

修士論文

LEPS2におけるハドロン光生成反応実験のための
Time Projection Chamber の開発



京都大学大学院理学研究科 物理学第二教室
原子核・ハドロン物理学研究室

野沢 勇樹

概要

LEPS2 は兵庫県西播磨郡にある大型放射光施設 SPring-8 に新たに建設されている逆コンプトン γ 線ビームラインであり、3 GeV の高エネルギー、10 MeV のエネルギー分解能で、およそ毎秒 10^7 個という高輝度の γ 線が使用できる。我々はこのビームラインで、ペンタクォーク探索実験や $\Lambda(1405)$ の内部構造解明実験などの、様々なハドロンの光生成反応実験を行う予定である。

これらの反応で生成される粒子、とりわけ $\gamma p \rightarrow K^{*+} \Lambda(1405)$ 反応における K^{*+} の崩壊や $\gamma n \rightarrow K^{-} \Theta^{+}$ 反応における Θ^{+} の崩壊などにより終状態に生成される遅い π 中間子は、前方だけでなく大散乱角にも放出される。したがって、これらの大散乱角に放出された粒子を検出することが要求される。そのため LEPS2 の検出器はほぼ 4π という大立体角を覆い、終状態に生成された粒子を全て検出できるように設計されている。前方に放出された荷電粒子はドリフトチェンバーで検出する。そして、大散乱角に散乱された荷電粒子を、Time Projection Chamber (TPC) で検出する。TPC を用いれば、円筒形ドリフトチェンバーに比べて前方での物質量を小さくできる。TPC はパッドで測定した 2 次元座標とドリフト時間から、3 次元的に荷電粒子の飛跡を検出する検出器である。

本研究では LEPS2 で用いる TPC の開発を行った。 $\Lambda(1405)$ の質量を $12 \text{ MeV}/c^2$ の精度で測定するためには、この検出器の性能として、磁場 1 T 中での K^{*+} の崩壊により生成されるおよそ $300 \text{ MeV}/c$ の π 中間子をおよそ 1.1% 以下の運動量分解能で測定することが要求される。本研究では試作機を製作し、LEPS の γ 線を鉛に入射して生成した、およそ $1 \text{ GeV}/c$ の陽電子ビームを用いて位置分解能の評価実験を行った。低運動量の荷電粒子に対しては、多重散乱の効果、およびアノードワイヤーと粒子の角度に依存した位置分解能の悪化を抑えることが重要である。印加電圧、パッドサイズについて最適化を行い、陽電子をパッド列に垂直に入射して、Ar-CH₄ ガスで $108 \mu\text{m}$ という位置分解能を得た。そのときの荷電粒子とセンスワイヤーとの角度依存性についても調べた。また、多重散乱の効果を抑え、運動量分解能を向上させるために、Ne-CH₄ ガスを用いても同様の実験を行い $125 \mu\text{m}$ の位置分解能を得た。さらに拡散の影響等を測定するため、ドリフト距離を長くした新たな試作機を製作し、その影響を測定した。そして、これらの実験結果を元にシミュレーションを行い、 $K^{*+} \Lambda(1405)$ 生成や、 $K^{-} \Theta^{+}$ 生成について、Ne-CH₄ ガスを用いれば、要求性能を満たす TPC が製作できることを示した。

本論文では、試作機を用いた実験の詳細、およびそれらを元に設計した TPC のパッド面の構造について述べる。

目次

第 1 章	GeV γ 線を用いたハドロン光生成反応実験	1
1.1	$\Lambda(1405)$ の光生成実験	1
1.1.1	$\Lambda(1405)$ の構造	1
1.1.2	LEPS2 における $\Lambda(1405)$ 生成実験	1
1.2	ペンタクォークの探索実験	2
1.2.1	ペンタクォークの構造	2
1.2.2	LEPS2 におけるペンタクォーク探索実験	3
第 2 章	LEPS2 の実験施設	5
2.1	SPring-8	5
2.2	LEPS2 ビームライン	5
2.3	LEPS2 の検出器	6
2.3.1	タギング検出器	7
2.3.2	ソレノイド電磁石	7
2.3.3	ドリフトチェンバー	7
2.3.4	TPC	7
2.3.5	エアロジェルチェレンコフカウンター	8
2.3.6	TOF 検出器	8
2.3.7	Barrel γ カウンター	8
第 3 章	Time Projection Chamber	9
3.1	TPC の動作原理	9
3.2	TPC の構造	10
3.2.1	フィールドケージ	10
3.2.2	端面ワイヤーチェンバー	11
3.3	ガスの種類	11
3.4	TPC の位置分解能	13
3.4.1	Pad Response Width	13
3.4.2	パッド平面内の位置分解能	14
3.4.3	ドリフト方向の位置分解能	14
3.5	実機製作のための研究項目	15
第 4 章	試作機 1 を用いたパッド平面内の位置分解能の測定	16
4.1	試作機 1 の構造	16
4.2	実験のセットアップ	17
4.3	efficiency の評価	19

4.4	パッド平面内の位置分解能の評価方法	19
4.4.1	Pad Response Function	19
4.4.2	パッド平面内の位置分解能の評価方法	20
4.5	2 mm パッドと 4 mm パッドにおける位置分解能の比較	22
4.6	P10 ガスおよび Ne-CH ₄ における 0° 入射での最適印加電圧の決定	23
4.7	パッド平面内の位置分解能の track wire angle 依存性の測定	25
4.7.1	カソードパッド読み出しによる位置分解能の track wire angle 依存性の測定	25
4.7.2	アノードワイヤーを用いた 2次元読み出し	26
第 5 章	試作機 2 を用いた位置分解能の依存性測定	29
5.1	試作機 2 の製作目的	29
5.2	試作機 2 の構造	29
5.2.1	試作機 2 の大きさ	29
5.2.2	パッドおよびワイヤーの配置	29
5.2.3	ドリフト筐体	31
5.3	実験セットアップ	32
5.4	位置分解能のドリフト距離依存性の測定	32
5.4.1	試作機 2 を用いた位置分解能のドリフト距離依存性の測定	32
5.4.2	P10 ガスでの磁場中における拡散の効果	33
5.4.3	Ne-CH ₄ ガスでの磁場中における拡散の効果	33
5.5	ドリフト方向の位置分解能の dip angle 依存性	35
5.5.1	試作機 2 を用いたドリフト方向の位置分解能の dip angle 依存性	35
5.5.2	Ne-CH ₄ ガスにおける位置分解能の dip angle 依存性	35
第 6 章	LEPS2 の TPC の設計	37
6.1	TPC に要求される性能	37
6.1.1	TPC の大きさおよび総チャンネル数	37
6.1.2	$\Lambda(1405)$ 生成に必要とされる質量分解能	37
6.1.3	ペンタクォーク生成に要求される質量分解能	38
6.1.4	運動量分解能	38
6.2	試作機を用いた位置分解能の結果	39
6.3	パッド構造の最適化	39
6.3.1	運動量分解能のシミュレーション方法	39
6.3.2	印加電圧およびガスの選択	40
6.3.3	パッドの最適配置	42
6.3.4	アノードワイヤーを用いた 2次元読み出し	43
6.4	質量分解能のシミュレーション	43
6.4.1	質量分解能のシミュレーション方法	44
6.4.2	シミュレーションを行う生成反応	45
6.4.3	各パッド配置、ガス、印加電圧におけるシミュレーション結果	45
6.4.4	前方での測定も含めたシミュレーション結果	46
6.5	TPC の半径を変えたときの質量分解能	48

第 7 章 結論	52
謝辞	54
付録 A 位置分解能評価方法の正当性	55
付録 B ノイズレベルの改善	56
付録 C dE/dx の分解能	58
付録 D 試作機 2 のパッドサイズの最適化	60
付録 E 試作機 2 における track wire angle 依存性の測定	63
参考文献	64

目次

1.1	Hemingway による $\Lambda(1405)$ 生成実験	2
1.2	LEPS における $\Lambda(1405)$ 生成実験	2
1.3	$\Lambda(1405)$ および $\Sigma(1385)$ の崩壊モード	3
1.4	K^{*+} を伴う $\Lambda(1405)$ の光生成反応	3
1.5	LEPS における γK^- の missing mass 分布 [8]	4
1.6	CLAS における nK^- の invariant mass 分布	4
2.1	SPring-8 の全体図	5
2.2	逆コンプトン散乱	6
2.3	LEPS2 ビームラインおよび実験棟	6
2.4	LEPS2 スペクトロメーター	7
2.5	米国ブルックヘブン国立研究所から移設されたソレノイド電磁石	7
3.1	TPC の動作原理	9
3.2	試作機 2(第 5 章参照) におけるフィールドケージ	10
3.3	Closed Gate のときのドリフト曲線	11
3.4	ドリフト速度の電場依存性	12
3.5	角度の定義	14
4.1	試作機 1 の外観図	16
4.2	2 mm パッド読み出しと 4 mm パッド読み出し	16
4.3	試作機 1 の断面図	17
4.4	実験のセットアップの様子	18
4.5	性能評価実験におけるトリガーの様子	18
4.6	P10 ガスと NeCH_4 ガスでの各印加電圧における efficiency	19
4.7	センスワイヤーに落とされた電荷に対する鏡像の取り方	20
4.8	実験で得られた電荷分布	21
4.9	パッド平面内の位置分解能の評価方法	21
4.10	2 mm および 4 mm パッドでの位置分解能の印加電圧依存性	22
4.11	2 mm pad および 4 mm pad におけるパルス波高	23
4.12	位置分解能の印加電圧依存性	24
4.13	Ar ベースガスおよび Ne ベースガスにおけるアバランシェサイズの印加電圧依存性	24
4.14	P10 ガスおよび Ne-CH_4 ガスにおける track wire angle 依存性	25
4.15	位置分解能の印加電圧依存性 2	26
4.16	位置分解能の印加電圧依存性 3	26
4.17	アノードワイヤーを用いた 2 次元読み出し	27

4.18	2次元読み出しを行ったときの位置分解能の track wire angle 依存性	28
5.1	試作機 2 の外観図	30
5.2	試作機 2 のパッド構造	30
5.3	試作機 2 でのドリフト電子のドリフト曲線	31
5.4	実験の様子	32
5.5	位置分解能のドリフト距離依存性	33
5.6	Ne-CH ₄ ガスにおけるパッド平面内の位置分解能のドリフト距離依存性	34
5.7	ドリフト方向の位置分解能の dip angle 依存性	35
6.1	K^{*+} が 30° より前方に散乱されたときの π^- の運動量と放出角の関係	38
6.2	設計する TPC の大きさ	41
6.3	シミュレーションするパッドの配置	42
6.4	パッド列と track wire angle の相関	43
6.5	$\Lambda(1405)$ 生成反応における TPC のアクセプタンス	46
6.6	TPC で測定した 3 つの π 中間子の運動量から求めた $\Lambda(1405)$ の質量分解能	46
6.7	Θ^+ 生成反応における TPC のアクセプタンス	47
6.8	TPC で測定した $\pi^+\pi^-$ と前方の DC で測定した p の運動量より求めた、 Θ^+ の質量 分布	47
6.9	TPC の半径を変化させたときの $\Lambda(1405)$ の質量分解能: 前方の運動量分解能は 1%	49
6.10	TPC の半径を変化させたときの Θ^+ の質量分解能: 前方の運動量分解能は 1%	49
6.11	TPC の半径を変化させたときの $\Lambda(1405)$ の質量分解能: 前方の運動量分解能は 2%	49
6.12	TPC の半径を変化させたときの Θ^+ の質量分解能: 前方の運動量分解能は 2%	49
1	シミュレーション方法	55
2	シミュレーション結果	55
3	実験セットアップの比較	56
4	プリアンプの接続方法の違いによる位置分解能の変化	57
5	truncated mean の分布	59
6	dE/dx の分解能の印加電圧依存性	59
7	シミュレーションしたパッドサイズ	60
8	シミュレーションの方法	61
9	試作機 2 における位置分解能の track wire angle 依存性	63

表 目 次

4.1	試作機 1 に用いたワイヤーの種類	17
4.2	位置分解能の track wire angle 依存性 1	25
4.3	印加電圧 1420 V および 1500 V でのパッド平面内の位置分解能の track wire angle 依存性	26
5.1	試作機 2 に用いたワイヤーの種類	31
5.2	diffusion constant	34
6.1	試作機において得られたパッド平面内の位置分解能の各依存性	39
6.2	試作機において得られたドリフト方向の位置分解能の各依存性	39
6.3	パッド列を 45 layer にしたときの π 中間子の運動量分解能のシミュレーション結果: π 中間子の運動量は $0.3 \text{ GeV}/c$ とした。	41
6.4	パッド構造を変化させたときの運動量分解能	42
6.5	パッド配置を変化させたときの $\Lambda(1405)$ と Θ^+ の質量分解能	45
6.6	ガスおよび印加電圧を変化させたときの $\Lambda(1405)$ と Θ^+ の質量分解能	46
6.7	$\Lambda(1405)$ の質量分解能	47
6.8	Θ^+ の質量分解能	47
6.9	TPC の半径を変えたときの $\Lambda(1405)$ の質量分解能: 前方の運動量分解能は上段が 1%で、下段が 2%	50
6.10	TPC の半径を変えたときの Θ^+ の質量分解能: 前方の運動量分解能は上段が 1%で、下段が 2%	50
6.11	パッド数を制限して、TPC の半径を変えたときの $\Lambda(1405)$ の質量分解能: 前方の運動量分解能は上段が 1%で、下段が 2%	51
6.12	パッド数を制限して TPC の半径を変えたときの Θ^+ の質量分解能: 前方の運動量分解能は上段が 1%で、下段が 2%	51
1	試作機 1 のパッド配置での位置分解能のシミュレーション結果	61
2	試作機 2 のパッド配置での位置分解能のシミュレーション結果	62

第1章 GeV γ 線を用いたハドロン光生成反応 実験

本論文では、大型放射光施設 SPring-8 に建設されている LEPS2 ビームラインで用いる主要な検出器である TPC の設計を行う。そこで、LEPS2 実験で重要な物理のテーマである、高エネルギー γ 線を用いた $\Lambda(1405)$ 生成実験と Θ^+ 生成実験について紹介する。

1.1 $\Lambda(1405)$ の光生成実験

1.1.1 $\Lambda(1405)$ の構造

クォーク模型においては、バリオンは3つのクォークの束縛状態であるとされており、 $\Lambda(1405)$ も u, d, s クォークからなるスピン $1/2$ のバリオンのひとつである。しかし、観測された $\Lambda(1405)$ の質量は、理論により予言されているものよりも非常に軽く、さらには、スピン多重項であるスピン $3/2$ の $\Lambda(1520)$ との質量差が大きすぎるために、クォーク間のスピン軌道相互作用では説明ができないという特異的な性質を持っている。クォーク模型ではこの $\Lambda(1405)$ の特異的な性質を説明できない。

そこで、Dalitz は $\Lambda(1405)$ が3クォーク状態ではなく、 $\bar{K}N$ のメソン-バリオン束縛状態である可能性をはじめて示唆した [1]。また、メソン-バリオン相互作用を基本相互作用とするカイラルユニタリー模型に基づいた計算により、 $\Lambda(1405)$ のエネルギー領域に2つの極があることがわかった。さらに最近の研究では、この2つの極がそれぞれ、 $\pi\Sigma$ に強く結合する幅の広い極 $z_1 = 1390 - 66i$ と、 $\bar{K}N$ に結合する高エネルギーの幅の狭い極 $z_2 = 1426 - 16i$ であることが示唆されている [2]。

また、実験の側面からも $\Lambda(1405)$ をメソン-バリオン分子状態と仮定し、Hemingway らは K^-p 反応により $\Lambda(1405)$ を生成する実験をおこない、そのピークが Breit-Wigner 関数できれいにフィットできないことを発見した [3](図 1.1)。この非対称なピークは $\bar{K}N$ 閾値近傍で急激に落ちており、これは $\Lambda(1405)$ が S 波の $\bar{K}N$ チャネルと強く結合することを示している。この実験は $\Lambda(1405)$ のスピンパリティが $J^\pi = 1/2^-$ であることを観測した。

SPring-8/LEPS においては $\gamma p \rightarrow K^+\Lambda(1405)$ 反応による $\Lambda(1405)$ の光生成実験が行われ、 $\Sigma^+\pi^-$ および $\Sigma^-\pi^+$ に崩壊するモードに対し、そのピーク位置を測定した [4](図 1.2)。このピーク位置が大きく異なることから、 $\Lambda(1405)$ には $\Sigma\pi$ 間のアイソスピンの干渉が大きく寄与することがわかった。

その他にも $\Lambda(1405)$ の生成実験は行われているが、いずれの実験においても統計量がおおよそ 1,000 イベントと少なく、その構造を特定できるような結果は得られていない。

1.1.2 LEPS2 における $\Lambda(1405)$ 生成実験

我々はこの $\Lambda(1405)$ の内部構造を解明するために、高エネルギー γ 線を用いた、 $\gamma p \rightarrow K^{*+}\Lambda(1405)$ 反応の実験を行う。この実験の特徴は、直線偏光した γ 線の偏極に対して垂直な崩壊面をもつ K^{*+}

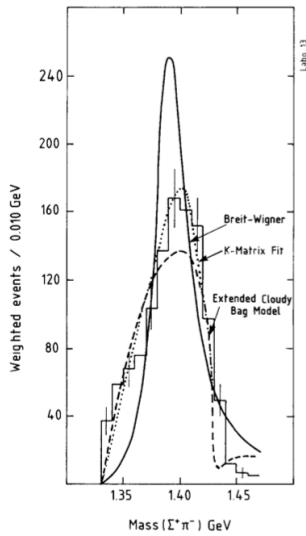


図 1.1: Hemingway の実験 [3] で得られた K^-p 反応による $\Lambda(1405)$ の質量分布

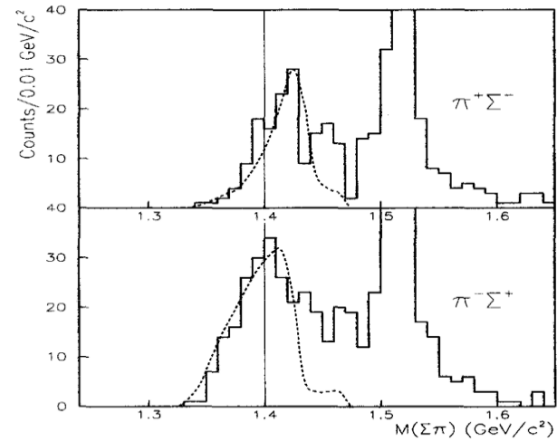


図 1.2: LEPS で測定された $\Lambda(1405)$ の $\pi^+\Sigma^-$, $\pi^-\Sigma^+$ 崩壊モードにおける質量分布 [4]

を選ぶことにより、交換粒子を K^- に特定できることである [5]。交換粒子を K^- に固定することで、測定により得られた $\Lambda(1405)$ の遷移形状因子を、3クォーク状態の $\Sigma(1385)$ のものと比較することが可能になる。 $\Lambda(1405)$ がメソン-バリオン分子状態のような構造を持っているならば、 $\Sigma(1385)$ に比べて広がった波動関数を持つはずである。したがって、 $\Lambda(1405)$ の遷移形状因子を調べることで、その内部構造が3クォーク状態なのか、メソン-バリオン分子状態なのかを特定する。

また、もし $\Lambda(1405)$ が分子状態であったならば、この反応では仮想 K^- 中間子を陽子と相互作用させることにより、 $\bar{K}N$ に強く結合する2つ目の極を取り出すことができる。

ここで、 $\Lambda(1405)$ の生成実験を行うにあたって、 $\Lambda(1405)$ の測定を最も困難にするのが、 $\Sigma(1385)$ の存在である。この2つのバリオンの質量差は $25 \text{ MeV}/c^2$ であり、それぞれの崩壊幅 $50 \text{ MeV}/c^2$ 、 $36 \text{ MeV}/c^2$ に比べて小さすぎる。そのため、同様のプロセスで生成されたこの2粒子を区別するのはとても困難である。

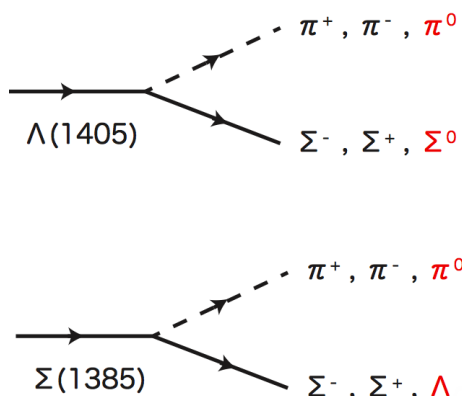
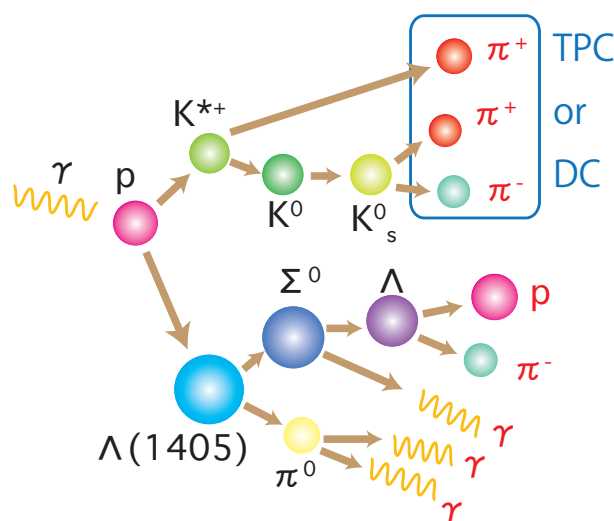
そこで、アイソスピンの違いを利用することでこの困難を解消する。 $\Lambda(1405)$ と Σ^0 のアイソスピンはそれぞれ $I=0$ と $I=1$ である。そのため、 $\Lambda(1405)$ は $\Sigma^0\pi^0$ に33%の分岐比で崩壊するが、 $\Sigma(1385)$ はこの崩壊モードへの崩壊が禁止される(図1.3)。そこで、 $\pi^0\Sigma^0$ への崩壊モードを観測することにより、 $\Sigma(1385)$ の影響を排除して $\Lambda(1405)$ の質量分布を測定することができる。

以上から、我々が測定すべき崩壊モードを図1.4に示す。この崩壊で得られる4つの荷電 π 中間子を測定する必要があるが、これらは前方から後方の大立体角にわたって放出される。したがって、大立体角において飛跡を測定できる検出器が必須である。

1.2 ペンタクォークの探索実験

1.2.1 ペンタクォークの構造

ハドロンには qqq から構成されるバリオンと、 $q\bar{q}$ から構成されるメソンが存在することが知られている。しかし、QCDによると、ハドロンとして存在するためにはカラー1重項であれば良く、

図 1.3: $\Lambda(1405)$ および $\Sigma(1385)$ の崩壊モード図 1.4: K^{*+} を伴う $\Lambda(1405)$ の光生成反応

グルーオンのみから構成されるグルーボールや、3個以上のクォーク、反クォークから構成されるテトラクォーク、ペンタクォークなどの存在は否定していない。これらのハドロンはエキゾチックハドロンとよばれている。

その中でも、Diakonov らによるカイラルソリトン模型をもちいた研究から、 $uudds$ の5つのクォーク・反クォークから構成される Z^+ 粒子 (スピン $1/2^+$ 、アイソスピン0、ストレンジネス+1) の存在が予言された [6]。この粒子の質量は $\sim 1530 \text{ MeV}/c^2$ であり、崩壊幅は $15 \text{ MeV}/c^2$ 以下である。その後、2002年に SPring-8/LEPS において初めて、この粒子と思われる Θ^+ が実験により観測された [7](図 1.5)。この結果を機に、様々な実験施設においてこの Θ^+ が観測されたという実験結果が報告された。LEPS においても、さらに統計を上げた実験を行った結果、 Θ^+ のピークが見えることを確認している [8]。

しかし、その数年後にはこの粒子の存在を否定するような実験結果が多々得られている。CLAS では、過去に行った $\gamma d \rightarrow pK^- \Theta^+ \rightarrow pK^- K^+ n$ の実験を同じセットアップで再度統計を増やして行った結果、過去に見えていた Θ^+ のピークが消えたという結果を得ている [9] (図 1.6)。

このように Θ^+ の存否は未だに決着がついていない。

1.2.2 LEPS2 におけるペンタクォーク探索実験

上で述べたように、LEPS と CLAS では Θ^+ の存否について異なった結果が得られている。LEPS 実験では、スペクトロメーターは前方にアクセプタンスを持つため、 $\gamma p \rightarrow K^- \Theta^+$ により生成された K^- が 20° 以内の散乱角に散乱されているイベントを選んでいる。それに対し、CLAS では K^- が 20° 以上の散乱角に散乱されているイベントを測定しているという違いが存在する。そのため、 K^- が 20° より前方の散乱角に散乱された場合にしか Θ^+ が生成されないとすると、この2つの実験は矛盾しないと考えられる。

LEPS2 においてはスペクトロメーターが大立体角を覆うため (第2章参照)、CLAS における測定領域を含めた測定を行うことが可能である。これにより、2つの実験結果の一貫性を検証できる可能性がある。

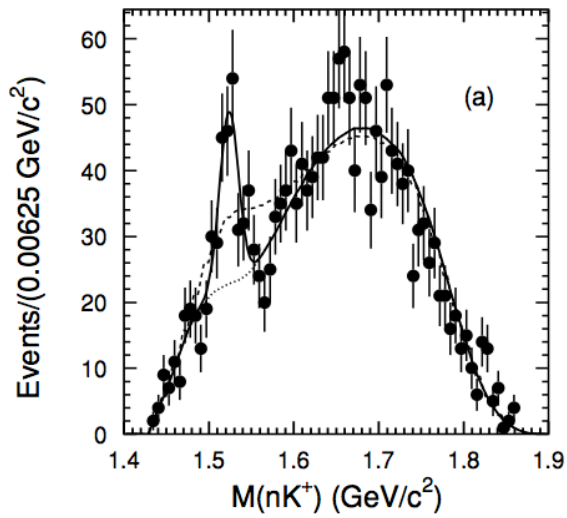


図 1.5: LEPS における γK^- の missing mass 分布 [8]

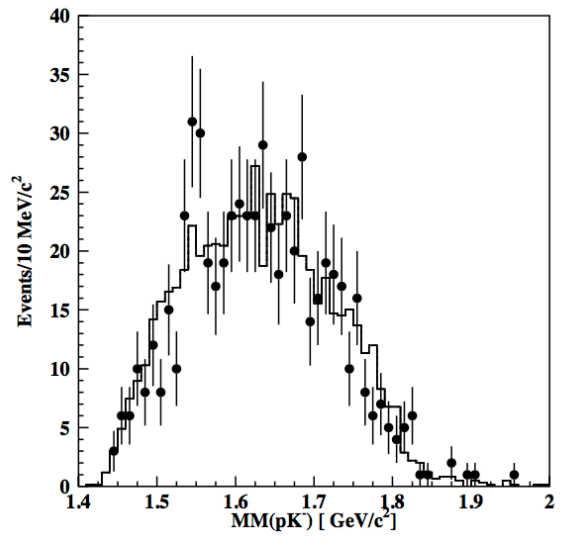


図 1.6: CLAS における nK^- の invariant mass 分布:黒点が過去のデータであり、ヒストグラムが論文 [9] におけるデータ

LEPS2 では、液体重水素標的に 3.0 GeV の γ 線を入射し、その中の中性子と $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+$ 反応を起こさせる。この Θ の崩壊 $\Theta^+ \rightarrow K_S^0 p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$ により生成される π^+, π^-, p を同時測定し、その運動量から Θ^+ の不変質量を再構成する。このために、 $\Lambda(1405)$ 生成反応と同様に、大立体角の飛跡検出器が必要である。

これらのことから、我々は LEPS2 における大立体角の飛跡検出器の開発を行うことにした。以下ではまず、我々が実験を行う LEPS2 について説明し、その後、開発を行った大立体角の飛跡検出器である TPC の説明を行う。

第2章 LEPS2の実験施設

LEPS2は兵庫県西播磨郡に位置する大型放射光施設 SPring-8 に新たに建設される実験施設であり、LEPS2 ビームラインと大立体角検出器から構成される。

2.1 SPring-8

SPring-8の全体図を図2.1に示す。

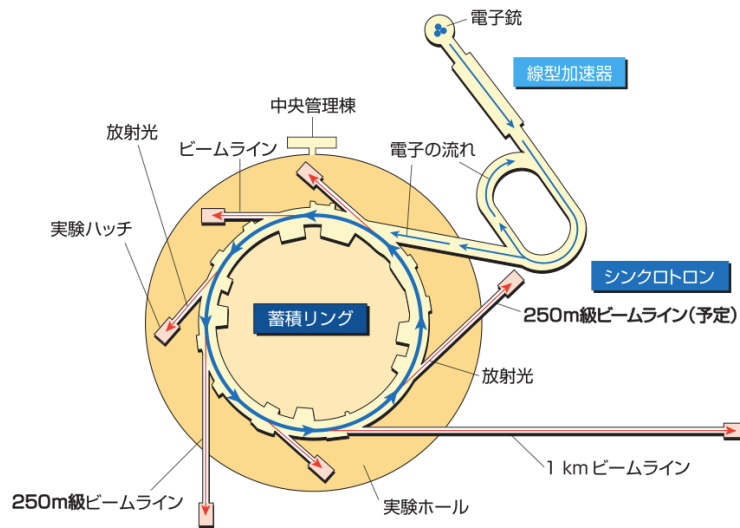


図 2.1: SPring-8 の全体図

電子銃により発生した電子を線形加速器でおよそ 1 GeV に加速し、その後シンクロトロンで 8 GeV まで加速する。8 GeV まで加速された電子は、蓄積リングに入射され蓄積される。

2.2 LEPS2 ビームライン

LEPS2では蓄積リング中の 8 GeV の高エネルギー電子に、レーザー光を入射し、図2.2のように逆コンプトン散乱を起こすことで高エネルギー γ 線を得る。このとき、蓄積リング中の電子のエネルギーを E_e 、速度を β とし、入射レーザー光のエネルギーを E_γ とすると、得られる γ 線ビームのエネルギーは、

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

となる。

LEPS2では、266 nmのレーザーを使用することにより、最大およそ3 GeVの γ 線ビームが得られる。逆コンプトン散乱を起こすときにレーザー光を扁平にしておくことで、電子ビームとの衝突確率を高くすることができる。さらに、4台同時にレーザー光を入射させることにより、1.5-2.4 GeVの γ 線エネルギーで最大 10^7 cpsという高い輝度で γ 線ビームを使用できる。

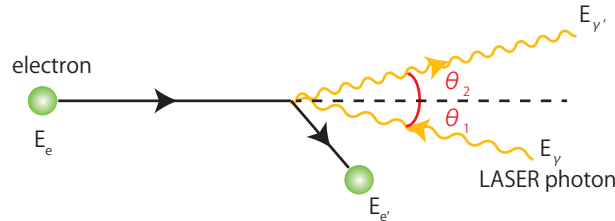


図 2.2: 逆コンプトン散乱

LEPS2のビームラインの様子を図 2.3 に載せる。

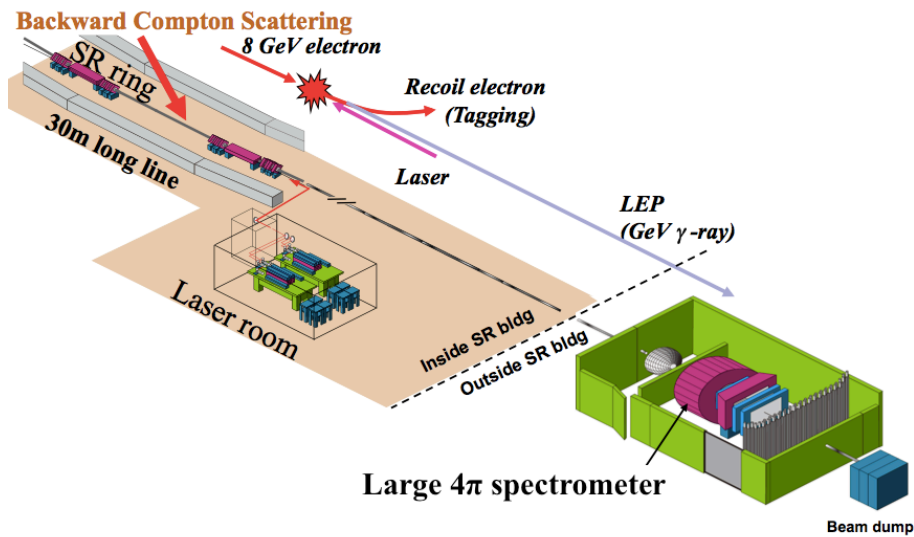


図 2.3: LEPS2 ビームラインおよび実験棟

LEPS2において逆コンプトン散乱を起こすのは、蓄積リングの間でも電子の角度発散が非常に小さくなっている30mの長直線部である。そこで逆コンプトン散乱を起こすことにより、細く平行な γ 線ビームが得られる。そのため、蓄積リング棟の外にビームラインを引き延ばしても γ 線ビームの発散が抑えられるため、実験ハッチを蓄積リング棟の外に置くことが可能となる。

LEPS2では新たに実験棟を建設し、ほぼ 4π の立体角を覆うスペクトロメーターを設置する。

2.3 LEPS2の検出器

LEPS2の実験棟に図 2.4 のように大立体角スペクトロメーターを設置する。

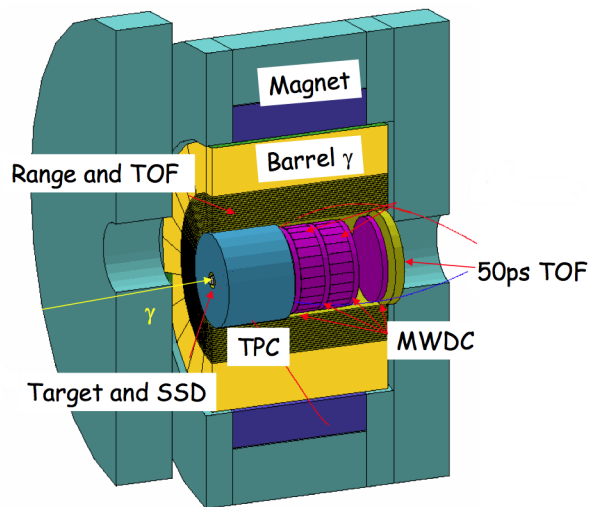


図 2.4: LEPS2 スペクトロメーター

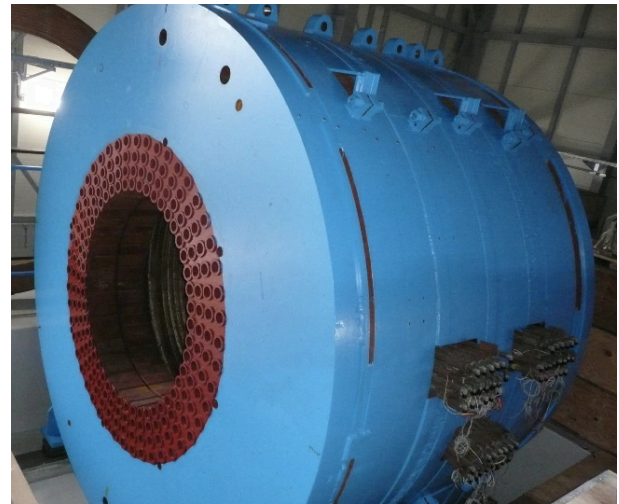


図 2.5: 米国ブルックヘブン国立研究所から移設されたソレノイド電磁石

2.3.1 タギング検出器

タギング検出器 (Tagger) は、逆コンプトン散乱による反跳電子のエネルギーを測定することにより、 γ 線のエネルギーを測定する検出器である。逆コンプトン散乱でエネルギーを失った電子は、蓄積リング中の電子ビーム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およびSSDにより、その電子の通過位置を測定することで、運動量およびエネルギーを求めることができる。この測定により入射 γ 線のエネルギーをおよそ10 MeVの精度で求めることができる。

2.3.2 ソレノイド電磁石

ソレノイド電磁石は、 K 中間子の稀崩壊実験で使用されていたものを米国ブルックヘブン国立研究所から移設した(図2.5)。このソレノイド電磁石は内径が2.22 m、長さが2.69 mである。この中にドリフトチェンバー、TPC、エアロジェルチェレンコフ検出器、TOF検出器、電磁カロリメーター (Barrel γ) が収納される。この電磁石によりビーム軸と平行に1 Tの磁場をかける。

2.3.3 ドリフトチェンバー

荷電粒子の飛跡の測定を行うのがこのドリフトチェンバーとTPCである。ドリフトチェンバーでは散乱角が 30° 以内に放出された荷電粒子の飛跡を測定する。有感領域の直径は1,400 mmであり、六角形の構造をしている。ドリフトチェンバーは計4台あり、1台あたり6層のワイヤー面を持つ。

2.3.4 TPC

TPCは、前方のドリフトチェンバーで測定できない 30° から 120° の散乱角に放出された荷電粒子の飛跡を測定する。TPCを用いることで、円筒形ドリフトチェンバーと比べて前方での物質量を小さくすることができる。TPCの詳細については第3章で述べる。

2.3.5 エアロジェルチェレンコフカウンター

エアロジェルチェレンコフカウンターは、入射 γ 線とターゲットの相互作用において対生成された電子・陽電子対を除去するために用いられる。これらはビーム軸の下流に設置される。

2.3.6 TOF 検出器

荷電粒子の粒子識別を行うために必要な、荷電粒子の速度を測定するのがTOF検出器である。これまではシンチレーターが使用されていたが、LEPS2ではより高時間分解能が得られると期待される Resistive Plate Chamber(RPC)を使用する。RPCはTPCの外側に設置し、これらの飛跡検出器を通過した粒子の速度を測定する。

2.3.7 Barrel γ カウンター

Barrel γ カウンターは、側方のTOF検出器の外側に設置される γ 線検出器である。 π^0 や η などの粒子の崩壊により生成される γ 線の方向とエネルギーを測定する。

第3章 Time Projection Chamber

第1で述べたように、我々が行う実験では大立体角の飛跡検出器の存在が不可欠である。そこで、この章では我々が開発を行った TPC の原理および構造について述べる。

TPC (Time Projection Chamber) は、ドリフトチェンバーと同様に荷電粒子の飛跡検出器のひとつである。以下に TPC の動作原理を順を追って説明する (図 3.1)。また、TPC の位置分解能に寄与する様々な効果についても詳しく述べ、本論文での研究項目について議論する。

3.1 TPC の動作原理

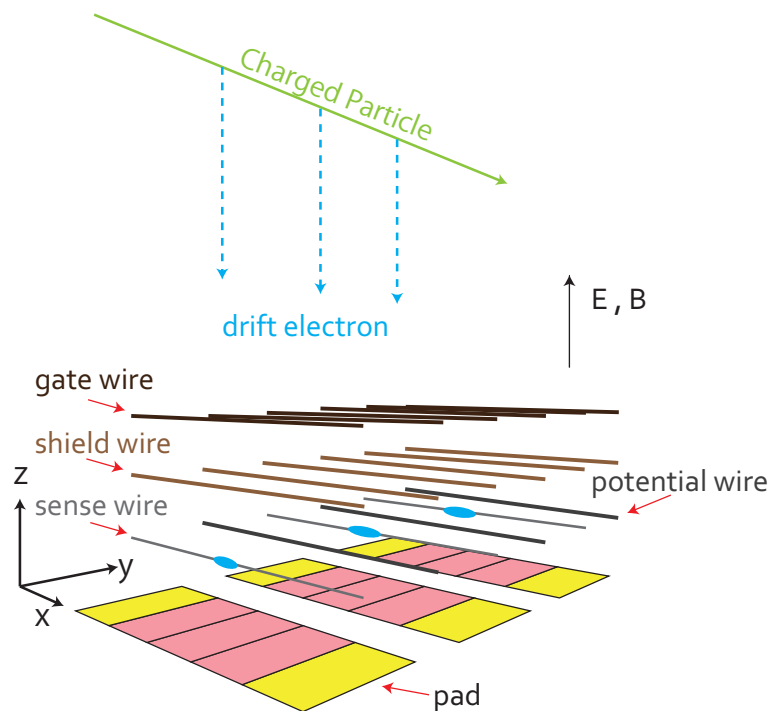


図 3.1: TPC の動作原理

TPC のドリフト領域内には希ガスが満たされており、荷電粒子が通過することによりガスがイオン化される。イオン化された電子は、一様なドリフト電場に従ってドリフトする。TPC ではドリフト距離が長いため、拡散の効果を軽減するために、電場と同じ方向に磁場をかける。センスワイヤーには正極の高電圧がかかっており、その付近では $1/r$ に比例する電場構造になっている。そのため、ドリフトしてきた電子はセンスワイヤー付近で急激に加速され、アバランシェを起こしな

からセンスワイヤーに電荷を落とす。アバランシェを起こした電荷量に比例した電荷が、アバランシェ位置付近のいくつかのカソードパッドに誘起される。

TPC では飛跡を 3 次元的に再構成することが可能である。図 3.1 のようにセンスワイヤーが x 軸方向に張ってあるとすると、 xy 平面内での位置は、アバランシェの起こったセンスワイヤーの位置、およびカソードパッドの誘起電荷分布の重心位置から求めることができる。電荷重心の位置は、カソードパッドに誘起された電荷の分布を、適当な関数を用いて解く、もしくはフィットすることで決定できる。また、 z 座標は、イオン化された電子がドリフトしてセンスワイヤーでアバランシェを起こすまでの時間を測定することにより、決定できる。詳細な解析方法は第 4 章で述べる。

3.2 TPC の構造

TPC はドリフト領域に一様な電場を生成するためのフィールドケージと、ドリフト位置を測定するための端面のワイヤーチェンバーから構成されている。

3.2.1 フィールドケージ

TPC においてドリフト方向の位置は、電子のドリフト時間および経路から求めるため、ドリフト領域内の電場の一様性は非常に重要である。無限に広いドリフト電極面と Shield Grid であれば、有感領域中の電場は一様に保たれるが、実際は有限であるため、端で電場が歪んでしまう。そのため、図 3.2 のように Field Cage の内側と外側に Strip 電極を蒸着し、それらを抵抗分割することにより、各 Strip の高さで本来の電位が保たれるようにしている。

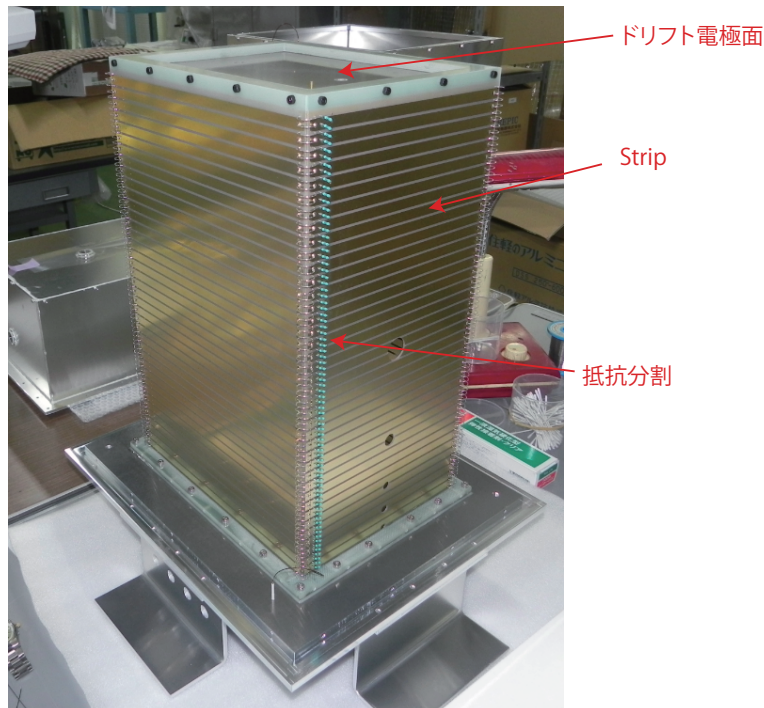


図 3.2: 試作機 2(第 5 章参照) におけるフィールドケージ

3.2.2 端面ワイヤーチェンバー

ワイヤー型 TPC は、おもに 3 つの役割をもったワイヤー面が存在する。まずは、センス/フィールド面である。この面にはセンスワイヤーとフィールドワイヤーが交互に張られている。センスワイヤーは上述のようにアバランシェを発生させる役割を担う。フィールドワイヤーはガス増幅のための電場を形成する役目を担っている。

次にシールド面である。ここではシールドワイヤーが張られており、カソードパッドプレーンと同じ電位を与える。この面はドリフト領域とアバランシェ領域を分離する役割をもつ。

最後に、ゲーティング面であり、ここにはゲートワイヤーが張られている。測定する際には、シールド面からの距離に対応する分だけの負の電圧をかける (Open Gate)。z 方向の位置は、電子のドリフト時間から決定するため、ドリフト領域内の電場の一様性が重要になってくる。しかし、アバランシェで生じた正イオンは、静電場によりドリフト領域内にもどってしまい、その一様性を壊してしまう。そこで、正と負に同じ大きさだけずれた電圧を、ゲートワイヤーに交互にかけることで、図 3.3 のようにドリフト領域内に正イオンが入るのを防ぐことができる (Closed Gate)。また測定したいイベントに対してのみ Open Gate にし、他のイベントに対しては Closed Gate にしたままにすることで、測定したいイベント以外のときはドリフト電子が比例係数領域に入らないようにできる。

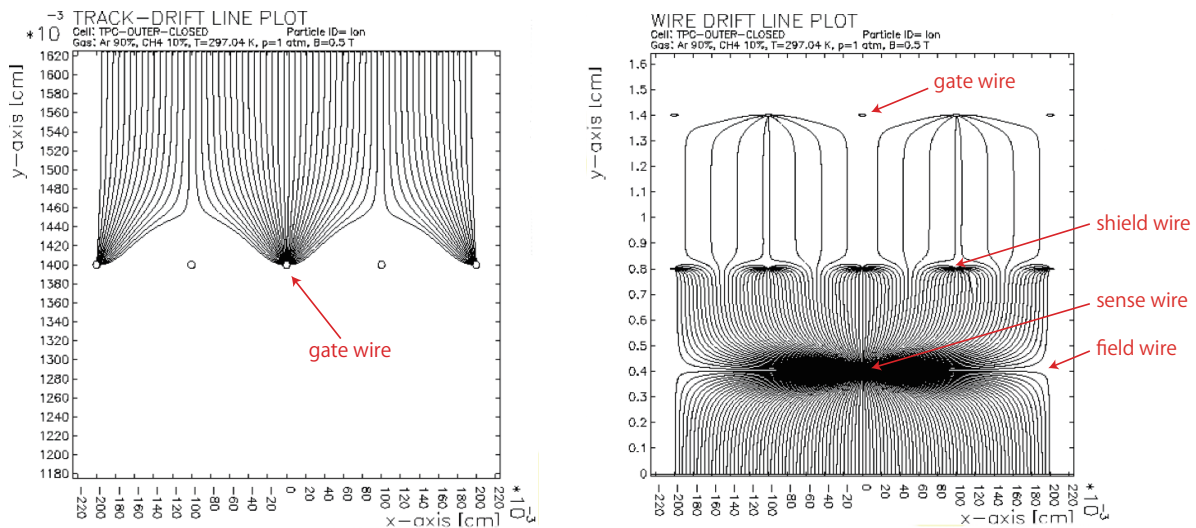


図 3.3: Closed Gate のときのドリフト曲線: 左図はドリフト電子、右図はアバランシェ領域で生成されたイオンのドリフト曲線。ドリフト領域およびアバランシェ領域に相互に侵入できなくしている。

3.3 ガスの種類

ドリフト電子の振る舞いは、用いるガスの種類によって大きく左右される。TPC では電子のドリフト時間およびドリフト速度から荷電粒子が通過した z 座標を決定するため、電子のドリフト速度が多少の電場の揺らぎに対しても一定であることが望ましい。この要請から、もちいるガスやドリ

フト電極にかかる電圧は決定される。また、用いるガスは多重散乱の効果により運動量分解能にも大きく影響する。放射長の長いガスを使用することで、この多重散乱の効果軽減することによって、運動量分解能を向上させることができる。

これまで、LEPSでは、安価でドリフト速度も速いアルゴン 90%、メタン 10%の混合ガス (P10 ガス) が用いられてきた。P10 ガスを用いた場合、放射長はおよそ 130 m である。ここで、アルゴンの代わりに物質量の小さいネオンを用いたネオン 90%、メタン 10%の混合ガス (Ne-CH₄) を使用すると、放射長が 363 m と長くなるため、多重散乱による運動量分解能を P10 ガスよりも小さくすることが可能である。しかし、磁場 1 T 中での横方向の拡散の効果は、P10 ガスでは 160 μm であるのに対し、Ne-CH₄ ガスではおよそ 210 μm と大きくなっているため、拡散に起因する運動量分解能は悪化してしまう。

したがって、より運動量分解能を小さくするために、実際に位置分解能による運動量分解能がどれだけ悪化するかを調べることは重要である。また、Ar ベースガスと Ne ベースガスとでは、荷電粒子により電離されるイオンペアの数も P10 ガスが 1 cm あたり 90 個に対し、Ne-CH₄ ガスでは 41 個と異なり、増幅度も異なると予想される。そのため、P10 ガスと同様の読み出し回路で動作できるかどうか調べる必要がある。

そこで、本研究では P10 ガスと、Ne-CH₄ の両ガスを用いて位置分解能の測定実験を行った。

図 3.4 に P10 ガスおよび Ne-CH₄ ガスにおけるドリフト速度の電場依存性を示す [15]。およそ $E/p = 160$ V/cm の電場でプラトーになっていることがわかる。したがって、この 2 つのガスに関しては $E/p = 160$ V/cm のドリフト電場を与えることにした。

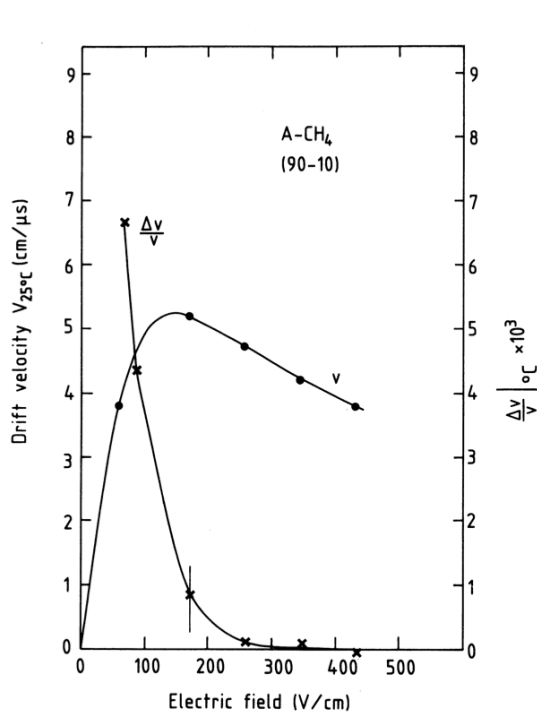


Fig. 59 Peisert and Sauli (1984)

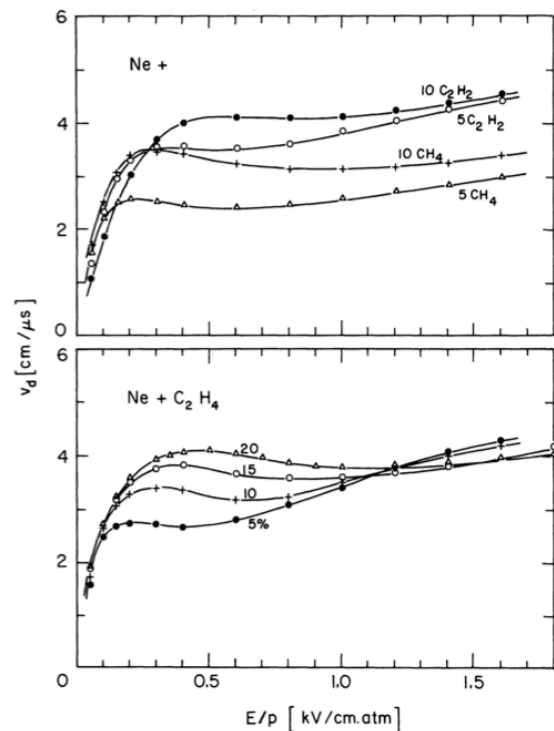


Fig. 25 Lehraus et al. (1982)

図 3.4: ドリフト速度の電場依存性:左図が P10 ガス、右図が Ne-CH₄ ガスにおけるドリフト速度の電場依存性を示している。

3.4 TPC の位置分解能

第1章で述べたように、TPC の位置分解能には様々な要因が寄与する。この節では位置分解能の評価に重要なこれらの要因について詳しく述べる。

3.4.1 Pad Response Width

センス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。この誘起電荷分布は Pad Response Function (PRF) とよばれ、この幅は TPC の重要なパラメータのひとつである。PRF の幅は、パッドおよびワイヤー等による幾何学的配置のみにより決定され、TPC の位置分解能に影響する量である。PRF の幅は、いくつかの成分に分解でき、

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

のように表せる [11, 12]。

第1項目 σ_0 は、センスワイヤーのある1点にアバランシェの電荷が集まったときに、カソードパッドに誘起される固有の電荷分布の幅である。この電荷分布は

$$\frac{(\text{パッドの幅})}{(\text{センスワイヤーとパッドとの距離})} \approx 2 \quad (3.2)$$

のときに最も良く Gaussian で近似できる。このときの3つのパッドのパルス波高を x 座標の順にそれぞれ P_i ($i = 1 \sim 3$) とすると、

$$\sigma_0^2 = \frac{\Delta_P^2}{\ln \frac{P_2^2}{P_1^2 P_3^2}} \quad (3.3)$$

と表せる。ただし、 Δ_P はパッド中心間の間隔である。

第2項目 σ_D は拡散による影響である。ドリフト距離が長いほどドリフト電子は広がり、電荷分布の幅は大きくなる。磁場がないときの横方向の拡散係数を D_T 、ドリフト距離を L_D とすると、拡散による広がり、

$$\sigma_D^2 = \frac{D_T^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \frac{L_D}{\cos^2 \alpha} \quad (3.4)$$

と表せる。ここで τ は電子のガス中での平均衝突時間であり、 ω はサイクロトロン周波数である。 α はセンスワイヤーとトラックのなす角である (図 3.5 参照)。

第3項目 σ_W は一般に Angular Wire Effect とよばれる項であり (図 3.5)、センスワイヤーとトラックがなす角 α が大きくなるほど各センスワイヤー上でのアバランシェの領域が大きくなることによる効果である。この影響は、センスワイヤーの間隔を d とすると、

$$\sigma_W^2 = \frac{d^2}{12} (\tan \alpha - \tan \psi)^2 \quad (3.5)$$

と表せる。ここで ψ は Lorentz angle とよばれ、ワイヤー近辺での電場と磁場の非一様性からくる $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ effect による広がりを表す角度である。またセンスワイヤー上でのアバランシェのふらつきも位置分解能に影響する。GEM などの MPGD ではこの影響は小さい。

最後の項 σ_P は、Angular Pad Effect とよばれる。パッドの長さを h 、パッドとトラックのなす角度を β とすると、荷電粒子がパッド列に垂直に入射するとき ($\beta = 0$) よりもアバランシェを起こす領域が $h \tan \beta$ だけ広がってしまう。このときの PRF の幅の広がり、

$$\sigma_P^2 = \frac{h^2}{12} \tan^2 \beta \quad (3.6)$$

と表せる。

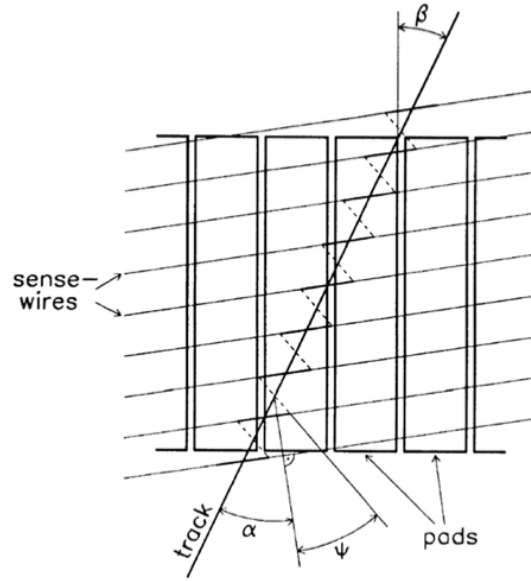


図 3.5: 角度の定義

3.4.2 パッド平面内の位置分解能

パッド平面内の位置分解能を求めるためには、さらにイオン化における統計のふらつきを考慮する必要がある。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数を N_{eff} とすると、パッド平面内での位置分解能は

$$\sigma_{xy}^2 = \frac{\sigma_0^2 + \sigma_D^2}{N_0} + \frac{\sigma_W^2 + \sigma_P^2}{N_{\text{eff}}} \quad (3.7)$$

とあらわすことができる [13]。

3.4.3 ドリフト方向の位置分解能

ドリフト方向の位置分解能は

$$\sigma_z^2 = \frac{\sigma_0^2 + D_L^2 L_D}{N_0} + \frac{h^2 \tan^2 \lambda}{12 N_{\text{eff}}} \quad (3.8)$$

と表せる [14]。ここで、 λ は荷電粒子の飛跡と xy 平面のなす角度 (dip angle) である。第 1 項目は、シェイプアップと FADC のサンプリングレートによって決まる量であり、

$$\sigma_0^2 = (\sigma_{\text{shaping}} \cdot v_D)^2 + \frac{(\Delta t \cdot v_D)^2}{12} \quad (3.9)$$

と書ける。 σ_{shaping} はシェイプアップの出力の時間幅であり、 Δt は FADC のサンプリング時間間隔である。

3.5 実機製作のための研究項目

第1章で、LEPS2において $\Lambda(1405)$ 生成および Θ^+ 生成実験を行うためには、TPCを用いて大角度に散乱された荷電粒子を測定する必要があることを述べた。また、荷電粒子の飛跡を測定する際の位置分解能は、飛跡とワイヤーの角度や、拡散の影響などに依存する複雑な量であることをこの章で述べた。したがって、LEPS2のTPCの実機を製作するにあたり、この位置分解能の様々な影響を調べることは重要である。

このために試作機1、試作機2を製作し、LEPSにおいて陽電子ビームを用いたテスト実験を行い、これらの影響を測定した。試作機1ではパッド平面内の位置分解能のtrack wire angleおよびtrack pad angle依存性を測定した。またP10ガスとNe-CH₄ガスによるパッド平面内の位置分解能の違いも測定した。試作機2では、試作機1では測定できなかった、ドリフト方向の位置分解能の位置分解能、およびパッド平面内の位置分解能のドリフト距離依存性の測定を行った。

2つの試作機を用いたこの測定実験の結果を第4章、および第5章にまとめ、LEPS2のTPCの設計を第6章で行う。

第4章 試作機1を用いたパッド平面内の位置分解能の測定

パッド平面内の位置分解能の track wire angle、およびガスによる依存性を調べるために、試作機1を用いて測定実験を行った。以下では用いた試作機1の構造、および行った性能評価実験の詳細について述べる。

4.1 試作機1の構造

試作機1の外観図を図4.1に示す。

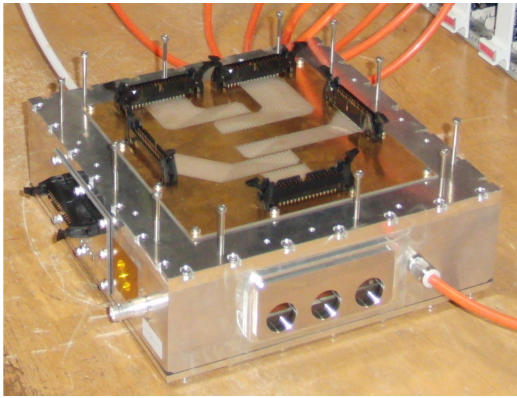


図 4.1: 試作機1の外観図

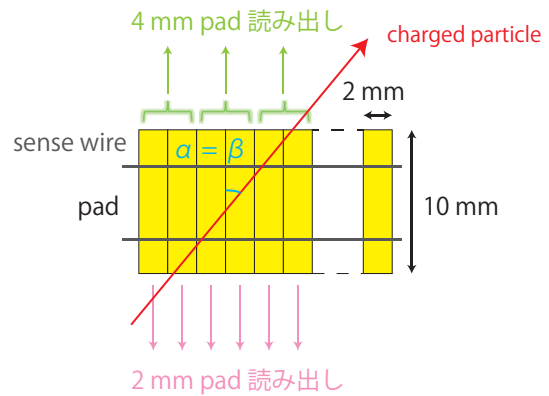


図 4.2: 2 mm パッド読み出しと 4 mm パッド読み出し

試作機1の外形のサイズは縦横ともに 226 mm、高さが 72 mm である。外形はアルミフレームで作られている。有感領域の面積は 50 mm × 50 mm である。1パッドの大きさは 2 mm × 10 mm である。このパッドが 2 mm 間隔で横方向に 25 個ならんで1つのパッド列 (50 mm × 10 mm) を構成しており、パッド列が 5 列ならんだ構造になっている。

読み出し基板は外から交換できるようになっており、2 mm パッドと 4 mm パッド読み出しの 2 通りを用意した。4 mm パッド読み出しは 2 mm パッド 2 つ分の信号を合わせて読み出している (図 4.2)。この TPC は 4 mm パッドに対して最適になるように設計している。そのため 3.4.1 で述べた通り、本来であればパッド面とセンスワイヤーとの間隔は 2 mm が最適なのだが、設計の都合上その間隔にすると放電が起きてしまうことがわかった。そのため、パッド面とセンスワイヤーとの間隔を 3.2 mm とした。

センスワイヤーおよびポテンシャルワイヤーはそれぞれ 5 mm 間隔 でならんでいる (図 4.3)。また、試作機1ではゲートワイヤーは取り付けなかった。試作機1にもちいたワイヤーの種類を表 4.1 に示す。

ここで、図 4.2 より、ワイヤーの方向とパッド列の並びが等しいため、試作機 1 および、試作機 2(第 5 章参照)では track wire angle (α) と track pad angle (β) は等しくなっている。よって、track wire angle による影響と track pad angle による影響は合わせて測定されるため、以降では両方ともに track wire angle とよぶことにする。

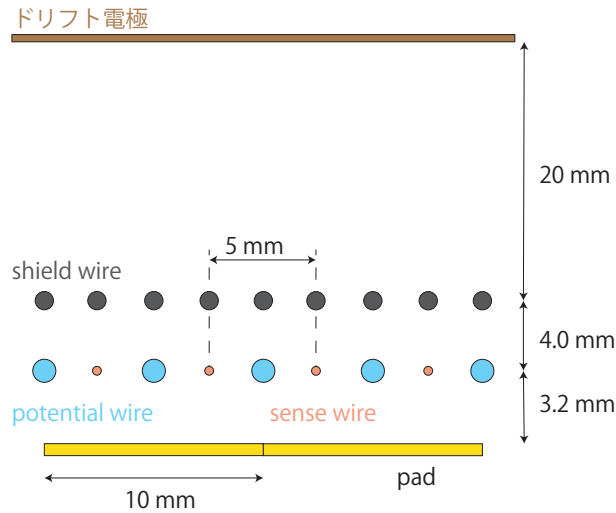


図 4.3: 試作機 1 の断面図

表 4.1: 試作機 1 に用いたワイヤーの種類

wire の種類	素材	直径	本数	ピッチ	パッド面からの距離
sense	Au-W	20 μm	10 本	5 mm	3.2 mm
potential	Au-BeCu	80 μm	11 本	5 mm	3.2 mm
shield	Au-BeCu	50 μm	21 本	2.5 mm	7.2 mm

4.2 実験のセットアップ

性能評価実験のセットアップを図 4.4 に示す。ターゲットとして 0.5 mm 厚の鉛の板を用い、高エネルギー γ 線を入射することで電子陽電子対を生成した。得られた電子陽電子ビームは超前方に散乱されるので、双極電磁石に 300 A の電流を流し、陽電子ビームのみが TPC に入射するようにした。トリガーは

$$\text{Trigger} = \text{Tagger} \otimes \text{Start Counter} \otimes (\text{SC1} \otimes \text{SC2}) \quad (4.1)$$

で組み、Start Counter でトリガーのタイミングを決めている (図 4.5)。Tagger により逆コンプトン散乱した γ 線のイベントを選び出し、その γ 線と鉛とが相互作用したイベントを Start Counter により選び出している。さらに 2 cm \times 7 cm の大きさの 2 枚のシンチレータの Coincidence により、TPC を通過したことを要求している。

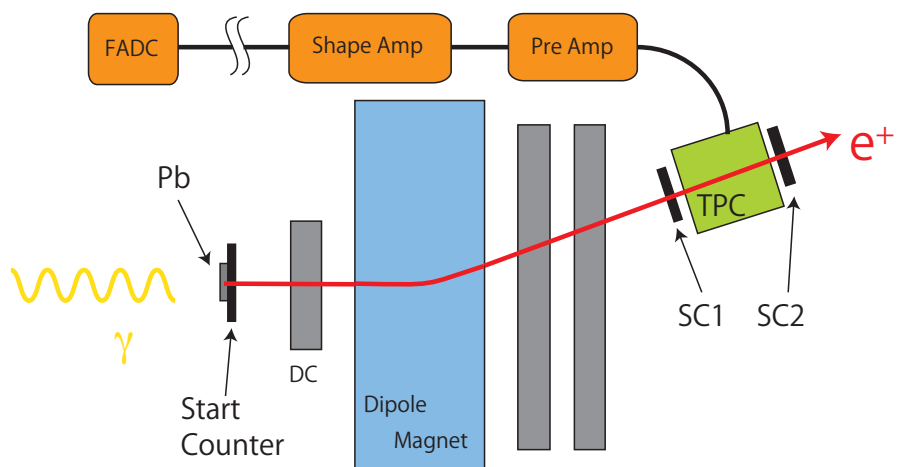


図 4.4: 実験のセットアップの様子

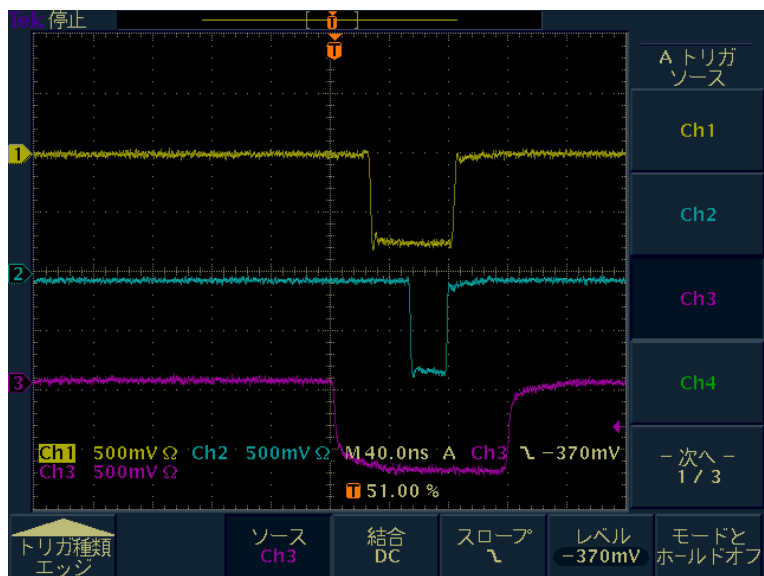


図 4.5: 性能評価実験におけるトリガーの様子: 上から Tagger、Start counter、トリガーシンチレーター 2 枚の Coincidence である。この 3 つの Coincidence をトリガー信号とした。

試作機1ではカソードパッドの信号だけでなく、センスワイヤーの信号も読み出している。読み出した信号は2 V/pC の preamp で増幅、Shapeamp で整形した後、40 MHz, 10 bit の FADC で波形をサンプリングし、DAQ を用いて取り込んでいる。このとき得られたパルス波高値は、パッドおよびセンスワイヤーに落とされた電荷量に比例している。今回の実験ではパッド平面内の位置分解能の track wire angle 依存性を測定するのが目的であり、陽電子ビームに対して試作機1の角度を変えながらデータを取った。

4.3 efficiency の評価

この実験セットアップにおいて、P10 ガスおよび Ne-CH₄ ガスでの試作機1の efficiency を各印加電圧ごとに求めた (図 4.6)。P10 ガスについては、1390 V の印加電圧でも efficiency は 99% 以上を保っているが、NeCH₄ ガスでは、1160 V 付近を境として efficiency が悪化していることがわかる。これは、アバランシェによる電荷量が小さくなり、S/N が悪化するためである。以降の測定においては efficiency が十分確保できる印加電圧で動作させている。

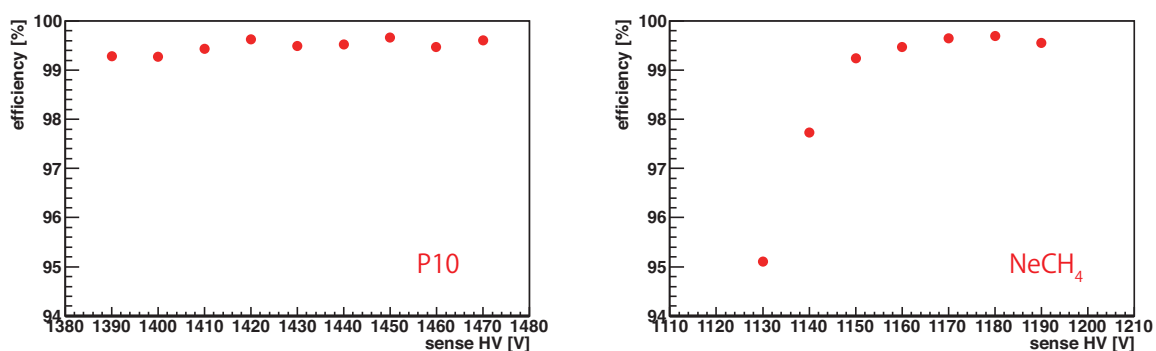


図 4.6: P10 ガスと NeCH₄ ガスでの各印加電圧における efficiency

4.4 パッド平面内の位置分解能の評価方法

この節では、以下で行うパッド平面内の位置分解能の測定実験のために、その評価方法について述べる。

4.4.1 Pad Response Function

3.4.1 でも述べたが、アバランシェが発生したときにカソードパッドに誘起される電荷分布を Pad Response Function (PRF) とよぶ。位置分解能を求めるために、この PRF の関数形を知っておくことは重要である。以下にこの関数系について述べる。

ここでは簡単のためにカソードパッドとセンスワイヤー、およびシールドワイヤーとセンスワイヤーの距離を a とする。このときにカソードパッドに誘起される電荷分布は鏡像法を用いると、

$$\sigma(x, y) = \frac{Q}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n+1)a}{(x^2 + y^2 + (2n+1)^2 a^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.2)$$

とかける (図 4.7)。ここで Q はセンスワイヤーに落とされた電荷量である。これをパッド列に垂直な方向 (y 方向) に、パッドの長さ分だけ積分することで、パッド列方向 (x 方向) の電荷分布が求められる。センスワイヤーの位置がパッドの中心から y 方向に y_0 だけずれた位置にあるとすると、 x 方向の電荷分布は

$$\sigma(x) = \int_{-L/2-y_0}^{L/2-y_0} \sigma(x, y) dy \quad (4.3)$$

$$= \frac{Q}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\frac{(2n+1)a}{x^2 + (2n+1)^2 a^2} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + (2n+1)^2 a^2}} \right]_{-L/2-y_0}^{L/2-y_0} \quad (4.4)$$

と求められる。実際に実験においてカソードパッドに誘起された電荷分布は、Gaussian を解いて求めた電荷重心位置と中央のパッドの中心位置との差を横軸にとり、連続する3つのパッドに誘起された電荷量をそれぞれ P_1, P_2, P_3 としたときに、 $P_2/(P_1 + P_2 + P_3)$ を縦軸にとることで求めることができる。実験においてカソードパッドに誘起された電荷分布を図 4.8 に載せる。Gaussian で良く近似できていることがわかる。

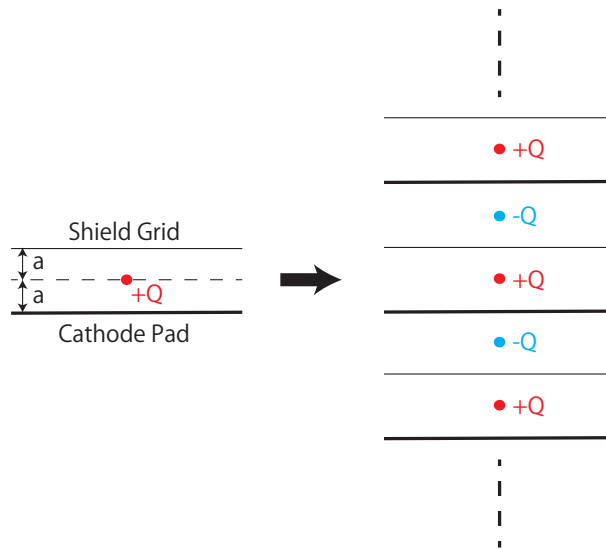


図 4.7: センスワイヤーに落とされた電荷に対する鏡像の取り方

4.4.2 パッド平面内の位置分解能の評価方法

ここでは位置分解能の評価方法について述べる。まず、アバランシェの発生点の、各パッド列に沿った位置を決定する。アバランシェ位置の x 座標は、パッドに誘起された電荷の重心から決定する。今回 PRF としては Gaussian を用いた。信号のパルス波高が最も高い連続する3 pad を Gaussian で解くことで電荷重心の位置を決定する。 y 座標は、パッド列の中心座標を用いる。この操作を全5 layer について行い、その後、この5点を用いて最小2乗法で直線フィットすることにより、陽電子ビームの飛跡を決定する (図 4.9)。ここで、求めた飛跡の各 layer 中心での x 座標と、PRF から求めたアバランシェ位置の x 座標との差 (residual) の分布の幅を求めることで位置分解能を決定する。

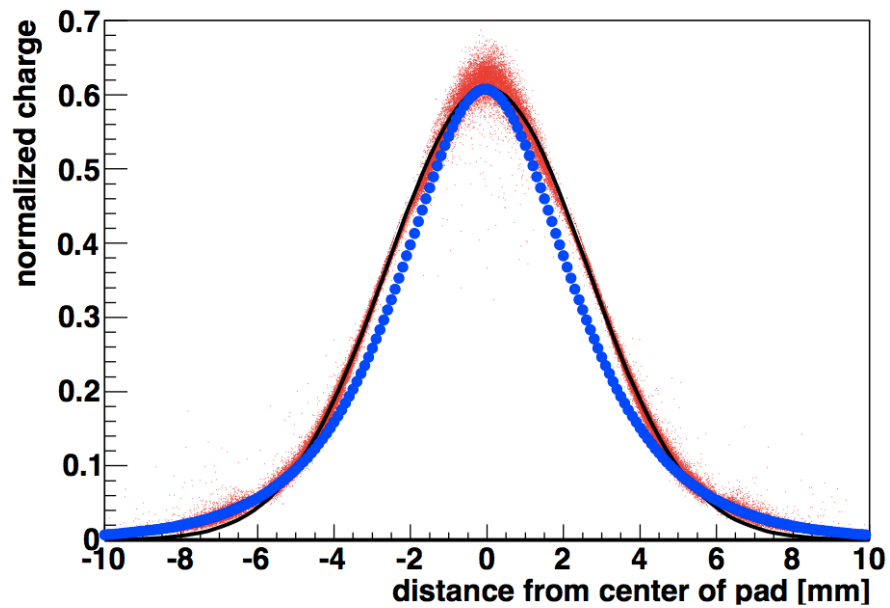


図 4.8: 実験で得られた電荷分布:赤点がデータ点であり、黒線は Gaussian によるフィットである。また、青点は鏡像法から求めた電荷分布である。鏡像法ではシールドワイヤーとセンスワイヤーの間隔も 3.2 mm としているため幅が狭くなってしまっている。

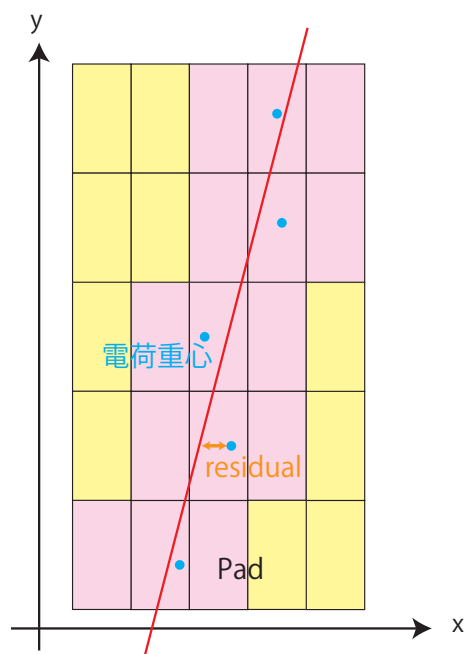


図 4.9: パッド平面内の位置分解能の評価方法

ここで5点すべてから直線フィットを行って位置分解能 σ_1 を求めると、自分自身の点が直線を引き寄せる力が強くなり、本来の位置分解能よりも良くてすぎてしまう。そこで自分自身の点を含めずに残りの4点で直線フィットを行い、その直線と自分自身の点との差をresidualとし、それから求めた位置分解能 σ_2 との積の平方をとることで、固有の位置分解能 $\sigma_{\text{intrinsic}}$ が得られる。

$$\sigma_{\text{intrinsic}} = \sqrt{\sigma_1 \sigma_2} \quad (4.5)$$

このようにして、パッド平面内の位置分解能を求めている。この正当性については付録Aに記す。

4.5 2 mm パッドと 4 mm パッドにおける位置分解能の比較

ここでは、P10 ガスを用いて、2 mm パッド読み出しと 4 mm パッド読み出しにおける位置分解能の比較を行った。パッド列に陽電子ビームが垂直に入射するよう (0° 入射) に試作機1をセットし、センスワイヤーにかける電圧を変化させて、位置分解能の評価を行った。その結果を図4.10に載せる。4 mm パッドよりも 2 mm パッドの方が位置分解能は悪くなっている。これは 2 mm パッ

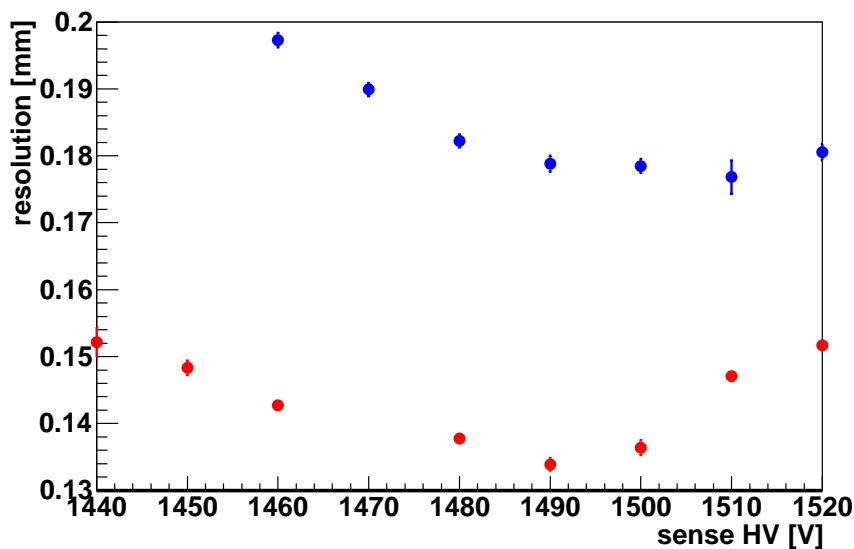


図 4.10: 2 mm パッドおよび 4 mm パッドでの位置分解能の印加電圧依存性：青い点が 2 mm パッド、赤い点が 4 mm パッドのデータ点である。

ドは 4 mm パッドに比べて pulse height 分布 (図 4.11) が小さい分、S/N が悪くなっているためと考えられる。

また両方のパッドにおいて、位置分解能が最も良いときの電圧から低電圧側および高電圧側に行くとき、位置分解能が再び悪化する現象が見られる。低電圧側で位置分解能が悪くなるのは、信号が小さくなり S/N が悪くなるためと考えられる。またセンスワイヤーに高電圧をかけると、発生するアバランシェのサイズが大きくなってしまいうため位置分解能が悪化すると考えられる。したがって、ノイズレベルにより最良の分解能が決まっている。

以上より 2 mm パッドよりも 4 mm パッドの方が位置分解能が向上した。よって以下では 4 mm パッド読み出しで、位置分解能の様々な影響に対する依存性の測定を行うことにする。また、以降

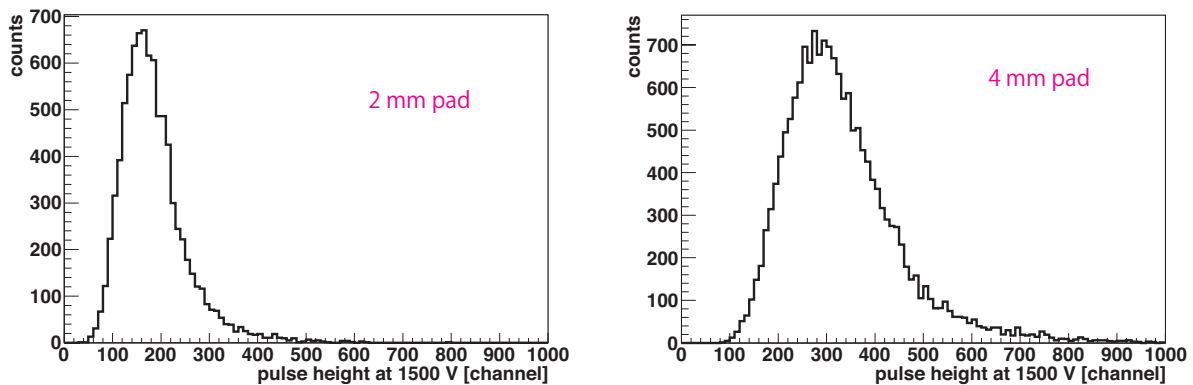


図 4.11: 2 mm pad および 4 mm pad におけるパルス波高: 2 mm pad の方がパッドサイズが小さい分パルス波高も小さくなっている。

の測定ではノイズレベルの改善を行ったため、0° 入射における位置分解能をさらに向上させることができた。この改善の詳細については付録 B に記す。

4.6 P10 ガスおよび Ne-CH₄ における 0° 入射での最適印加電圧の決定

3.3 節で述べたように、ガスによる荷電粒子の多重散乱は運動量分解能を悪化させる。そこで、これまで用いていた P10 ガスの代わりに、物質量の小さい Ne-CH₄ ガスを用いることでこの効果を軽減することができる。したがって P10 ガスと同等の位置分解能を達成することができれば、全体として運動量分解能は向上させることができるが、そのために、位置分解能に寄与する様々な依存性や、最適印加電圧および、P10 ガスと同等の読み出し回路で動作するかなどを調べる必要がある。そこで、本研究では P10 ガスと Ne-CH₄ ガスの両方を用いて実験を行い、その位置分解能を測定した。

ここでは、位置分解能の track wire angle 依存性を測定するための最適印加電圧を決定するために、4.5 節と同様に、荷電粒子がパッド列に垂直に入射する 0° 入射の状態、センスワイヤーにかかる印加電圧を変化させ、位置分解能の印加電圧依存性を測定した。(図 4.12)。また、efficiency を考慮して 4.6、位置分解能がほぼ最小になっている、P10 ガスで 1420 V、Ne-CH₄ ガスで 1160 V を最適印加電圧とし、この印加電圧で track wire angle 依存性の測定を行った。同じ印加電圧で Ar ベースガスと Ne ベースガスを比較したとき、アバランシェで生成される電荷量は Ne ベースガスの方が大きい(図 4.13) [16]。そのため、Ne-CH₄ ガスにおいては、P10 ガスのときよりも低い印加電圧で同じアバランシェサイズに達するため、最適印加電圧は、P10 ガスのときよりも小さくなる。

また、位置分解能をみると、P10 ガスに比べて Ne-CH₄ ガスの方が悪化していることがわかる。Ne ベースガスの方が Ar ベースガスに比べて、アバランシェで生成された電子が空間的に広がっている可能性があると思われる [16]。

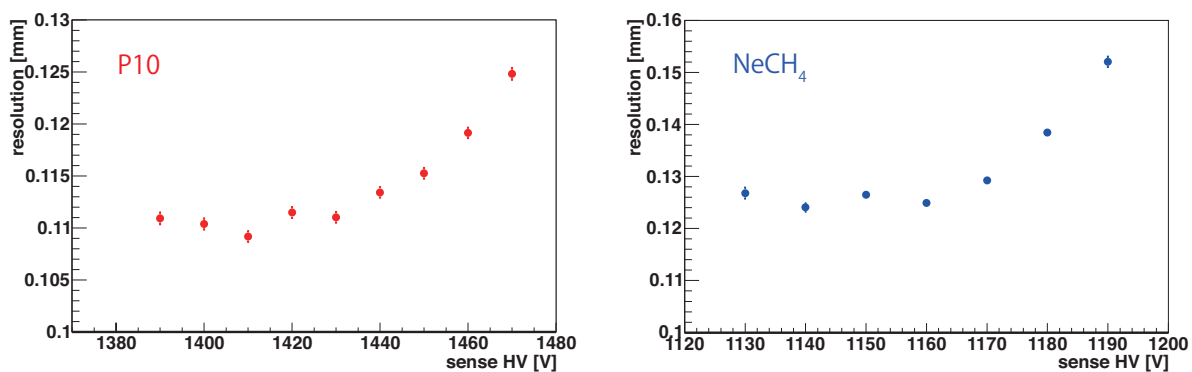


図 4.12: P10 ガスおよび Ne-CH₄ ガスにける位置分解能の印加電圧

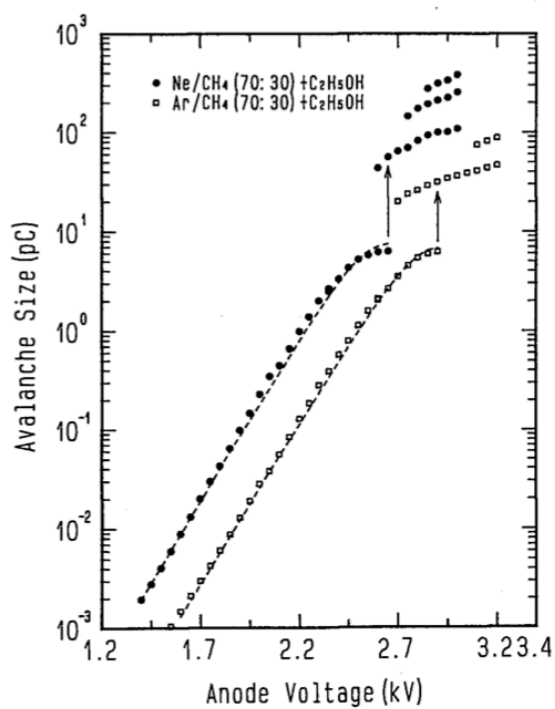


図 4.13: Ar ベースガスおよび Ne ベースガスにおけるアバランシェサイズの印加電圧依存性

4.7 パッド平面内の位置分解能の track wire angle 依存性の測定

4.7.1 カソードパッド読み出しによる位置分解能の track wire angle 依存性の測定

以上で、陽電子をセンスワイヤーに垂直に入射した 0° 入射での最適印加電圧を決定した。そこで、この最適印加電圧において、荷電粒子の飛跡とセンスワイヤーのなす角度 (track wire angle) を変化させて、それぞれの角度での位置分解能を測定した。このときの測定結果を図 4.14 および表 4.2 に示す。これより、位置分解能は track wire angle が大きくなると急激に悪化することがわかる。また、Ne-CH₄ ガスにおける位置分解能は、P10 ガスと比較すると悪化していることがわかった。これは、Ne-CH₄ ガスは P10 ガスに比べてイオン化で生成される電子-イオン対の数が少ないため、アバランシェによりゲインを稼いでいる。そのためアバランシェの空間的広がりが大きくなっているためであると考えられる。

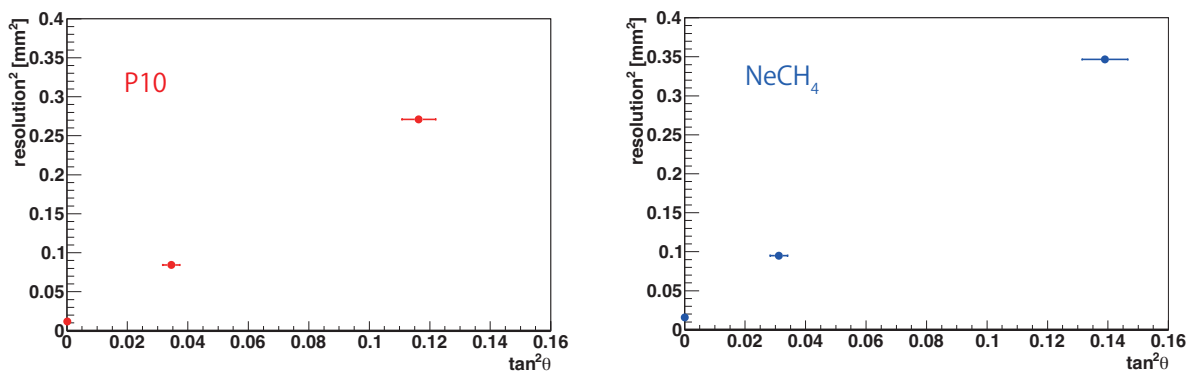


図 4.14: P10 ガスおよび Ne-CH₄ ガスにおけるパッド平面内の位置分解能の track wire angle 依存性

表 4.2: P10 ガスおよび Ne-CH₄ ガスでのパッド平面内の位置分解能の track wire angle 依存性

track wire angle	P10	Ne-CH ₄
0°	$108 \pm 1 \mu\text{m}$	$125 \pm 1 \mu\text{m}$
10°	$290 \pm 2 \mu\text{m}$	$308 \pm 2 \mu\text{m}$
20°	$520 \pm 3 \mu\text{m}$	$589 \pm 3 \mu\text{m}$

次に、track wire angle が 10° および 20° において、位置分解能を最小にする最適印加電圧を調べるため、印加電圧を変化させて再度実験を行った。そのときの P10 ガスにおける結果を図 4.15 に示す。これによると、印加電圧を大きくした方が位置分解能は向上していることがわかる。これは高印加電圧ではアバランシェのふらつきが小さくなっているためであると考えられる。

今回 1500 V 以上の電圧では信号がほとんどオーバーフローしてしまっているため、測定できなかった。しかしさらにダイナミックレンジがあれば、より位置分解能を小さく抑えることができると思われる。

ここで、track wire angle が 0° の時の最適印加電圧である 1420 V と、 10° および 20° での最適印加電圧 1500 V における、位置分解能の track wire angle 依存性を図 4.16 に示す。

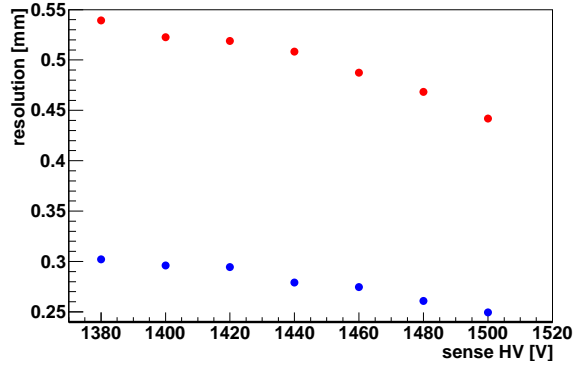


図 4.15: 位置分解能の印加電圧依存性 : 青点が track wire angle が 10° 、赤点が 20° の時のデータ点

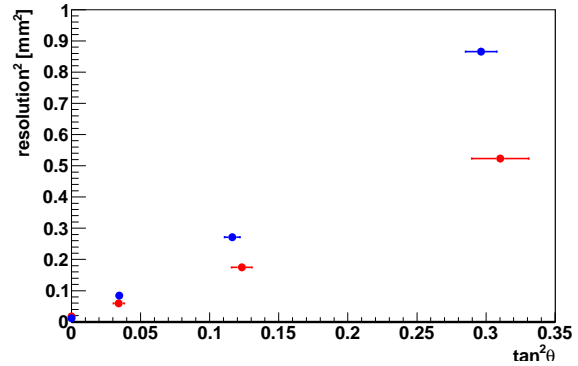


図 4.16: 印加電圧を変えたときの位置分解能の track wire angle 依存性 : 青点が 1420 V、赤点が 1500 V でのデータ点

また、3.4.1 より、パッド平面内の位置分解能の自乗は $\tan^2 \alpha$ についての 1 次関数で表せることがわかる。したがって図 4.16 のデータを 1 次関数でフィットすることで、

$$\sigma_{xy,1420 \text{ V},P10}^2 = (0.011 \pm 0.000) + (2.37 \pm 0.01) \cdot \tan^2 \alpha \quad (4.6)$$

$$\sigma_{xy,1500 \text{ V},P10}^2 = (0.017 \pm 0.000) + (1.34 \pm 0.01) \cdot \tan^2 \alpha \quad (4.7)$$

という track wire angle 依存性が得られる。NeCH₄ ガスについても同様にして

$$\sigma_{xy,1160 \text{ V},\text{Ne-CH}_4}^2 = (0.016 \pm 0.000) + (2.57 \pm 0.01) \cdot \tan^2 \alpha \quad (4.8)$$

$$\sigma_{xy,1205 \text{ V},\text{Ne-CH}_4}^2 = (0.034 \pm 0.000) + (1.84 \pm 0.01) \cdot \tan^2 \alpha \quad (4.9)$$

表 4.3: 印加電圧 1420 V および 1500 V でのパッド平面内の位置分解能の track wire angle 依存性

track wire angle	1420 V	1500 V
0°	$108 \pm 1 \mu\text{m}$	$134 \pm 1 \mu\text{m}$
10°	$290 \pm 2 \mu\text{m}$	$243 \pm 1 \mu\text{m}$
20°	$520 \pm 3 \mu\text{m}$	$418 \pm 2 \mu\text{m}$

4.7.2 アノードワイヤーを用いた 2 次元読み出し

これまでパッド列に平行な方向については PRF の電荷重心を取り、アバランシェ位置を決定したが、垂直な方向についてはパッド列の中心座標をとっていた。しかし、パッド列に垂直な方向についても電荷重心を取ることで、さらに位置分解能を向上させることができる。

そこで、各アノードワイヤーに落とされた電荷量の重みを考慮することで、パッド列に垂直な方向についても電荷重心をとることとする。アノードワイヤー間の間隔を d 、 i 番目のセンスワイヤー

の重み、およびパルス波高をそれぞれ w_i 、 h_i とすると、パッド列に垂直な方向の位置とパッド中心との差は、

$$dy = \sum_i \left(\frac{i w_i h_i}{\sum_j w_j h_j} \right) d \quad (4.10)$$

のように表せる。試作機1では、パッド列に対するセンスワイヤーの配置は、図4.17のようになっているため、 $d = 2.5 \text{ mm}$ とし、 $i = -3 \sim 3$ までの奇数番目の項のみを考慮している。

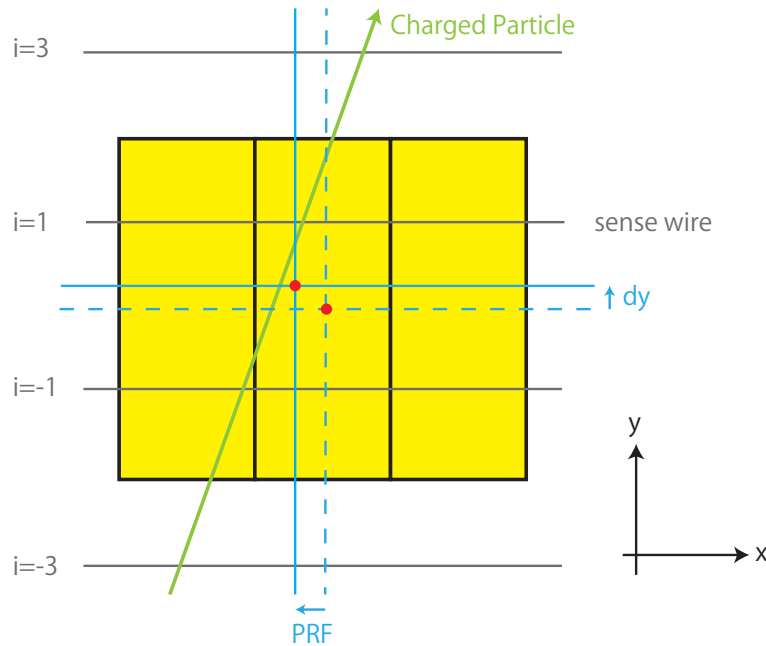


図 4.17: アノードワイヤーを用いた2次元読み出し

以上の2次元読み出しを行ったときのP10ガスの高印加電圧における2次元読み出しの結果を図4.18に示す。

P10ガスおよびNe-CH₄ガスにおける、アノードワイヤーを用いた2次元読み出しのデータを1次関数でフィットすると、

$$\sigma_{1,xy,P10,1420V,anode}^2 = (0.012 \pm 0.000) + (0.547 \pm 0.004) \cdot \tan^2 \alpha \quad (4.11)$$

$$\sigma_{1,xy,P10,1500V,anode}^2 = (0.022 \pm 0.000) + (0.333 \pm 0.004) \cdot \tan^2 \alpha \quad (4.12)$$

$$\sigma_{1,xy,Ne-CH_4,1160V,anode}^2 = (0.016 \pm 0.000) + (0.638 \pm 0.007) \cdot \tan^2 \alpha \quad (4.13)$$

$$\sigma_{1,xy,Ne-CH_4,1205V,anode}^2 = (0.035 \pm 0.000) + (0.484 \pm 0.004) \cdot \tan^2 \alpha \quad (4.14)$$

という依存性が得られた。

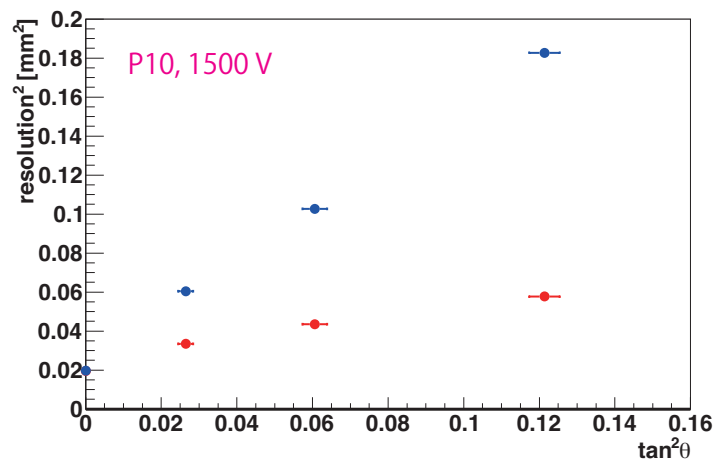


図 4.18: P10 ガス印加電圧 1500 V での 2 次元読み出しを行ったときの位置分解能の track wire angle 依存性: 青点がパッド情報のみを用いたとき、赤点が 2 次元読み出しを行ったときの位置分解能。

第5章 試作機2を用いた位置分解能の依存性測定

5.1 試作機2の製作目的

試作機1にはドリフト距離が2 cmと短かったため、位置分解能のドリフト距離依存性については測定することができなかった。実機ではドリフト距離はおよそ80 cmであり、ドリフト電子の拡散の影響により位置分解能はさらに悪化することが予想される。そこで実機を製作するにあたり、長いドリフト距離におけるドリフト方向の位置分解能、ドリフト距離依存性、および飛跡とパッド面のなす角度 (dip angle) の依存性を調べておく必要がある。そのため、およそ400 mmのドリフト距離を確保できるドリフト筐体を持った試作機2を製作し、それを用いた実験により位置分解能のドリフト距離依存性および、dip angle 依存性を測定することにした。

5.2 試作機2の構造

5.2.1 試作機2の大きさ

製作した試作機2の写真を図7に載せる。試作機2の大きさは310 mm × 370 mm × 490 mmであり、そのうち有感領域は、188 mm × 250 mm × 412.6 mmである。

5.2.2 パッドおよびワイヤーの配置

試作機2におけるパッドの配置を図5.2に示す。この試作機では、シミュレーションによりパッドの配置を最適化し(付録D)、4 mm × 6 mmのパッドを用いている。また、パッド上のセンスワイヤーの本数を2本から1本に変更した。この変更によりセンスワイヤーを用いた2次元読み出しの効果は期待できないが、センスワイヤーの本数を減らすことにより、ワイヤーに沿ったアバランシェの領域を小さくすることができる。そのため、カソードパッド読み出しによる位置分解能の track wire angle 依存性は向上すると考えられる。

試作機2に使用したワイヤーの種類を表5.1に示す。試作機2ではゲートワイヤーも設置してある(今回の実験ではOpen Gateのままにしている)。

ワイヤーの間隔は prototype1 と同様である。また PRF が Gaussian で最も良く近似できるときのギャップに近づけるため、センスワイヤーとパッド面の距離を3 mmに短くした。

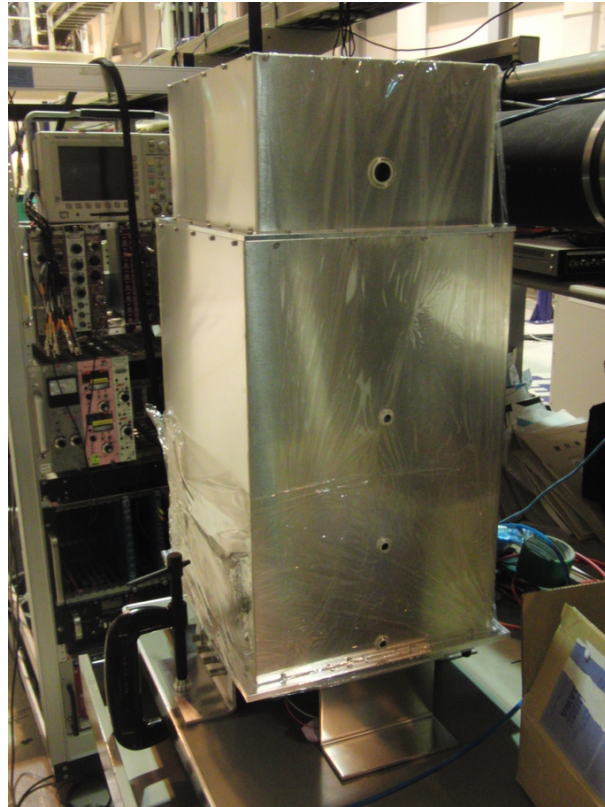


図 5.1: 試作機2の外観図

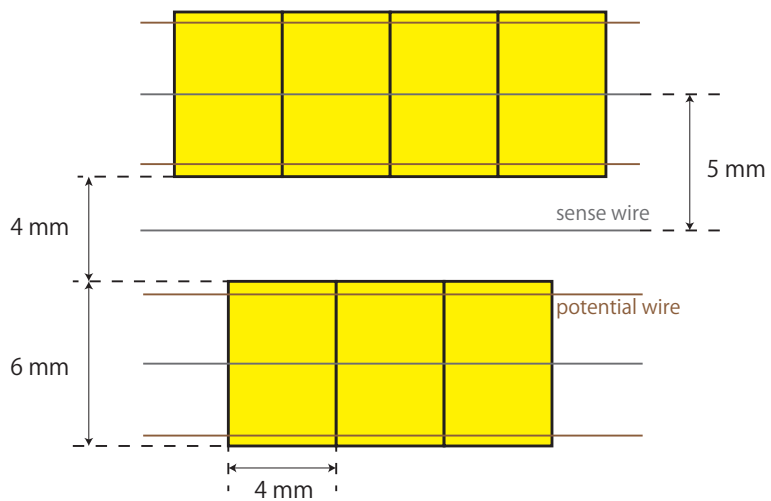


図 5.2: 試作機2のパッド構造

表 5.1: 試作機 2 に用いたワイヤーの種類

wire の種類	素材	直径	本数	ピッチ	パッド面からの距離
sense	Au-W	20 μm	32 本	5 mm	3 mm
potential	Au-BeCu	80 μm	32 本	5 mm	3 mm
shield	Au-BeCu	50 μm	64 本	2.5 mm	6 mm
gate	Au-BeCu	50 μm	64 本	2.5 mm	9 mm

5.2.3 ドリフト筐体

3.2.1 節でも述べたように、一様な電場をかけるために、ドリフト筐体にはストリップ電極が蒸着してある (図 3.2)。ドリフト電極面からシールドワイヤー面までを $1\text{ M}\Omega$ で抵抗分割することで、本来あるべき電位をフィールドケージのそれぞれのストリップに与え、電場のゆがみを補正している。このときのドリフト電子のドリフト曲線を図 5.3 に載せる。フィールドケージの壁からおよそ 1.35 cm 離れると一様な電場と見なすことができる。試作機 2 ではパッドは壁から 4.5 cm 以上離れているため、電場に対するゆがみはないと考えられる。

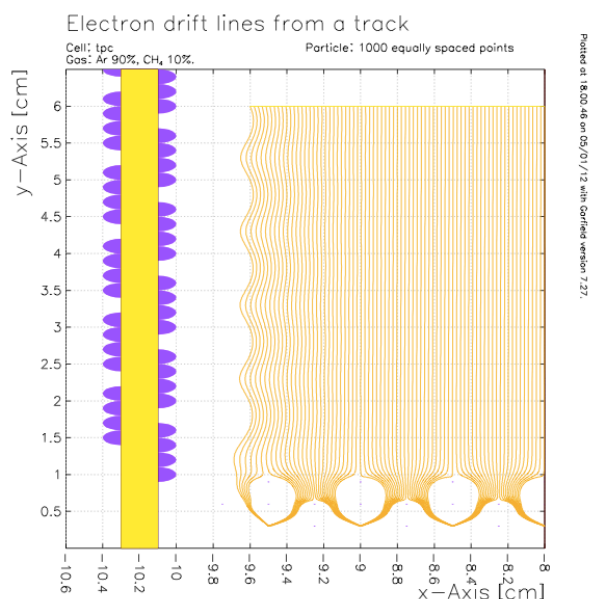


図 5.3: センスワイヤーの電圧が 1500 V 、ポテンシャルワイヤーの電圧が 200 V のときの電子のドリフト曲線

製作した試作機 2 をもちいて、ドリフト距離依存性、および dip angle 依存性を測定した。以下ではその詳細を述べる。

5.3 実験セットアップ

実験セットアップは基本的には試作機1の時と同様である。prototype1に比べて有感領域が大きいため、トリガースynchは前回の使用した物よりも大きい、6 cm × 30 cm の物を使用した。図5.4に実験の様子を載せる。

今回の実験ではプリアンプからシェイプアンプまで延長するケーブルの都合により、13 layer のパッド列の内、6 layer のみを使用した。また試作機2に流すガスとしては、0.1%の精度のP10ガスをを用いた。Ne-CH₄ガスは残念ながら時間の制約で測定できなかった。

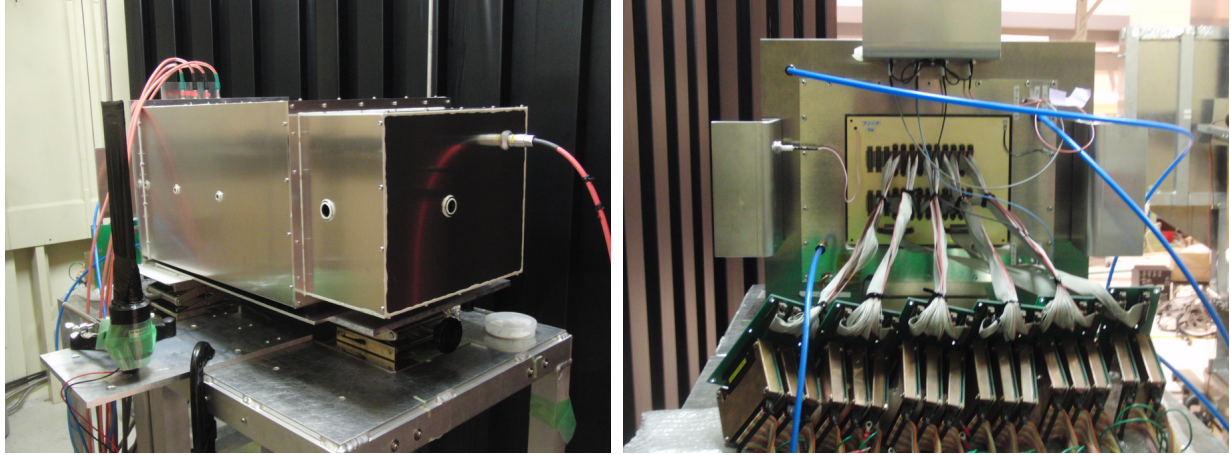


図 5.4: 実験の様子:(a) 左図:ドリフト距離依存性を測定しているときのセットアップ。(b) 右図:カソードパッドからの信号はケーブルで延長し、preampにつないでいる。

5.4 位置分解能のドリフト距離依存性の測定

5.4.1 試作機2を用いた位置分解能のドリフト距離依存性の測定

まず、パッド平面内およびドリフト方向の位置分解能を測定した。拡散による依存性のみを得るため、陽電子をワイヤーに垂直に入射させて評価を行った。最適印加電圧は試作機1と同じ1420 Vを用いている。その、ドリフト距離依存性の結果を図5.5に示す。これにより、ドリフト距離が長くなるほど、ドリフト方向およびパッド平面内の位置分解能は悪化していることがわかる。3.4.1で述べたように、位置分解能の自乗もドリフト距離について1次関数で表せる。したがって、このデータ点を1次関数でフィットすることにより、

$$\sigma_{xy,\text{diffusion}}^2 = (0.0170 \pm 0.001) + (0.00116 \pm 0.00002) \cdot L_D \quad (5.1)$$

$$\sigma_z^2 = (0.156 \pm 0.003) + (0.00040 \pm 0.00002) \cdot L_D \quad (5.2)$$

というドリフト距離依存性が得られた。ドリフト方向の位置分解能をさらに向上させるためには、FADCのサンプリング周波数をより大きくする必要がある。

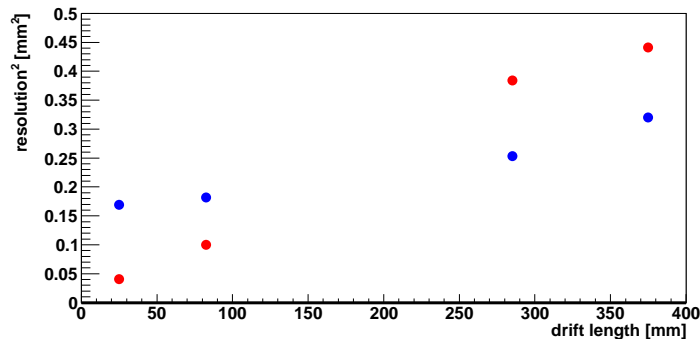


図 5.5: 位置分解能のドリフト距離依存性：赤点がパッド平面内の位置分解能、青点がドリフト方向の位置分解能を表している。

5.4.2 P10 ガスでの磁場中における拡散の効果

ここで、今回は磁場がかかっていない状態で拡散による影響を測定したが、LEPS2 における本実験では磁場 1 T をかけて動作させる。そのため、磁場に巻き付く効果によりドリフト電子の拡散が抑えられ、位置分解能に影響する横方向の拡散の効果はさらに小さくなる。したがって、シミュレーションを行うためには、磁場中での拡散の影響を知る必要があるため、ここでは前節での測定結果から磁場 1 T 中での拡散の効果を見積もることとする。

まず、P10 ガスにおける横方向の拡散の影響を見積もる。拡散に寄与する電子数を N_0 とすると、位置分解能 σ の拡散による依存性は、磁場 B における拡散係数を $D(B)$ とすると、式 3.7 より、

$$\sigma^2 = \sigma_0'^2 + \frac{D^2(B)}{N_0} L_D \quad (5.3)$$

とかける。ここで、拡散の影響以外の寄与は σ_0' にまとめた。

拡散係数はドリフト電圧に依存する。ドリフト電圧 160 V/cm、における、P10 ガス、および Ne-CH₄ ガスの拡散係数を表 5.2 に示す [17, 18]。これらの値を代入することで、拡散に寄与する有効電子数を求めることができる。

パッド平面内での位置分解能のドリフト距離依存性より拡散に寄与する電子数を求めると、

$$N_{0,P10} = 24 \pm 1 \text{ 個} \quad (5.4)$$

であった。また、ドリフト方向の位置分解能の測定からも 29 ± 2 個と近い値が得られている。これより、P10 ガスにおける磁場 $B = 1$ T 中での横方向の拡散の効果を見積もると、

$$\sigma_{xy,P10,diffusion}^2(B = 1 \text{ T}) = 0.017 + 0.00011 \cdot L_D \quad (5.5)$$

$$(5.6)$$

と見積もることができる。

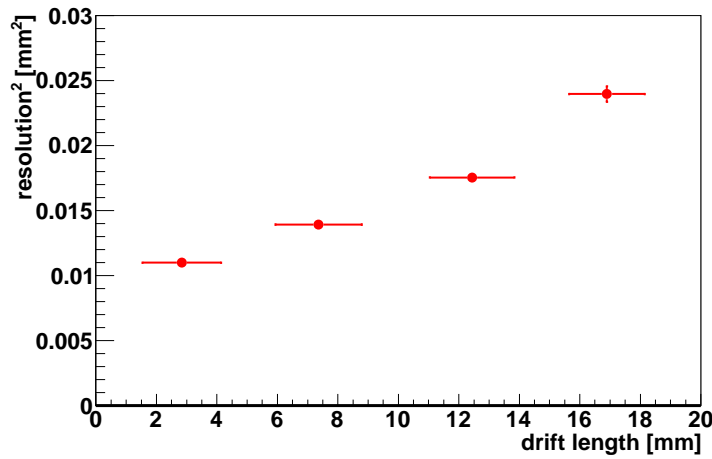
5.4.3 Ne-CH₄ ガスでの磁場中における拡散の効果

次に、Ne-CH₄ ガスにおける拡散の効果を見積もる。しかし、試作機 2 では P10 ガスを用いた実験しか行えなかったため、パッド平面内の位置分解能の拡散の効果と、ドリフト方向の位置分解能の拡散の効果は測定できていない。

表 5.2: diffusion constant

	横方向の拡散係数	縦方向の拡散係数
P10, $B = 0$ T	560 $\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$	340 $\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$
P10, $B = 1$ T	160 $\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$	340 $\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$
NeCH ₄ , $B = 0$ T	460 $\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$	330 $\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$
NeCH ₄ , $B = 1$ T	210 $\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$	330 $\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$

そこで、パッド平面内の位置分解能の拡散の効果は、試作機1を用いた実験での値を使用することにする。試作機1ではドリフト距離が20 mmしかないが、その領域を4つに区切って拡散の影響を調べた。その結果を図5.6に示す。この結果より位置分解能のドリフト距離依存性は

図 5.6: Ne-CH₄ ガスにおけるパッド平面内の位置分解能のドリフト距離依存性

$$\sigma_{xy, \text{Ne-CH}_4, \text{diffusion}}^2 = (0.0209 \pm 0.0005) + (0.0008 \pm 0.0001) \cdot L_D \quad (5.7)$$

$$(5.8)$$

と求まった。同様に、拡散に寄与する電子数を求めると、 $N_{0, \text{Ne-CH}_4} = 25 \pm 2$ 個となる。これより、磁場1 T中での拡散係数を用いると、磁場中での横方向の拡散による効果は、

$$\sigma_{xy, \text{Ne-CH}_4, \text{diffusion}}^2(B = 1 \text{ T}) = 0.0209 + 0.00018 \cdot L_D \quad (5.9)$$

と見積もることができる。

次にドリフト方向の拡散の効果であるが、これは試作機1ではドリフト距離が短すぎて測定することができなかった。そこで、式5.3より、Ne-CH₄ ガスにおけるパッド平面内の位置分解能から得られた拡散に寄与する電子数と、縦方向の拡散係数を用いることにより求めることにする。これより、ドリフト方向の位置分解能のドリフト距離依存性は、

$$\sigma_{z, \text{Ne-CH}_4, \text{diffusion}}^2(B = 1 \text{ T}) = 0.156 + 0.0004 \cdot L_D \quad (5.10)$$

と見積もった。

5.5 ドリフト方向の位置分解能の dip angle 依存性

5.5.1 試作機 2 を用いたドリフト方向の位置分解能の dip angle 依存性

ドリフト方向の位置分解能は dip angle にも依存する。陽電子ビームをワイヤーと垂直に入射し、dip angle を変化させることで、dip angle 依存性も測定した。この結果を図 5.7 に示す。これについても直線でフィットすると、

$$\sigma_{z,\text{dipangle}}^2 = (0.215 \pm 0.002) + (2.375 \pm 0.011) \cdot \tan^2 \lambda \quad (5.11)$$

という依存性が得られた。dip angle が大きくなるにつれて位置分解能も悪くなっていることがわかる。パッド平面内の位置分解能についても dip angle 依存性を調べてみたが、依存性は見られなかった。

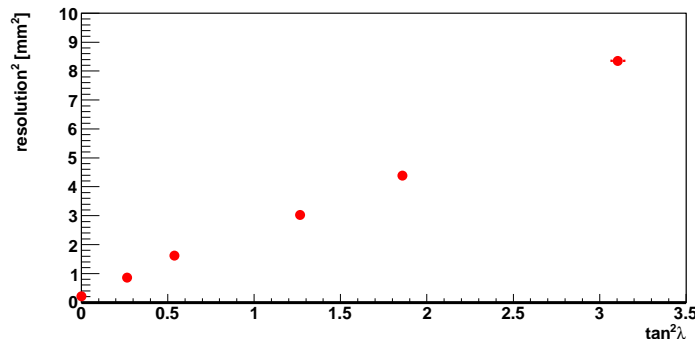


図 5.7: ドリフト方向の位置分解能の dip angle 依存性

5.5.2 Ne-CH₄ ガスにおける位置分解能の dip angle 依存性

Ne-CH₄ ガスについては、ドリフト方向の位置分解能と同様に、dip angle についても試作機 1 および試作機 2 では測定することができなかった。そこで、track wire angle 依存性と dip angle 依存性とで、有効電子数が同じと仮定できることを利用し、試作機 1 を用いた track wire angle 依存性から Ne-CH₄ ガスでの dip angle 依存性を見積もることにした。以下に詳しく述べる。

ここで、位置分解能の track wire angle 依存性以外の影響を σ_0' とすると、track wire angle 依存性、および dip angle 依存性は

$$\sigma_{W,P}^2 = \sigma_0'^2 + \frac{d^2 + h^2}{12N_{\text{eff}}} \tan^2 \alpha \quad (5.12)$$

$$\sigma_{\text{dip}}^2 = \sigma_0'^2 + \frac{h^2}{12N_{\text{eff}}} \tan^2 \lambda \quad (5.13)$$

と書ける。ここで、 h はパッドの長さ、 d はセンスワイヤーの間隔である。この式より、P10 ガスと Ne-CH₄ ガスにおける $\tan^2 \alpha$ の係数の比、および $\tan^2 \lambda$ の比は、両ガスにおける N_{eff} の比と考えることができる。そこで、試作機 1 における track wire angle 依存性から、両ガスにおける N_{eff} の比をもとめ、P10 ガスにおける $\tan^2 \lambda$ の係数にかけることによって Ne-CH₄ ガスでの位置分解能の dip angle 依存性測定を見積もることにする。

これより P10 ガス、および Ne-CH₄ ガスにおける N_{eff} はそれぞれ、

$$N_{\text{eff,P10}} = 4.39 \pm 0.02 \quad (5.14)$$

$$N_{\text{eff,Ne-CH}_4} = 4.05 \pm 0.02 \quad (5.15)$$

とかける。したがって、Ne-CH₄ ガスでの位置分解能の dip angle 依存性は、試作機2で P10 ガスを用いて測定した $\tan^2 \lambda$ の係数に、 $N_{\text{eff,P10}}/N_{\text{eff,Ne-CH}_4} = 1.08$ をかけることで求められる。

以上から Ne-CH₄ ガスにおけるドリフト方向の位置分解能の dip angle 依存性を

$$\sigma_{\text{dip,Ne-CH}_4,\text{diffusion}}^2 = 0.156 + 2.57 \tan^2 \lambda \quad (5.16)$$

と見積もった。ただし、この計算には有効電子数が track wire angle と dip angle とで共通であるという仮定が入っているため、今後 Ne-CH₄ ガスを用いた試作機2の試験を行い、評価し直す予定である。

第6章 LEPS2のTPCの設計

この章では、第4, 5章で得られた位置分解能を元に、 $\Lambda(1405)$ および Θ^+ 生成反応における運動量分解能および質量分解能のシミュレーションを行い、LEPS2 で用いる TPC のパッド面の設計を行う。

6.1 TPC に要求される性能

6.1.1 TPC の大きさおよび総チャンネル数

前方に設置するドリフトチェンバーの有感領域の直径がおよそ 1400 mm であるため、ドリフトチェンバーではおよそ 30° 以内の散乱角しか覆うことができない、そのため TPC は $30^\circ \sim 120^\circ$ の散乱角を覆う必要がある。また TPC の読み出すパッドの総数はコストの面から 10,000 チャンネル以内を目標とする。

6.1.2 $\Lambda(1405)$ 生成に必要とされる質量分解能

第1章で述べたように、LEPS2 では、3 GeV の γ 線を液体水素標的に入射することにより、 $\gamma p \rightarrow K^{*+} \Lambda(1405)$ 生成反応実験を行う。この反応によって生成された K^{*+} は

$$K^{*+} \rightarrow K_S^0 \pi^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$$

と崩壊し、終状態に 3 つの荷電 π 中間子を放出する。この 3 つの π 粒子の運動量を TPC および前方ドリフトチェンバーで測定することにより、missing mass 法から $\Lambda(1405)$ の質量を測定する。

$\Lambda(1405)$ のカイラルユニタリー模型で示唆される 2 つの極のエネルギーの位置はおよそ 1390 MeV/ c^2 と 1426 MeV/ c^2 である。このピーク位置を 1,000 イベントで、0.8 MeV/ c^2 の精度で測定するためには、およそ 12 MeV/ c^2 の質量分解能が要求される。これは、この 2 つの極のピーク位置を区別するには十分な精度である。

このときに要求されるおおよその運動量分解能を、3 GeV の γ 線 (エネルギー分解能 10 MeV) を液体水素標的に入射し、 K^{*+} と $\Lambda(1405)$ を等方的に生成するシミュレーションから求めた。第1章で述べたように $\Lambda(1405)$ の内部構造を探索するための実験では、 K^+ を交換粒子とする t -チャンネル反応を観測する必要がある。そのため、前方に K^{*+} が散乱されるイベントに注目する。そこで、 K^{*+} が 30° 以内に散乱され、その崩壊により終状態に現れる 3 つの π 中間子が TPC もしくは前方のドリフトチェンバーに放出されたイベントを選んだ。このときの K^{*+} の崩壊により生成される π^- 粒子の放出角と運動量の分布を図 6.1 に示す。TPC に入射される π 中間子の平均運動量はおよそ 300 MeV/ c^2 であり、平均散乱角は 55° である。この 3 つの π 中間子から missing mass 法により $\Lambda(1405)$ の質量分解能を求めたところ、前方のドリフトチェンバーの運動量分解能を 1% としたときに、TPC での運動量分解能が 1.1% 以下であれば良いことがわかった。

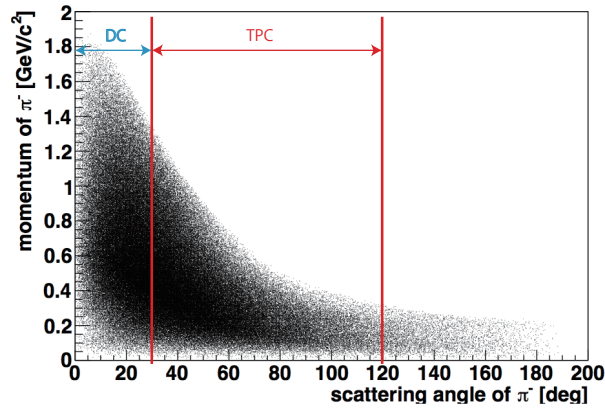


図 6.1: K^{*+} が 30° より前方に散乱されたときの π^- の運動量と放出角の関係

6.1.3 ペンタクォーク生成に要求される質量分解能

ペンタクォーク探索実験は $\Lambda(1405)$ 生成実験とともに LEPS2 で行う主要な物理のひとつにあげられ、 $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+$ という反応よりペンタクォークを生成する。ここでは



のペンタクォークの崩壊モードを考える。 Θ により生成された陽子は前方へ放出されるため、陽子は前方のドリフトチェンバーで測定する。TPC では K_{S0} の崩壊で生成される π^+, π^- を測定する。ペンタクォークの質量は、その崩壊により生成される π^+, π^-, p の不変質量を組み合わせることで求める。LEPS ではおよそ $11 \text{ MeV}/c^2$ の位置分解能で Θ^+ の探索を行ってきたが、LEPS2 ではそれよりも良い分解能として、 5.0 MeV 以下を目標とする。

6.1.4 運動量分解能

質量分解能を向上させるためには、測定する粒子の運動量分解能を良くすることが必要であるため、ここで運動量分解能について述べる。TPC で測定する荷電粒子の横方向の運動量分解能は、有限の位置分解能による効果 ($\Delta p_{t,\text{res}}$) と、多重散乱による効果 ($\Delta p_{t,\text{ms}}$) に分けられる。TPC のパッド平面内での位置分解能を σ_{xy} 、磁場を B としたとき、放射長 X_0 のガス中を電荷 z 、速度 β の荷電粒子が通過したときの運動量分解能はそれぞれ、

$$\frac{\Delta p_{t,\text{res}}}{p_t} = \frac{\sigma_{xy} p_t}{0.3 B L'^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}} \quad (6.2)$$

$$\frac{\Delta p_{t,\text{ms}}}{p_t} = \frac{0.016 [\text{GeV}/c] z}{0.3 B \beta L'} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \quad (6.3)$$

と表せる [10]。ここで、 L は有感領域における荷電粒子の飛跡の長さであり、 L' はその飛跡を xy 平面に射影したときの長さである。また、 N は荷電粒子が通過したパッド列の数である。式 6.3 をみると、運動量分解能は位置分解能に依存することがわかる。以降では、試作機を用いた実験から得られた、様々なパラメータに依存する位置分解能を用いてシミュレーションを行う。

6.2 試作機を用いた位置分解能の結果

ここで、運動量分解能および質量分解能のシミュレーションに必要な、試作機による位置分解能の測定実験の結果を記す。パッド平面内およびドリフト方向の位置分解能を、それぞれ

$$\sigma_{xy}^2 = \sigma_{0,xy}^2 + \sigma_{D,T}^2 L_D + \sigma_{W,P}^2 \tan^2 \alpha \quad (6.4)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_{0,z}^2 + \sigma_{D,L}^2 L_D + \sigma_{\text{dip}}^2 \tan^2 \lambda \quad (6.5)$$

という式で表したとき、試作機を用いて測定したそれぞれの依存性を表 6.1、および表 6.2 に整理しておく。次節以降のシミュレーションにおいては、この表にある値を用いて行う。本研究では、 0° 入射においては、低印加電圧の方が位置分解能は良かったが、track wire angle が大きくなると位置分解能は高印加電圧の方が向上することがわかった。そのため、どちらの印加電圧が、 $\Lambda(1405)$ や Θ^+ 生成反応から放出される低運動量の π 中間子の運動量分解能を小さくできるかをシミュレーションよりもとめる。

表 6.1: 試作機において得られたパッド平面内の位置分解能の各依存性

	$\sigma_{0,xy}^2$	$\sigma_{D,T}^2$	$\sigma_{W,P}^2$	$\sigma_{W,P}^2(\text{with anode})$
P10, 1420V	0.011 mm ²	0.00011 mm	2.37 mm ²	0.547 mm ²
P10, 1500V	0.017 mm ²	0.00011 mm	1.34 mm ²	0.333 mm ²
Ne-CH ₄ , 1160V	0.016 mm ²	0.00018 mm	2.57 mm ²	0.638 mm ²
Ne-CH ₄ , 1205V	0.034 mm ²	0.00018 mm	1.84 mm ²	0.484 mm ²

表 6.2: 試作機において得られたドリフト方向の位置分解能の各依存性

	$\sigma_{0,z}^2$	$\sigma_{D,L}^2$	σ_{dip}^2
P10	0.156 mm ²	0.0004 mm	2.38 mm ²
Ne-CH ₄	0.156 mm ²	0.0004 mm	2.57 mm ²

6.3 パッド構造の最適化

6.3.1 運動量分解能のシミュレーション方法

試作機を用いた実験により、運動量を測定する際に影響する位置分解能の依存性を調べた。その結果を用いて、TPC を通過した荷電粒子の運動量分解能を最小にできる、パッド面の構造、ガス、印加電圧などの条件を決定する。

6.1.4 節でも述べた通り、運動量分解能は、位置分解能に起因する項 $\Delta p_{t,\text{res}}/p_t$ と、多重散乱による項 $\Delta p_{t,\text{ms}}/p_t$ に分けて書くことができる。

$$\left(\frac{\Delta p_t}{p_t}\right) = \sqrt{\left(\frac{\Delta p_{t,\text{res}}}{p_t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_{t,\text{ms}}}{p_t}\right)^2} \quad (6.6)$$

よって、この2つの効果をシミュレーションにより調べることで、全体の運動量分解能を評価する。

まず、位置分解能に起因する項 $\Delta p_{t,\text{res}}/p_t$ を求める。飛跡をパッド平面に射影すると、磁場の影響により飛跡は円弧状になるため、この曲率を求めることで荷電粒子の運動量を測定できる。この運動量と、はじめに荷電粒子に与えた運動量との差

$$\frac{p_{\text{measured}} - p_0}{p_{\text{measured}}} \quad (6.7)$$

を各イベントごとにヒストグラムにつめることで、その幅から位置分解能に起因する運動量分解能が得られる。ここで、飛跡を各パッド列で測定するとき、有限の位置分解能の効果を入れる必要がある。そこで、プロトタイプを用いて測定した、track wire angle 依存性、およびドリフト距離依存性を考慮して、各パッド列に位置分解能の効果を入れて測定点を出す。次に、各パッド列における測定点を円フィットすることにより、飛跡の曲率を求める [20]。曲率 ρ と横運動量 p_t には、

$$p_t = 0.3\rho Bz \quad (6.8)$$

という関係があるため、これにより横運動量 p_{measured} および、運動量の差の幅から位置分解能起因の運動量分解能を求めることができる。多重散乱による運動量分解能は6.1.4節に示した、

$$\frac{\Delta p_{t,\text{ms}}}{p_t} = \frac{0.016 [\text{GeV}/c]z}{0.3B\beta L'} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \quad (6.9)$$

の計算式で書ける。

以上の2つの影響より、この荷電粒子に対する横方向の運動量分解能を評価することができる。これを各パッド配置、ガス、印加電圧について調べることで運動量分解能を最小にできる条件を求める。

6.3.2 印加電圧およびガスの選択

この節では、使用するガス、および印加電圧を決定する。多重散乱の効果を考えて、P10 ガスよりも物質量の小さい Ne-CH₄ ガスの方が運動量分解能を小さくできる。しかし、試作機の測定によって得られた位置分解能を見ると、P10 ガスの方が Ne-CH₄ ガスよりも、各依存性に対して位置分解能は良い値を示すことがわかった。そこで、どちらが $\Lambda(1405)$ 生成、および Θ^+ 生成反応において有効であるかを調べるために、運動量分解能のシミュレーションを行った。

製作する TPC は6角形で、図6.2のように大きさを仮定し、シミュレーションを行う。我々がこの TPC に要求する性能は、

- $30^\circ < \theta < 120^\circ$ の散乱角を覆うこと
- パッドの総数がおよそ 10,000 個以下
- $\Lambda(1405)$ および Θ^+ の質量分解能がそれぞれ 12 MeV/c、5 MeV/c 以下

である。よって、ここではまず、 $\Lambda(1405)$ 生成、および Θ^+ 生成反応で測定すべき、0.3 GeV/c の運動量の π 中間子に対する運動量分解能を比較し、最適なガスや動作印加電圧を決定する。

まずはこの有感領域に 4 mm × 10 mm のパッドをすき間なく敷き詰めて考える (図6.3:PATTERN 1)。この状態で、P10 ガスと Ne-CH₄ ガスでの運動量分解能、および高印加電圧と低印加電圧での π 中間子の運動量分解能についてシミュレーションを行った。このシミュレーションの結果を表6.3に示す。ここでは、アノードワイヤーを含めた2次元読み出しは行っていないとした。

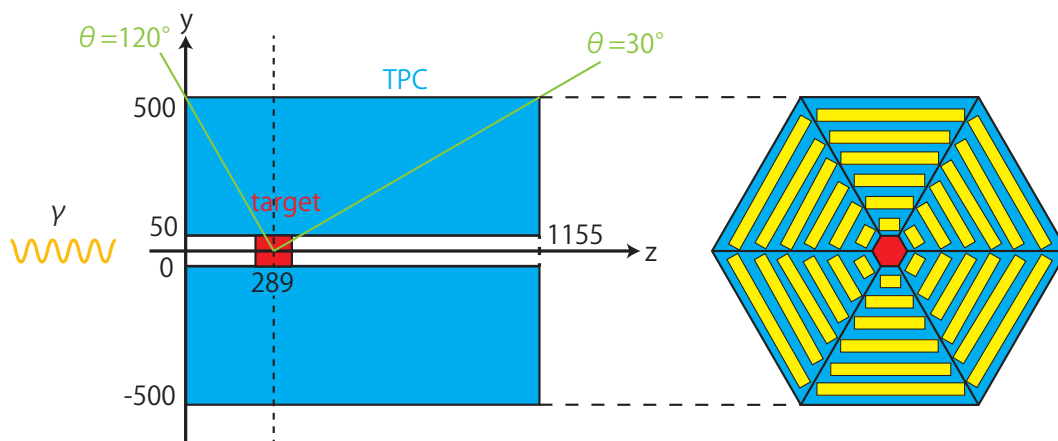


図 6.2: 設計する TPC の大きさ:右図の黄色い部分がパッド面であり、この配置を決定する

表 6.3: パッド列を 45 layer にしたときの π 中間子の運動量分解能のシミュレーション結果: π 中間子の運動量は $0.3 \text{ GeV}/c$ とした。

	$\Delta p_{t,\text{res}}/p_t$	$\Delta p_{t,\text{ms}}/p_t$	$\Delta p_t/p_t$
P10, 1420V	$0.688 \pm 0.003\%$	$0.828 \pm 0.003\%$	$1.077 \pm 0.003\%$
P10, 1500V	$0.607 \pm 0.002\%$	$0.828 \pm 0.003\%$	$1.027 \pm 0.003\%$
Ne-CH ₄ , 1160V	$0.767 \pm 0.003\%$	$0.491 \pm 0.002\%$	$0.911 \pm 0.003\%$
Ne-CH ₄ , 1205V	$0.733 \pm 0.003\%$	$0.491 \pm 0.002\%$	$0.882 \pm 0.002\%$

この結果より、両ガスについて高印加電圧で動作した方が運動量分解能は向上することがわかる。これは、track wire angleが大きくなったときに位置分解能が悪化する影響が効いているためである。また、ガスについて、P10ガスの方がNe-CH₄ガスよりも位置分解能が良かったため、位置分解能に起因する運動量分解能はP10ガスの方が良い。しかし、Ne-CH₄ガスの方が多重散乱の影響を軽減できるため、全体的には、Ne-CH₄ガスの方が運動量分解能を小さくできることがわかった。

したがって以降ではNe-CH₄の高印加電圧でオペレーションすることを想定し、パッドの配置の最適化を行う。

6.3.3 パッドの最適配置

6.3.2で見たように、PATTARN 1のパッド構造にNe-CH₄を用いることで、およそ1%以下の運動量分解能を十分達成できることがわかった。しかし、このとき読み出すパッドの総数は20,910チャンネルであり、我々の目標とする10,000チャンネルを大きく超えてしまう。そこで、パッド列の総数を少なくして目標運動量分解能を達成できるパッド構造を考える必要がある。

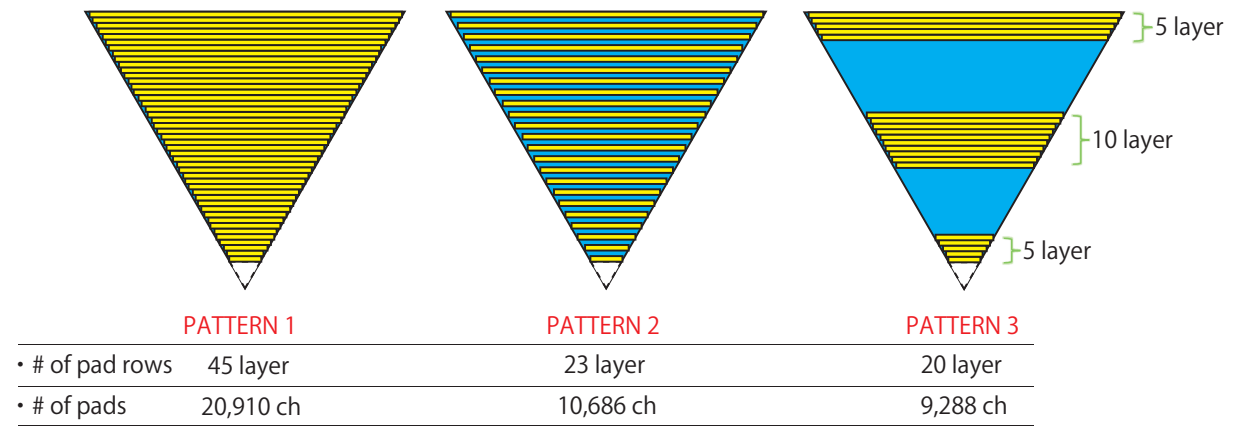


図 6.3: シミュレーションするパッドの配置

そこで、まずこの45 layerのパッド列の内、偶数番目のパッド列を取り除いたパッド配置を考えてみる(図6.3:PATTERN 2)。すると、23 layerのパッド列で、パッドの総数は10,686チャンネルとなり、我々の目標パッド数に近づけることができる。このとき同様のシミュレーションを行うと、運動量分解能はおよそ1.1%となる(表6.4:PATTERN 2)。測定点(パッド列)が少なくなったため、位置分解能による運動量分解能が悪化していることがわかる。

表 6.4: パッド構造を変化させたときの運動量分解能

	$\Delta p_{t,res}/p_t$	$\Delta p_{t,ms}/p_t$	$\Delta p_t/p_t$
PATTERN 1	$0.733 \pm 0.003\%$	$0.491 \pm 0.002\%$	$0.882 \pm 0.003\%$
PATTERN 2	$0.984 \pm 0.005\%$	$0.490 \pm 0.002\%$	$1.099 \pm 0.003\%$
PATTERN 3	$0.852 \pm 0.003\%$	$0.490 \pm 0.002\%$	$0.983 \pm 0.003\%$
PATTERN 3 (outside anode readout)	$0.783 \pm 0.003\%$	$0.490 \pm 0.002\%$	$0.924 \pm 0.003\%$

ここで、位置分解能に起因する運動量分解能は、荷電粒子の飛跡を円フィットしたときの曲率の分散からくるものである。そのため、この曲率分散を最小にするようにパッド列を配置すればよい。パッド列の総数を N layer とし、全てのパッド列における位置分解能が一定であると考えると、荷電粒子の飛跡の中心に $N/2$ layer、飛跡の両端に $N/4$ layer ずつおいたときに、曲率の分散は最小になる [21]。

したがって、 $N = 20$ として TPC の内側と外側に 5 layer ずつ、中央に 10 layer を配置してみると (図 6.3:PATTERN 3)、パッドの総数は 9,288 チャンネルになる。この配置についてシミュレーションにより運動量分解能を求めると、およそ 0.98% となり、さらに運動量分解能を小さくできることがわかった。

6.3.4 アノードワイヤーを用いた 2次元読み出し

この PATTERN 3 の配置において、各パッド列における track wire angle と、TPC の動径方向を y 軸としたときの各パッド列の y 座標との関係を図 6.4 に示す。この図より、外側のパッド列ほど track wire angle は大きくなっていることがわかる。track wire angle が大きくなると、位置分解能は $\tan \alpha$ にしたがって急激に悪化し、運動量分解能を悪化させる原因となる。そこで、track wire angle が大きくなる外側の 5 layer のパッド列に関しては、アノードワイヤーの読み出しを行うことにする。これにより 2次元読み出しによる測定が可能になり、位置分解能を向上させることができる。このとき、シミュレーションより π 粒子の運動量分解能はおよそ 0.92% と得られた (表 6.4 , PATTERN 3 outside anode readout)。

以上により LEPS2 の TPC は、パッド構造を PATTERN 3 のようにし、外側 5 layer 分のアノードワイヤーを読み出すことにする。

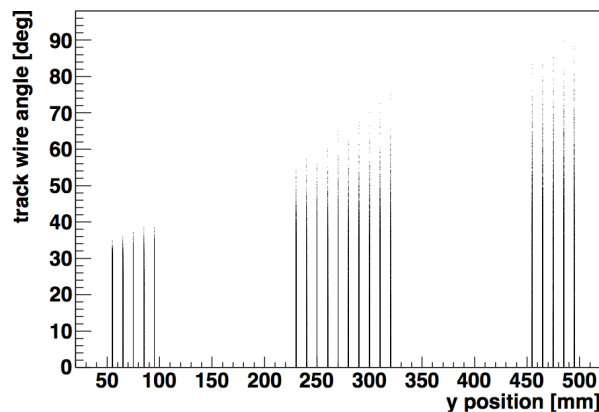


図 6.4: 各パッド列における track wire angle と、各パッド列の y 座標の相関: 外側の 5 layer は track wire angle が大きくなるイベントがある

6.4 質量分解能のシミュレーション

前節で最適化したパッド構造において、各ハドロン生成反応に対してシミュレーションを行い質量分解能を求めた。その詳細を以下に述べる。

6.4.1 質量分解能のシミュレーション方法

ここでは質量分解能を求めるために行ったシミュレーションの方法を説明する。

まず、液体水素標的に 3.0 GeV の γ 線を入射し、測定したい反応を等方的に生成する。

質量分解能のシミュレーションを行うにあたり、質量分解能を悪化させる様々な影響を考慮した。それらを以下にまとめる。

入射 γ 線のエネルギー分解能

ここでは 3.0 GeV の入射 γ 線におけるハドロン生成反応を見ているが、本実験においては Tagger のエネルギー分解能により、入射 γ 線もエネルギー分解能を持つ。そこで、反応を生成する際に入射 γ 線に 10 MeV のエネルギー分解能を与えている。

前方ドリフトチェンバーにおける運動量分解能

TPC が覆うのは、散乱各 θ が $30^\circ < \theta < 120^\circ$ の領域である。これより小さい角度に放出された粒子は、前方のドリフトチェンバーで測定する。今回のシミュレーションでは、ドリフトチェンバーによる運動量分解能を 1-2% として、前方に散乱された粒子の運動量を求めている。

ガス中での多重散乱

ガス中での多重散乱による横運動量分解能は、

$$\Delta p_{t,ms} = \frac{0.016 [\text{GeV}/c] p_t z}{0.3 B \beta L'} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \quad (6.10)$$

により考慮する。この値を幅とする Gaussian 型の乱数を各イベント、各粒子ごとに発生し、多重散乱の効果として与えている。また θ および ϕ についても、多重散乱による誤差が生じる。その誤差は、

$$\Delta \theta = \frac{0.0136 [\text{GeV}/c] z}{\beta p} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \quad (6.11)$$

とかける。運動量と同様に乱数を発生して角度の誤差として与えている。

今回用いた、Ne-CH₄ ガスの radiation length は $X_0 = 363.16[\text{m}]$ である。

ターゲット中での多重散乱

TPC の領域に入るまでに、ターゲット中でも多重散乱により誤差が発生する。 θ , ϕ における誤差は同様の方法で与える。運動量の誤差は、ターゲット中でのエネルギー損失は、Bethe-Bloch の式

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\log \frac{2m_e \beta^2 \gamma^2}{I^2} - \beta^2 \right] \quad (6.12)$$

により求める。また、その幅を

$$\sigma^2 = 4\pi N_A r_e^2 \rho \frac{Z}{A} x \quad (6.13)$$

により与えている。

ターゲットの大きさは半径を 5 cm、長さを 15 cm とした。また、今回のシミュレーションではターゲットとして、 $\Lambda(1405)$ 生成および ϕ 中間子生成反応においては液体水素、 Θ^+ 生成反応においては液体重水素を用いた。これらの radiation length はそれぞれ、8.88 m、7.4m である。

以上の効果を考慮して質量分解能のシミュレーションを行った。

6.4.2 シミュレーションを行う生成反応

本研究でシミュレーションを行うのは以下の2つの反応である。

$\Lambda(1405)$ 生成反応

$\Lambda(1405)$ は $\gamma p \rightarrow K^{*+}\Lambda(1405)$ 反応によって生成する。この K^{*+} の崩壊

$$K^{*+} \rightarrow K_S^0 \pi^+ \rightarrow K^0 \pi^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$$

により終状態に生成される π^+, π^+, π^- の運動量を測定して、missing mass を組むことにより、 $\Lambda(1405)$ の質量を測定する。目標とする質量分解能は、およそ 12 MeV 以下である。 $\Lambda(1405)$ の内部構造を調べる実験を行うには、 $\Lambda(1405)$ の生成反応を t -チャネル反応で起こす必要があるため、前方に K^{*+} が散乱されたイベントを見る必要がある。そこで、 K^{*+} が前方 ($\theta < 30^\circ$) に散乱されたイベントに対して、その質量分解能を調べる。

ペンタクォーク生成反応

次に、 $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+$ のペンタクォーク探索実験における、 Θ^+ の質量分解能をシミュレーションより求める。我々の目標とする Θ^+ の質量分解能はおよそ 5 MeV である。この反応では Θ^+ の崩壊

$$\Theta^+ \rightarrow K_S^0 p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$$

により生成される、 π^+, π^-, p の invariant mass を組むことにより Θ^+ の質量を求める。 Θ^+ は、現在のところ前方事象以外は観測されていない。そこで、 K^+ が $0 < \theta < 20^\circ$ に散乱されるイベントを測定する。

まず、この2つの生成反応について、 $\Lambda(1405)$ 生成反応で観測する π^+, π^+, π^- ペンタクォークの崩壊により生成される π^+, π^-, p を TPC で測定したときの質量分解能のシミュレーションを行い、前節のようなガス、印加電圧、パッド配置で質量分解能を最良にできていることを確認する。

6.4.3 各パッド配置、ガス、印加電圧におけるシミュレーション結果

表 6.4 における各パッド配置について質量分解能を求めたところ、表 6.5 のような結果が得られた。ここでは、動作させるガスとして、Ne-CH₄ ガスの高印加電圧を用いた。このシミュレーション結果より、パッドの配置は PATTERN 3 (outside anode readout) をもちいることで、最良になっていることが確認できる。

表 6.5: パッド配置を変化させたときの $\Lambda(1405)$ と Θ^+ の質量分解能

	$\Lambda(1405)$	Θ^+
PATTERN 2	13.4MeV/ c^2	5.59MeV/ c^2
PATTERN 3	11.9MeV/ c^2	5.14MeV/ c^2
PATTERN 3 (outside anode readout)	11.3MeV/ c^2	4.96MeV/ c^2

さらにこのパッド配置において、各ガスについてシミュレーションを行ったところ、表 6.6 のような結果が得られた。これにより、Ne-CH₄ ガスの高印加電圧で動作させるのが最良であることが

確認できた。また、このとき、 $\Lambda(1405)$ と Θ^+ の両方において目標質量分解能を達成できていることがわかった。

表 6.6: ガスおよび印加電圧を変化させたときの $\Lambda(1405)$ と Θ^+ の質量分解能

	$\Lambda(1405)$	Θ^+
P10, 低印加電圧	12.0MeV/c ²	5.56MeV/c ²
P10, 高印加電圧	11.3MeV/c ²	5.34MeV/c ²
Ne-CH ₄ , 低印加電圧	11.5MeV/c ²	5.09MeV/c ²
Ne-CH ₄ , 高印加電圧	11.3MeV/c ²	4.96MeV/c ²

6.4.4 前方での測定も含めたシミュレーション結果

前節では、この2つの生成反応について、 $\Lambda(1405)$ 生成反応で生成される π^+ , π^+ , π^- と、ペンタクォークの崩壊により生成される π^+ , π^- , p をすべて TPC で測定した状況を考えた。

ここで、 $\Lambda(1405)$ 生成反応の終状態に生成される3つの π 中間子に対するアクセプタンスを図 6.5 に示す。この図より、 K^{*+} の放出角が 30° に近づくにしながら 3π 検出イベントも観測されるが、 K^{*+} が前方に放出されたときは 1π , 2π 検出がメインであることがわかる。したがって、TPC で測定する π 中間子が、 1π , 2π , 3π のときの missing mass による $\Lambda(1405)$ の質量分解能をシミュレーションよりそれぞれ求めた。ここで、前方に放出された π 中間子はドリフトチェンバーで測定する。

前方での運動量分解能を 1% としてシミュレーションを行うと、 1π , 2π , 3π のイベント全てに対して $12 \text{ MeV}/c^2$ 以下の質量分解能で $\Lambda(1405)$ の質量を測定できることがわかった (表 6.7)。

ここで前方での運動量分解能を 2% としてシミュレーションを行うと、 1π , 2π 検出における $\Lambda(1405)$ の質量分解能は 1% の時よりも悪化しており、 $14 \text{ MeV}/c^2$ 以上であることがわかった。

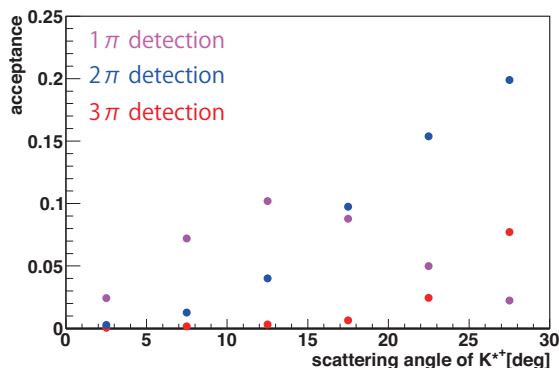


図 6.5: $\Lambda(1405)$ 生成反応における TPC のアクセプタンス

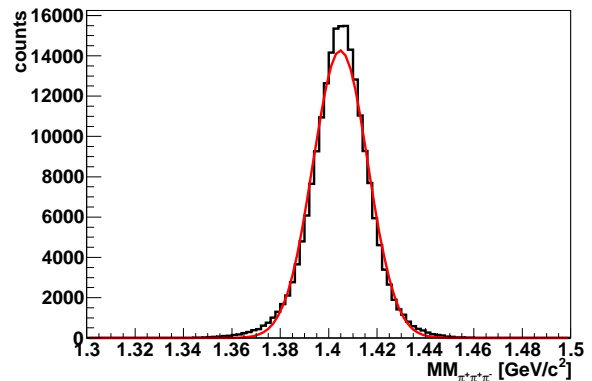


図 6.6: TPC で測定した3つの π 中間子の運動量から求めた $\Lambda(1405)$ の質量分解能

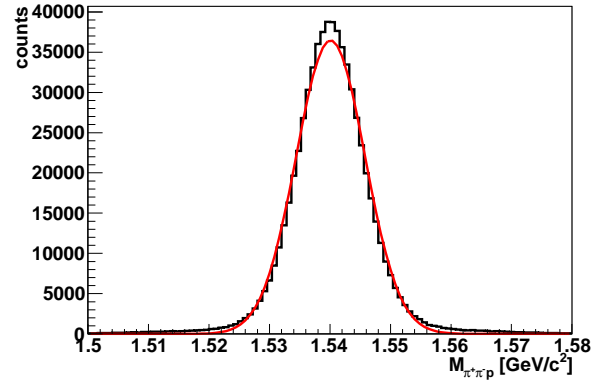
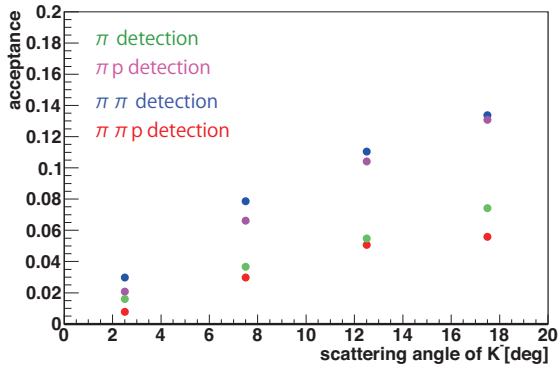
表 6.7: $\Lambda(1405)$ の質量分解能

	$\Delta M M_{\pi^+\pi^+\pi^-}$ (forward dp/p $\sim 1.0\%$)	$\Delta M M_{\pi^+\pi^+\pi^-}$ (forward dp/p $\sim 2.0\%$)	acceptance
1 π detection	11.2 MeV/ c^2	16.0 MeV/ c^2	39.0%
2 π detection	11.6 MeV/ c^2	14.1 MeV/ c^2	45.4%
3 π detection	11.3 MeV/ c^2	11.3 MeV/ c^2	12.7%

次に、図 6.7 に Θ^+ 生成反応のアクセプタンスを示す。このときのモードとしては、 π 、 πp 、 $\pi\pi$ 、 $\pi\pi p$ がそれぞれ全体的に起こっていることがわかる。そこで、 π 検出、 πp 検出、 $\pi\pi$ 検出、 $\pi\pi p$ 検出のモードについて、 Θ^+ の invariant mass の分解能を求める (図 6.8)。

この結果を表 6.8 に示す。目標とする 5 MeV/ c^2 の質量分解能は、 $\pi\pi p$ のイベントに対して達成できた。また前方の運動量分解能を 2% としたときは、 $\pi\pi$ のイベントに対して、目標分解能に近い 5.8 MeV/ c^2 以下の質量分解能で測定できることがわかる。 π 、 πp のイベントに対しては、 ~ 7.5 MeV/ c^2 と大きい値になってしまっている。前方での運動量分解能を 1% とすると、 πp 検出を含めた、およそ 80% のイベントに対して、質量分解能 6.0 MeV/ c^2 で Θ^+ の質量を測定できる。

これはいずれにしても LEPS における質量分解能 ~ 11 MeV/ c^2 と比較すると十分に向上しており、LEPS よりもさらに良い精度で Θ^+ の質量分布のピークを測定できることを示す。

図 6.7: Θ^+ 生成反応における TPC のアクセプタンス図 6.8: TPC で測定した $\pi^+\pi^-$ と前方の DC で測定した p の運動量より求めた、 Θ^+ の質量分布表 6.8: Θ^+ の質量分解能

	ΔM_{Θ} (forward dp/p $\sim 1\%$)	ΔM_{Θ} (forward dp/p $\sim 2\%$)	acceptance
π detection	6.4 MeV/ c^2	7.6 MeV/ c^2	18.2%
πp detection	5.6 MeV/ c^2	7.4 MeV/ c^2	32.3%
$\pi\pi$ detection	5.0 MeV/ c^2	5.8 MeV/ c^2	35.3%
$\pi\pi p$ detection	5.0 MeV/ c^2	5.0 MeV/ c^2	14.4%

6.5 TPCの半径を変えたときの質量分解能

ここでは、TPCに対する半径およびパッド総数の条件を外して、目標とする質量分解能を達成するために必要な構造を調べる。

運動量分解能を求める式を改めて書く。

$$\frac{\Delta p_{t,\text{res}}}{p_t} = \frac{\sigma_{xy} p_t}{0.3BL'^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}} \quad (6.14)$$

$$\frac{\Delta p_{t,\text{ms}}}{p_t} = \frac{0.016 [\text{GeV}/c] z}{0.3B\beta L'} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \quad (6.15)$$

この式より、TPCの構造を変えて運動量分解能を向上させるためには、

- パッド列の層数を増やす
- 荷電粒子の飛跡距離、すなわち TPC の半径を大きくする

の2つが考えられる。パッド列の層数 N を増やせば、位置分解能に起因する運動量分解能は $\sim 1/\sqrt{N}$ で向上する。この影響は多重散乱による運動量分解能には寄与しない。また、TPCの半径 R を大きくすることでは、位置分解能に起因する項は $1/R^2$ で向上し、さらに多重散乱による項も $1/\sqrt{R}$ で向上することがわかる。したがって TPC の半径を変化させて、質量分解能の変化を調べることが有効である。

TPCの半径を 500 mm, 600 mm, 700 mm としたときの各生成反応について、シミュレーションにより求めた質量分解能の結果を図 6.9 - 6.12, 表 6.11, 表 6.12 に示す。ここではパッドの総数がおよそ 10,000 チャンネルになるように制限をつけた。この結果より半径が大きくなるほど、質量分解能も大きく向上していることがわかる。

前方の運動量分解能を 1% とすると、全ての検出モードにおいて $\Lambda(1405)$ の質量分解能は $12 \text{ MeV}/c^2$ 以下になり、目標質量分解能を達成できることがわかった。また Θ^+ については $\pi p, \pi\pi, \pi\pi p$ を TPC で検出するイベントについては、およそ目標質量分解能に近い $6 \text{ MeV}/c^2$ 以下で測定できることがわかった。さらに、 Θ^+ については半径を 700 mm にすることで、 πp 検出のイベントについてもほぼ目標運動量分解能である $5.0 \text{ MeV}/c^2$ を達成できることがわかる。

また、前方の運動量分解能を 2% のとすると、 $\Lambda(1405)$ については、TPC の半径を 600mm にすれば、およそ 60% のイベントに対して、目標質量分解能である $12 \text{ MeV}/c^2$ で測定できることがわかる。また、 Θ^+ では $\pi, \pi p$ 検出では半径を大きくしても目標運動量分解能は達成できなかったが、半径を 600 mm 以上にすることで、およそ 50% の $\pi\pi, \pi\pi p$ のイベントに対して $5 \text{ MeV}/c^2$ の質量分解能以下で Θ^+ の質量を測定できることがわかった。

したがって、前方での運動量分解能を 1% 以下にするか、TPC の半径を 600 mm にすることで、この 2 つの反応に関して目標とする質量分解能を達成できることがわかった。

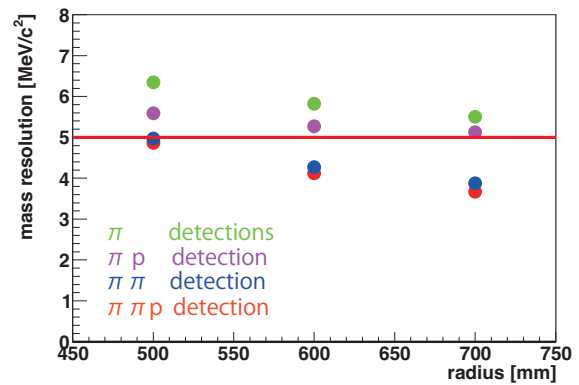
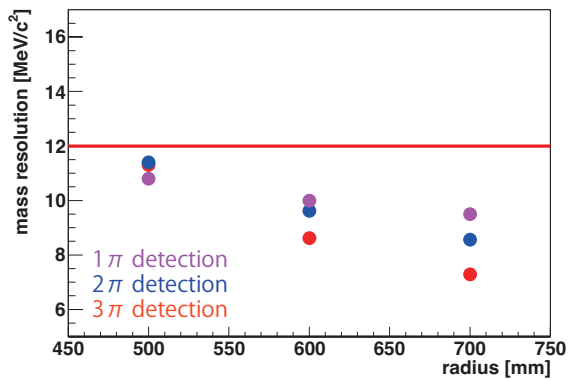


図 6.9: TPC の半径を変化させたときの $\Lambda(1405)$ の質量分解能: 前方の運動量分解能は 1%

図 6.10: TPC の半径を変化させたときの Θ^+ の質量分解能: 前方の運動量分解能は 1%

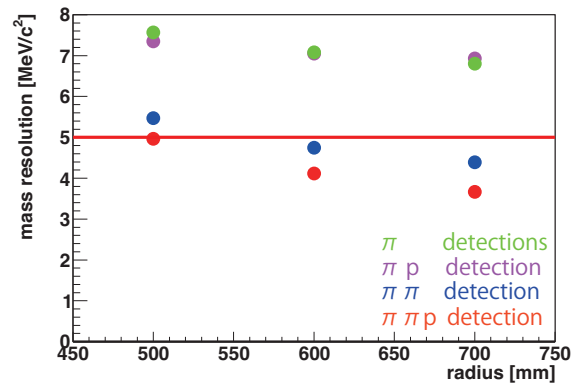
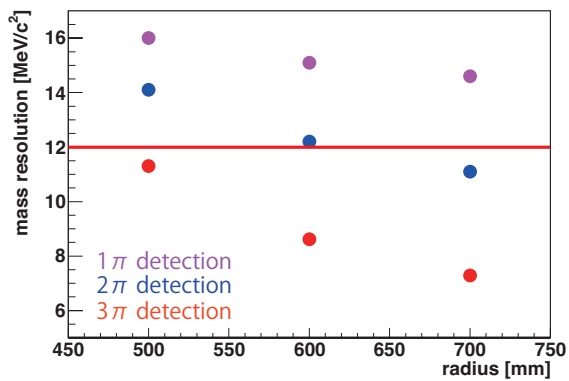


図 6.11: TPC の半径を変化させたときの $\Lambda(1405)$ の質量分解能: 前方の運動量分解能は 2%

図 6.12: TPC の半径を変化させたときの Θ^+ の質量分解能: 前方の運動量分解能は 2%

表 6.9: TPCの半径を変えたときの $\Lambda(1405)$ の質量分解能: 前方の運動量分解能は上段が1%で、下段が2%

radius (# of pads)	500 mm (10,218)	600 mm (9,930)	700 mm (10,218)	acceptance
1π detection	10.8 MeV/ c^2	10.0 MeV/ c^2	9.50 MeV/ c^2	39.0%
2π detection	11.4 MeV/ c^2	9.62 MeV/ c^2	8.56 MeV/ c^2	45.4%
3π detection	11.1 MeV/ c^2	8.62 MeV/ c^2	7.28 MeV/ c^2	12.7%
1π detection	15.9 MeV/ c^2	15.1 MeV/ c^2	14.6 MeV/ c^2	39.0%
2π detection	13.9 MeV/ c^2	12.2 MeV/ c^2	11.1 MeV/ c^2	45.4%
3π detection	11.1 MeV/ c^2	8.62 MeV/ c^2	7.28 MeV/ c^2	12.7%

表 6.10: TPCの半径を変えたときの Θ^+ の質量分解能: 前方の運動量分解能は上段が1%で、下段が2%

radius (# of pads)	500 mm (10,218)	600 mm (9,930)	700 mm (10,218)	acceptance
π detection	6.35 MeV/ c^2	5.82 MeV/ c^2	5.50 MeV/ c^2	18.2%
πp detection	5.59 MeV/ c^2	5.27 MeV/ c^2	5.13 MeV/ c^2	32.3%
$\pi\pi$ detection	4.97 MeV/ c^2	4.27 MeV/ c^2	3.88 MeV/ c^2	35.3%
$\pi\pi p$ detection	4.86 MeV/ c^2	4.12 MeV/ c^2	3.67 MeV/ c^2	14.4%
π detection	7.56 MeV/ c^2	7.08 MeV/ c^2	6.80 MeV/ c^2	18.2%
πp detection	7.35 MeV/ c^2	7.05 MeV/ c^2	6.93 MeV/ c^2	32.3%
$\pi\pi$ detection	5.40 MeV/ c^2	4.75 MeV/ c^2	4.39 MeV/ c^2	35.3%
$\pi\pi p$ detection	4.86 MeV/ c^2	4.12 MeV/ c^2	3.67 MeV/ c^2	14.4%

表 6.11: パッド数を制限して、TPC の半径を変えたときの $\Lambda(1405)$ の質量分解能: 前方の運動量分解能は上段が 1% で、下段が 2%

radius (# of pads)	500 mm (10,218)	600 mm (9,930)	700 mm (10,218)	acceptance
1π detection	10.8 MeV/ c^2	10.0 MeV/ c^2	9.50 MeV/ c^2	39.0%
2π detection	11.4 MeV/ c^2	9.62 MeV/ c^2	8.56 MeV/ c^2	45.4%
3π detection	11.1 MeV/ c^2	8.62 MeV/ c^2	7.28 MeV/ c^2	12.7%
1π detection	15.9 MeV/ c^2	15.1 MeV/ c^2	14.6 MeV/ c^2	39.0%
2π detection	13.9 MeV/ c^2	12.2 MeV/ c^2	11.1 MeV/ c^2	45.4%
3π detection	11.1 MeV/ c^2	8.62 MeV/ c^2	7.28 MeV/ c^2	12.7%

表 6.12: パッド数を制限して TPC の半径を変えたときの Θ^+ の質量分解能: 前方の運動量分解能は上段が 1% で、下段が 2%

radius (# of pads)	500 mm (10,218)	600 mm (9,930)	700 mm (10,218)	acceptance
π detection	6.35 MeV/ c^2	5.82 MeV/ c^2	5.50 MeV/ c^2	18.2%
πp detection	5.59 MeV/ c^2	5.27 MeV/ c^2	5.13 MeV/ c^2	32.3%
$\pi\pi$ detection	4.97 MeV/ c^2	4.27 MeV/ c^2	3.88 MeV/ c^2	35.3%
$\pi\pi p$ detection	4.86 MeV/ c^2	4.12 MeV/ c^2	3.67 MeV/ c^2	14.4%
π detection	7.56 MeV/ c^2	7.08 MeV/ c^2	6.80 MeV/ c^2	18.2%
πp detection	7.35 MeV/ c^2	7.05 MeV/ c^2	6.93 MeV/ c^2	32.3%
$\pi\pi$ detection	5.40 MeV/ c^2	4.75 MeV/ c^2	4.39 MeV/ c^2	35.3%
$\pi\pi p$ detection	4.86 MeV/ c^2	4.12 MeV/ c^2	3.67 MeV/ c^2	14.4%

第7章 結論

我々は LEPS2 で $\gamma p \rightarrow K^{*+}\Lambda(1405)$ 反応および、 $\gamma n \rightarrow K^{-}\Theta^{+}$ 反応などのハドロン光生成実験を行う。これらの実験を行うにあたって、大散乱角に放出された荷電粒子の測定が必要となるため、我々は大散乱角側での飛跡検出器である TPC の開発を行った。TPC の実機を設計するにあたり、詳細な運動量分解能および質量分解能のシミュレーションを行うためには、位置分解能に影響する様々な効果を調べる必要がある。そこで、2つの試作機を用いてこれらの効果を測定した。

試作機1では、位置分解能の track wire angle、track pad angle、およびガスによる依存性を調べた。この実験の結果、track wire angle が 0° のとき、最適印加電圧において、P10 ガスで $108 \mu\text{m}$ 、Ne-CH₄ ガスで $125 \mu\text{m}$ のパッド平面内の位置分解能を得た。この印加電圧において track wire angle が 20° での P10 ガスでの位置分解能は $520 \mu\text{m}$ であったが、より高い印加電圧で動作させることで、 $418 \mu\text{m}$ と、より小さい位置分解能を得られることがわかった。これは Ne-CH₄ ガスでも同様の傾向が見られた。さらに、センスワイヤーを用いた2次元読み出しをすることにより、 20° における位置分解能は、 $293 \mu\text{m}$ まで小さくすることができた。

また、長いドリフト筐体を持った試作機2を製作することで、P10 ガスにおけるドリフト方向の位置分解能と、パッド平面内の拡散の効果を測定した。その結果、 300 mm のドリフト距離において、 $525 \mu\text{m}$ のドリフト方向の位置分解能が得られた。LEPS2 の本実験では磁場 1 T 中で動作させるので、拡散の効果は本研究での測定値よりも小さくなるため、本研究での結果からこの効果を見積もった。本研究では、Ne-CH₄ ガスについては試作機2を用いて測定することができなかったため、Ne-CH₄ ガスにおける dip angle 依存性は P10 ガスでの依存性から見積もった。したがって、今後試作機2でも Ne-CH₄ ガスを用いてこれらの依存性を測定する必要がある。以上により、シミュレーションに必要な位置分解能の効果を詳細に得ることができた。この結果位置分解能については、P10 ガスの方が良い値が得るという結果になった。

試作機での実験より得られた位置分解能を用いて、LEPS2 の TPC の設計を行った。この TPC に要求される性能は、以下の3点である。

- $30^{\circ} < \theta < 120^{\circ}$ の散乱角を覆うこと
- パッドの総数がおおよそ 10,000 チャンネル以下
- 主要なモードである $\gamma p \rightarrow K^{*+}\Lambda(1405)$ 、および $\gamma n \rightarrow K^{-}\Theta^{+}$ 反応における $\Lambda(1405)$ 、 Θ^{+} の質量を、それぞれ $12 \text{ MeV}/c^2$ 、 $5 \text{ MeV}/c^2$ の質量分解能で測定すること

このためには、平均運動量が $300 \text{ MeV}/c$ の π 中間子に対して、おおよそ 1.1% 以下の運動量分解能を達成する必要がある。これらを考慮したシミュレーションを行うことで、 $\Lambda(1405)$ 生成、および Θ^{+} 生成反応により生成される遅い π 中間子の運動量分解能を最も向上させるパッド面の構造、ガス、印加電圧を決定した。この結果、パッド列を TPC の両端に 5 列ずつ、中央に 10 列配置し、外側の 5 列に関してはアノードワイヤーを用いた2次元読み出しを行うことにした。シミュレーションの結果、位置分解能に起因する運動量分解能は P10 ガスの方が良かったが、遅い π 中間子に対

しては多重散乱が大きく影響するため、全体として Ne-CH₄ ガスの方が運動量分解能を向上でき、1.1% 以下の運動量分解能を達成できることがわかった。

よって、LEPS2 の本実験では Ne-CH₄ ガスを用いることを想定して、シミュレーションにより $\Lambda(1405)$ 生成反応や、 Θ^+ 生成反応実験における質量分解能を求めた。前方のドリフトチェンバーの運動量分解能を 1% とすると、こ $\Lambda(1405)$ を $12 \text{ MeV}/c^2$ 以下の質量分解能で測定できることがわかった。これは我々の設定する目標質量分解能を達成できている。また、 Θ^+ についても、 $\Theta^+ \rightarrow K_S^0 p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$ の崩壊により生成される、2つの荷電粒子 π 中間子と p のうち $\pi p, \pi\pi, \pi\pi p$ を TPC で検出するイベントについては、およそ $6 \text{ MeV}/c^2$ 以下の質量分解能で測定できることがわかった。これはほぼ目標質量分解能を達成していると言える。また、LEPS における Θ^+ の質量分解能 $11 \text{ MeV}/c^2$ と比較すると、十分に向上しているといえる。よって、本研究により、要求性能を満たす TPC が製作できることを示せた。

謝辞

本研究を行うにあたり、様々な方に助けていただきました。特に同研究室の新山雅之助教には、本研究を行う上での直接的な指導をいただきました。また本論文の添削もしていただき、本論文を完成するにあたって忙しい中多大な時間を割いていただきました。本論文が完成したのも新山雅之助教のサポートがあったおかげです。また、同研究室の永江知文教授には、本論文の指針を与えていただきました。また、本研究に対してもアドバイスも多々いただきました。大阪大学の與曾井優准教授には、本研究を進めていく上での的確なアドバイスを数多くいただきました。大阪大学の笠松勇斗さんには、本研究を進めていく上でともに議論をしていただきました。同研究室の橋本敏和さん、水谷圭吾さん、大阪大学の濱野博友さんには、本研究における実験のサポートをしていただきました。また同研究室の同期である石黒洋輔さん、冨田夏希さん、横田直樹さんには疲れたときなどに雑談につき合っていただきました。上記の方々、またここには書ききれなかった、同研究室の方や、LEPS2の共同研究者のみなさまに感謝いたします。

付録 A 位置分解能評価方法の正当性

ここでは、シミュレーションにより、式 4.5 が適切であることを述べる。

5 layer のパッド列に対して、各パッド列ごとの位置分解能は共通だと思えるとする ($\sigma_i = \sigma$, $i = 1-5$)。各パッド列における位置分解能はそれぞれ σ であるから、飛跡と測定点の差の分布は、 σ を幅とする正規分布に従う。そこで荷電粒子の飛跡を直線で生成し、それをもとに測定点を与える。各パッド列の中心 y 座標における測定点は、共通の固有位置分解能 σ を幅とする正規分布にしたがう乱数により、飛跡からずらす。

これにより設置した測定点について 4.4.2 節で述べた方法でもとの飛跡を求め、解析により得られる位置分解能を求める。

ここで、固有の位置分解能を $\sigma = 100 \mu\text{m}$ とし、10,000 回飛跡を生成し、それらの残差分布を Gaussian でフィットすると、自分自身を含んで直線フィットを行ったときの残差分布の幅 σ_1 と、自分自身を除いてフィットを行ったときの残差分布の幅 σ_2 はそれぞれ、

$$\sigma_1 = 76.9 \pm 0.3 \mu\text{m} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = 133.5 \pm 0.5 \mu\text{m} \quad (2)$$

となった。これより $\sigma_{\text{intrinsic}}$ は、

$$\sigma_{\text{intrinsic}} = \sqrt{\sigma_1 \sigma_2} = 101.3 \pm 0.3 \mu\text{m} \quad (3)$$

となり、共通の固有位置分解能とほぼ等しい値が得られていることがわかる。

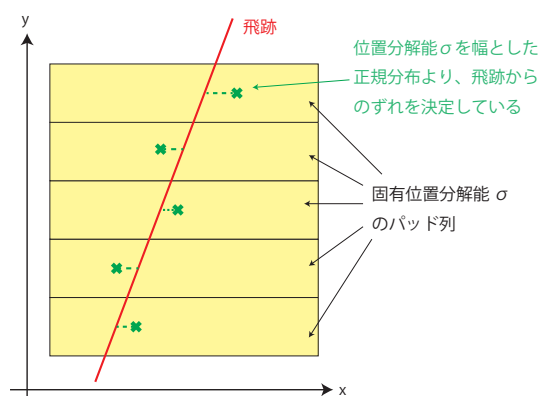


図 1: シミュレーション方法

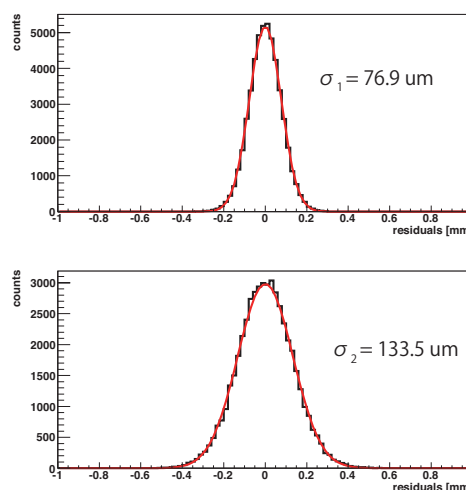


図 2: シミュレーション結果

付録B ノイズレベルの改善

4.5節でみたように最良の位置分解能は電子回路のノイズによって決まってしまっており、さらにノイズレベルを低くすることができれば、位置分解能はさらに良くなると考えられる。

そこでノイズレベルを小さくして再度実験を行った。これまではカソードパッドからの信号をおよそ2 mの同軸ケーブルを用いてプリアンプまで伸ばしていた(図3(a))が、ノイズレベルを低くするために、プリアンプを試作機1に直づけにすることにした(図3(b))。後ろの2 layerはプリアンプが干渉してしまい、直にさすことができなかつたため、およそ5 cmのフラットケーブルで延長することにした。その結果、ノイズレベルを3.7 channelから0.7 channelに低下させることができた。

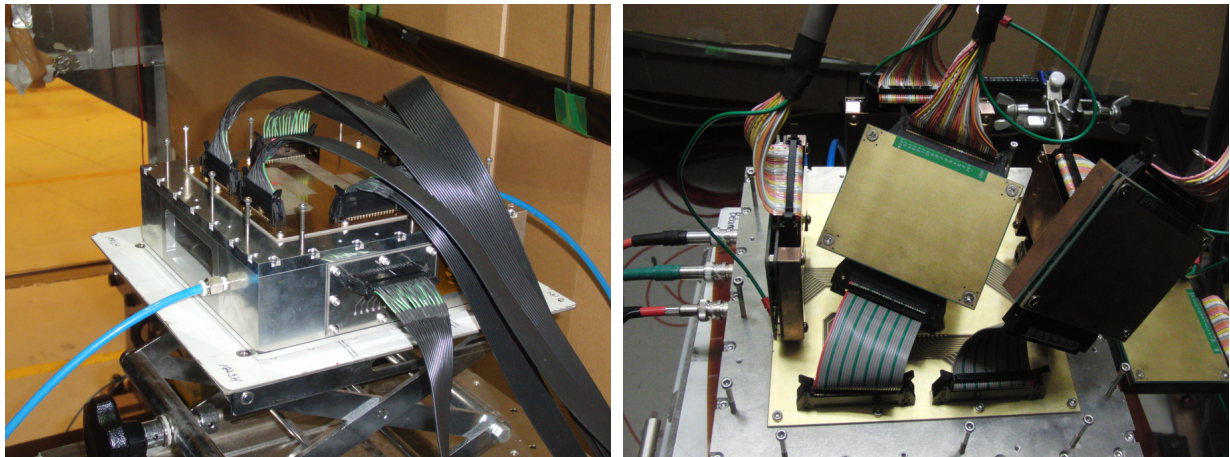


図 3: 実験セットアップの比較 : (a) 左図はカソードパッドからの信号を同軸ケーブルを用いてプリアンプまで延長している。(b) 右図はプリアンプを読み出し基盤に直にさした。後ろの2 layerはフラットケーブルで延長している。

このセットアップで4.5節や4.5節と同じように、両ガスについて位置分解能の印加電圧依存性を調べた。その結果を図4に載せる。プリアンプを直づけしたときの方が、やはり位置分解能は良くなっている。そのときにsense wireにかけるべき電圧も低くなっている。これは、ノイズレベルが下がったため、誘起電荷量が小さくてもS/Nを保てるためである。

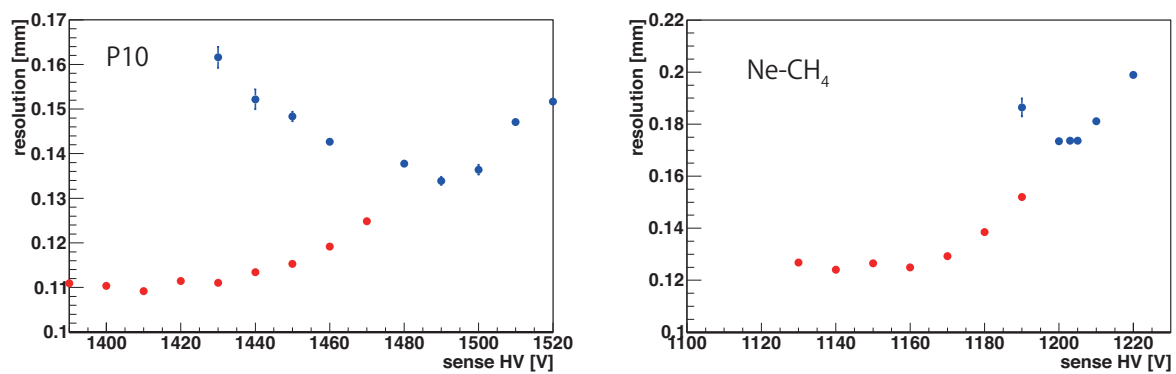


図 4: プリアンプの接続方法の違いによる位置分解能の変化:赤点がプリアンプを直づけしたときで、青点がプリアンプまでをケーブルでのばしたときである

付録C dE/dx の分解能

TPC では荷電粒子の dE/dx の情報から、粒子識別を行うことが可能である。よって、この節では dE/dx の分解能について調べる。

荷電粒子の dE/dx は Landau 分布に従うが、TPC 自体の dE/dx の影響により、各パッド列のシグナル和 S は Landau 分布と Gaussian の畳み込み積分の形に書ける。

$$S = \int dy A \cdot \text{Landau} \left(\frac{y - \text{MPV}}{\sigma_L} \right) \exp \left(-\frac{(x - y)^2}{2\sigma_G^2} \right) \quad (4)$$

ここで、 σ_L および σ_G は Landau 分布と Gaussian の幅であり、MPV は、Landau 分布の最頻値である。

したがって、実験により得られたパッド列のシグナルの和をこの関数を用いてフィットすれば、 dE/dx の分解能は求められるが、ここでは実際の解析で良く用いられる truncated mean という方法を使用する。

まず、各パッド列のシグナル和をもとめる。この全パッド列のうち、最大のシグナル和 S_{\max} の一定割合 (truncation level) 以下のパッド列のみを選び出し、足し合わせる。この和を選び出したパッド列の個数 N で割った値

$$M = \frac{\sum_i S_i \text{ (if } S_i < S_{\max} \cdot \text{(truncation level))}}{N} \quad (5)$$

をヒストグラムにつめる。これを各イベントごとに行う。

この作業を行うことで、Landau 分布の影響による高エネルギー側のテールを除去することができるため、シグナル和の分布は Gaussian の形に近くなる (図 5)。これにより、エネルギー分解能を求めることができる。

試作機 1 における実験では、パッド列が 5 layer しかないため、この方法を行うには、パッド列が少なすぎる。しかし、MIP の場合各パッド列における dE/dx は独立だと思えることができるため、複数個のイベントをまとめて、パッド列を増やして測定した 1 イベントと見なすことが可能である。第 6 章での都合上、ここではパッド列の数が 20 layer 分で 1 イベントとみなして、truncated mean の方法を用いる。また、このときの truncation level を 80% とした。

P10 ガスおよび Ne-CH₄ における dE/dx の分解能の印加電圧依存性を図 6 に示す。

印加電圧が高い方が dE/dx の分解能は向上していることがわかる。

P10 ガスにおける 1500 V、および Ne-CH₄ ガスにおける 1205 V の印加電圧ではおよそ 10% の dE/dx 分解能を有していることがわかる。この分解能では、運動量 0.6 GeV/c 以下の π/K 、および 1.0 GeV/c 以下の K/p を 3σ で分離することが可能である [19]。

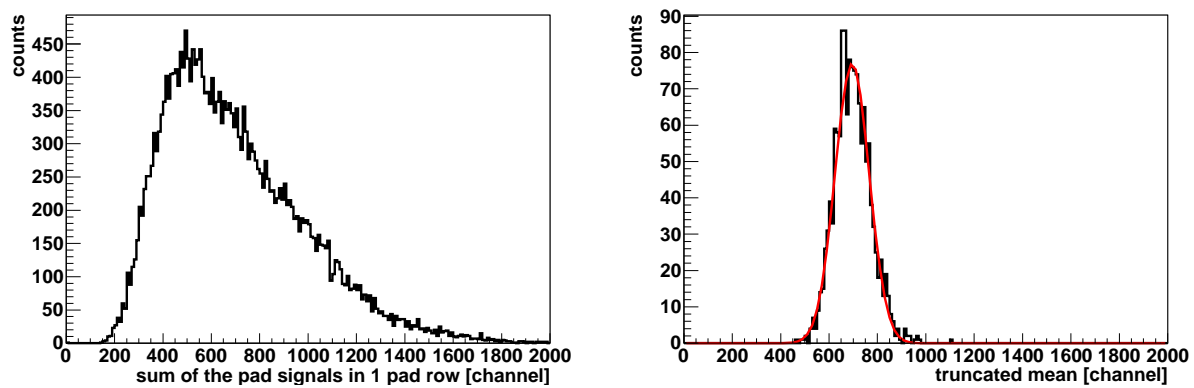


図 5: P10 ガスで印加電圧が 1500 V の時の truncated mean の分布: 左図が各パッド列のシグナル和の分布で、右図が truncated mean の分布。

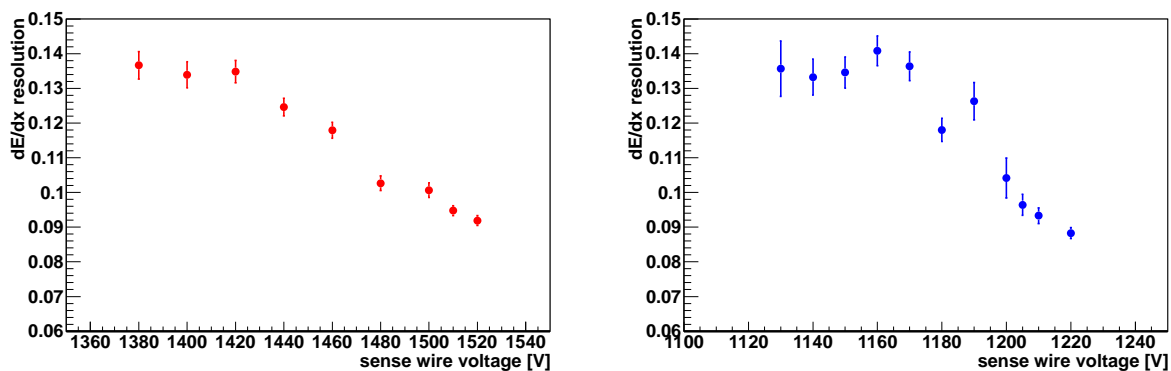


図 6: dE/dx の分解能の印加電圧依存性: 左図が P10 ガスで、右図が Ne-CH₄ ガス

付録D 試作機2のパッドサイズの最適化

前節で述べたように、角度依存性を小さくできるようなパッド配置を設計するためにいくつかのパッド配置に対し、位置分解能のシミュレーションを行った。式 3.6 によると、位置分解能を悪化させる要因には、パッドの長さが関係していることがわかる。そこで、パッドの長さを短くすることで、位置分解能の track wire angle 依存性が向上することが期待される。そのため、試作機2では長さを短くしたパッドを用いることを考える。シミュレーションを行ったパッド配置を図7に示す。PATTERN 1はパッドの長さが5 mm、PATTERN 2,3は6 mmである。また、PATTERN 1,2はパッド列の中心にセンスワイヤーが通っているが、PATTERN 3に関しては、1つのパッド列に2本のセンスワイヤーが乗るようにしてある。

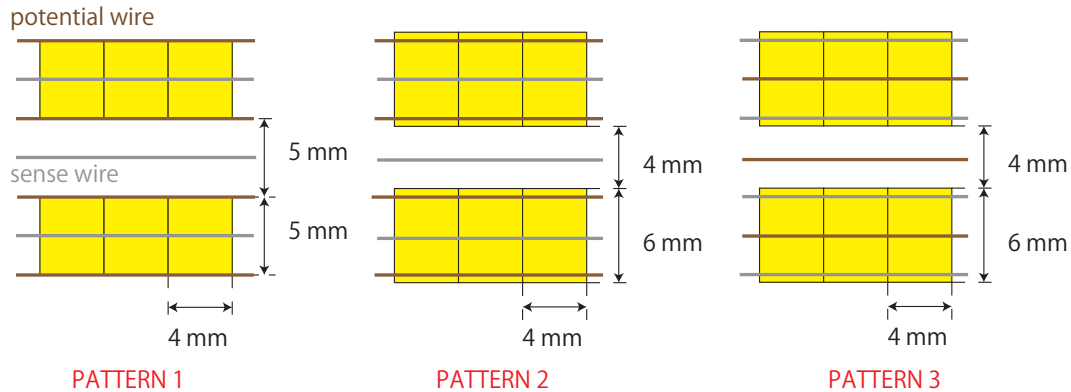


図 7: シミュレーションしたパッドサイズ

上の3つのパターンにおいておこなった位置分解能シミュレーションの方法について述べる (図 8)。

まず、track wire angle の中心値を設定し、試作機1の実験により得られた、 0.8° の幅を持った分布の飛跡を生成させる。また、一様に乱数をふって、飛跡の始点を任意の x 座標に設定し、飛跡を生成する。このときの角度の幅は、試作機1の実験より 0.7° とした。次に、各センスワイヤーにアバランシェを生成する。各センスワイヤーで発生するアバランシェの領域は、両隣りのポテンシャルワイヤーと飛跡の交点の間で起こるはずである。そのため、この各領域を25等分し、それぞれの x 座標でアバランシェを発生させた。このときの電荷は Landau 分布に従うようにしてある。

各センスワイヤーで発生させたアバランシェによる誘起電荷分布を、式 4.2 をもとに計算し、各パッドごとに積分することで、各パッドの信号としている。このときの pulse height が試作機1での実験と同程度の値になるように、定数をかけている。

これをパッドの信号と見なし、4.4.2 と同様の方法で、電荷重心および飛跡を決定し、tracking residual の分布から位置分解能を求める。

まず、実験に使用した試作機1のパッド配置において、シミュレーションを行った。その結果、

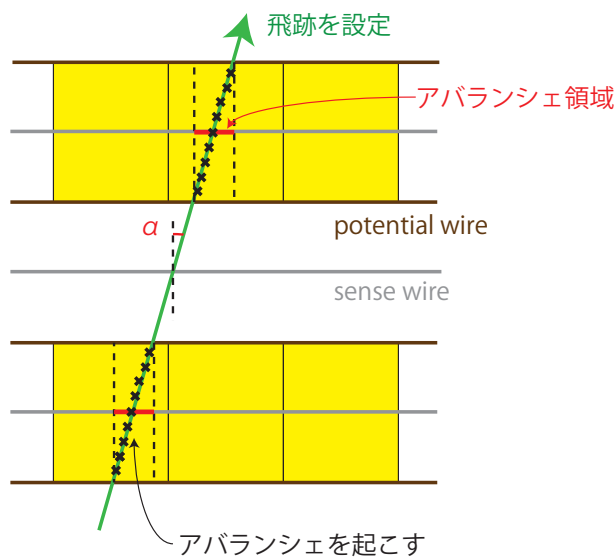


図 8: シミュレーションの方法

実験結果よりもシミュレーションの方が、位置分解能が小さくなりすぎてしまった。今回のシミュレーションでは、拡散による効果や、隣のセンスワイヤーの影響などは考慮したが、各センスワイヤーでのアバランシェのサイズについては点と見なして、考慮していなかった。そのため、 0° における位置分解能のずれをアバランシェサイズによるものと思い、 $62\ \mu\text{m}$ を足すことにする。track wire angle が 0° , 10° , 20° のときの、アバランシェサイズを考慮したシミュレーションの値と、実験値を表 1 に示す。これによって、試作機 1 の角度依存性はほぼ再現できていることがわかる。実験値とシミュレーション値の差をアバランシェのサイズによるものとして、試作機 2 のシミュレーション結果にも加えることにした。

表 1: 試作機 1 のパッド配置での位置分解能のシミュレーション結果

	0°	10°	20°
実験値	$136 \pm 1\ \mu\text{m}$	$246 \pm 1\ \mu\text{m}$	$428 \pm 2\ \mu\text{m}$
シミュレーション値	$136 \pm 1\ \mu\text{m}$	$261 \pm 3\ \mu\text{m}$	$427 \pm 7\ \mu\text{m}$

試作機 2 のパッドサイズのシミュレーション結果を表 2 に載せる。これより、PATTERN 3 は PATTERN 1,2 に比べて、大角度において位置分解能が悪化していることがわかる。したがって、パッドにセンスワイヤーを 2 本のせるよりも、パッド列の中心をワイヤーが通るようにした方が位置分解能は向上できることが予想される。また、PATTERN 1,2 についてはほとんど位置分解能が変化していないことがわかる。しかし、S/N を考えるとパッドサイズを大きくした方が得であるため、試作機 2 では、PATTERN 2 のようなパッド配置をとることにした。

表 2: 試作機 2 のパッド配置での位置分解能のシミュレーション結果

	0°	10°	20°
PATTERN 1	128 ± 1 μm	187 ± 1 μm	264 ± 2 μm
PATTERN 2	127 ± 1 μm	189 ± 1 μm	260 ± 2 μm
PATTERN 3	127 ± 1 μm	197 ± 1 μm	282 ± 2 μm

付録E 試作機2における track wire angle 依存性の測定

まず、パッド平面内の位置分解能の track wire angle 依存性の結果を図9に載せる。全体的に得られたイベント数が少なかったため、角度が大きくなるに従って、大きな誤差がでてしまっている。位置分解能については試作機1と比べて、角度依存性は多少良くなっているように見えるものの、大幅な位置分解能の向上は見られなかった。また大きな誤差により、厳密な議論はできない。そのため、第6章においてのパッド面の設計にはこのパッドは用いないとした。このときの track wire angle 依存性は

$$\sigma_{2,xy,1420V,P10}^2 = (0.037 \pm 0.001) + (1.47 \pm 0.03) \tan^2 \alpha \quad (6)$$

$$\sigma_{2,xy,1500V,P10}^2 = (0.052 \pm 0.002) + (0.99 \pm 0.03) \tan^2 \alpha \quad (7)$$

であった。

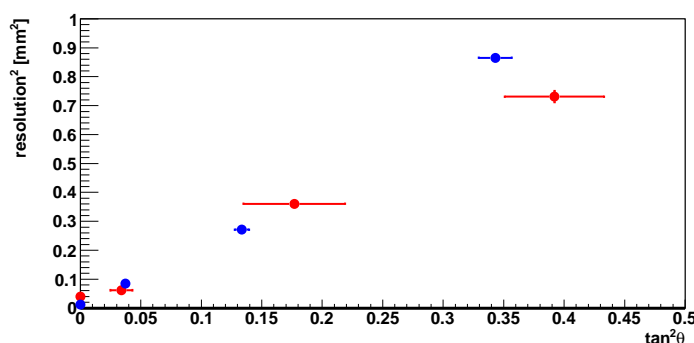


図9: 位置分解能の track wire angle 依存性：青点が試作機1におけるデータ点、赤点が試作機2におけるデータ点である。試作機2については統計が少ないため角度の誤差が大きくなっている。

特に0°度では位置分解能がおよそ60 μmも悪化してしまっている。また角度依存性についてもシミュレーションで得られた結果とは大きく異なっている。これは試作機1に比べて、試作機2の方がS/N比がおよそ60%になってしまっていたことが原因と考えられる。これは、パッドサイズが小さくなっただけではなく、読み出すパッドの数が多くなったため、プリアンプを直接つけることができず、ケーブルで読み出さなくてはならなくなったことも影響している。試作機1に比べて、S/Nは約2倍悪くなっていた。

参考文献

- [1] R.H.Dalitz, *et al.*, Phys.Rev. **153** (1967) 1617
- [2] D.Jido, *et al.*, Nucl.Phys. A **725** (2003) 181
- [3] R.J.Hemingway, Nucl.Phys. B **253** (1985) 742
- [4] J.K.Ahn *et al.*, Nucl.Phys. A **721** (2003) 715c
- [5] T.Hyodo, A.Hosaka, M.J.Vicente, E.Oset, Phys.Lett. B **593** (2004) 75
- [6] D.Diakonov, V.Petrov, M.Polyakov, Z.Phys. A **359** (1997) 305
- [7] T.Nakano, *et al.*, Phys.Rev.Lett, **91** (2003) 1
- [8] T.Nakano, *et al.* Phys.Rev. C **79** (2009) 025210
- [9] B.McKinnon, *et. al.*, Phys.Rev.Lett, **96** (2006) 212001
- [10] Journal of Physics G, *Nuclear and Particle Physics*, **37** (2010) No.7A
- [11] T.Lohse and W.Witzeling, *The Time Projection Chamber*, Instrumentation in High Energy Physics (1993)
- [12] H.J.Hilke, Rep.Prog.Phys. **73** (2010) 116201
- [13] D.Decamp, *et al.*, Nucl.Instrum.Methods A **294** (1990) 121
- [14] The BRAHMS collaboration, *Forward Angle and Midrapidity Hadron Spectrometers at RHIC*, Conceptual Design Report (1994)
- [15] A.Peisert and F.Sauli, *DRIFT AND DIFFUSION OF ELECTRONS IN GASES: A COMPILATION*, CERN 84-08 (1984)
- [16] 久保 龍二, ガス計数管動作ガスとしてのネオンベースガスの特性, 九州大学総合理工学研究科報告 第11巻 (1989)
- [17] http://www.star.bnl.gov/public/tpc/hard/tpcrings/p10_magboltz2.html
- [18] Y.Assran and A.Sharma, *Transport Properties of operational gas mixtures used at LHC*
- [19] M.Kowalski, ALICE/96-37 Internal Note/TPC/sim (1996)
- [20] N.I.Chernov, G.A.Ososkov, Comput.Phys.Comm **33** (1984) 329
- [21] V.Karimäki, Nucl.Instrum.Meth.A **410** (1998) 284