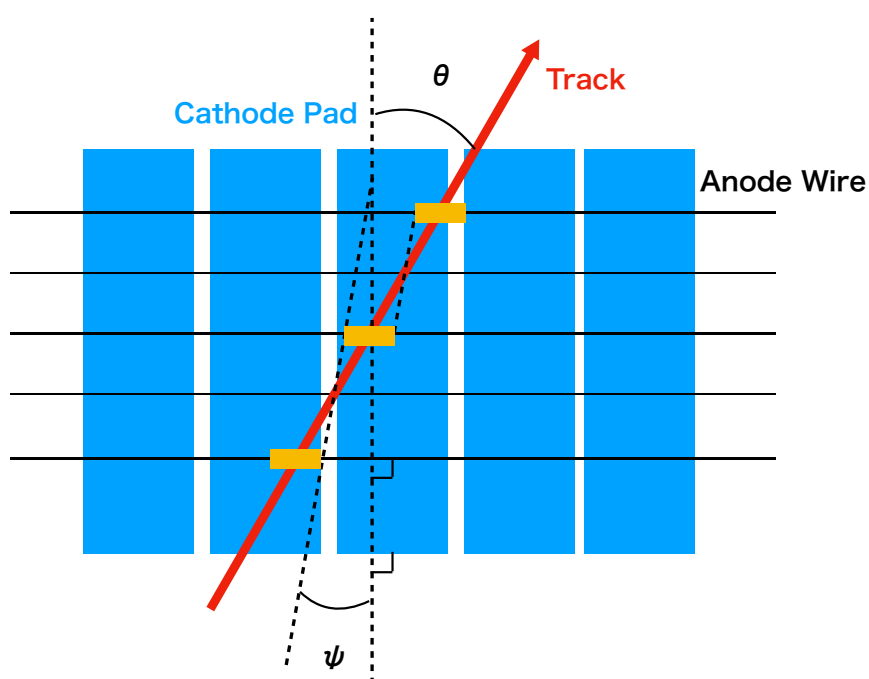


図 3.7. 角度の定義 橙の領域は電荷が吸収される領域

σ_W は Angular Wire Effect と呼ばれる項であり、アノードワイヤーと飛跡のなす角 θ が大きくなるほどアバランシェ領域が大きくなることによる寄与である (図 3.7)。アノードワイヤーの間隔を d とすると

$$\sigma_W^2 = \frac{d^2}{12} (\tan \theta - \tan \psi)^2 \quad (3.3)$$

と書ける [33]。ここで ψ は Lorentz angle と呼ばれ、電子が磁場に巻きついてドリフトする時のワイヤーと飛跡の角度である。

σ_P は Angular Pad Effect と呼ばれ、飛跡とパッド列のなす角による位置分解能への寄与である。LEPS2TPC ではパッド列に対してワイヤーが平行に張られているので、この角度は θ に等しい。 θ が大きいほど、アバランシェ領域が大きくなる。パッドの長さを h とすると、

$$\sigma_P^2 = \frac{h^2}{12} \tan^2 \theta \quad (3.4)$$

と書ける [33]。

パッド平面における位置分解能を決定するにはこれらに加えてイオン化による統計のふらつきも考慮しなければならない。荷電粒子によるイオン化によって生成された電子の総数を N_0 、センスワイヤーまでたどり着く電子の総数を N_{eff} とすると、

$$\sigma_{xy}^2 = \frac{\sigma_0^2 + \sigma_D^2}{N_0} + \frac{\sigma_W^2 + \sigma_P^2}{N_{eff}} \quad (3.5)$$

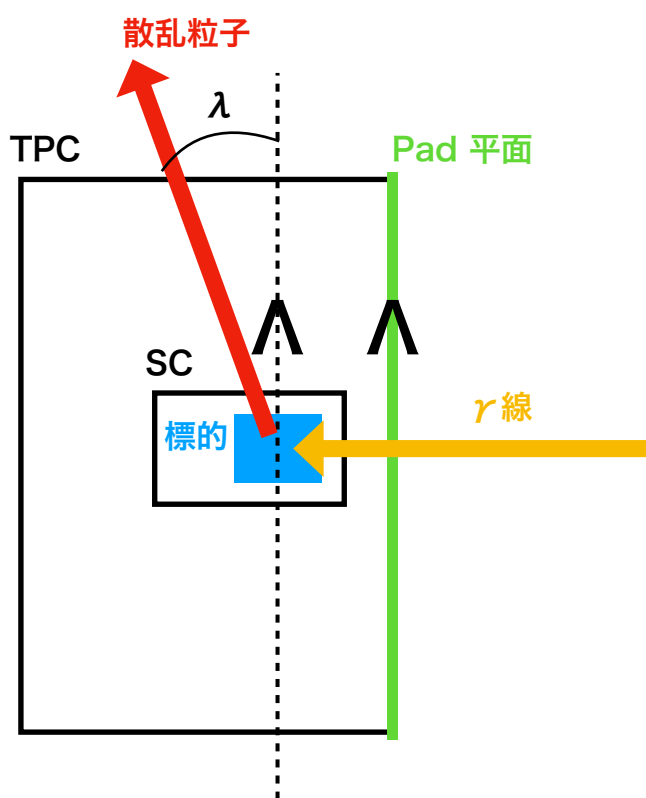
と書ける [33]。

3.4.2 ドリフト方向成分の分解能

ドリフト方向の位置分解能は、磁場 \mathbf{B} における縦方向の拡散係数を $D_L(\mathbf{B})$ 、ドリフト距離を L_D 、カソードパッドの長さを h とすると、

$$\sigma_z^2 = \frac{\sigma_{z0}^2 + D_L^2(\mathbf{B})L_D}{N_0} + \frac{h^2}{12N_{eff}} \tan^2 \lambda \quad (3.6)$$

と書ける [33]。ここで、 λ は荷電粒子の飛跡とパッド平面のなす角で、dip angle と呼ぶ (図 3.8)。 σ_{z0} は TPC の構造及び読み出し回路の性能によって決まる位置分解能である。 σ_{z0} を TPC のドリフト方向における固有位置分解能と定義する。

図 3.8. dip angle λ の定義

3.5 Θ^+ 探索に必要な質量分解能

LEPS 実験では、質量分解能 $11 \text{ MeV}/c^2$ であった。LEPS2 ではこの分解能をより向上させて Θ^+ 探索実験を行う予定であり、先行研究 [13] で本 TPC は、 $\Theta^+ \rightarrow K_s^0 p$ の不変質量分解能が $6 \text{ MeV}/c^2$ となるように設計された。この値はバックグラウンドに対して Θ^+ を 5σ で識別するのに十分な値である。

また、先行研究 [14] により Θ^+ 探索における目標位置分解能も定められた。入射 γ 線エネルギーを 2.4 GeV として、 $\gamma n \rightarrow \Theta^+ K^- \rightarrow K_s^0 p K^- \rightarrow \pi^+ \pi^- p K^-$ という反応過程をシミュレーションによって生成し、飛跡の xy 平面への射影を円で、 z 座標を直線でフィッティングすることで運動量を再構成している。また、ここでは多重散乱による運動量分解能への寄与も考慮している。シミュレーション結果から $\pi^+ \pi^- p$ の不変質量を組み、目標である質量分解能 $6 \text{ MeV}/c^2$ での探查感度を有するような位置分解能を、目標の位置分解能とする。

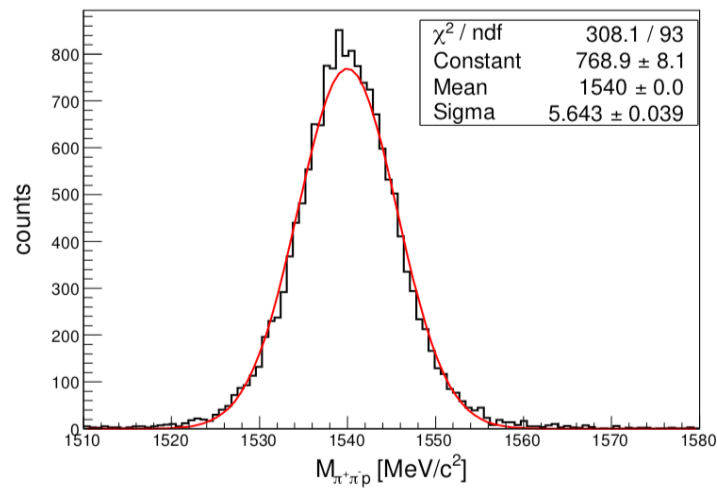


図 3.9. パッド平面の固有位置分解能が $150 \mu\text{m}$ 、ドリフト方向の固有位置分解能が $700 \mu\text{m}$ の時の $K_s^0 p$ の不変質量分布 [14]

第4章 TPC 性能評価実験のセットアップ

4.1 実験セットアップ

4.1.1 読み出し回路

TPC の性能評価実験における検出器の配置及び回路を図 4.1 に示す。今回の実験は LEPS2 スペクトロメータの検出器群を同時にオペレートして行なった。SC で生成されたトリガーからマスタートリガーモジュールによって各 PC にイベントタグを配布され、対応する検出器からデータ取得を行う。TPC では rpv260 モジュール [34] によってトリガー管理を行い、DE10 ボード [35] 図 4.3 でデータ取得を行う。

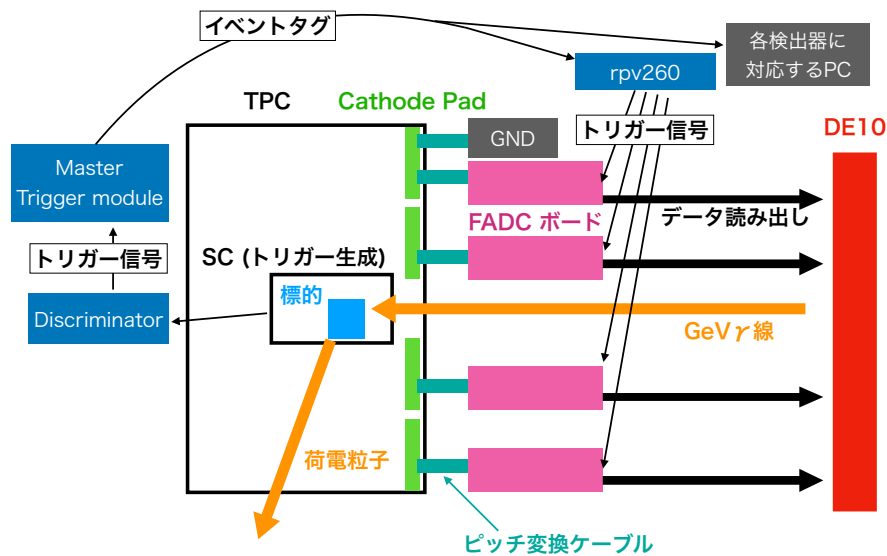


図 4.1. TPC 読み出し回路図

4.1.2 FADC ボード

LEPS2TPC には 10,000 以上という多チャンネルの読み出しができ、ソレノイド内の限られたスペースに収納できる回路を設計する必要があった。それを実現したのが低消費電力かつ小型の FADC ボードである (図 4.2)。ボード電源は 3.3 V で、アナログデータの波形整形を行う ASIC チップ、A/D 変換を行う FADC チップ、A/D 変換後のデジタルデータの波形処理を行う FPGA から構成される。

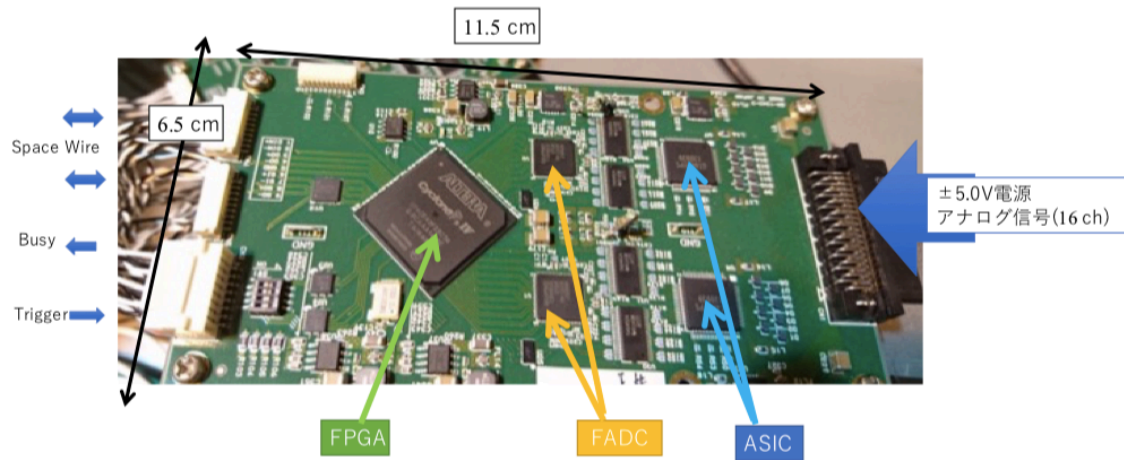


図 4.2. FADC ボード [14]

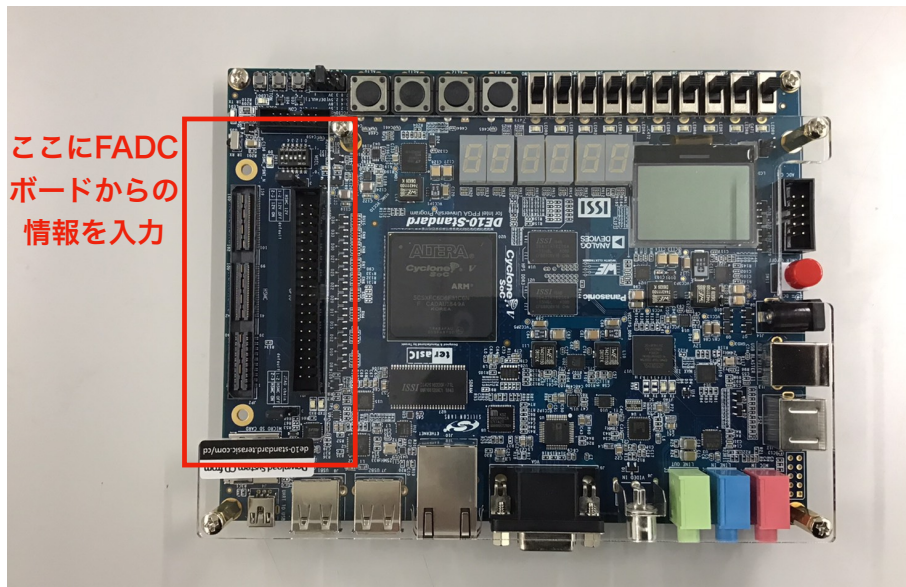


図 4.3. FADC のデータ読み出しに用いた DE10 ボード。DAQ middle ware によって制御し FADC ボードからデータを読み出す。[35]

4.1.3 トリガー

本実験においてトリガー生成に関与している検出器は SC の他に Tagger 検出器、UpVeto 検出器及び eeVeto がある (図 4.4)。これらを順に説明する。

Tagger 検出器 Tagger 検出器は、蓄積リングにて逆コンプトン散乱により散乱された電子のエネルギーを測定する事で、 γ 線のエネルギーをイベントごとに測定する検出器である。逆コンプトン散乱によりエネルギーを失った電子は蓄積リング中を運動する 8 GeV の電子の軌道よりも内側に曲げられる。プラスチックシンチレータにより、その電子を検出し、その検出位置から運動量及びエネルギーを求める事ができる。

UpVeto カウンター UpVeto カウンターはプラスチックシンチレータ及び光電子増倍管によって構成される。最大 3 GeV の γ 線ビームを使用しているため、本 LEPS2 実験で観測したいハドロンイベントの他にも空気中で電子陽電子対生成が発生する。そこでソレノイド上流側に UpVeto カウンターを設置し、標的粒子に入射する前に電子陽電子対生成したイベントの除去を行う。

eeVeto カウンター eeVeto カウンターは UpVeto カウンター同様プラスチックシンチレータ及び光電子増倍管で構成される。標的で電子陽電子対生成したイベントを除去する役割を持つ。下流側は磁場の影響が大きいため磁場中でも使用可能なファインメッシュ構造を持つ光電子増倍管を使用している。

Barrel γ Detector 2.4.6 で述べた Barrel γ Detector により、側方に反応で生じた γ 線が検出された際にトリガーを生成する。

本研究における TPC 性能評価実験では Side SC \otimes Tagger \otimes UpVeto \otimes eeVeto \otimes Barrel γ のトリガー条件のもとで実験を行なった。

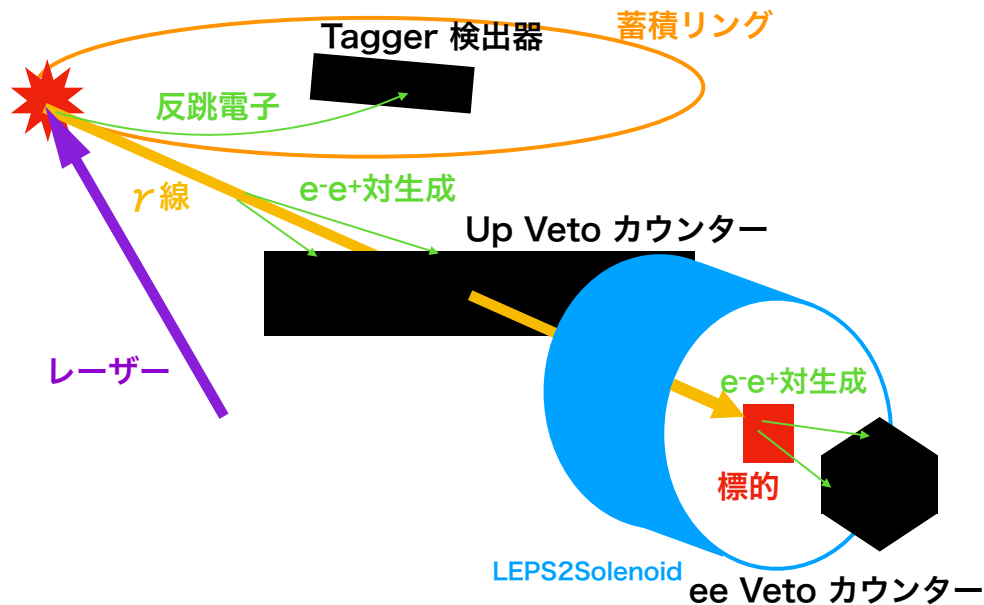


図 4.4. トリガー用検出器の概要図。

4.1.4 ポリエチレン標的

データ取得にはポリエチレン標的を用いた (図 4.5)。ポリエチレン標的は円筒形の形状であり、直径 4 cm、高さ 4 cm である。図 4.5 の十字の印にビーム中心を合わせる。標的下部に発泡スチロールを挟んでいるが、これは位置調整用のものである。本研究ではこの標的を TPC の位置分解能の測定及び荷電粒子飛跡のエネルギー損失測定に用いた。



図 4.5. ポリエチレン標的。直径 4 cm、高さ 4 cm の円筒形である。十字の印にビーム中心を合わせる。

4.1.5 Cu 標的

厚さ 0.5 mm の銅板を 3 枚を図 4.6 の土台に固定して作成した。これを 2.4.1 で述べた SC の内部に固定し、図 5.1 のように配置を行なった。本研究ではこの Cu 標的をドリフト速度の測定及び TPC の位置分解能の測定に用いた。

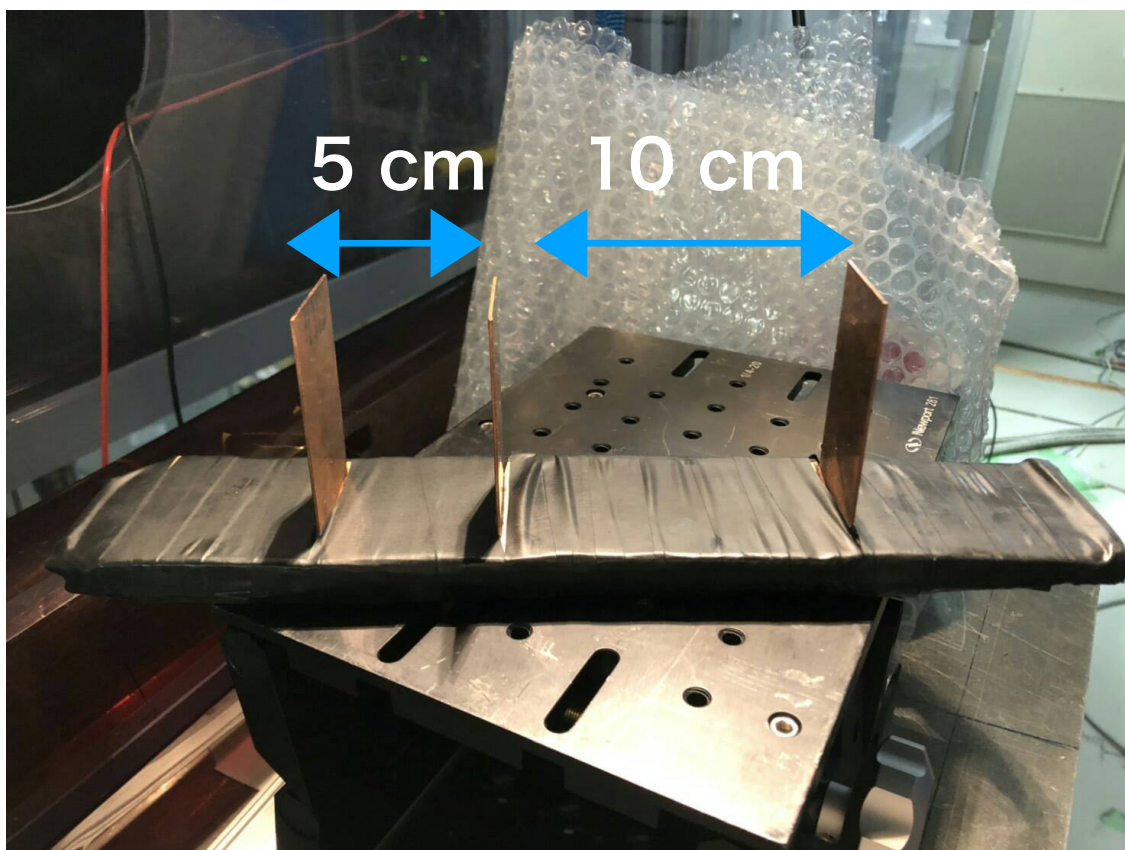


図 4.6. ドリフト速度測定用の Cu 標的

第5章 TPCの性能評価

本章では、 Θ^+ の不変質量分解能を評価する上で必要な以下の項目の解析結果を示す。

- TPCにおける電子のドリフト速度
- TPCの位置分解能
- TPCドリフト領域における荷電粒子のエネルギー損失の評価方法の最適化

5.1 ドリフト速度異常

6月のデータ取得中、TPCの飛跡の検出効率が非常に低くなる問題が発生した。イベントディスプレイを確認したところ、前方に放出された飛跡が見られなくなっている事が分かった。そこで、ドリフト速度が何らかの原因でP10ガスによる正常なオペレート時の $50\text{ mm}/\mu\text{s}$ を下回り、トリガー生成から信号が誘起されるのが大きく遅れたためにFADCボードで正常に波形検出ができなかったのではないかと疑った。

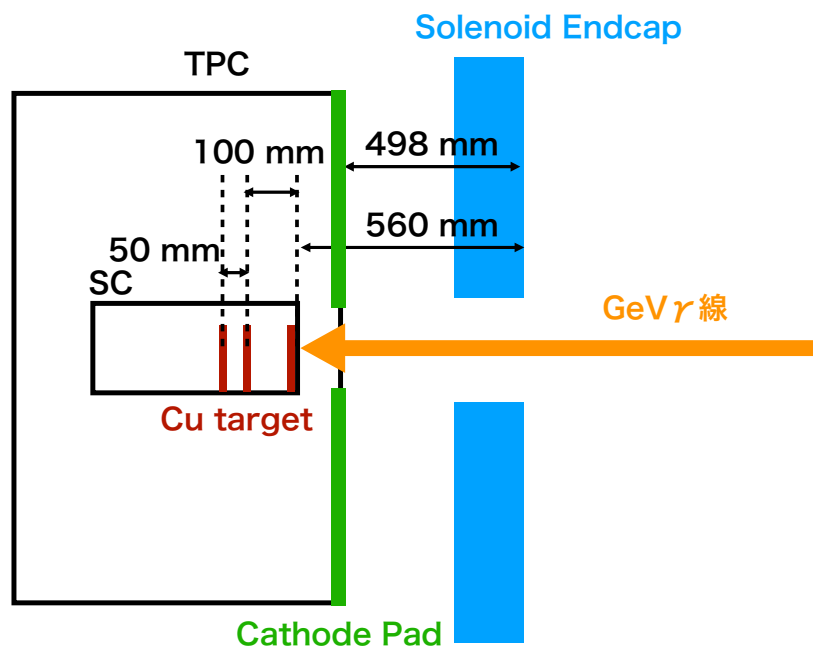


図 5.1. ドリフト速度測定時のセットアップ

5.1.1 ドリフト速度の評価

160 V/cm のドリフト電場のもとで、飛跡検出を行なったのちマルチトラックイベントについて、トラック同士の最近接点から反応点を計算し、その z 座標の分布 (図 5.2) から評価した。この分布はドリフト速度を $50 \text{ mm}/\mu\text{s}$ を仮定して反応点の z 座標を再構成したものである。しかし、このドリフト速度の仮定の下で得られた銅板座標間隔は、 244.3 ± 10 、 $118.1 \pm 7 \text{ mm}$ と得られ、実際の銅板間隔 (100 mm、50 mm) とは異なっていた。これらの銅板間隔の理想値と実測の差異から本試験時のドリフト速度を見積もると、 $20.7 \pm 0.7 \text{ mm}/\mu\text{s}$ と得られ、設計値の半分以下の速度であることがわかった (表 5.1)。

vertex point at Cu target

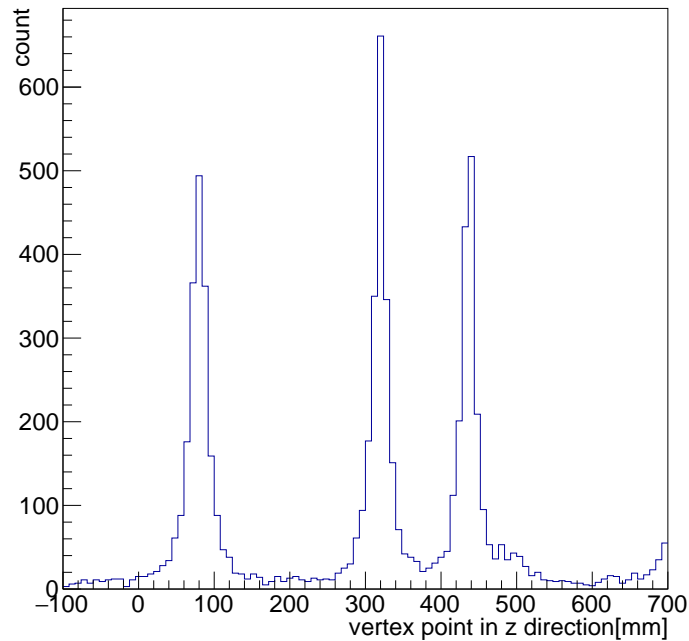


図 5.2. ドリフト速度を $50 \text{ mm}/\mu\text{s}$ と仮定して得られた粒子の生成位置 z 座標再構成分布。実際に配置した銅板標的の間隔は 100 mm、50 mm であるが、三本のピークはこれを再現していない。この差異から、本測定時のドリフト速度を見積もった。

表 5.1: TPC ドリフト速度の評価

	ドリフト速度 ($\text{mm}/\mu\text{s}$)
文献値 [29]	50
データ取得時	20.7 ± 0.7

5.1.2 ドリフト速度異常の原因

データ取得後にガス回路周りを調査したところ、ガス管に使用していたタイゴンチューブが長時間高温に晒された結果溶け出してガスを汚染した事が原因である可能性が高い事が発覚した。コネクタの近くにある FADC ボードには全台合わせて 360 A もの電流が流れており、熱を持つため空冷を行っていたが、タイゴンチューブの耐熱温度が 74 °C なのに対して、FADC の温度が 70 °C 近くまで上がることも少なくなかった。継手を耐熱性の高いものに交換し、空冷システムを増強した上で 2019 年 12 月中頃に TPC をオペレート可能な状態にすることができた。しかし、12 月中旬に差し掛かった時点で既にビームタイムが終了していたため、 γ 線ビームによるデータ取得を行うことができなかった。本論文ではそこで取得したデータにより、BRPC を併用した TOF 解析を行う予定であった。2020 年 1 月、宇宙線によるデータからドリフト速度の評価を行なった。図 5.3 に示したように、シンチレータを TPC を上下から挟むように設置して AND を取ることでトリガーを生成する。3 通りのトリガーシンチレータの設置場所の間隔と、ドリフト速度が 50 mm/ μ s を仮定した時の TPC のヒット点分布の平均を比較することでドリフト速度を測定した (図 5.4)。結果、ドリフト速度が 42 ± 9 mm/ μ s まで回復している事が確認された。しかし、ビームタイムは 12 月中旬に差し掛かった時点で既に終了していたため、本研究では γ 線によるデータ取得は叶わなかった。

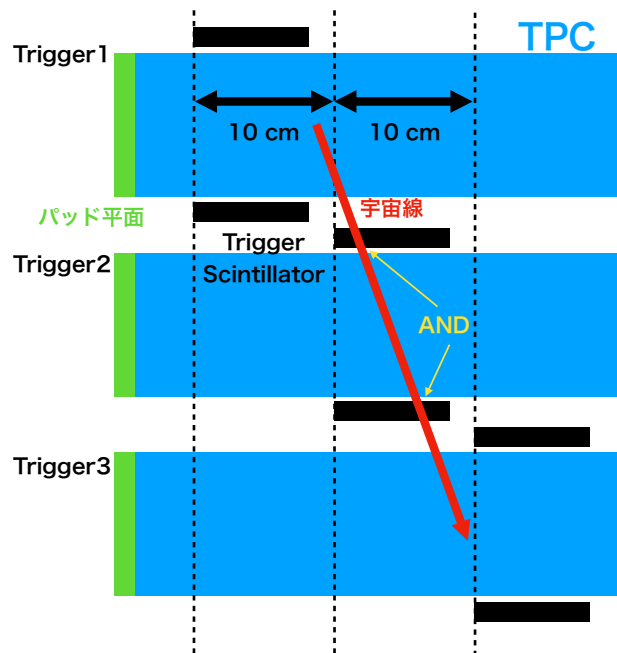


図 5.3. 2020 年 1 月時点における宇宙線を用いたドリフト速度測定時のセットアップ。3 通りのトリガーシンチレータの設置場所についてデータ取得を行った。

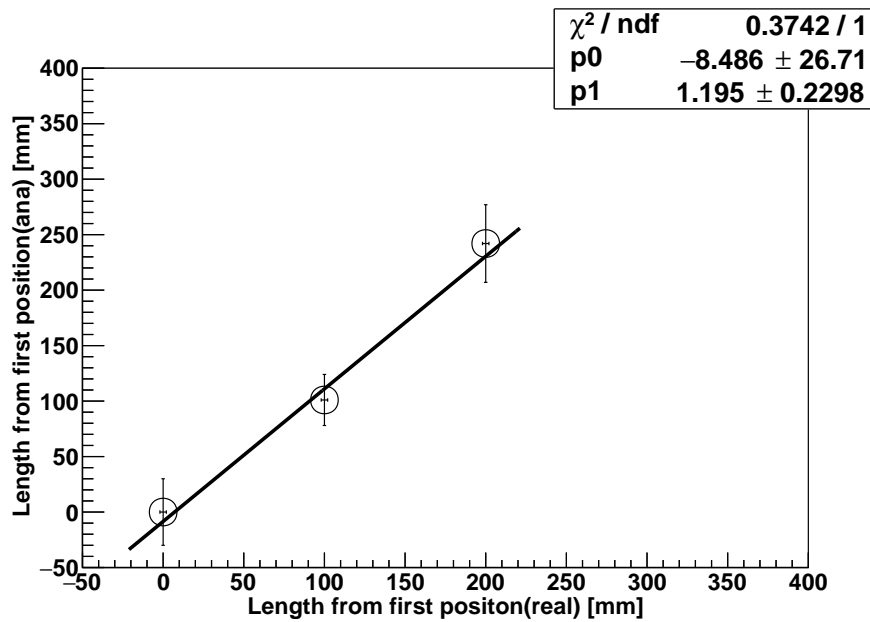


図 5.4. 2020 年 1 月時点における宇宙線を用いたドリフト速度測定結果。横軸はトリガーシンチレータの設置位置の間隔。縦軸はドリフト速度 $50 \text{ mm}/\mu\text{s}$ を仮定した時のそれぞれのトリガー条件の時の宇宙線によるヒット点の平均値。

5.2 位置分解能の評価

ここでは位置分解能の評価方法及びその結果について述べる。TPC は第 3 章で述べたように、パッド面に誘起される電荷の重心から xy 平面における座標が決まり、電子のドリフト時間から z 座標が決まる。

5.2.1 パッド平面の位置分解能の評価方法

xy 平面の座標を決定するには、パッドに誘起される電荷の重心を決定する必要がある。周囲で最も信号の波高が高いパッドを中心とする連続する 3 つのパッドの波高の値及びパッドの x 座標の情報からガウス関数を解き、中心値を電荷中心の x 座標とする。 y 座標はパッドの中心を用いる。この操作を全パッドに対して行い、各パッドから得た座標に対して Runge Kutta 法によるフィッティングを行う事で荷電粒子の飛跡を決定する。この飛跡の各層における x 座標とガウス関数から得られた電荷中心との差 (residual) の分布の幅から xy 平面における位置分解能を決定する (図 5.5)。ここで、用いたパッド層のすべての点を用いてフィッティングを行うと自分自身の点がフィッティングによる飛跡の決定に影響を与え、本来の位置分解能を評価する事ができない。そこで、残差を見るパッド層の自分自身を含めずにフィッティングした時の残差分布の幅を σ_1 、全層用いたフィッティングをした時の残差分布の幅を σ_2 とした時、

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_1 \sigma_2} \quad (5.1)$$

とする事で、TPC の位置分解能 σ_{xy} を正しく評価する事ができる [13]。

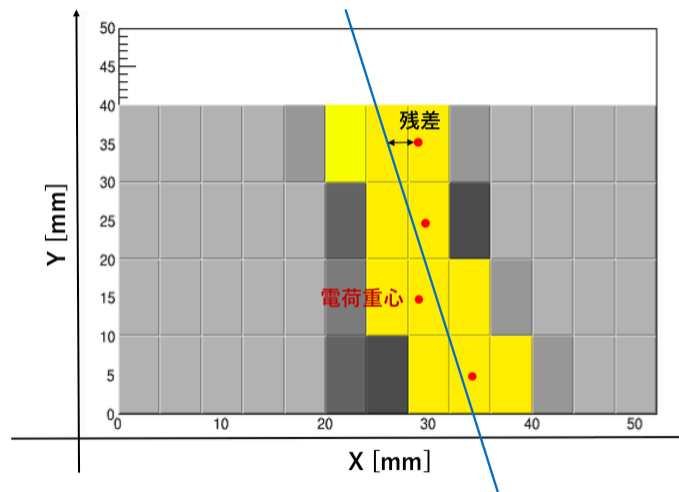


図 5.5. パッド平面の位置分解能評価の方法 [14]

5.2.2 ドリフト方向の位置分解能の評価方法

ドリフト距離は、電子のドリフト時間情報と電子のガス中の速度から求める事ができる。この時、ソレノイド内部の測定磁場から電子のドリフト軌道を Runge Kutta 法で解いている。ドリフト距離を飛跡の z 座標とする。パッド平面の位置分解能の評価と同様な方法で、 σ_1 、 σ_2 を求め、ドリフト方向の位置分解能を決定する。

5.2.3 TPC 分解能の各依存性

電場及び磁場が十分平行であり $\mathbf{E} \times \mathbf{B} \simeq \mathbf{0}$ のとき、3.4 で述べた、位置分解能を分解した式は簡略化できて

$$\sigma_{xy}^2 = \sigma_{xy,0}^2 + \sigma_{xy,D}^2 L_D + \sigma_{P,W}^2 \tan^2 \theta \quad (5.2)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z,0}^2 + \sigma_{z,D}^2 L_D + \sigma_{dip}^2 \tan^2 \lambda \quad (5.3)$$

と書ける。以下ではパッド平面における位置分解能のドリフト距離及び θ 依存性、ドリフト方向の位置分解能のドリフト距離依存性及び dip angle 依存性についてそれぞれ議論する。

5.2.4 パッド平面における位置分解能のドリフト距離依存性

4.1.4 で述べたポリエチレン標的のデータを用いた。TPC のドリフト領域を 3 つの領域に分けて評価を行なった。ここで、式 5.3 における $\tan \theta^2$ 依存性を除去するために、 $|\tan \theta| < 0.05$ の制限をかけている。

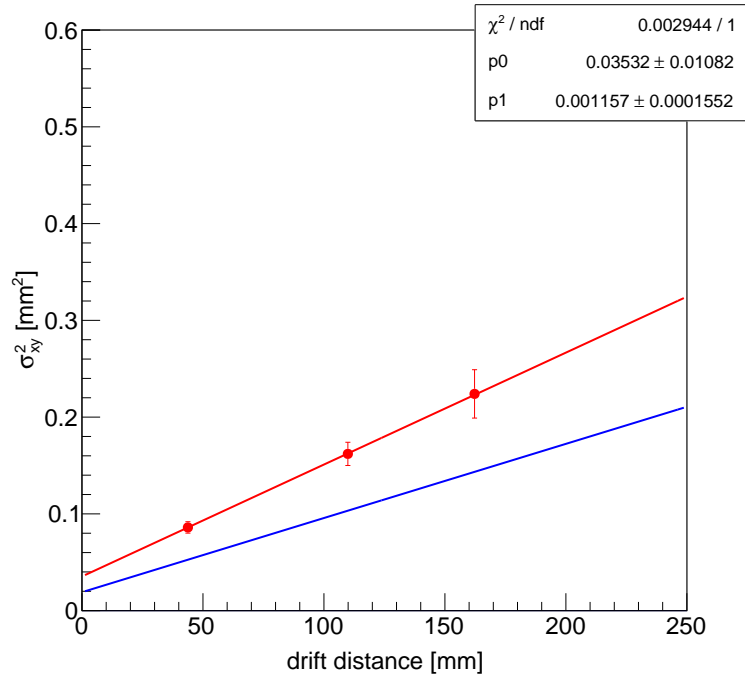


図 5.6. パッド平面上の位置分解能のドリフト距離依存性。

5.2.5 パッド平面における位置分解能の θ 依存性

4.1.4 で述べたポリエチレン標的のデータを用いた。ドリフト領域を通過した荷電粒子に関して、 $0 < |\tan \theta| < 0.2$ 、 $0.2 < |\tan \theta| < 0.4$ 、 $0.4 < |\tan \theta| < 0.6$ 、 $0.6 < |\tan \theta| < 0.8$ に区切って位置分解能の評価を行い、位置分解能の二乗の値と $\tan \theta$ のグラフを直線フィッティングする事で、傾き $\sigma_{P,W}^2$ の評価を試みた (図 5.7)。しかし、先行研究 [14] では顕著に見られた相関が見えなくなっていることがわかった (図 5.8)。この原因については Appendix にて後述した考察を行ったり、ドリフト速度異常によるゲインの低減を疑ったが、原因究明には至らなかった。

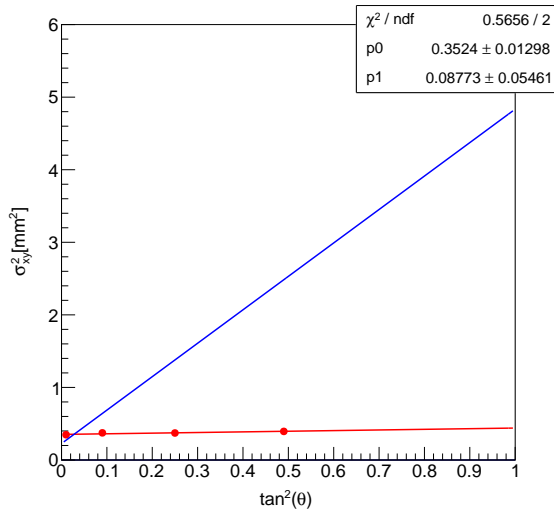


図 5.7. パッド平面上の位置分解能の θ 依存性

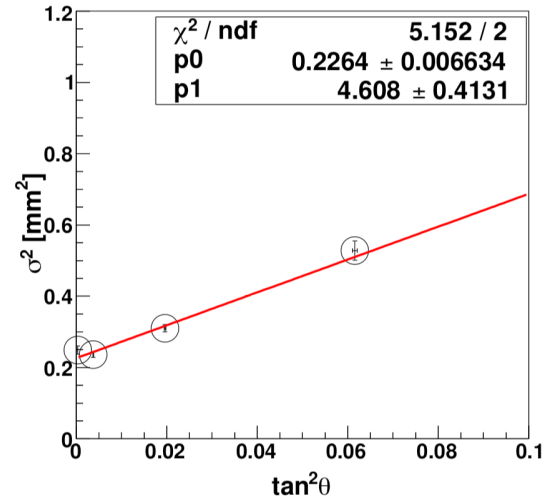


図 5.8. ドリフト速度正常時における先行研究 [14] の結果。

5.2.6 ドリフト方向の位置分解能のドリフト距離依存性

4.1.5 で述べた 3 枚組の Cu 標的のデータを用いた。dip angle 依存性を除去するために $|\tan \lambda| < 0.1$ の条件のもとで、3 枚それぞれの標的について、それ由来の飛跡から位置分解能を評価した。位置分解能の二乗の値とドリフト距離の二乗の値のグラフを直線フィッティングする事で、傾き $\sigma_{z,D}^2$ を求めた (図 5.9)。

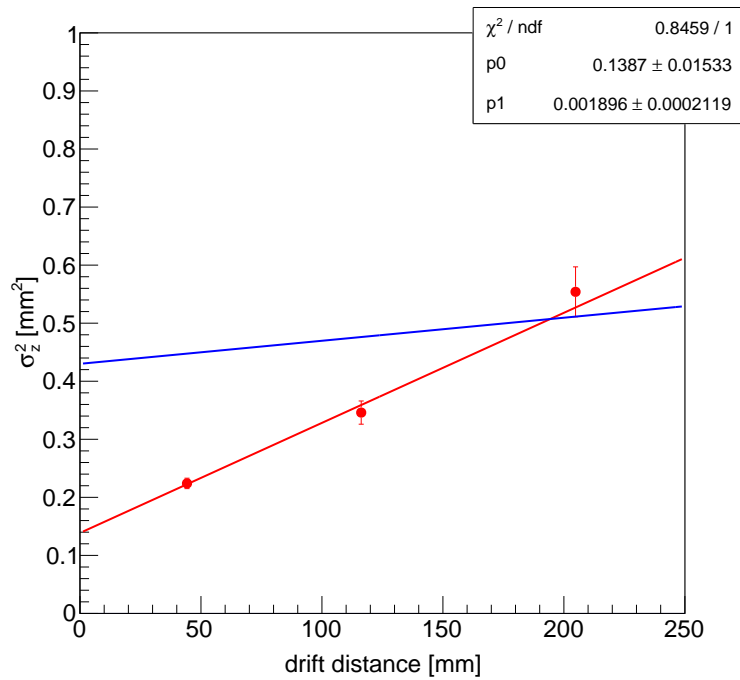


図 5.9. ドリフト方向の位置分解能のドリフト距離依存性。

5.2.7 ドリフト方向の位置分解能の dip angle 依存性

4.1.5 で述べた 3 枚組の Cu 標的のデータを用いた。ドリフト距離を $40 < z < 60$ (mm) に制限した上で、 $0 < |\tan \lambda| < 0.1$ 、 $0.1 < |\tan \lambda| < 0.3$ 、 $0.3 < |\tan \lambda| < 0.5$ 、 $0.5 < |\tan \lambda| < 0.7$ 、に区切って位置分解能の評価を行い、位置分解能の二乗の値と $\tan^2(\lambda)$ のグラフを直線フィッティングする事で、傾き σ_{dip}^2 を求めた。

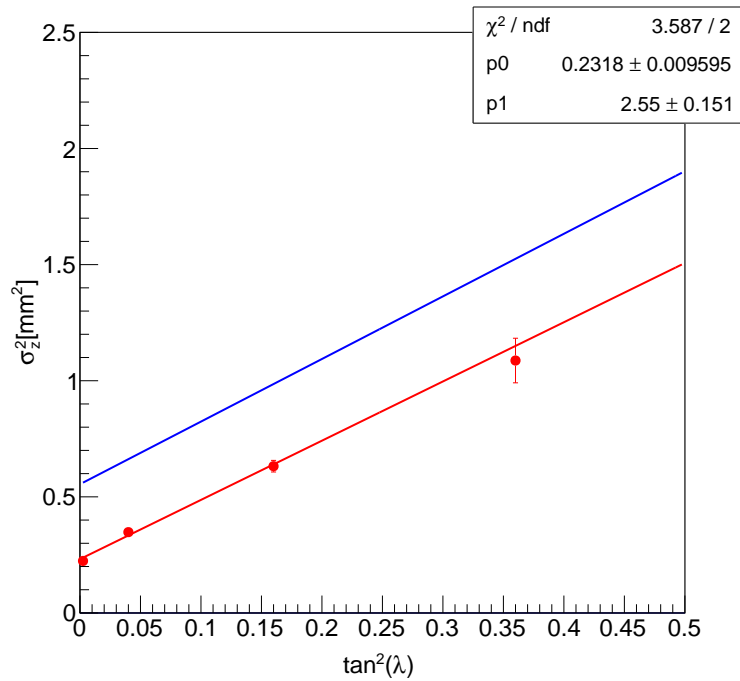


図 5.10. ドリフト方向の位置分解能の dip angle 依存性。

5.2.8 TPC 固有の位置分解能の評価方法

ドリフト方向の位置分解能について考える。5.2.6 でドリフト距離が 0 mm における位置分解能 σ_{z,D_0} 、5.2.7 で $\lambda = 0$ における位置分解能、 σ_{z,λ_0} がそれぞれわかる。これらに加えてドリフト距離および λ の制限の無い時の位置分解能 $\sigma_{z,all}$ を用いて固有分解能を見積もることができる。

まず、 σ_{z,D_0} はドリフト距離の項を持たないので、全イベントの dip angle λ について $\tan^2 \lambda$ の平均値 $\tan^2 \lambda_a$ を用いて

$$\sigma_{z,D_0}^2 = \sigma_{z,0}^2 + \sigma_{dip}^2 \tan^2 \lambda_a \quad (5.4)$$

と書ける。同様にして全イベントのドリフト距離の平均値、 L_{D_a} を用いて

$$\sigma_{z,\tan^2 \lambda_0}^2 = \sigma_{z,0}^2 + \sigma_{z,D}^2 L_{D_a} \quad (5.5)$$

と書ける。

ここで、ドリフト距離及び λ の全領域における位置分解能 $\sigma_{z,all}$ は

$$\sigma_{z,all}^2 = \sigma_{z,0}^2 + \sigma_{dip}^2 \tan^2 \lambda_a + \sigma_{z,D}^2 L_{D_a} \quad (5.6)$$

であるから、固有位置分解能 $\sigma_{z,0}$ は

$$\sigma_{z,0}^2 = \sigma_{z,D_0}^2 + \sigma_{z,\tan^2 \lambda_0}^2 - \sigma_{z,all}^2 \quad (5.7)$$

によって求めることができる。

同様にしてパッド平面における固有位置分解能 $\sigma_{xy,0}$ は

$$\sigma_{xy,0}^2 = \sigma_{xy,D_0}^2 + \sigma_{xy,\tan^2 \theta_0}^2 - \sigma_{xy,all}^2 \quad (5.8)$$

によって求めることができる。

表 5.2: ドリフト方向の位置分解能依存性各項まとめ

$\sigma_{z,0}$	TPC 構造によって決まる固有の位置分解能
σ_{z,D_0}	ドリフト距離が 0 mm の時の位置分解能
$\sigma_{z,\tan^2 \lambda_0}$	飛跡の dip angle(3.8) が 0 の時の位置分解能
$\sigma_{z,all}$	全ての依存性を含んだ位置分解能

5.3 エネルギー損失の計算方法の最適化

反応により TPC 中で発生した荷電粒子が、チェンバー内のガスをイオン化したときに生じる電子の量は、TPC のドリフト領域における荷電粒子のエネルギーロスに比例する。この節ではドリフト電子によりカソードパッドに誘起された信号の波形情報を用いた、エネルギー損失の評価方法の最適化について述べる。

5.3.1 エネルギー損失の dip angle 依存性

飛跡の dip angle λ が大きく成るほどカソードパッドに対してドリフト領域を通過する長さは長くなり、 $\tan \lambda$ に比例する。このときドリフト領域でのエネルギーロスも $\tan \lambda$ に比例することが十分に考えられるが、飛跡ごとのエネルギー損失を見積もる際にパッドに誘起された電荷量をパッド領域を通過した飛跡長で割ることで、dip angle 依存性は消えるはずである。本節ではその手法を用いて実際に dip angle 依存性を除去できているのかどうか調べる。

図 5.11 はエネルギー損失を 5.2.1 節で述べたガウス関数の面積を計算することで見積もり、飛跡の dip angle λ について $\tan \lambda$ を 0.2 ずつ区切って分布を見たものである。この分布には π に起因する分布及び陽子に起因する分布が混じっているため、2 山の構造を持つように見える領域もある。しかし、この 2 山ははっきりと分けられるわけでもなく、dip angle で分割したエネルギー損失分布はランダウ分布に分布に近い形をしており、ここでは分布の平均値及び RMS を取得するという目的のためにランダウ分布による当てはめを行なった。そして、図 5.12 は図 5.11 と同様に 8 分割した λ 領域についてそれぞれ λ の平均値及び電荷量の平均値をプロットしたものである。ここで電荷量は検出されたパッド領域における飛跡長で割ることで平均を行なっている。これらの図を見ると、エネルギーロスと $\tan \lambda$ の明確な相関関係は見えない。飛跡長で割った荷電粒子のエネルギーロスは統計の少ない $\tan \lambda = -0.7$ の点を除いて、統計誤差の範囲内に収まっており、dip angle の寄与は個別に考慮する必要がないと判断した。

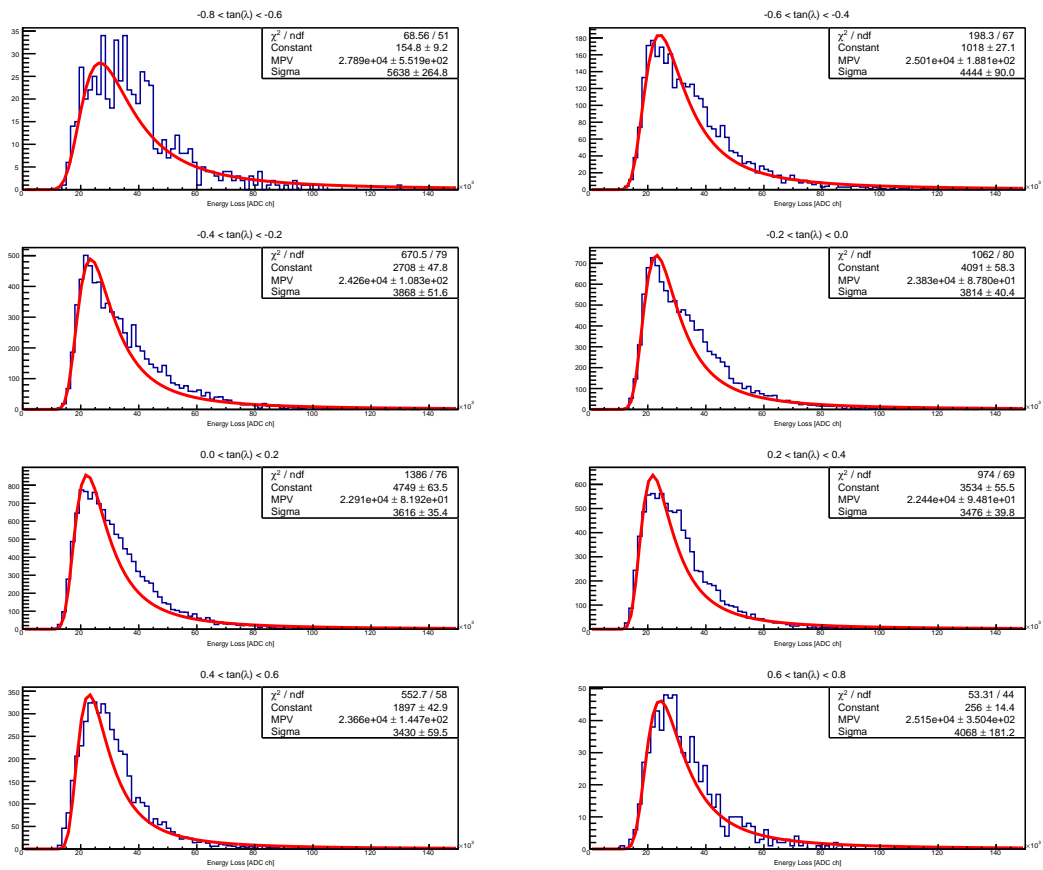


図 5.11. dip angle の異なる選定領域におけるパット誘起電荷分布。

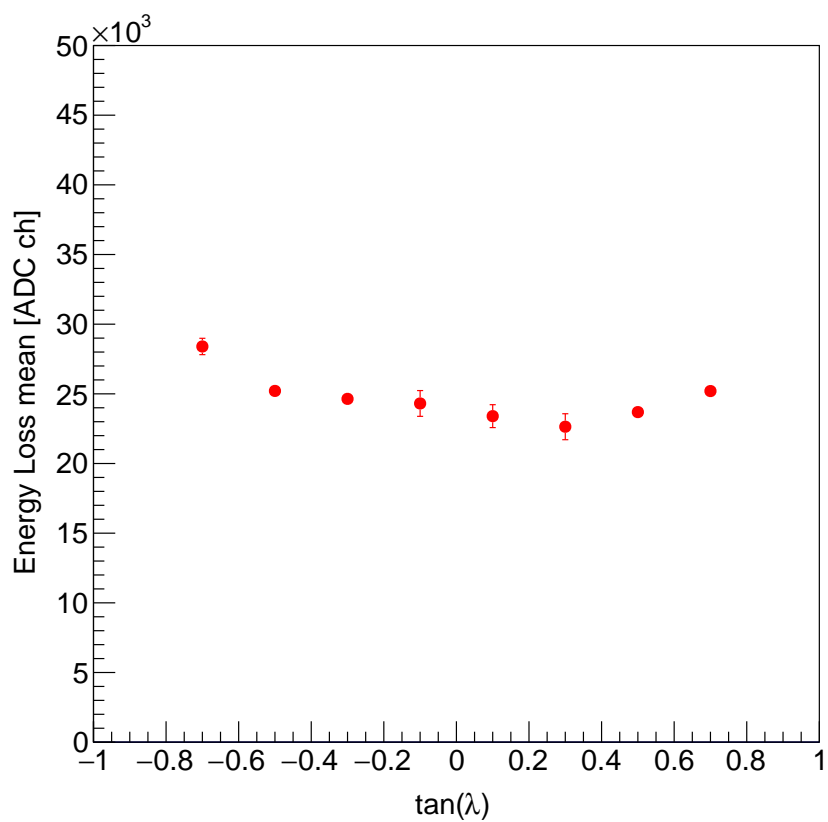


図 5.12. パッドに誘起された電荷量の dip angle 依存性。5.11 と同様 8 分割した角度領域における電荷量の平均値及び角度の平均値。

5.3.2 エネルギー損失の θ 依存性

飛跡をパッド平面に射影した時、カソードパッドと飛跡のなす角が大きいほどパッド一枚に誘起される電荷量は大きくなると考えられる。図 5.14 は 5.3.1 同様にエネルギーロスを見積もり、パッドと飛跡のなす角度 θ について $\tan \theta$ を 0.2 ずつ区切って分布を見たものである。また、図 5.14 は図 5.14 と同様に 8 分割した θ 領域についてそれぞれ θ の平均値及び電荷量の平均値をプロットしたものである。こちらも 5.3.1 節同様にエネルギーロスと $\tan \theta$ の相関関係が見られなかった。これは、ドリフト速度異常を原因とするアバランシェ増幅によるゲインの低減が利いていると考えられたが、クリティカルな原因の究明には至っていない。ここでは、 θ のエネルギーロスへの寄与は統計誤差に比べ十分小さいため、考慮する必要性が小さいと判断した。

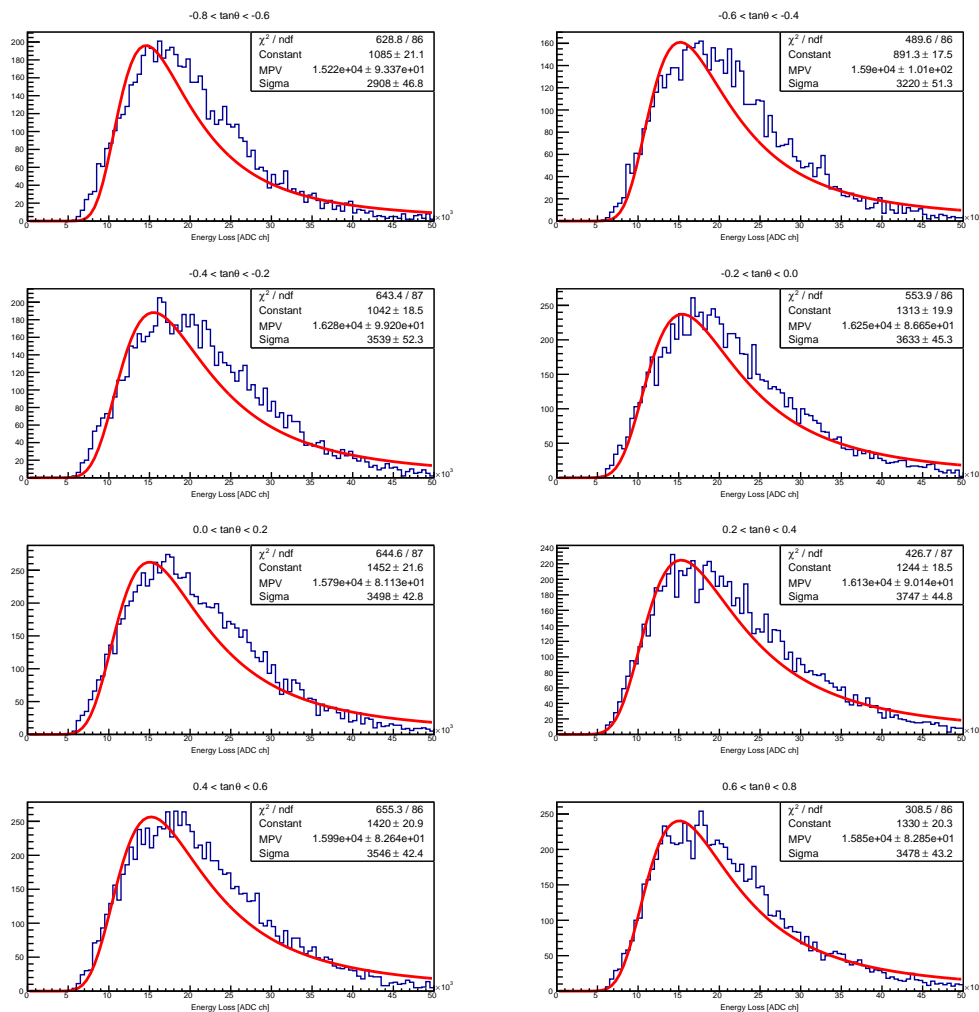


図 5.13. θ の異なる選定領域におけるパッド誘起電荷分布。電荷量と θ には明確な相関が見られない。

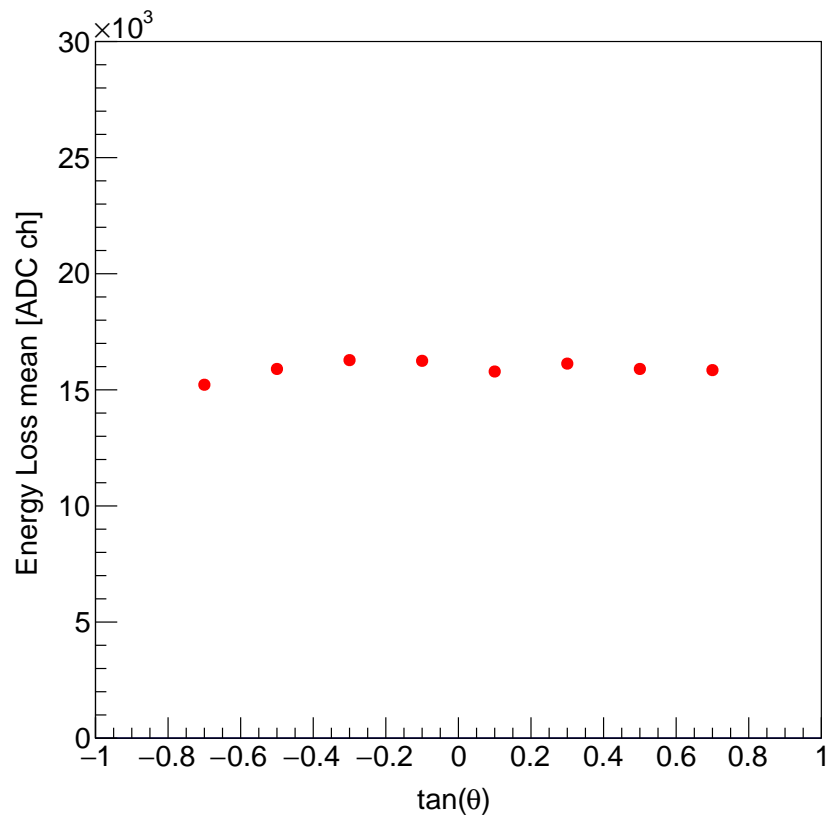


図 5.14. パッドに誘起された電荷量の θ 依存性。と同様 8 分割した角度領域における電荷量の平均値及び角度の平均値

5.3.3 評価関数

本研究では、エネルギー損失の評価方法の最適化を π 粒子及び陽子の粒子識別を運動量とエネルギー損失から行った際に、識別能が最も高くなるように行う。評価に当たって、荷電粒子の物質中及びガス中でのエネルギー損失はランダウ分布に従うが、運動量領域を区切って、かつ飛跡ごとに飛跡長さを考慮した平均をとって評価する上ではガウス関数とランダウ関数のどちらがより相応しいか比較を行った。負電荷の粒子の粒子について、低運動量領域でエネルギー損失の分布を見ると、 π^- による分布が見られる。これらの分布をガウス関数及びランダウ関数でフィッティングし (図 5.15、5.16)、reduced χ^2 を比較した (図 5.17)。図 5.15、5.16 でメインピークの右側の事象は、 K^- に起因すると考えられるバックグラウンドであるため、フィッティングには含めていない。

比較を行なった結果、ガウス関数の方がよくフィッティングできていると分かったため、本研究ではガウス関数を使って粒子識別能の評価を行った。実際、ランダウ分布に従う変数を 100 万個生成し、10 個ずつ平均した値の分布はガウス分布に近い。(図 5.18)。本研究ではヒット数 n に対し、 $n > 12$ という制限をかけることでほぼ確実に飛跡と呼べるものを選んでいるため、以上の結果からガウス関数を用いて評価することが妥当であると判断した。

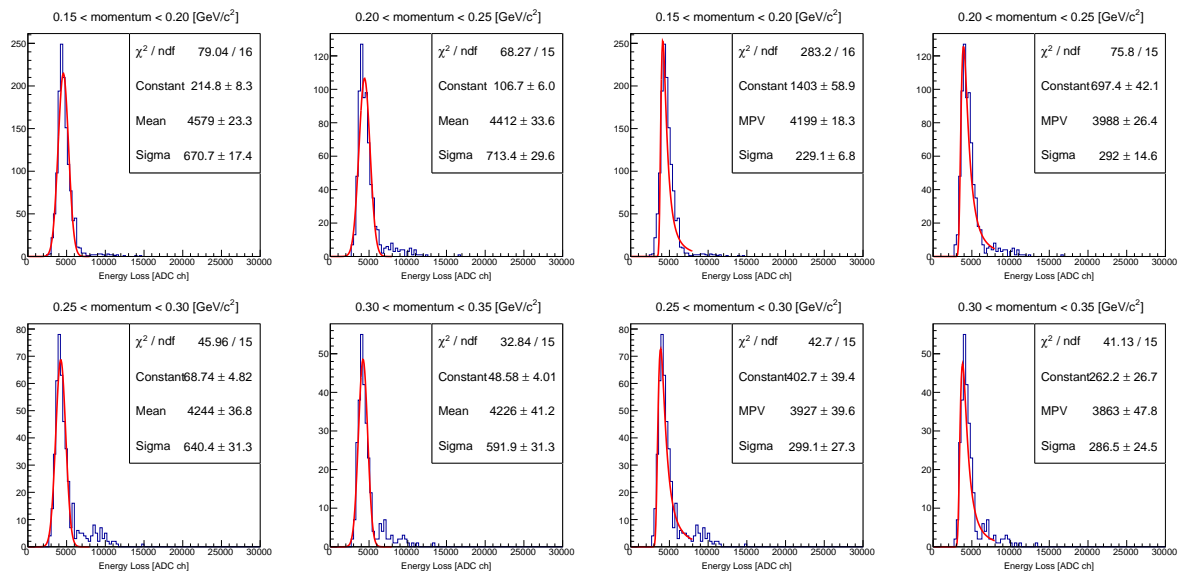


図 5.15. いくつかの異なる運動量領域におけるエネルギー損失分布。ガウス関数であてはめを行った結果が赤の実線で示されている。

図 5.16. いくつかの異なる運動量領域におけるエネルギー損失分布。ランダウ関数であてはめを行った結果が赤の実線で示されている。

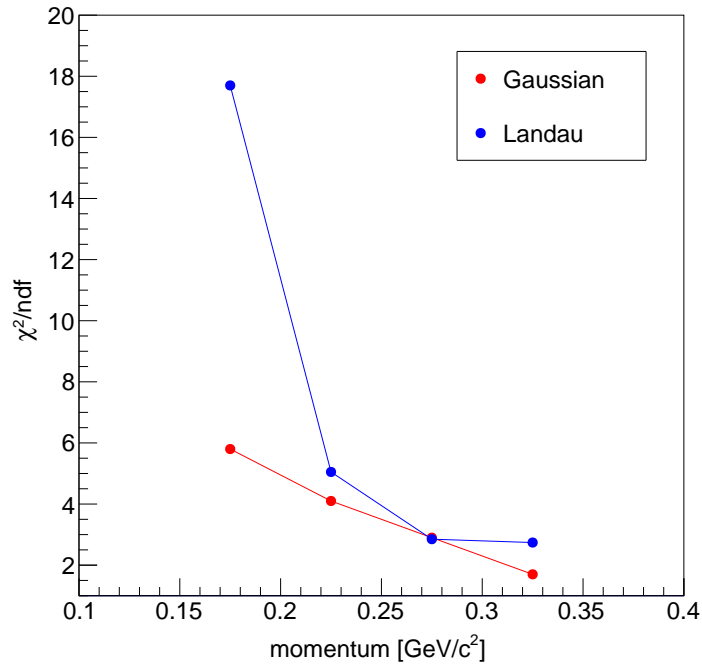


図 5.17. 図 5.15 と図 5.16 における reduced χ^2 の比較。

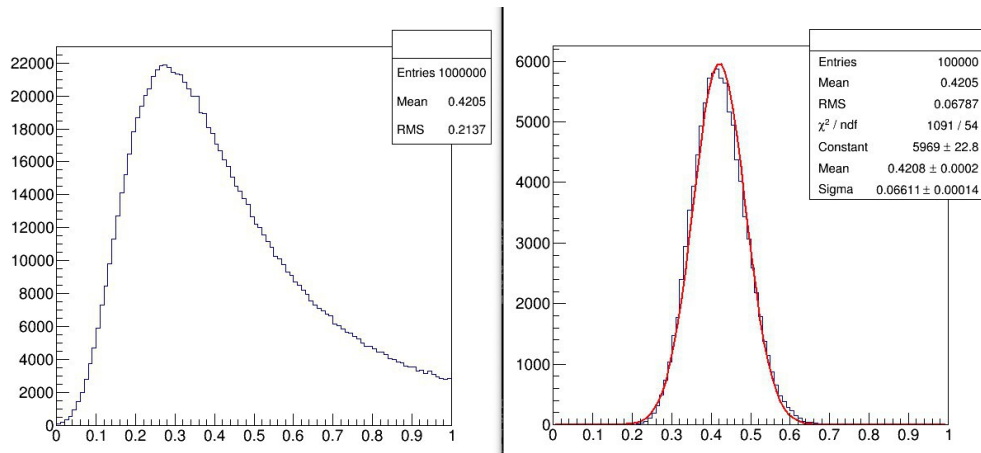


図 5.18. 乱数により生成したランダウ分布 (左図) と、その変数を 10 個ずつ平均した値による分布 (右図)。

5.3.4 各ヒット点における評価方法

LEPS2TPC ではドリフト電子により、連続した 3 つのカソードパッドにおいて、誘起された信号の ADC 値が閾値を超えた場合にヒット情報としてみなし、イベントトリガーが生成されるごとに得られる複数のヒット情報から飛跡検出を行なっている。この時の adc 値を用いた評価方法について 3 つ候補が上げたのでそれらについて粒子識別による比較を行う。

まず、一つ目はヒット情報を返した、連続した 3 パッドによる adc 値の和を取る方法である。2 つ目は、ヒット情報を返した、連続した 3 パッドに対して、横軸をパッドの位置、縦軸を adc 値としたグラフからガウス関数を解き、そのピークの値で持って評価する方法である。そして 3 つ目は、2 つ目と同様にして得たガウス関数の面積から評価する方法である。その他にも 1 ヒット情報に対して閾値を超えたパッドの adc を全て足すなどの候補を挙げたが、解析が非常に困難であったため断念した。

この 3 つの評価方法を比較する方法であるが、 π 粒子及び陽子が混在している運動量領域である $0.15 \text{ GeV}/c < p < 0.35 \text{ GeV}/c$ を 4 分割し、それぞれの評価方法で得たエネルギー損失量から、荷電粒子の総エネルギー損失量を見積もった (図 5.19、5.20、5.21)。この分布より、 π 粒子を 3σ で選んだ時の陽子の混入率を評価することで比較を行った (図 5.22)。

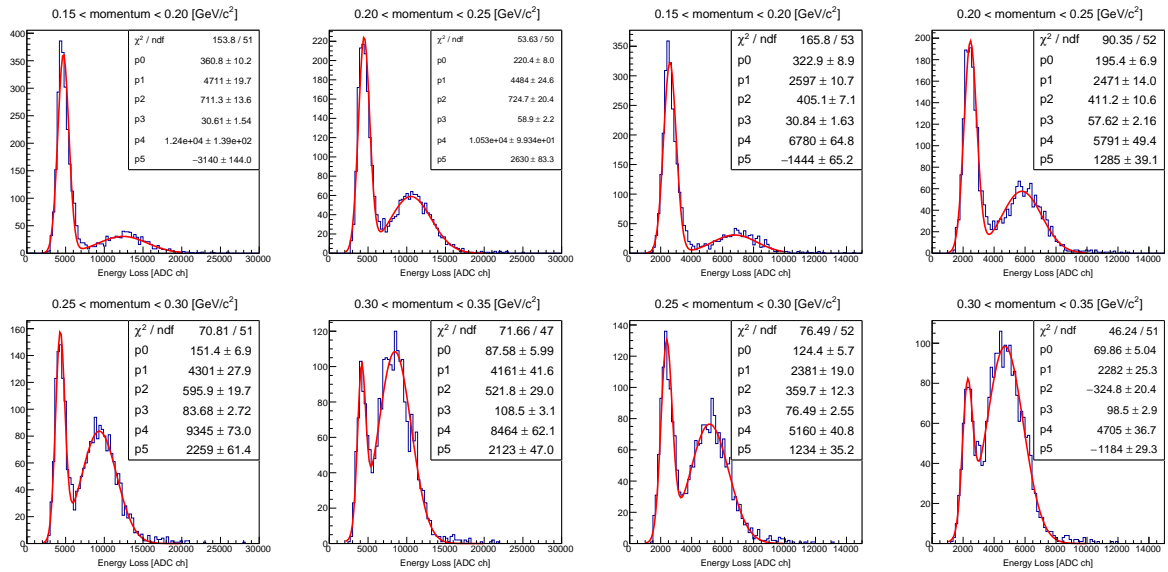


図 5.19. 隣り合う 3Pad の adc の値の和を取ることによって評価したエネルギー損失分布。

図 5.20. 隣り合う 3Pad の adc の値からガウス関数を解き、そのピーク値によって評価したエネルギー損失分布。

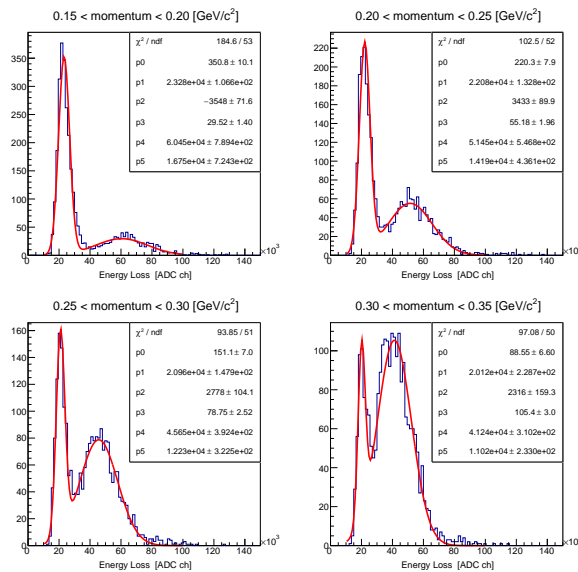


図 5.21. 隣り合う 3Pad の adc の値からガウス関数を解き、その面積を計算することによって評価したエネルギー損失分布。

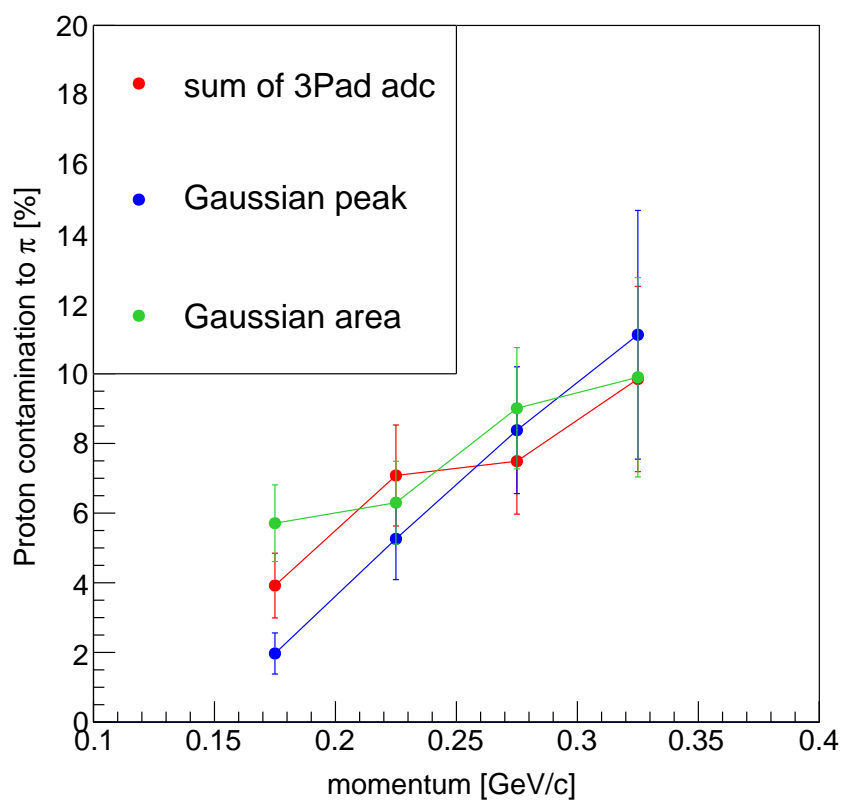


図 5.22. 3つの評価方法について π を 3σ で選んだ時の陽子の混入率。

5.3.5 各飛跡におけるのエネルギー損失の評価方法

5.3.4 節で評価した結果より低運動量域で粒子識別能が最も高かった 3 パッドによるガウス関数のピーク値を用いて、TPC を通過した荷電粒子の総エネルギー損失量の評価を行った。

従来の手法では各ヒット情報から得たエネルギー損失を 1 飛跡で全て足しあげて、荷電粒子が通過したパッド領域の総距離で割ることで評価を行っていたが、エネルギー損失はランダウ分布に従い、大きくなる方向に長いテールを持つ。そこで本研究では、各飛跡ごとにヒット情報をエネルギー損失が大きいものから順に 1 つないし複数個取り除いた上で荷電粒子のパッド平面上の飛行距離で割ることで、このテールを落としてより粒子識別能がよくなる可能性を模索した。

比較対象は、ヒット情報が 12 以上である飛跡に対し、エネルギー損失を大きいものから 0 ~ 3 個を取り除く、計 4 通りの方法で飛跡のエネルギー損失を計算したものとし、粒子識別能の評価方法は 5.3.4 節と同様に π 粒子を 3σ で選んだ時の陽子の混入率を評価することで行った (図 5.27)。

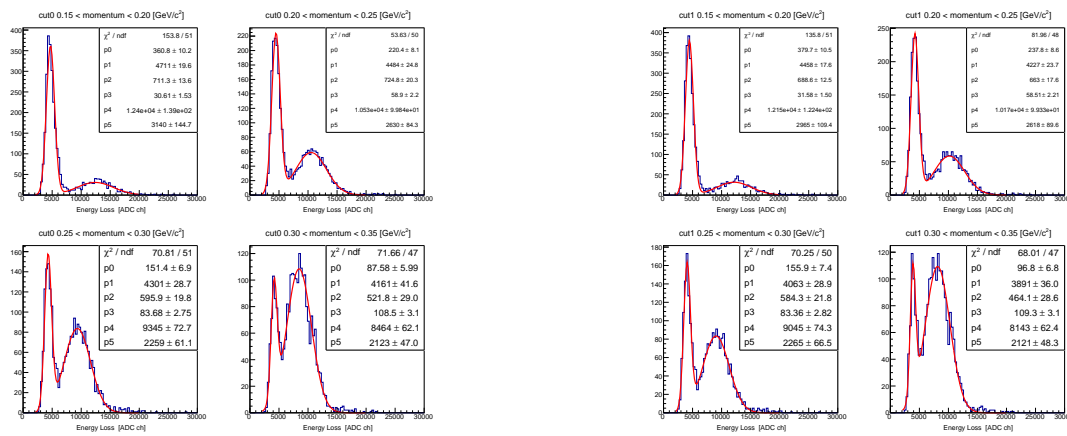


図 5.23. 各ヒット点におけるエネルギー損失の和を荷電粒子がパッド領域を横切った総飛行距離で割った量の分布。

図 5.24. 各飛跡のヒット点の中で最もエネルギー損失が大きいものを 1 点取り除いた上で図 5.23 と同様の計算を行った量の分布。

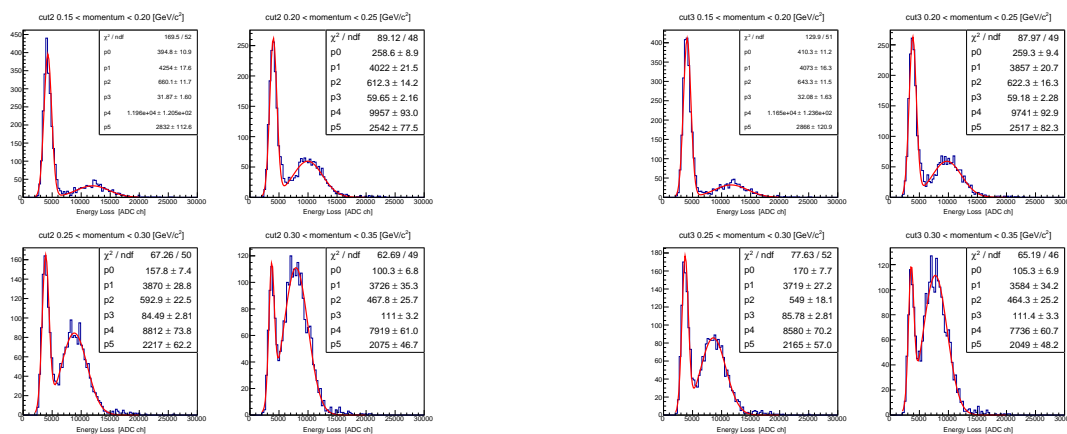


図 5.25. 各飛跡のヒット点の中で最もエネルギー損失が大きいものから 2 点取り除いた上で図 5.23 と同様の計算を行った量の分布。

図 5.26. 各飛跡のヒット点の中で最もエネルギー損失が大きいものから 3 点取り除いた上で図 5.23 と同様の計算を行った量の分布。

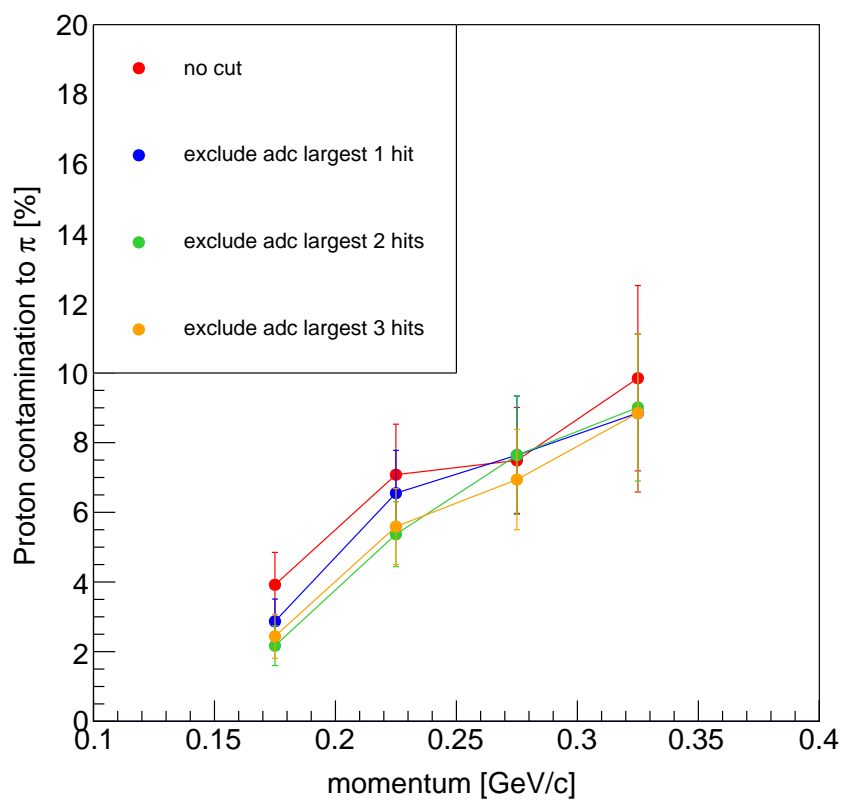


図 5.27. 4つの TPC 中でのエネルギー損失の総量の評価方法について π を 3σ で選んだ時の陽子の混入率。

5.4 結論

5.4.1 TPC の固有位置分解能

今回の実験によって得た TPC 分解能の各成分を表 5.3 にまとめた。

ドリフト速度が正常な状態で行われた先行研究 [14] では固有分解能及び、ドリフト距離依存性、角度依存性の評価を行い、 $\Theta^+ \rightarrow K_s^0 p$ のシミュレーションを行った結果、目標の $6 \text{ MeV}/c^2$ という不変質量分解能を達成していることがわかった。今回の測定はドリフト速度が正常時より半分以上遅い状態の TPC について行い、位置分解能の評価及び、3.5 節で述べた Θ^+ 生成のシミュレーションを行い、不変質量を再構成した。

TPC 位置分解能の解析結果及びドリフト速度が正常な状態で行われた先行研究 [14] の結果を表 5.3 に示す。ドリフト方向の位置分解能については、ドリフト速度が遅いことにより、時間分解能が良くなるため、固有分解能は向上している。その一方で拡散の効果が大きくなるため、ドリフト距離依存性は大きくなっている。パッド平面方向の分解能については、固有分解能に関してもドリフト距離依存性が拡散の効果により悪くなっているのが見られる。得られた位置分解能を考慮して行なったシミュレーションから得た Θ^+ の質量分解能は $5.3 \text{ MeV} / c^2$ となり、 Θ^+ 探索における要求性能を満たしていることが判明した (図]5.28)。低質量側にテールを引いているのは、ガス中での多重散乱やエネルギーロスによって運動量に変化する効果である。この結果はドリフト速度が設計の速度に対して遅いことにより拡散の効果が大きくなったことで運動量分解能の悪化を招いたためであり、LEPS2 実験において Θ^+ 探索を行う際にはドリフト速度が正常な状態でオペレートすることが求められると結論づけた。

2020 年 1 月現在ではドリフト速度の回復が確認されており正常なオペレートが可能な状態であるが、ビームタイムが既に終了しており、本研究ではこれを究明することは叶わなかった。今後励磁したビーム実験において正常なドリフト速度の TPC について再度 θ 依存性に対する評価を行う必要がある。また、位置分解能はヒット数やアクセプタンスにも依存するため、この依存性を今後定量的に評価する必要がある。

表 5.3: TPC 位置分解能

	本研究の解析結果	先行研究 [14] における結果
$\sigma_{z,0}$	$529 \pm 14 \text{ } \mu\text{m}$	$654^{+40}_{-43} \text{ } \mu\text{m}$
σ_{zD}^2	$1.9 \pm 0.21 \text{ } \mu\text{m}$	$0.40 \pm 0.03 \text{ } \mu\text{m}$
σ_{dip}^2	$2600 \pm 150 \text{ } \mu\text{m}$	$4600 \pm 400 \text{ } \mu\text{m}$
$\sigma_{xy,0}$	$163 \pm 26 \text{ } \mu\text{m}$	$138^{+13}_{-15} \text{ } \mu\text{m}$
σ_{xyD}^2	$1.16 \pm 0.16 \text{ } \mu\text{m}$	$0.77 \pm 0.03 \text{ } \mu\text{m}$
$\sigma_{P,W}^2$	$89 \pm 5.5 \text{ } \mu\text{m}$	$2700 \pm 300 \text{ } \mu\text{m}$

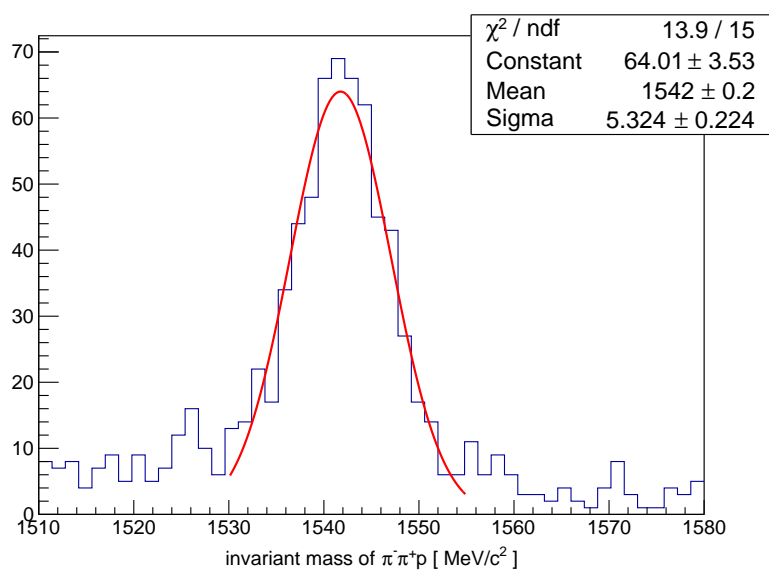


図 5.28. 評価した分解能を考慮して Θ^+ 生成のシミュレーションを行い、崩壊粒子から不変質量を組んだもの。

5.4.2 TPC における荷電粒子のエネルギー損失の評価方法

本研究では各ヒット点ごとのエネルギー損失の評価方法、飛跡ごとのエネルギー損失の評価方法の2つの観点から最適化を行った。再掲図 5.29 では各ヒット情報ごとにエネルギー損失を評価する際は、運動量が大きくなるほど有意差がなくなっていくものの、低運動量領域では連続した3パッドの ADC 値のピークから求めるのが良いという結果が得られた。

また、飛跡ごとのエネルギー損失については再掲図 5.30 より、こちらも運動量が大きい成分では有意差が見られないが、小さい成分ではエネルギー損失の大きいヒット情報を除去することで識別能が上がっているのが確認でき、この手法が有効であるという可能性を示唆している。高運動量領域では分布がガウス関数から外れていき、関数フィッティングが非常に困難になるので、今後、最適化を図る際にはより高度な関数の導入が必要である。今後このような解析手法の開発により、 K 中間子の識別能力の向上、更にそれによる Θ^+ の測定感度の向上が期待できる。

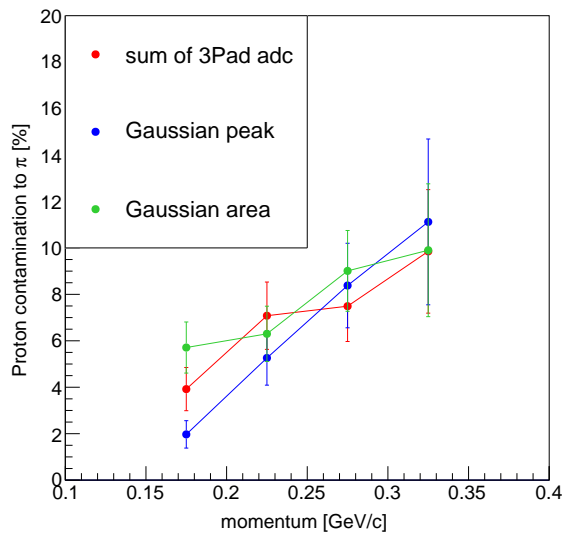


図 5.29. 3つの評価方法について π を 3σ で選んだ時の陽子の混入率 (再掲)。

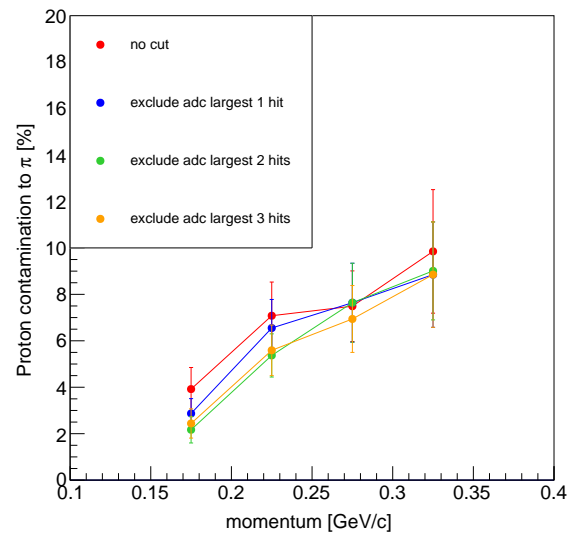


図 5.30. 4つの TPC 中でのエネルギー損失の総量の評価方法について π を 3σ で選んだ時の陽子の混入率 (再掲)。

第6章 まとめと今後の展望

本研究は LEPS2 実験の主目的である θ^+ 探索において要求される性能を有しているかの性能評価及びエネルギー損失の評価方法を最適化することによる TPC の性能の向上を行った。

本修士論文では LEPS2TPC 及び Barrel RPC を用いて側方領域に放出された荷電粒子の飛行時間測定を行う予定であったが、ドリフト速度異常の問題が非常に大きく、前期に取得したデータからでは不可能であった。2020 年 1 月現在ではドリフト速度はほぼ $42 \pm 9 \text{ mm}/\mu\text{s}$ まで回復しており、正常なオペレートが可能である。しかし回復が確認された時分にはビームタイムが終了しており、 γ 線によるデータ取得は不可能であった。そこでドリフト速度異常時の前期データ取得時においても位置分解能を評価し LEPS2 実験の目的である、 θ^+ 探索を成し得る質量分解能を有しているのか評価する価値があると判断し評価を行った。前期に取得したデータの解析により位置分解能の評価を行なったところ、ドリフト距離に対する拡散の効果が大きくなっていることが判明した。そして、得られた位置分解能を考慮した θ^+ 生成シミュレーションを行い不変質量分解能を評価した結果、 $\sigma = 5.3 \text{ MeV}/c^2$ となり、目標分解能である $\sigma = 6 \text{ MeV}/c^2$ を達成していることが判明した。アクセプタンスおよびヒット数の依存性について今後詳細を調べる必要があり、今後の課題である。これより、LEPS2 実験において θ^+ 探索実験を行う際はドリフト速度が正常であるという条件が必要であると結論づけた。また、荷電粒子のエネルギー損失をカソードパッドに誘起される電荷量から見積もることができ、TPC 単体の性能向上のためにエネルギー損失の評価方法について最適化を図った。荷電粒子のガス中のエネルギー損失はランダウ分布に従うため各飛跡ごとに誘起電荷量が最も大きかったヒット点を削除する手法に着目した結果、これが有効である可能性を示唆する結果が得られた。

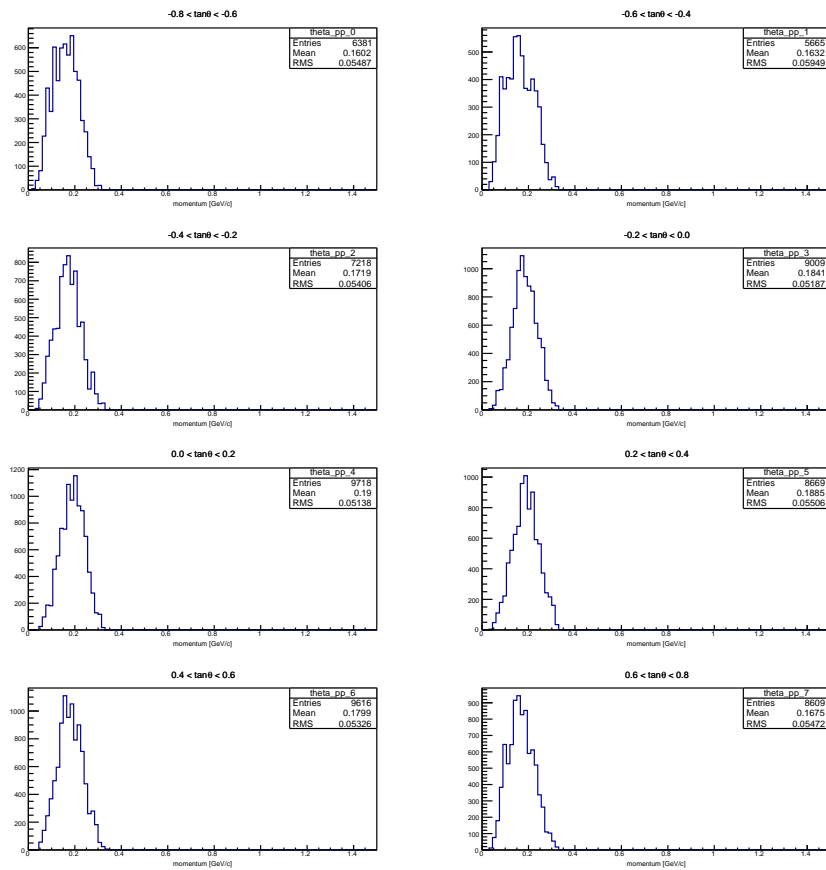
今後は大規模な修理を経てドリフト速度を回復した TPC が θ^+ 探索における要求性能を満たしているか、励磁した状態でかつ γ 線を用いて再度性能評価を行った上で、Barrel RPC 等の他の側方検出器を合わせた合同解析を行い、飛行時間測定を行うことで TPC 単体では困難な K 中間子識別を行うことが当面の目標である。

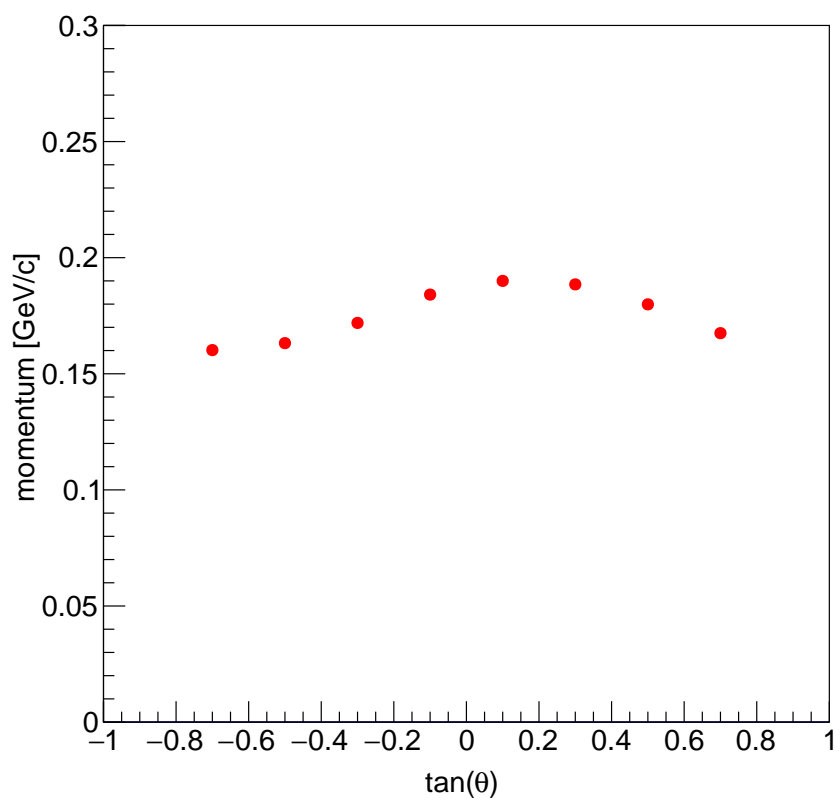
Appendix

A 運動量の θ 依存性

5.2.5 で述べたように、パッド平面方向の位置分解能の θ 依存性について先行研究 [14] で顕著に見られた依存性が見られなくなった。遠因はドリフト速度の異常によるものであると考えられるが、その前に θ について正しい解析を行っているか検証を行なった。

磁場中において荷電粒子は運動量が低いほどよく曲がる。TPC のワイヤーが同心円状に貼られていると仮定すると、飛跡とワイヤーのなす角である θ は運動量が大きい時は飛跡はほとんど曲がらず、全点で 0 に近くなる。一方運動量が小さくなると飛跡が曲がることで θ が大きい点が発生する。これに着目して θ を複数領域に区切った時の運動量分布の平均値の変化を調べた。図 A.1 はエネルギー損失と運動量分布から π 粒子を選んだ上で、 θ 領域を 8 分割し、運動量分布の変化を見たものである。図 A.2 はこの分布から θ と運動量の平均値との相関をプロットしたものである。図 A.2 を見ると飛跡とワイヤーの角度が大きい時運動量の低い成分の影響で平均値が下がっているのが見られた。想定した相関が見られたことから、飛跡上の各ヒット点におけるの運動量とワイヤーの角度から θ の見積もり方は正しいと判断した。

図 A.1. いくつかの異なる θ 領域における π 粒子の運動量分布

図 A.2. π 粒子飛跡の各ヒット点における θ と運動量の相関

謝辞

本研究を進めるにあたり、大変多くの方々にお世話になりました。この場を借りて皆様に御礼申し上げます。新山雅之准教授は2018年度より京産大に異動されながらも私のために時間を取って指導してくださり、そして本論文執筆にあたり何度も添削していただき誠にありがとうございました。また、同研究室の後神利志助教授にも提出直前の短い時間の中で全文添削していただき、本当にありがとうございました。そして同研究室の永江知文教授には、常日頃から、本研究の進展を気にしてくださり、解析結果の考察について助言していただきありがとうございました。

同研修室同実験グループの先輩である小早川亮さんはTPCのスペシャリストとして当LEPS2グループには必要不可欠な方であり、TPCのセットアップ、データ取得から解析及びシミュレーションの仕方など、何から何までご丁寧に指導くださり感謝感激雨霰でございます。そして同じく同研究室同実験グループの先輩である渡邊憲さんは25本ものBRPCを設計から製作まで一人で全て取り仕切り、多大な実績を残している一方で、外部から様々な出自の人々が集うこのLEPS2グループにおいて誰に対しても分け隔てなく明るく接し、笑顔の絶えない研究室作りに尽力されていた姿が印象的でした。そのおかげで私もストレスなく実験や解析を進めることができたと感じております。また同じく先輩の梅崎英一さんは当実験グループにおける業務の進め方や連携体制のあり方に一石投じられ、学生にとってより良い研究環境作りに先陣切って取り組まれました。そのおかげで私はとても円滑に研究活動に取り組むことができたと感じており、感謝の言葉もございません。

大阪大学の與曾井優教授は教授という立場でありながらも、貴重なお時間を割いて実験棟に自ら赴き、LEPS2実験の設備や検出器などのハード関係で多大なる尽力をされました。そのおかげで快適な実験環境の中で作業を行うことができ、大きなケガなく本研究を終えることができました。RCNPの水谷圭吾さんは、一を聞いて十を知るという言葉を実に体現したような非常に聡明な方で、私の要領を得ない質問に対して的確かつ私にもすぐに理解できるように噛み砕いてお答えいただき、LEPS2実験に関係することのみならず、環境構築やC++言語に関する知識について理解を深めることができ、非常に有意義な時間を与えてくださりました。今年度付で東北大に異動された佐田優太さんはとても気さくで物知りな方で、ハード作業を楽しく進めたり様々な雑学について見識を深めたりすることができました。RCNPの橋本敏和さんは非常に親切な方で、mihoの使い方等を教えてくださいたり、私のTPC解析の相談に乗ってくださいました。RCNPの柳善永さんは小早川亮さんと共にTPCのDAQシステム及びLEPS2のDAQミドルウェアの開発、デバッグに尽力され、その結果2019年前期のうちに豊富なデータ取得を行うことができ、本研究をスムーズに進めることができました。岐阜大の桂川仁志さんは私がケーブル作業に難儀していたところを手伝っていただき、しかもとても手際よく作業を進められていたのでとても参考になりましたし、とても助かりました。その他のハード作業をしていても様々なアドバイスをいただき、ありがとうございました。阪大の田中慎太郎さんは非常にユーモアのある方で一緒に作業をしていて楽しかったです。また、しばしば食事等でSPring-8の外に連れ出していただき、満足度の高い実験生活を送ることができました。阪大の柳井優花さんはLEPSグループの方で我々LEPS2とは仕事上の接点はそれほど多くはありませんでしたが、BRPCの生産作業を手伝った時、半田付けのコツを教えてくださいありがとうございました。東北大の吉田千尋さんは遠方からはるばるSPring-8まで通い、ACの開

発に尽力された功労者であります。陰ながら多くの激励をいただき非常に励みになりました。また去年度阪大理学研究科を卒業され、就職された山本林那さんにはお忙しいところ、SC の設計に関する様々な情報を提供していただき非常に助かりました。東北大の宮部学先生とはハード作業を共にする機会がありましたが、ハード作業のみならずとてもこだわりの強い方で、ものごとを突き詰めて考える姿勢に感銘を受けました。また、同じく東北大の時安敦史先生は、周りの学生に親しまれ、LEPS2 の回路系や OS についてなど幅広い質問になんでも答えてくださる良い先生でした。

同研究室の同期である原田健志君、土井隆暢君、岡本慎太郎さん、関屋涼平君、藤井涼平君とは最後の学友として共に学んだ仲間となりました。やはり最後という感慨深いものがあります。そしてこの中の原田健志君、土井隆暢君、そして片山一樹君とは学部生時代の課題研究 P4 より研究生活を共にして参りました。自分は助けられてばかりで彼らには何かしてやれたか分からない 3 年間でしたが、よき研究仲間、そしてよき悪友として精神面でとても支えられました。今では 5 号館の中庭でキャッチボールをしていた日々が懐かしく感じられます。ありがとう。

上記の方々に加え、ここでは書ききれなかった同研究室の方々、LEPS 及び LEPS2 グループの方々にも深くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] R.H. Dalitz : Euro. Phys. J C15 (2000) 748.
- [2] D.Jido, et al., Nucl.Phys. A 725 (2003) 181.
- [3] T.Nakano, et al., Phys.Rev.Lett, 91 (2003) 1
- [4] T.Nakano, et al. Phys.Rev. C 79 (2009) 025210
- [5] D.Diakonov, V.Petrov, M.Polyakov, Z. Phys. A 359 (1997) 305
- [6] A. I. Titov, et al., arXiv, nucl-th, 0607054v1 (2006)
- [7] A. Airapetian, et al., Phys. Lett. B 585 (2004) 213
- [8] V. Kubarovsky et al., Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 032001
- [9] R. De Vita et al., Phys. Rev. D 74 (2006)032001
- [10] B.McKinnon, et. al., Phys.Rev.Lett, 96 (2006) 212001
- [11] K. Miwa, et al., Phys. Rev. C 77 (2008) 045203
- [12] Spring-8 HP. <http://www.spring8.or.jp/ja/>
- [13] Y. Nozawa, Kyoto-Univ., Master thesis (2012)
- [14] R. Kobayakawa, Kyoto-Univ., Master thesis (2017)
- [15] T. Hashimoto, Kyoto-Univ., Master thesis (2013)
- [16] N. Tomida et al., JINST 11 (2016) C11037
- [17] T. Hyodo et al, Phys. Lett., B593 (2004) 75
- [18] H. Katsuragawa, Gifu-Univ., Master thesis (2016)
- [19] H. Goto, Osaka-Univ., Master thesis (2016)
- [20] D. Gonzalez-Diaz, JINST 003, Univ. Santiago de Compostela, Ph.D. Thesis(2006), http://jinst.sissa.it/jinst/theses/2006_JINST_TH_003.jsp,
- [21] N. Tomida, Kyoto-Univ., Master thesis (2012)
- [22] W. Riegler, D. Burgarth, Nucl. Instr. and Meth. A,481(2002)130.
- [23] S. Tanaka, Osaka-Univ., Master thesis (2016)
- [24] K. Watanabe, Kyoto Univ., Master Thesis (2018)

-
- [25] K.Watanabe, Kyoto Univ., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 925, 188-192, (2019)
- [26] E. Umezaki, Kyoto Univ., Master Thesis (2019)
- [27] C. Yoshida, Tohoku Univ., Master Thesis (2019)
- [28] N. Tomida et al., Nucl. Instr. and Meth. A 766 (2014) 283
- [29] A.Peisert and F.Sauli, DRIFT AND DIFFUSION OF ELECTRONS IN GASES: A COMPILATION, CERN 84-08 (1984)
- [30] C. Wei, et al., IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 32 (1984) 439.
- [31] <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-5479EN.pdf>
- [32] C.R. Paul, Analysis of Multiconductor Transmission Lines, John Wiley and Sons, 2008.
- [33] D.Decamp, et al., Nucl.Instrum.Methods A 294 (1990) 121
- [34] https://www.h-repic.co.jp/products/module/ats/rpv_260
- [35] https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/programmable/products/boards_and_kits/dev-kits/altera/kit-terasic-cyclone-v-gx-starter.html