

修士論文
J-PARC における
ダブルハイパー核探索実験のための
位置較正手法の検証



京都大学大学院理学研究科
原子核ハドロン物理学研究室
岡村敦史

平成 20 年 2 月 12 日

概要

2個の粒子を構成要素に持つダブルハイパー核はハイペロン-ハイペロン間の相互作用を決定し、未だ謎の多い核力を理解するために重要な実験情報を提供する。また未だ発見されていないHダイバリオンの存在領域を決定する上でも重要な役割をはたす。

その測定手法の一つとしてエマルション(原子核乾板)中でダブルハイパー核を生成してそのトラックを顕微鏡で観察するという手法がある。しかしエマルションには全てのトラックが記録されること、また時間情報が得られないことから多くのバックグラウンドの中から興味あるイベントを探し出すには多大な労力が必要とされてきた。そこで外部の飛跡カウンターと組み合わせてエマルション中での興味あるトラックの位置を効率よく予測する混合システムが考案された。

約10年前にKEKで行われたE373実験では外部カウンターとしてシンチレーションファイバーバンドルが用いられ、 ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ であるNAGARAイベントを発見し一息に間の相互作用を決定する等大きな成果を上げた。しかしまだまだ統計が少なく系統的な理解は得られていない。そこで我々はJ-PARCにおいてE373の10倍の統計である100例のダブルハイパー核発見を目指す実験を計画している。実験は K^- ビームをダイヤモンド標的に入射し、生成した Ξ^- 粒子をエマルション中で止めることで行う。原子核に吸収された Ξ^- 粒子は、ある割合でダブルハイパー核を生成する。

ここでダイヤモンド標的、エマルション間に両面読み出しシリコンストリップ検出器DSSD2枚を配置することによりエマルション中に止まる Ξ^- 粒子を dE/dx により選別し、その位置・角度を予測する。この予測精度が高いほど顕微鏡によって探すべき領域を制限することが可能となる。 Ξ^- 粒子の崩壊を避けるため、標的-エマルション間の距離を短くする必要があるが、我々は実装面を片面にまとめる等の工夫を凝らしたDSSDを開発した。

我々はRCNPの140MeV陽子ビームを用いて、DSSD-エマルション混合システムの性能評価実験を行った。DSSD2枚による予測座標をもとにエマルション中の陽子トラックを探索して予測座標とエマルション座標の残差をとった。その結果あらゆる角度で入射した陽子に対して $50\ \mu\text{m}$ 以内の位置予測精度、 20mrad 以内の角度予測精度が得られた。これはE373のシンチレーションファイバーバンドルの約5倍の性能向上に当たり、J-PARC実験での要求を十分満たしている。

また直進トラックを画像処理により自動認識し、DSSD、エマルションの位置較正に用いる手法を開発した。同じテスト実験において初期の位置較正を行うのに十分な認識率が得られることがわかった。

目次

第1章	序章	6
1.1	ストレンジネス物理学	6
1.2	ダブルハイパー核探索の意義及び歴史	7
1.2.1	ダブルハイパー核の物理	7
1.2.2	ダブルハイパー核の生成法	8
1.2.3	エマルション	8
1.2.4	過去の実験	10
第2章	J-PARCにおける次世代ダブルハイパー核探索実験	12
2.1	動機	12
2.2	実験手法	12
2.3	KEK-PS-E373 実験からの改良点	15
2.3.1	ビームの向上	15
2.3.2	トリガーの改善	16
2.3.3	DSSDの導入	16
第3章	RCNPにおける性能評価実験	20
3.1	実験動機	20
3.2	セットアップ	21
第4章	解析	25
4.1	解析手順	25
4.2	DSSDの解析	25
4.3	位置、角度の予測	26
4.4	位置予測精度、角度予測精度の決定	28
第5章	結果及びその考察	33
5.1	結果および考察	33
第6章	画像処理を用いた位置較正手法	43
6.1	カウンター・エマルション実験の位置較正手法	43
6.2	画像処理による0°トラック認識	43

6.3	直線認識のアルゴリズム	44
6.3.1	トラック候補の選出	44
6.3.2	直線トラックの認識	47
6.4	結果及び考察	47
6.5	E07 実験への応用	52
第7章	まとめと展望	53
	謝辞	54
付録A	ビームを用いた位置較正の新手法 (R80 実験)	57
付録B	DSSD の基本性能	59

目 次

1.1	原子核と2つの Λ のエネルギー準位	9
1.2	NAGARA イベントの顕微鏡写真	11
2.1	E07 実験の標的周辺のセットアップ	13
2.2	E07 実験の標的周辺のセットアップ	13
2.3	ダブルハイパー核その他の生成プロセス	14
2.4	ドリフト長 1.5 mm ドリフトチェンバー	16
2.5	放電対策	16
2.6	DSSD の動作原理	17
2.7	DSSD の p 側の写真	18
2.8	DSSD _n 側の写真	18
2.9	DSSD2 枚をセットアップした時の写真	18
3.1	T594 実験のセットアップ	21
3.2	R78 実験のセットアップ	22
3.3	GRAND RAIDEN 後方の実験セットアップの配置図	22
3.4	セットアップの写真	22
3.5	R78 実験の回路図	23
4.1	(左) 1 イベントの DSSD#1 の ADC 分布 (赤丸は信号) (右) 全イベントの DSSD#1 の ADC 分布	25
4.2	DSSD# 1 の χ^2 分布	26
4.3	DSSD# 12 の χ^2 分布	26
4.4	補正後の DSSD の ADC 分布	27
4.5	平均クラスターサイズの角度依存性	27
4.6	コリメータ写真	28
4.7	(左)DSSD#1 (右)DSSD#12	28
4.8	顕微鏡セットアップの写真	29
4.9	15 °陽子トラックの顕微鏡写真	29
4.10	位置残差、角度残差	29

4.11	位置合わせ前後の (a)x 方向位置分解能 (b)y 方向位置分解能 (c)x 方向位置分解能 (d)y 方向位置分解能	32
5.1	0 °入射トラックの (a) 位置予測精度 (x 方向) (b) 位置予測精度 (x 方向) (c) 角度予測精度 (x 方向) (d) 角度予測精度 (y 方向) (横軸単位は mm) .	33
5.2	15 °入射トラックの (a) 位置予測精度 (x 方向) (b) 位置予測精度 (x 方向) (c) 角度予測精度 (x 方向) (d) 角度予測精度 (y 方向) (横軸単位は mm) .	34
5.3	25 °入射トラックの (a) 位置予測精度 (x 方向) (b) 位置予測精度 (x 方向) (c) 角度予測精度 (x 方向) (d) 角度予測精度 (y 方向) (横軸単位は mm) .	34
5.4	30 °入射トラックの (a) 位置予測精度 (x 方向) (b) 位置予測精度 (x 方向) (c) 角度予測精度 (x 方向) (d) 角度予測精度 (y 方向) (横軸単位は mm) .	35
5.5	45 °入射トラックの (a) 位置予測精度 (x 方向) (b) 位置予測精度 (x 方向) (c) 角度予測精度 (x 方向) (d) 角度予測精度 (y 方向) (横軸単位は mm) .	35
5.6	E176 より予測される $\delta\theta$ 内に存在するバックグラウンドトラックの数 . . .	38
5.7	シミュレーションのセットアップ	39
5.8	測定値、シミュレーションの角度依存 (青は測定値、赤はシミュレーション値)	40
6.1	明度不均一性を除くための処理	46
6.2	Fog 除去のための処理	46
6.3	認識アルゴリズム (赤丸が 0 °トラック)	48
6.4	R_t 、 R_f 、 $R_{accidental}$	49
6.5	上段から (1) 肉眼で確認されたトラック (2) 閾値 38 で画像処理で認識されたトラック (3)DSSD による予測トラックのヒットポジション。黄色部分は特徴的なビームパターン。	50
A.1	r80 実験のセットアップ	57
A.2	r80 実験で照射されたエマルジョン写真	58

表 目 次

1.1	ハイペロン一覧表	6
3.1	T594 で得られた位置予測精度、角度予測精度	21
3.2	5 枚のエマルションに対するトリガー数	24
4.1	調整前後の予測精度の変化	31
5.1	R78 実験で得られた位置予測精度、角度予測精度	36
5.2	シンチレーションファイバーの予測精度	36
5.3	得られた位置予測精度、角度予測精度	39
5.4	多重散乱の角度依存性 (μm)	40
5.5	得られた位置予測精度、角度予測精度	41
5.6	系統誤差のシミュレーション ((4) の角度予測精度は χ^2 の値が大きいため除いている。)	41
6.1	記号の定義	45
6.2	予測値の N_t 、 N_f 、 R_t 、 R_f 、画像処理の N_t 、 N_f 、 R_t 、 R_f の値 (N_{all} は 27)	51
B.1	DSSD の基本性能	59

第1章 序章

1.1 ストレンジネス物理学

陽子、中性子を構成する u クォーク、d クォークに加え、s クォークを含むバリオンをハイペロンと呼ぶ(表 1.1)。またハイペロンを構成要素に持つ原子核をハイパー核と呼び、ハイパー核をはじめストレンジネスを持つハドロンを研究対象とする分野をストレンジネス物理学と呼ぶ。

ハイパー核は 1952 年、宇宙線を照射したエマルション(原子核乾板)中に発見されて以来、u、d、s を含む一般的なバリオン間の相互作用の理解に大きな貢献をしてきた[1, 2]。さらに 1974 年に CERN の加速器を用いて 2 次粒子の K^- 中間子を利用して人工的にハイパー核を生成することが可能となり、またカウンターを用いた研究手法が利用できるようになってからストレンジネス物理学は飛躍的に発展した。 K^- ビームを用いた手法は BNL-AGS、KEK-PS 等の加速器に引き継がれ、現在までに多くのハイパー核が発見されてきた。中でも Λ 粒子を一つ含むシングルハイパー核は 30 例以上発見され、また Ge 検出器を用いたガンマ線検出の方法も確立されたことにより、核力のスピン依存項のような微細な構造を知ることも可能となった[3]。

しかし Λ 粒子を二つ含むダブルハイパー核の発見例はまだ数例のみであり、核種を一意に同定できたのは後述する NAGARA イベントのみである。そこで我々のグループではできるだけ多くのダブルハイパー核を発見し、最終的には $S=-2$ を持つ核図表を作成することを目指している。

表 1.1: ハイペロン一覧表

	質量 [MeV]	寿命 [s]	isospin	spin	strangeness	構成クォーク
ラムダ (Λ^0)	1115.6	2.6×10^{-10}	0	$\frac{1}{2}$	-1	uds
シグマ ⁺ (Σ^+)	1189.4	0.8×10^{-10}	1	$\frac{1}{2}$	-1	uus
シグマ ⁰ (Σ^0)	1192.5	5.8×10^{-20}	1	$\frac{1}{2}$	-1	uds
シグマ ⁻ (Σ^-)	1197.3	1.5×10^{-10}	1	$\frac{1}{2}$	-1	dds
グザイ ⁰ (Ξ^0)	1314.9	2.9×10^{-10}	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-2	uss
グザイ ⁻ (Ξ^-)	1321.3	1.6×10^{-10}	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-2	dss
オメガ (Ω^-)	1672.5	0.8×10^{-10}	0	$\frac{3}{2}$	-3	sss

1.2 ダブルハイパー核探索の意義及び歴史

1.2.1 ダブルハイパー核の物理

ダブルハイパー核内の二つの Λ の系は ΞN 、 $\Sigma\Sigma$ と共に、クォークのフレーバー SU(3) のもとで二つのバリオンの系を組んだ時の一重項を形成する。言い換えれば、二つのバリオンからなる系を考えた時に一重項は $S = -2$ の原子核内でしか存在しないということであり、その意味でダブルハイパー核はバリオン-バリオン間相互作用の貴重な実験的データを提供する。

またそれだけでなくダブルハイパー核の基底状態には H ダイバリオンが存在するという興味深い理論的予測がある [4]。H ダイバリオンは 1977 年 R. Jaffe によって理論的に予想された [uuddss] 状態から成るエキゾチック粒子の一種である。H ダイバリオンが存在が予言されたのはクォーク間のスピン-スピン相互作用を記述する色磁気相互作用

$$V = -\alpha \sum_{i < j} \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j \vec{\lambda}_i \cdot \vec{\lambda}_j \quad (1.1)$$

からの帰結である。ここで $\vec{\sigma}$ はパウリ行列、 $\vec{\lambda}$ はゲルマン行列、 α は 18MeV 程度の正の定数である。通常の 3 クォークから成る核子を考えた場合、式 (1.1) の期待値は -8α となり、二つの核子が重なり 6 クォーク状態にあるとすると 8α となる。3 クォーク状態の核子 2 つと 6 クォーク状態の粒子の差は $8\alpha - (-8\alpha) \times 2 = 24\alpha$ となり、核子間に強い斥力が働くことがわかる。従って通常の二つの核子は 6 クォーク状態になることはできない。しかし [uuddss] からなる系を $J^P = 0^+$ となるように組むと式 (1.1) の値は -24α となる。この場合 2 個の Λ 粒子系との差は $-24\alpha - (-8\alpha) \times 2 = -8\alpha$ で強い引力になり、束縛状態が存在することが予想される。

Jaffe が MIT バッグモデルを用いて計算した H ダイバリオンの質量は 2 個の Λ 粒子系の質量 (2×1115.6 [MeV]) に比べて 81 MeV 低い 2150 MeV であった。その後も H ダイバリオンの質量は 2 陽子以下の質量を持つ束縛状態から 2Λ の質量以上の非束縛状態まで多くの理論計算がなされてきた。また H ダイバリオンを探索する多くの実験が行われてきたがまだ H ダイバリオンの確たる存在証拠は見つかっていない [6]。後述するダブルハイパー核の連続的な崩壊が発見されたことにより、現在では深く束縛した粒子的な H ダイバリオンが存在する可能性は否定されている。また NAGARA イベント (後述) により、2 個の Λ 粒子の束縛エネルギーが決定され、H ダイバリオンが存在する可能性のある質量領域は

$$2223.7\text{MeV} < M_H < 2231.4\text{MeV} \quad (1.2)$$

という非常に狭い間隔に限られている。しかし一方、 $S=-2$ 核からの Σ^-p 崩壊、 $\Lambda\Lambda$ の不変質量を組んだ時の $\Lambda\Lambda$ 閾値近傍のバンプの存在のように H ダイバリオンの存在を示唆する報告がある [7][8, 9]。H ダイバリオンの存否はまだ明確なものでなく、次世代のダブルハイパー核探索実験の課題の一つである。

このようにダブルハイパー核は大変興味深い研究対象であるが、生成断面積が非常に小さく、また弱い相互作用で連続的に崩壊するため、全ての荷電粒子を電氣的検出器を用いて検出するのはきわめて困難である。そこで検出器としてエマルションを用いる実験が過去に行われ、成功を収めてきた。以下にダブルハイパー核の生成法と、エマルションを用いる研究手法について、またそれらの手法を用いて行われた過去の代表的な実験について述べる。

1.2.2 ダブルハイパー核の生成法

ダブルハイパー核を生成する手法について述べる。まずストレンジネスを原子核に持ち込む手法には2種類ある。ひとつはストレンジネスを持たない粒子を入射し、 s, \bar{s} の対を作る方法である。例としては (π^+, K^+) 反応を用いた Λ 粒子生成がある。もうひとつはストレンジネスを持つ粒子を原子核に打ち込む方法である。例としては (K^-, π^+) 反応による Σ^- 生成がある。しかしこれらの手法では基本的に $S = -1$ の原子核しか作ることができない。したがって $S = -2$ を持つ原子核を生成するには両方を合わせた方法を用いる。検出しやすさを考えて荷電粒子の放出される (K^-, K^+) 反応を用いるのが普通である。

また (K^-, K^+) 反応を用いてダブルハイパー核を生成する方法にも2種類ある。ひとつは原子核中に K^- ビームを入射し、2つの Λ を直接生成する方法である。もうひとつは原子核中に K^- ビームを入射し、準自由反応 $p(K^-, K^+)\Xi^-$ によりまず Ξ^- 粒子を生成し、その後、静止 Ξ^- からの Ξ^- 原子を経て強い相互作用による崩壊 $\Xi^- + p \rightarrow \Lambda\Lambda$ で生成された2個の Λ 粒子を標的原子核、もしくは他の原子核に止める方法である。前者の方法は非常に断面積が少なく、また生成された Λ が原子核中にとどまりにくいという難点がある。そこでダブルハイパー核を生成するには後者の Ξ 原子核を経る手法をとることが多い。

さらに Ξ^- 原子をエマルション中で生成する方法にも2種類ある。ひとつは Ξ^- 粒子をエマルション中で生成し、エマルション中の原子核に止めてやる方法である。もうひとつはまずエマルション以外の標的内で Ξ^- を生成し、エマルション中の原子核に止めてやる方法である。前者の方法は E176 実験、後者の方法は E373 実験で用いられた手法である。

1.2.3 エマルション

エマルションは全ての荷電粒子の飛跡を記録し、また $1 \mu\text{m}$ 以下の位置分解能を誇る 4π の検出器であり、ダブルハイパー核の崩壊を精密に記録できる現在唯一の検出器である。

エマルションは写真乾板の AgBr の含有量を高くして、最小電離粒子に対しても感度を持つようにしたものである。主な構成元素は C、N、O、Ag、Br であり、典型的な密度は 3.6 g/cm^3 である。エマルション中に荷電粒子が入射すると AgBr をイオン化し、電子がトラップされた結晶に Ag イオンが引き寄せられて潜像核となる。エマルションを現像す

ると、荷電粒子のトラックが $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$ の銀粒子の列として現れる。この列を顕微鏡で 50 倍程度の倍率で観察する。

エマルジョン中に記録されたトラックの銀粒子の密度、飛程、角度によって崩壊粒子のエネルギー、角度、電荷がわかる。崩壊の可能な候補の中でハイパー核の崩壊過程の運動学を満たすものを選び出し、崩壊粒子を特定すると最終的に原子核中の二つの Λ 粒子の束縛エネルギー $B_{\Lambda\Lambda}$ と $\Lambda\Lambda$ 間の相互作用 $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ が得られる。それぞれ

$$\begin{aligned} B_{\Lambda\Lambda}(^A_{\Lambda\Lambda}Z) &= M(^{A-2}Z) + 2M(\Lambda) - M(^A_{\Lambda\Lambda}Z) \\ \Delta B_{\Lambda\Lambda}(^A_{\Lambda\Lambda}Z) &= B_{\Lambda\Lambda}(^A_{\Lambda\Lambda}Z) - 2B_{\Lambda}(^A_{\Lambda}Z) \end{aligned} \quad (1.3)$$

と定義できる (図 1.1)。ここで、 $M(^{A-2}Z)$ は通常核の質量、 M_{Λ} は Λ の質量、 $M(^A_{\Lambda\Lambda}Z)$ はダブル Λ ハイパー核の質量、 $M(^A_{\Lambda}Z)$ はシングル Λ ハイパー核の質量である。

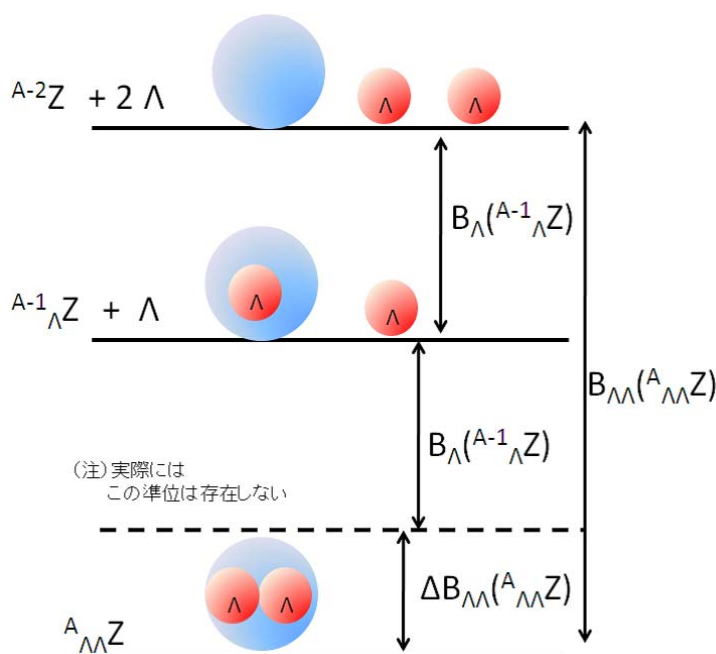


図 1.1: 原子核と 2 つの Λ のエネルギー準位

$B_{\Lambda\Lambda}$ は H ダイバリオンの質量の下限を決め、その値は

$$M_H \geq 2m_{\Lambda} - B_{\Lambda\Lambda} \quad (1.4)$$

となる。もし安定な H ダイバリオンが核内に存在し、その質量が 2 個の Λ 粒子より軽いとすると、2 個の Λ 粒子は強い相互作用によってただちに H ダイバリオンに変化し、ダブルハイパー核からの連続的な崩壊は起こり得ないからである。また $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ はバリオン-バリオン間の相互作用の理解にとって重要である。現在バリオン-バリオン相互作用を記述する理論モデルは多く存在し、それらの検証に貴重なデータを提供する [10, 11, 12]。

このようにエマルジョンはダブルハイパー核を検出するのに重要な検出器であるが、詳細な時間情報が得られず単体ではダブルハイパー核生成イベントを選出することができな

い。そのため顕微鏡を用いた解析では膨大なバックグラウンドから興味あるイベントを探し出すことに多大な時間と労力が費やされた。そこで位置測定カウンターと組み合わせる混合システムが考え出された。カウンターはエマルジョンに入射する粒子をトラッキングし、その位置を予測するために用いられる。またエマルジョン中のトラックをカウンターによる予測を元に自動的にサーチする手法も開発され、トラックを探索するのに要する労力が大幅に削減された。

1.2.4 過去の実験

過去の代表的なエマルジョンを用いたダブルハイパー核探索実験の例として E176 実験と E373 実験がある。

E176 実験は 1988 年にエマルジョン中での H ダイバリオンの発見を目指して行われた [13, 14]。エマルジョンに入射する K^- 粒子を SSD でトラッキングし、また散乱粒子である K^+ 粒子を下流のスペクトロメータで検出し、エマルジョン中での反応点を特定した。その結果、それまで不確かな実験事実しかなかったダブルハイパー核の連続崩壊をとらえることに成功した。生成されたダブルハイパー核が ${}_{\Lambda\Lambda}^{10}\text{Be}$ と ${}_{\Lambda\Lambda}^{13}\text{B}$ の 2 通りの解釈が可能で、それぞれについての $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ は -4.9MeV 、 4.9MeV となって引力斥力の不確定性を残したものの、ダブルハイパー核の連続崩壊が確認されたことにより H ダイバリオンの質量の下限が 2203.7MeV であることが示された。

E373 実験は E176 の 10 倍の統計を目指して行われた実験である [15, 16]。E176 と比べて大きく異なるのは、 Ξ^- 粒子をダイヤモンド標的内で生成し、その後エマルジョン中に静止させる方法を用いたことである。また Ξ^- 粒子のエマルジョン中への入射位置、入射角度を高精度で測定するためにシンチレーションファイバーバンドルが用いられた。

E373 実験ではシンチレーションファイバーバンドル・エマルジョン混合システムを用いて 6 例のダブルハイパー核の生成、連続崩壊を発見するに到った。そのうち NAGARA イベントと名付けられたイベントは核種が一意に同定され、初めて Λ - Λ 間の相互作用の不定性のない実験結果が得られた。

NAGARA イベントの顕微鏡写真を図 1.2 に示す。

NAGARA イベントは多くの候補の中から運動学的制限より

$$\Xi^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He} + {}^4\text{He} + t \quad (1.5)$$

$${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He} \rightarrow {}_{\Lambda}^5\text{He} + p + \pi^- \quad (1.6)$$

の崩壊であると一意的に決定でき、

$$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 1.01 \pm 0.20_{-0.11}^{+0.18}\text{MeV} \quad (1.7)$$

$$B_{\Lambda\Lambda} = 7.25 \pm 0.19_{-0.11}^{+0.18}\text{MeV} \quad (1.8)$$

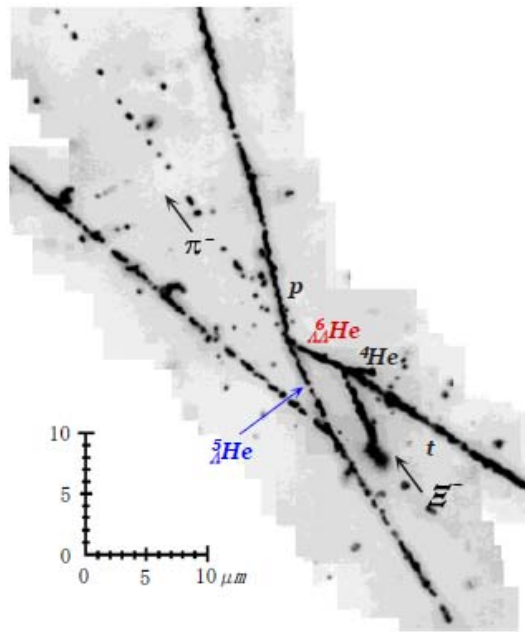


図 1.2: NAGARA イベントの顕微鏡写真

という値が得られた [16, 17]。ただしここで Ξ の原子核への吸収は 3D 軌道で起こると仮定している。 $B_{\Lambda\Lambda}$ の値より H ダイバリオンの質量の下限が 2223.7 MeV と決定され、また $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ の値より $\Lambda\Lambda$ 相互作用が多くの理論的予測に反し弱い引力であることが確かめられた。

E176 実験ではダブルハイパー核からの連続崩壊の明確な存在証拠が得られ、深く束縛する H ダイバリオンの存在が否定された。E373 実験では NAGARA イベントを発見すると共にカウンター・エマルジョン混合システムの有効性が示された。次に望まれるのは統計を上げてダブルハイパー核の系統的研究を行うことである。そこで我々のグループでは現在茨城県東海村に建設中である大強度陽子加速器 (J-PARC) にてこれまでの技術を総動員したダブルハイパー核探索実験を計画している。その概要について次章に述べる。

第2章 J-PARCにおける次世代ダブル ハイパー核探索実験

2.1 動機

E07実験の目標は、できるだけ多くのダブルハイパー核を発見し系統的な研究を行うことである [18]。統計が上がれば

1. Λ - Λ 間の相互作用 $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ の核種依存性
2. ダブルハイパー核の崩壊の分岐比

について議論することが可能となる。まず 1 についてであるが、もし H ダイバリオンが $S = -2$ の系の基底状態に存在すれば $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ は核種に依存せず一定の値となる。一方 $\Lambda\Lambda$ が基底状態として原子核中に存在するのであれば、 $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ は核種に依存することとなる。例えば ${}^{14}_{\Lambda\Lambda}\text{C}$ の $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ の値はラムファ ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{H}$ の値よりおよそ 1MeV 大きくなるとの理論計算がある [18]。またもし同じ核種で異なった値が得られれば、ダブルハイパー核の励起状態を初めて観測することにつながる [19]

次に 2 についてであるが、H ダイバリオン核からの ΣN 崩壊の分岐比は 50% 程度と予想されているが、一方 $\Lambda\Lambda$ からの ΣN 崩壊の分岐比は 0.1% と見積もられている [20]。現在、一例の Ξ^- 吸収点からの ΣN 放出が報告されているが [7]、 K^- 吸収による反応であるとの説もあり、まだ決定的な実験証拠はない。統計を上げて $S = -2$ の核からの崩壊の分岐比が求められれば、H ダイバリオンの存否について議論することができる。

2.2 実験手法

図 2.1 に実験のセットアップを、標的周辺の拡大図を 2.2 に示す。

実験の概要であるが、まず 1.7 GeV/c の K^- ビームをダイヤモンド標的に入射し準自由反応 $p(K^-, K^+)\Xi^-$ により Ξ^- を生成する。ここで入射運動量 1.7 GeV/c は、 Ξ の生成断面積とエマルジョン中に静止する確率の積が最大になる値である。生成された Ξ^- 粒子はダイヤモンドターゲット内でエネルギーを失い、DSSD2 枚を通してエマルジョン中に静止し、 Ξ 原子を形成する。エマルジョン中の原子に捕獲された Ξ^- 粒子は X 線を放出して準位を下げて、やがて原子核中に吸収される。 Ξ 粒子は、強い相互作用 $\Xi^- p \rightarrow \Lambda\Lambda$ により

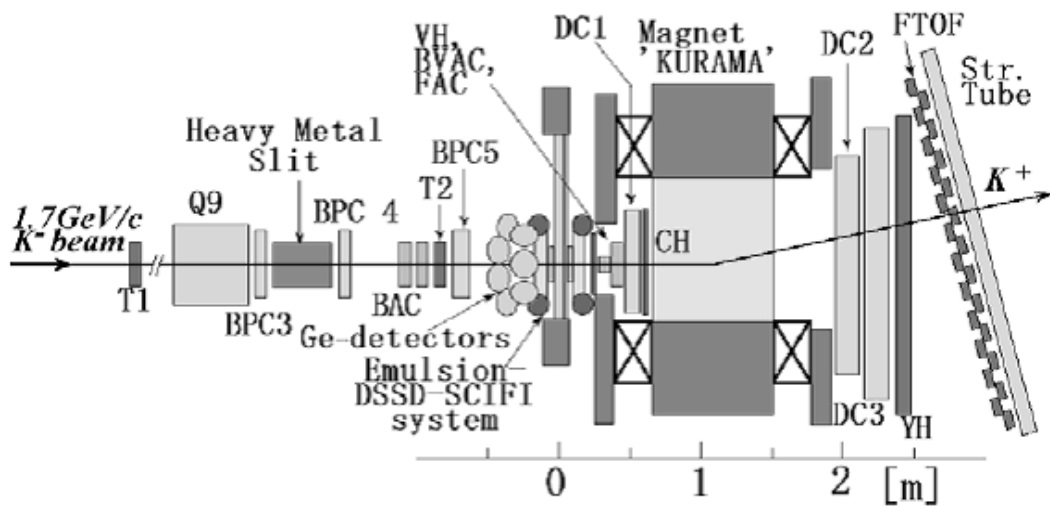


図 2.1: E07 実験の標的周辺のセットアップ

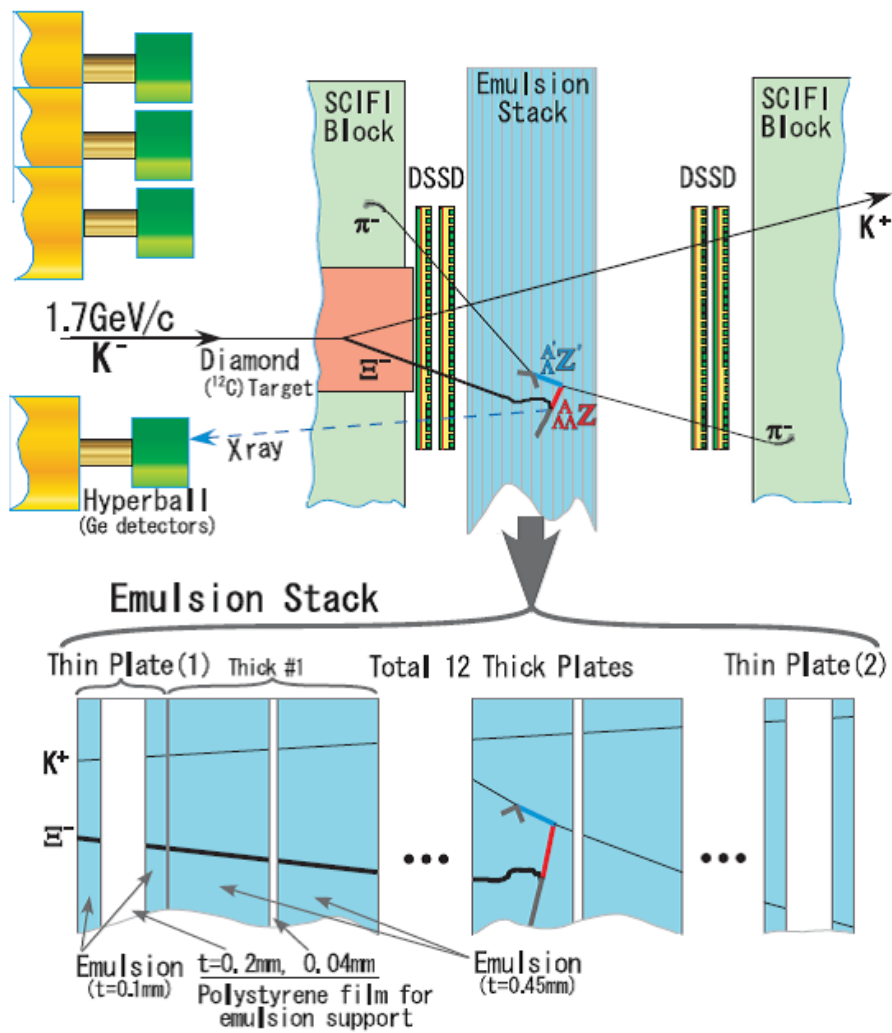


図 2.2: E07 実験の標的周辺のセットアップ

二個の Λ 粒子を生成し、ダブルハイパー核、シングルハイパー核等に崩壊する。一連の流れを図 2.3 に示す。後は、エマルションを現像し、崩壊トラックを顕微鏡を用いて観測する。

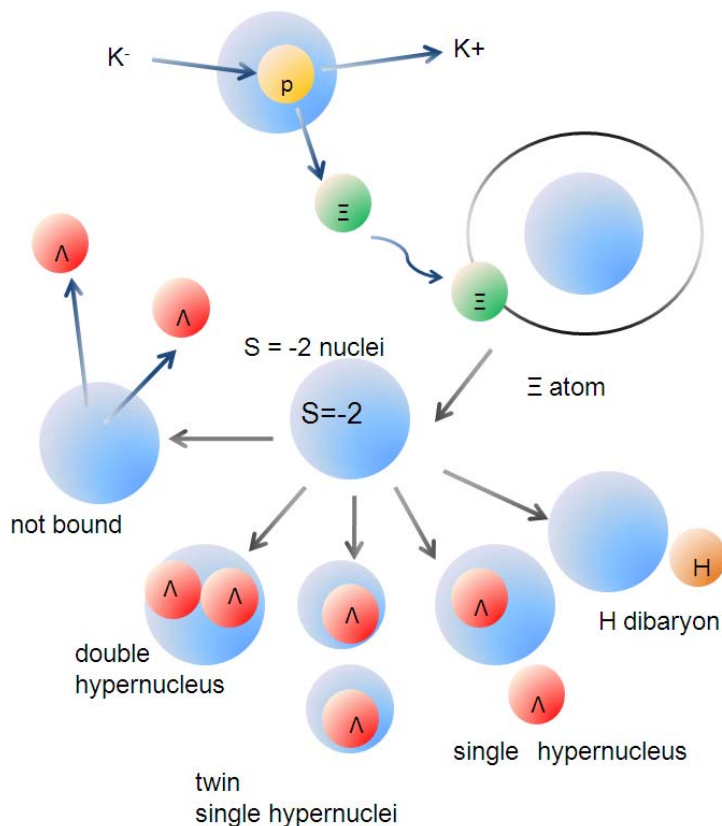


図 2.3: ダブルハイパー核その他の生成プロセス

次に興味あるイベント(エマルション中に Ξ が静止するイベント)の選出方法であるが、

- 準自由反応 $p(K^-, K^+) \Xi^-$ に関する K^- 粒子、 K^+ 粒子の同定
- エマルション中に静止する Ξ^- 粒子の同定

の 2 段階で行う。

まず K^- ビームは、BAC(Beam Aerogel Cherenkov Counter)(インデックス=1.03)によって、トリガーレベルでの選別を行い、また T1 と T2 の TOF をとることによってパイオン等のバックグラウンドから分別される。

次に散乱粒子である K^+ は、BVAC(Beam Veto Aerogel Cherenkov Counter)(インデックス=1.05)で未反応の K^- から、また FAC(Forward Aerogel Cherenkov Counter)によって散乱パイオンからトリガーレベルで分別される。さらに大立体角磁石である KURAMA で曲げられ、後方のドリフトチェンバー群で位置を特定することにより運動量が測定される。また E373 実験では K^+ のバックグラウンドの除去(主に陽子)のため質量選別トリガーを 2nd レベルで導入したが、本実験では ($n=1.13$) のエアロジェルチェレンコフカウ

ンターを導入することにより、1st レベルで K^+ トリガーをつくる。これについては後述する。

最後に準弾性散乱により生成された Ξ であるが、DSSD2 枚による dE/dx によって静止する Ξ^- 粒子を選別する。またエマルジョンに入射する位置、角度が予測される。またターゲット下流に SciFi ブロックを配置することにより、ダブルハイパー核からの崩壊物質であるパイオンを測定する。

また E07 実験では、Ge 検出器をターゲット上流に配置することにより、世界初の Ξ 原子からの X 線の検出を目指す。原子軌道を回る Ξ^- 粒子は X 線を放出しながら低準位に遷移しやがて原子核との軌道と重なり合い、強い相互作用により核内に取り込まれ、 Ξ 原子核を形成する。これは 3D,4F 軌道で起こる [21, 22]。この際放出される X 線の遷移率、幅、エネルギーは各表面からの影響を受けて変化する。従って X 線を測定することによって Ξ 核子間の相互作用を知ることができる。

これらのセットアップおよび研究手法は、先に行われた E373 実験をベースに改良したものである。以下に述べる改良により、E373 実験の 10 倍の 100 例のダブルハイパー核を短期間で発見することが可能となる。

2.3 KEK-PS-E373 実験からの改良点

J-PARC-E07 実験の E373 実験からの改良点の内重要なものとして

- ビームの向上
- トリガーの改善
- DSSD の導入

である。以下にこれら改善点の詳細を E373 実験との比較しながら述べる。

2.3.1 ビームの向上

J-PARC の K1.8 ビームラインでは静電セパレータを 2 台用いることによって $K/\pi \geq 6$ という非常に純度の高い K^- ビームを供給することができる。この値は KEK-PS の $K/\pi \sim 1/4$ に比べて大きな改善となっている。エマルジョンは 1 mm^2 あたり 1×10^4 個までの粒子しか記録できないという制限があるが、ビームの質の向上により E373 実験の 3 倍以下の量のエマルジョンで 10 倍の統計を得ることができる。

また K1.8 ビームラインではビーム強度も $3 \times 10^5/\text{spill}$ という値を目指している。これは KEK-PS の約 100 倍であり、ビームライン上の検出器を高レートに対応するように一新する必要がある。我々はこの目的のためドリフト長が 1.5mm の高レート仕様のドリフ

トチェンバーを開発した。写真を図 2.4 に示す。またドリフト長 1.5mm というのは非常に狭い間隔なので、定常運転を行うためには放電対策をしっかりと行わなければならない。放電は主にフィールドワイヤーと隣接する半田間で起こるので、図 2.5 に示すように該当部分に接着剤を充填することによって絶縁を図っている。

この DC に関しては位置分解能、efficiency 等の性能評価を現在行っている。

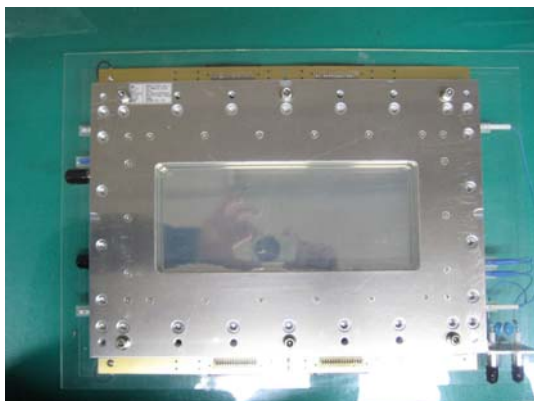


図 2.4: ドリフト長 1.5 mm ドリフトチェンバー



図 2.5: 放電対策

2.3.2 トリガーの改善

1st トリガーの後 2nd トリガーで質量選別トリガー、運動量選別トリガーを導入することにより (K^- , K^+) のトリガーを作った [16]。E373 実験ではスピルあたりのレートは 1st トリガーで 75、2nd トリガーで 13 という値であった。E07 実験を行う際のビーム強度を 3×10^5 /spill とすると、1st トリガーのレートは 2000 となり、後述する DSSD を動作させることが難しい。2nd レベルトリガーを導入しても数百というレートになる。バックグラウンドは主に (K^- , p) 反応による高エネルギーの陽子である。そこで新しくインデックス = 1.13 のエアロゲルチェレンコフカウンターをエマルション、KURAMA 間に配置し、1st レベルでの散乱陽子の除去を目指す。ドイツの GSI におけるテスト実験において粒子速度別の検出効率測定が行われ、E07 実験の要求を満たすことが示された [23]。

2.3.3 DSSD の導入

E373 実験ではエマルションに入射する Ξ^- 粒子のトラッキングはシンチレーションファイバーを用いて行った [15, 24]。シンチレーションファイバーバンドルは $40 \mu\text{m}$ の半径を持つファイバーを重ね合わせたものであり、目でイメージを見ることによって Ξ^- 粒子の候補を選んだ。しかし E07 実験では候補トラックが 2×10^5 個あると見積もられ、この方法を用いることは難しい。

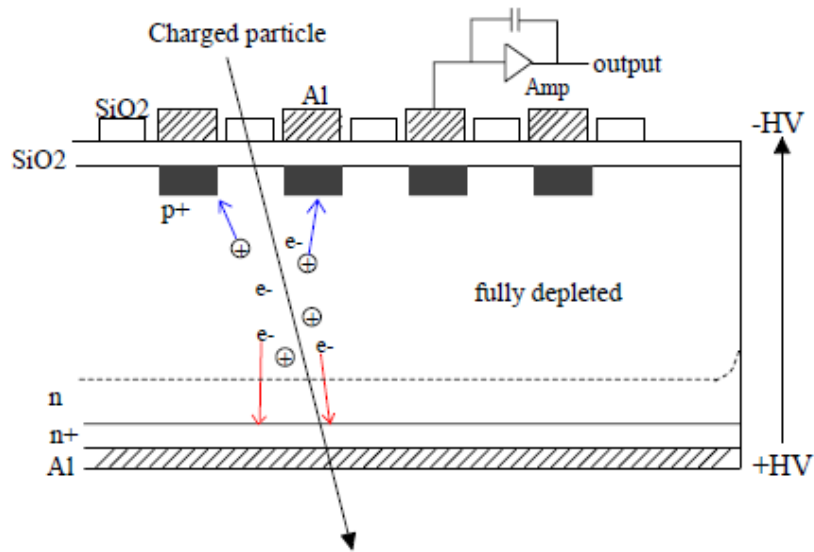


図 2.6: DSSD の動作原理

さらに E373 実験では Ξ 粒子の落すエネルギーが大きいとファイバー間のクロストークが起こったり、ファイバーの隙間を通った粒子に対しては十分な光量が得られないなどの問題が起こった。そのため位置予測精度は悪くなり、予測された位置に対し $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ の領域をサーチしなければならなかった。

そこで E07 実験では $50\ \mu\text{m}$ ピッチの両面読み出しシリコンストリップ検出器 DSSD (Double-sided Silicon Strip Detector) をシンチレーションファイバーバンドルの代わりに Ξ^- 粒子のトラッキングに用いる。DSSD は半導体検出器の一種であり、粒子の位置と dE/dx を高精度で測定することが可能である。DSSD の構造は図 2.6 に示すように n 型のシリコンウェハ-の上に n^+ 、 p^+ のストリップをのせたものである。これに逆バイアス (n^+ 側に +、 p^+ 側に -) をかけると空乏層が広がる。この領域に荷電粒子が入射すると電子、ホール対を生成し、電子は n^+ 電極に、ホールは p^+ 電極に収集される。電荷はアンプ整形され出力される。

半導体検出器をエマルジョンの上流に配置するカウンターとして利用する実験は E176 をはじめ過去にも存在したが [13, 14, 25]、それらはいずれも K^- ビームのトラッキングを行いエマルジョン中にバーテックスを見つける目的で用いられた。

一方 E07 実験では DSSD を Ξ^- 粒子のトラッキングに用いる。 Ξ^- 粒子は短寿命であるため、 4 mm という非常に狭い間隔に 2 枚の DSSD をセットアップする必要がある。我々は、n-側の実装面を全て p 側にまとめる等の工夫をして、狭い間隔にセットアップが可能な $50\ \mu\text{m}$ ストリップ間隔の DSSD を開発した。写真を図 2.7、図 2.8 に示す。また 2 枚セットアップした写真を図 2.9 に示す。

p 側には図において縦方向に 1280 本のストリップが刻まれており、x 方向の位置測定を

可能にする。一方 n 側には図において横方向に 640 本のストリップが刻まれており、 y 方向の位置測定を可能にする。一方ストリップは 128 本毎に VA チップにまとめられ、トリガー信号が入力されると、収集された電荷を保持、整形、増幅を行い読み出し装置に送られる。DSSD の基本性能を付録 B に示す。

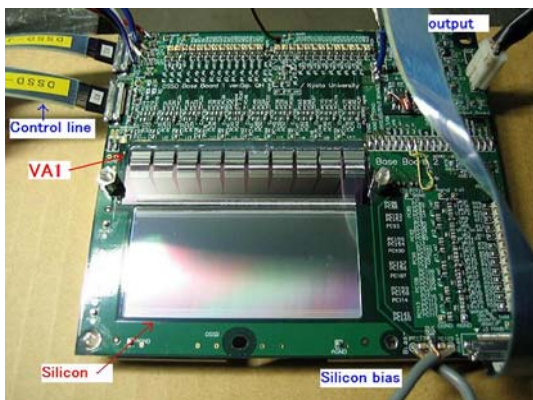


図 2.7: DSSD の p 側の写真

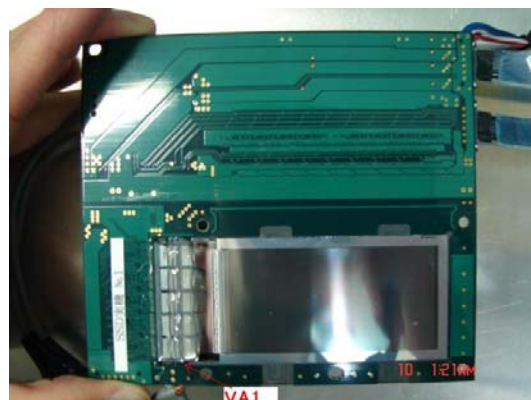


図 2.8: DSSD n 側の写真

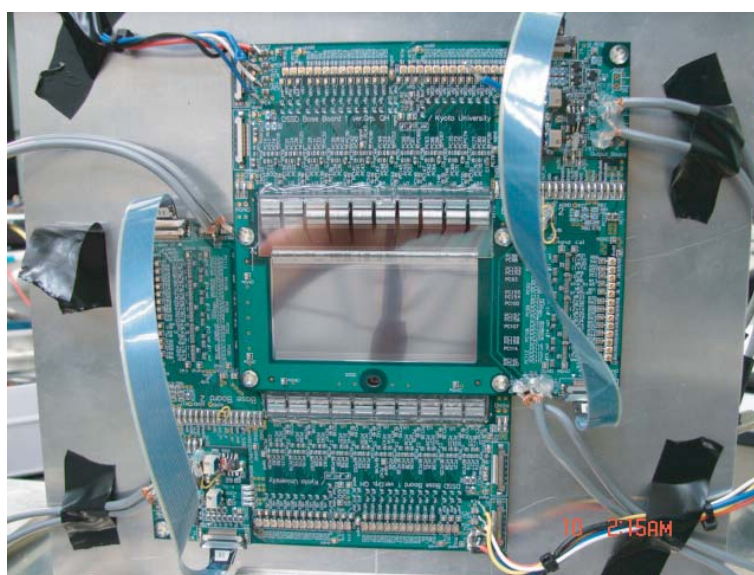


図 2.9: DSSD2 枚をセットアップした時の写真

またエマルジョン上流だけでなく下流にも DSSD を 2 枚配置する。下流の 2 枚によってエマルジョンを突き抜ける E^- 粒子を同定することができる。またエマルジョン中で崩壊した粒子をトラッキングし、高精度でトポロジーを組むためにも用いられる。

以上の改良により、E07実験では約100例のダブルハイパー核イベントが発見される見込みである。これはE373実験の約10倍に相当し、 Λ - Λ 間の相互作用、及び Ξ -核子間の相互作用について多くの知見をもたらすものと期待される。一方解析すべきイベントが10倍以上に増えるため、DSSDによるエマルション中のトラックの位置予測精度が解析効率を左右するカギとなってくる。そこで我々はDSSDエマルション混合システムの性能評価を我々は大阪大学核物理研究センター(RCNP)の陽子ビームを用いて行った。以下、第3章で実験の概要、第4章で解析手法、第5章で結果考察について述べる。またRCNPの実験の解析の簡略化のために画像処理技術を用いて、エマルション中の 0° トラックの検出を自動検出する手法を開発した。その概要について第6章に述べる。そして最終章の第7章でまとめ及び今後の展望について述べる。

第3章 RCNPにおける性能評価実験

3.1 実験動機

E07実験で導入されるDSSDには

1. エマルジョンに静止する Ξ^- を dE/dx を用いて選別するのに十分なエネルギー分解能
2. 興味ある粒子がエマルジョンに入射した位置を $100\ \mu\text{m}$ 以内で予測
3. 興味ある粒子がエマルジョンに入射した角度を高精度で予測

することが要求される。1.についてエマルジョン中に静止する Ξ^- 粒子は5 MIPに相当し、0.7 MeV程度のエネルギーをDSSDに落とす。したがってその領域での線形性、分解能を求める必要がある。2.について20倍の対物レンズの視野は $300\ \mu\text{m}$ 四方なので、r.m.sで $100\ \mu\text{m}$ の予測精度があれば予測に従った時に確実に視野内にトラックが発見されることになる。3.の角度予測精度は Ξ^- 粒子の候補を顕微鏡を用いて自動探索する際に重要である[15]。6.1で述べるように、自動探索は角度の予測値に基づいて顕微鏡の位置を変えながら行う。E373実験では予測角度に対して $\pm 100.0\ \text{mrad}$ の範囲で顕微鏡を操作した[15]。角度の予測精度が高ければ高いほど自動探索に要する時間が節約できる。E07実験では $20\ \text{mrad}$ 以内の角度予測精度を目指す。

そこでDSSDエマルジョン混合システムがこれらの要求を満たしているかを検証するため我々は2005年度、KEK $\pi 2$ ビームラインの陽子、パイオンビームを用いてT594実験を行った[26]。図3.1にT594の実験セットアップを示す。

図3.1において、上流からシンチレーション検出器、エアロジェルチェレンコフカウンター、シンチレーション検出器、SSD#1 y-plane、SSD#1 x-plane、SSD#2 y-plane、SSD#2 x-plane、DSSD、エマルジョンの順に配置した。ここでエアロジェルチェレンコフカウンターは陽子ビームとパイオンビームを区別するのに用いられた。

入射粒子の運動量を $0.6\ \text{GeV}/c$ から $1.2\ \text{GeV}/c$ まで変化させ、DSSDの dE/dx の線形性を調べると共に、SSDとDSSDによるトラックとエマルジョン中のトラックを比べて予測精度、角度予測精度を求めた。結果としてDSSDは dE/dx の線形性が $250\ \text{keV}$ まで確かめられ、また位置予測精度、角度予測精度に関しては 20° 、 40° のトラックに関して表3.1の予測精度が得られた。

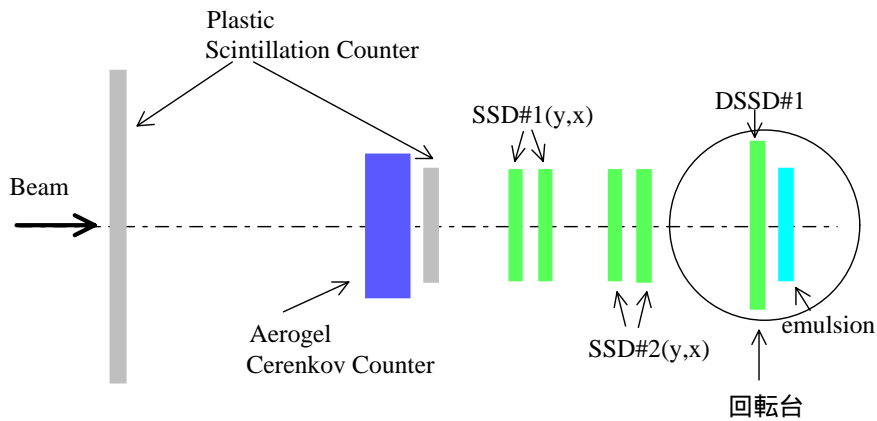


図 3.1: T594 実験のセットアップ

表 3.1: T594 で得られた位置予測精度、角度予測精度

	位置 residual	角度 residual
x 方向 (20 °)	$58 \pm 5 \mu\text{m}$	$14 \pm 1 \text{ mrad}$
y 方向 (20 °)	$49 \pm 6 \mu\text{m}$	$19 \pm 2 \text{ mrad}$
x 方向 (40 °)	$80 \pm 19 \mu\text{m}$	$12 \pm 1 \text{ mrad}$
y 方向 (40 °)	$44 \pm 6 \mu\text{m}$	$17 \pm 3 \text{ mrad}$

しかし T594 実験では予測トラックを引くのに用いられたのは 30 cm 以上離れた SSD と DSSD であり J-PARC 実験で用いられる 2 枚の DSSD ではない。またデータの破損のため、統計をあげた議論を行うことができなかった。そこで我々は 2006 年度、RCNP において J-PARC 実験のセットアップに近い条件で DSSD エマルション混合システムの性能評価実験を行った (R78 実験)。以下その内容について順を追って述べる。

3.2 セットアップ

R78 実験のセットアップを図 3.2 に示す。以降ビーム方向を z 軸方向、水平方向を x 軸方向、垂直方向を y 軸方向とする。

ビーム上流からシンチレーション検出器 S1、DSSD#12、DSSD#1、エマルション、シンチレーション検出器 S2 の順に配置した。ここで DSSD の区別には製造時のシリアルナンバーを用いている。DSSD エマルション混合システムは x 方向に回転可能な台の上に乗っており、 0° 、 15° 、 25° 、 30° 、 45° 、 50° の角度でビームを入射した。またシステムは空冷装置を内部に装着した暗箱の中に設置した。空冷装置はシリコンのリーク電流を抑え、VA チップからの発熱を逃がす役割を果たす。

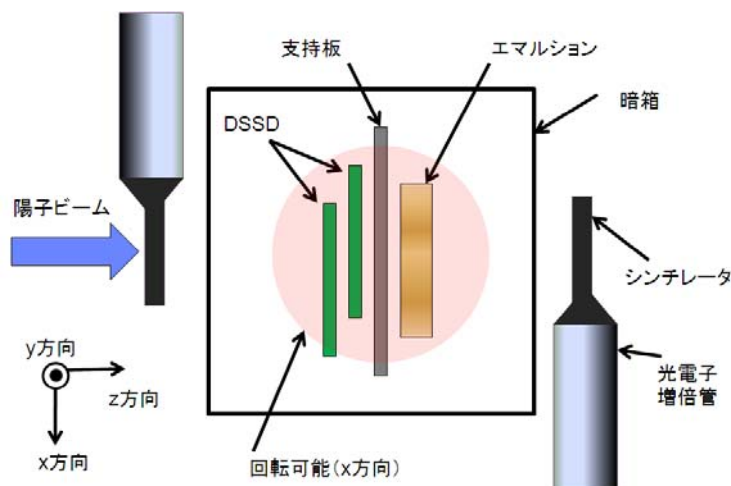


図 3.2: R78 実験のセットアップ

エマルジョン-DSSD 間には用いたエマルジョンによるが $1 \sim 2 \text{ mm}$ であり、DSSD-DSSD 間 1.5 mm である。

R78 実験で用いたエマルジョンモジュールは、E07 実験で用いるものと同様、 $500 \mu\text{m}$ のアクリル板の両側に $100 \mu\text{m}$ の薄型エマルジョンを張り付けた構造をしたもので、ビームラインに対して垂直に配置した。これは現像の際に生じるエマルジョンの伸縮を z 軸方向のみに限定し、後の顕微鏡を用いた陽子トラックの探索を容易にするためである。

この実験システムを RCNP 西実験棟の高精度スペクトロメータ Grand Raiden の焦点面の後方に配置した (図 3.3、図 3.4)。

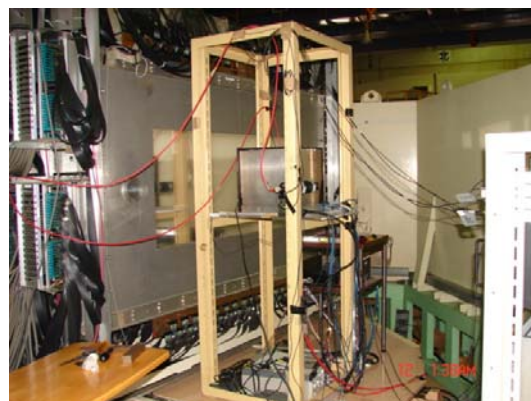
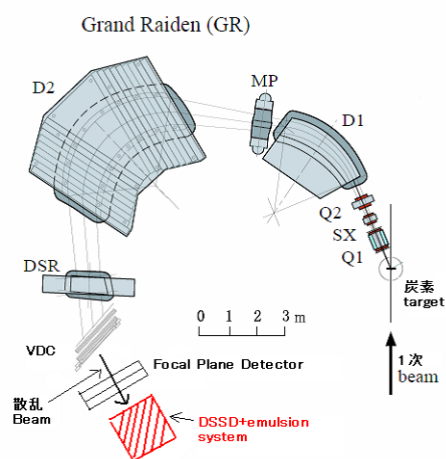


図 3.4: セットアップの写真

図 3.3: GRAND RAIDEN 後方の実験セットアップの配置図

尚 R78 実験における DSSD、エマルジョン混合システムの工作、及びセットアップの誤差は $100 \mu\text{m}$ 、角度に関しては $\pm 1^\circ$ 程度であり、これらの系統誤差は後述する解析を

行って取り除いた。

サイクロトロンで 140 MeV まで陽子を加速し、 30 mg/cm^2 の厚さの炭素膜ターゲットに当てて弾性散乱させる。散乱された陽子を 8.5° に構えた Grand Raiden によりデフォーカスさせることにより、十分広くかつ密度の薄い 140 MeV 単色陽子ビームを作り出し DSSD エマルション混合システムに入射した。

次に実験の回路図を図 3.5 に示す。

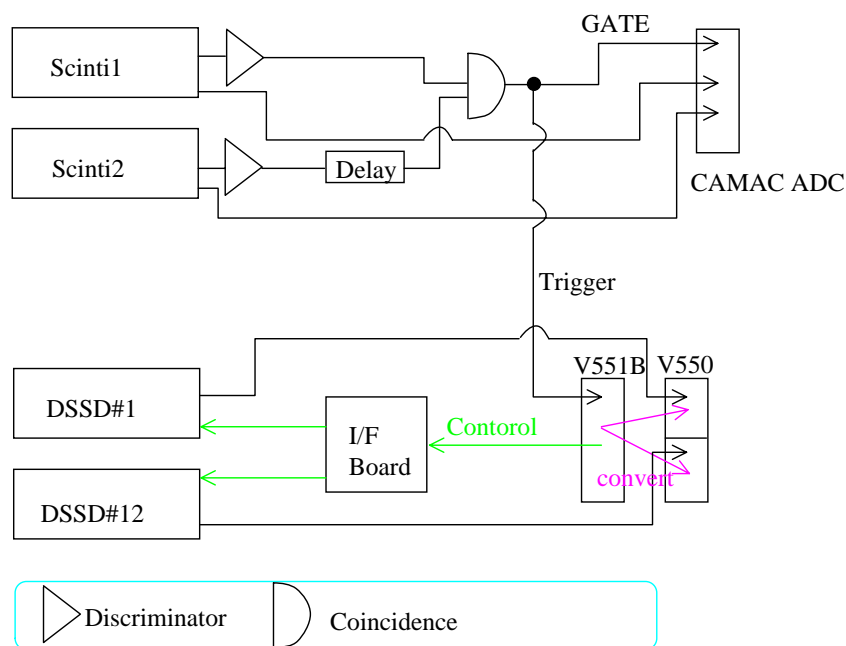


図 3.5: R78 実験の回路図

S1 と S2 のコインシデンスをトリガー信号とした。S1 と S2 のコインシデンスでゲートを作り、CAMAC を用いて ADC 情報を得た。DSSD のデータ読み込みには、インターフェースボード、制御モジュール V551B、フラッシュ ADC V550 を用いた。トリガー信号が V551B に入力されると、V550 の Convert 信号と DSSD の VA チップ制御用のクロック信号を出力する。クロック信号はインターフェースボードで適当な電圧値に調整され、DSSD#1、DSSD#12 に平行に入力される。一方陽子がシリコン面を通過した際に生じた電荷は対応するスリップで収集され、VA チップのコンデンサーに蓄えられている。インターフェースボードからのクロックに同期し、各チャンネルの VA チップのコンデンサーが解放され、差動のパルスハイト情報がシリアルに V550 に入力される。V550 の入力は V551B からの Convert 信号と同期してデジタル化して FIFO に記録され、最終的にデジタルデータとして PC に蓄えられる。

今回は #7D-4 ~ #7D-8 の 5 枚のエマルションを用いた。エマルションは 1 mm^2 当たり、 10^4 個のトラックを入射できるが [18]、今回は DSSD2 枚によるプレディクションとエマ

ルション中のトラック対応付けを容易にするため 1 mm^2 に一トラックとなるように陽子を入射した。各々のエマルションモジュールに陽子を入射した際のトリガー数を表 3.2 に示す。

表 3.2: 5 枚のエマルションに対するトリガー数

	0	15	25	30	45	50
7D-4	1008	1016	1033	0	1021	0
7D-5	1035	1038	1060	0	1206	0
7D-6	3132	3067	3176	0	3133	0
7D-7	3112	0	0	3325	0	3142
7D-8	10253	0	0	0	0	

第4章 解析

4.1 解析手順

R78 実験の目的は DSSD2 枚によるエマルジョン中に入射する粒子の位置予測精度、角度予測精度を測定することである。実験の解析は

1. DSSD の解析
2. 位置、角度の予測
3. エマルジョン中でのトラックの探索
4. 位置予測精度、角度予測精度の決定及び系統誤差の除去

の順に行った。以下順を追って説明する。

4.2 DSSD の解析

DSSD の信号を ADC で読み込んだ時の生データを図 4.1 に示す。左は 1 イベントのプロットで、右は全イベントを重ね合わせたプロットである。横軸はストリップのチャンネルで、縦軸は ADC 値を表す。またトリガー時に p-side、n-side をシリアルに読み込んでおり、0 ~ 1279ch までが p-side、1280 ~ 1919ch までが n-side の信号を表している。

DSSD の ADC データはペDESTALのふらつきが大きいいため、信号を取り出すために以下の手順でデータの整形を行った。

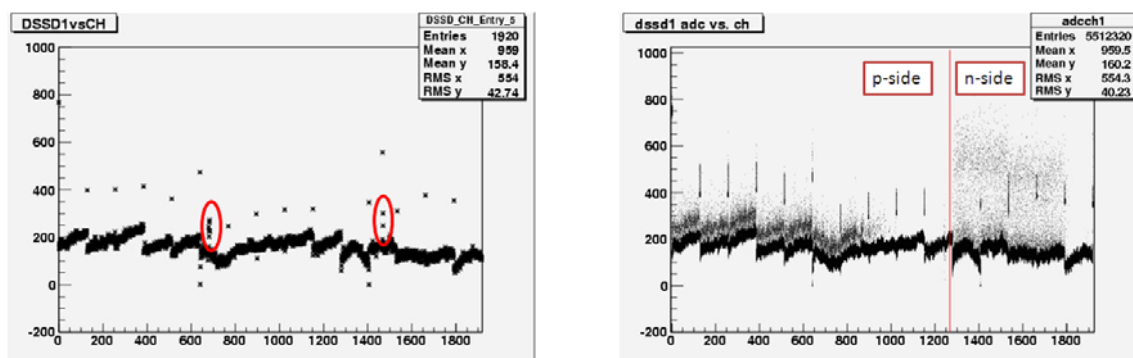


図 4.1: (左) 1 イベントの DSSD#1 の ADC 分布 (赤丸は信号)
(右) 全イベントの DSSD#1 の ADC 分布

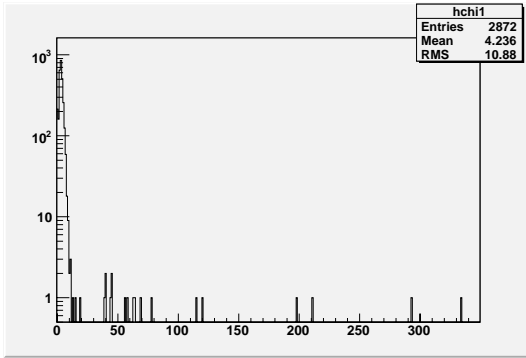


図 4.2: DSSD# 1 の χ^2 分布

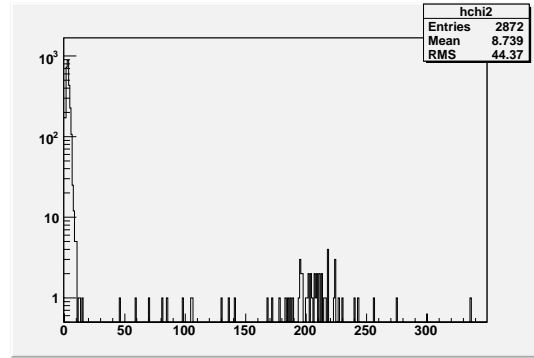


図 4.3: DSSD# 12 の χ^2 分布

1. 各 ch 毎にペDESTALの平均値と幅を計算し、その平均値を各イベント毎にひいてやる (pedestal subtraction)。
2. R78 実験では DSSD12 の VA チップが周期的に発振し、信号のベースラインが大きく上がる現象が起こった。そこで各イベントごとに χ^2 を式 (4.1) に基づいて計算し、その値が 50 以上であるイベントを発振イベントとみなし解析対象から除いた。

$$\chi^2 = \frac{1}{1920} \sum_{ch=1}^{1920} \frac{(\text{ADC 値} - \text{Mean}_{ped})^2}{(\sigma_{ped})^2} \quad (4.1)$$

ここで Mean_{ped} はペDESTALの Mean の値、 σ_{ped} はペDESTALの σ の値である。図 4.2 に DSSD#1, 図 4.3 に #2 の χ^2 のプロットを示す。通常のイベントでは χ^2 の値は高々 10 程度であることが読み取れる。 χ^2 が 50 以上となるイベントの発生率は DSSD# 1 では $0.42 \pm 0.12\%$ 、DSSD# 12 では $3.7 \pm 0.35\%$ となる。

3. イベント毎に同じ VA チップに属するチャンネルからの信号を平均し、各チャンネルの値から引く。この処理は同じ VA チップに属するチャンネルに共通に乗るノイズ (common mode noise) を除くためである。
4. 最後に 1. の pedestal subtraction をもう一度繰り返す。

これらの処理を施した後の ADC 分布を図 4.4 に示す。ペDESTALの幅が狭くなり、その中心値が 0 に揃っていることがわかる。

4.3 位置、角度の予測

次に整形された DSSD のデータを用いてトラックを再構成し、陽子がエマルジョンに入射する位置、角度を予測した。

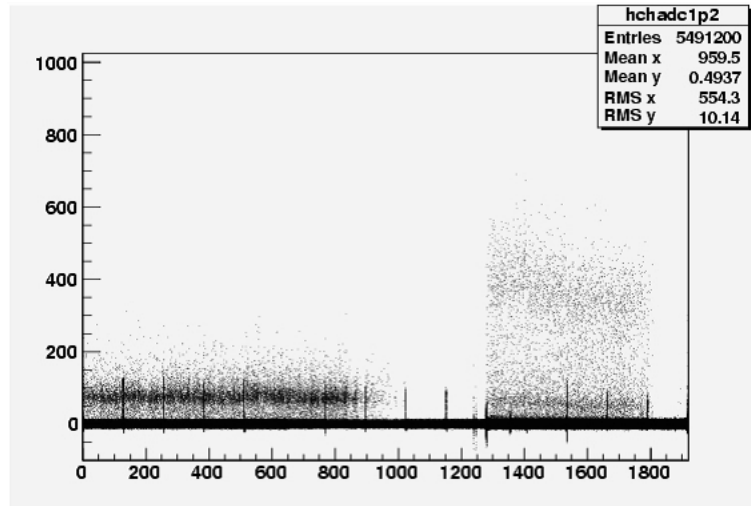


図 4.4: 補正後の DSSD の ADC 分布

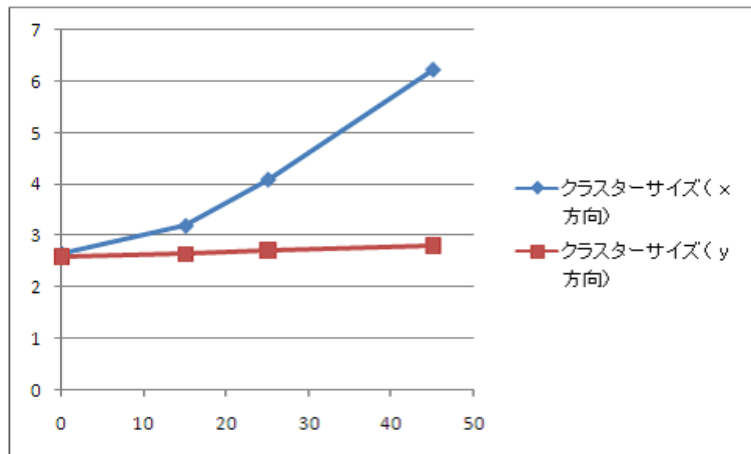


図 4.5: 平均クラスターサイズの角度依存性

まずは DSSD におけるヒットの位置の求め方であるが、これは以下に示すクラスタリングアルゴリズムを用いて行った。まず補正後の ADC 値が σ_{ped} の 3 倍以上であるものを信号とみなす。隣り合ったストリップに信号が来ているとそのエネルギーを足し合わせていきクラスターを構成する。複数のクラスターができた場合は最もエネルギーの大きいクラスターを入射粒子による信号であると考え、クラスタリングを構成するチャンネルに ADC の重みをつけて平均した位置を荷電粒子のヒットポジションとする。ここで陽子を 0° 、 15° 、 25° 、 40° に入射した際のクラスターの平均のサイズを図 4.5 に示す。入射角度が大きくなるにつれてクラスタリングのサイズも大きくなっていることがわかる。

DSSD2 枚それぞれにおいてヒットポジションを同定してやり、2 点を結ぶトラックを外挿した直線がエマルジョンと交わる座標を予測位置、角度を予測角度とした。

また DSSD2 枚の位置のずれは系統誤差となるため、最初の位置合わせを図 4.6 に示す

!h

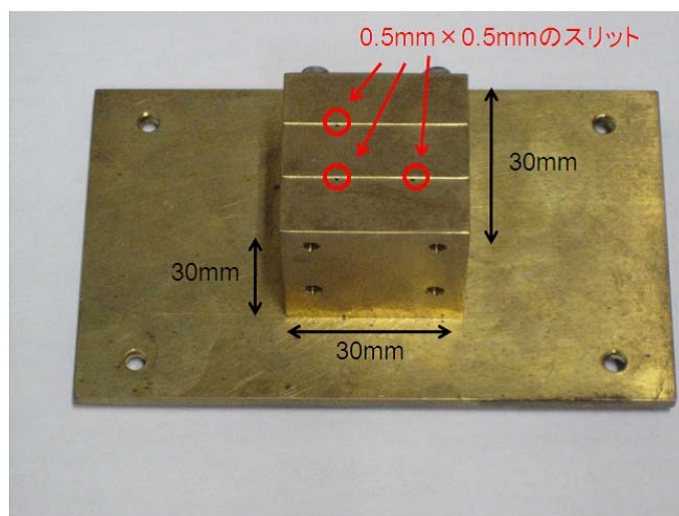


図 4.6: コリメータ写真

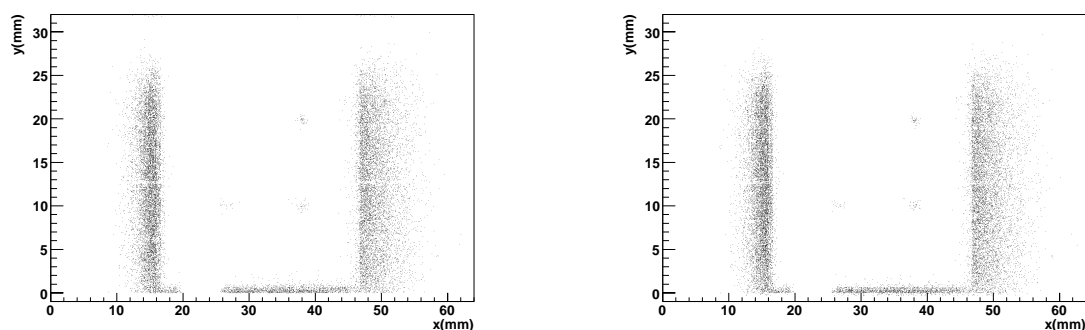


図 4.7: (左)DSSD#1 (右)DSSD#12

真鍮製のコリメータを用いて行った。コリメータには $500 \mu\text{m}$ のスリットが3点刻まれており、DSSD2枚の上流に配置し、 0° の角度で陽子ビームを入射した。DSSD#1,#12のヒットポイントを合わせることによってDSSD間の位置を補正した。DSSD#1,#12のコリメータイメージを図4.7に示す。コリメータのスリット部分にのみヒットが記録されていることがわかる。

4.4 位置予測精度、角度予測精度の決定

エマルジョン中のトラックの探索はE07実験の解析に採用される顕微鏡を用いて行った。顕微鏡のセットアップを図4.8に示す。

E07実験で用いられる大面積のエマルジョンを解析するために、エマルジョンを置く台はモーター制御でx方向、y方向、z軸方向に可動となっている。またその位置は $1 \mu\text{m}$ の精度で読みだされる。顕微鏡に映った画像は120Hzで動作可能なCCDによってコンピュータにデジタルデータとして画像が取り込まれ、画面上に表示される。またそのデータを



図 4.8: 顕微鏡セットアップの写真

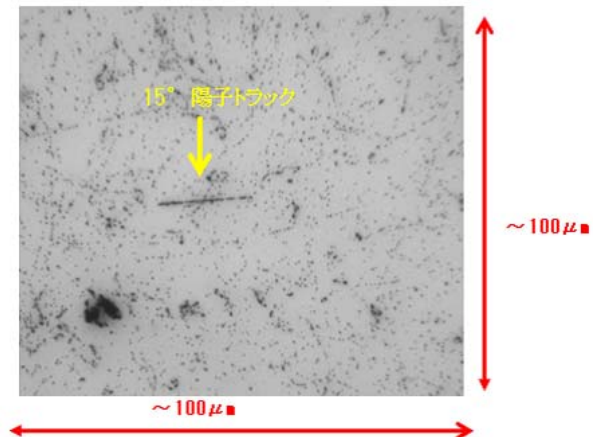


図 4.9: 15°陽子トラックの顕微鏡写真

ビットマップ形式で保存することが可能である。後述する0°トラック認識プログラムはこの画像に対して処理を行った。顕微鏡で観察された15°入射のトラックを図4.9示す。

DSSD2枚により予測された地点周辺をサーチし、予測点に最も近いトラックと予測トラックの残差をとった。尚、ここでエマルションの中に記録されたトラックは、図4.10に示すように、アクリルの支持板に入射した位置と、抜け出た位置を結んだ直線と等しいと仮定した。これはエマルションのz軸方向の伸び縮みの影響を除くためである。今回は0°、15°、25°、30°、45°の角度について各々約100トラックを探索して残差を求めた。

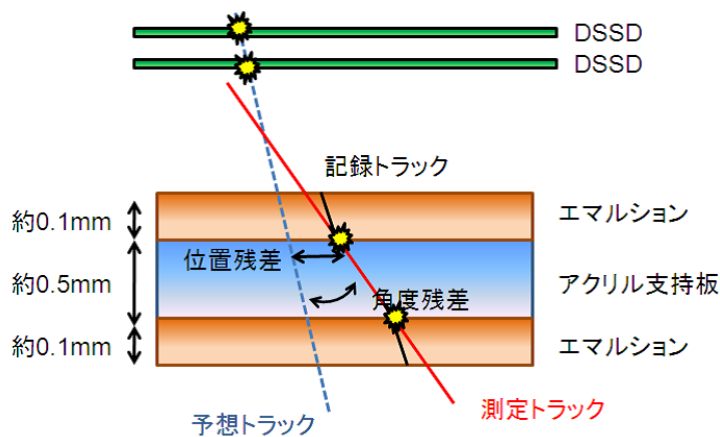


図 4.10: 位置残差、角度残差

次に系統誤差を除くことを残差の広がり

$$\sigma_{\text{残差}} = \sqrt{\sigma_{\text{システムの分解能}}^2 + \sigma_{\text{アライメント}}^2 + \sigma_{\text{多重散乱}}^2} \quad (4.2)$$

と書ける。ここで

- $\sigma_{\text{システムの分解能}}$ は DSSD エマルジョン混合システムが本来持っている分解能
- $\sigma_{\text{アライメント}}$ はセットアップの際の系統誤差
- $\sigma_{\text{多重散乱}}$ は陽子トラックの多重散乱による広がり

である。また $\sigma_{\text{アライメント}}$ は

$$\sigma_{\text{アライメント}} = \sqrt{\sigma_{\text{DSSD-DSSD}}^2 + \sigma_{\text{DSSD-エマルジョン}}^2 + \sigma_{\text{顕微鏡セットアップ}}^2} \quad (4.3)$$

と書ける。ここで

- $\sigma_{\text{DSSD-DSSD}}$ は DSSD-DSSD 間の誤差によるもの
- $\sigma_{\text{DSSD-エマルジョン}}$ は DSSD-エマルジョン間の誤差によるもの
- $\sigma_{\text{顕微鏡セットアップ}}$ は顕微鏡にエマルジョンをセットアップする際の誤差によるもの

である。この中で $\sigma_{\text{顕微鏡セットアップ}}$ が最も大きく角度にして $\pm 2^\circ$ 距離にして $\pm 1 \text{ mm}$ の誤差がある。これは人間の手によってエマルジョンを顕微鏡にセットアップするためである。他の 2 つはセットアップの際の誤差によるもので、角度にして $\pm 1^\circ$ 、距離にして $\pm 200 \mu\text{m}$ 程度の誤差がある。

アライメントの誤差は原理的には取り除くことができる。まず DSSD-DSSD 間の系統誤差はコリメータのプロットを用いて、取り除いた。 0° で入射したと仮定して x 方向、y 方向に DSSD#12 の座標を平行移動させて DSSD#1 の座標と合わせた。その値は x 方向で $191 \mu\text{m}$ 、y 方向で $216 \mu\text{m}$ であった。

また $\sigma_{\text{DSSD-エマルジョン}}$ 及び $\sigma_{\text{顕微鏡セットアップ}}$ 除去には以下の式を用いた位置合わせを行った。以下の式を用いて DSSD-エマルジョンの相対の位置を変えていき、 $\sigma_{\text{残差}}$ が値が最小になる調整パラメータを探した。

$$x' = A \times x \cos(d\theta) - B \times y \sin(d\theta) + dx \quad (4.4)$$

$$y' = B \times y \cos(d\theta) - A \times x \sin(d\theta) + dy \quad (4.5)$$

ここで

$$A = \cos(xangle) / \cos(xangle + d\alpha) \quad (4.6)$$

$$B = \cos(yangle) / \cos(yangle + d\beta) \quad (4.7)$$

であり、

- x, y は位置合わせ前の座標であり、 x', y' は位置合わせ後の座標
- $xangle, yangle$ はトラックをそれぞれ $x-z$ 面、 $y-z$ 面に射影した時の角度
- $dx, dy, d\theta, d\alpha, \beta$ は調整パラメータであり、それぞれ x 方向、 y 方向の調整距離、 $x-y$ 面、 $x-z$ 面、 $y-z$ 面での調整角度である。

である。なお z 軸方向の距離 dz は上記のパラメータで記述できるため調整パラメータには含めていない。

調整パラメータが局所的に $\sigma_{残差}$ の値を小さくすることがあるので、最初は調整パラメータの幅を大きく取り、徐々に幅を狭めていくという方法を用いた。一例として位置調整前後の比較を図 4.11 に示す。また表 4.1 に示す。調整前に比べて調整後の位置残差、角度残差の中心値は 0 に近づき、またガウス分布でフィットした時の σ の値（予測精度）も小さくなっていることがわかる。

表 4.1: 調整前後の予測精度の変化

	位置予測精度 (μm)	角度予測精度 (mrad)
x 方向 (調整前)	61.5 ± 12.3	21.4 ± 1.9
x 方向 (調整後)	41.3 ± 5.0	7.6 ± 0.8
y 方向 (調整前)	26.3 ± 2.6	16.0 ± 1.5
y 方向 (調整後)	21.0 ± 2.2	15.3 ± 1.4

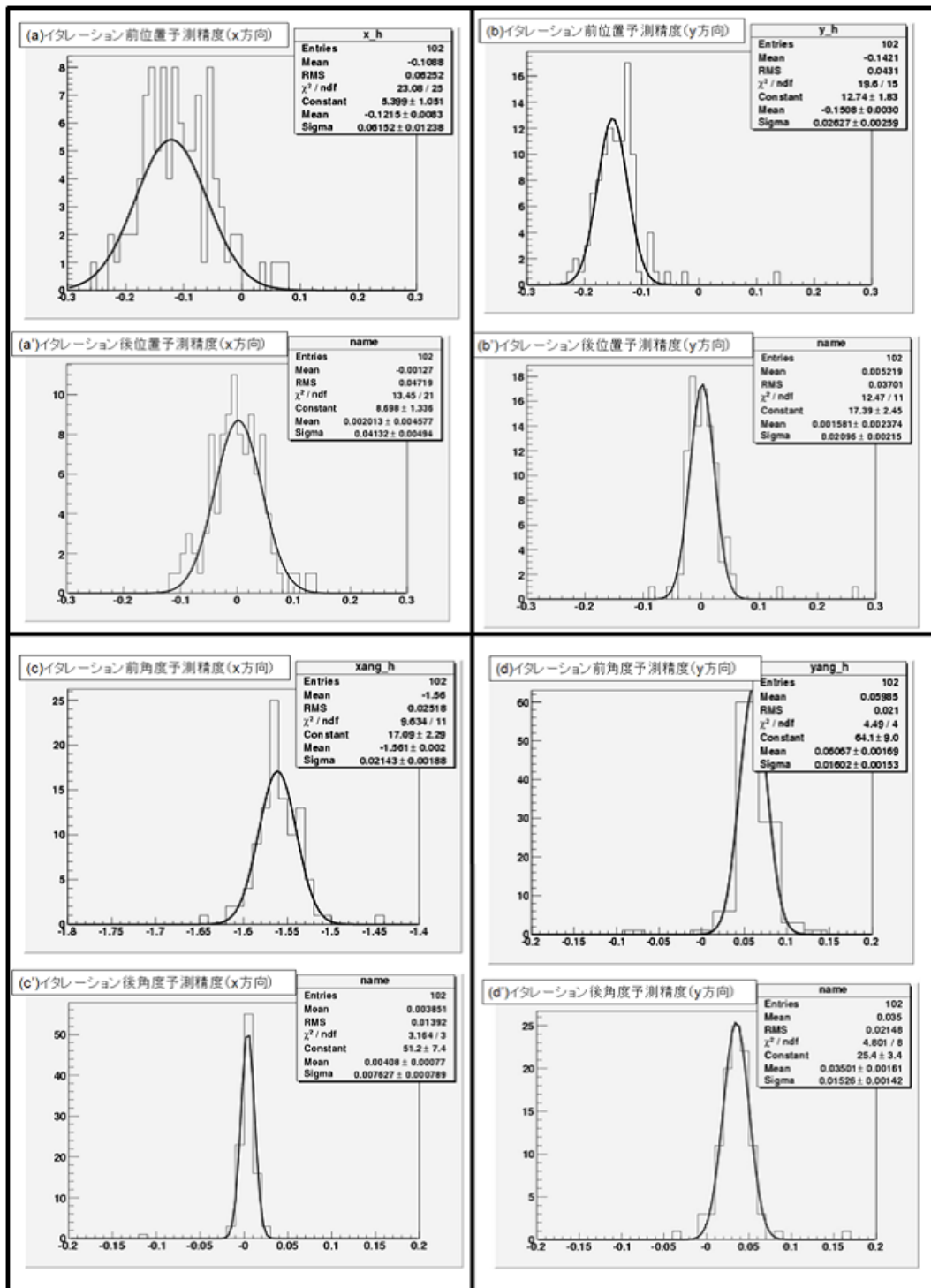


図 4.11: 位置合わせ前後の (a)x 方向位置分解能 (b)y 方向位置分解能
(c)x 方向位置分解能 (d)y 方向位置分解能

第5章 結果及びその考察

5.1 結果および考察

0°、15°、25°、30°、45°の位置残差、角度残差のヒストグラムを各々図5.1、図5.2、図5.3、図5.4、図5.5に示す。また位置残差をガウス分布でフィットした時の σ の値を位置予測精度と定義し、角度残差をガウス分布でフィットした時の σ の値を角度予測精度と定義しその値を求めた。各々の角度に対する位置予測精度、角度予測精度を表5.1に示す。

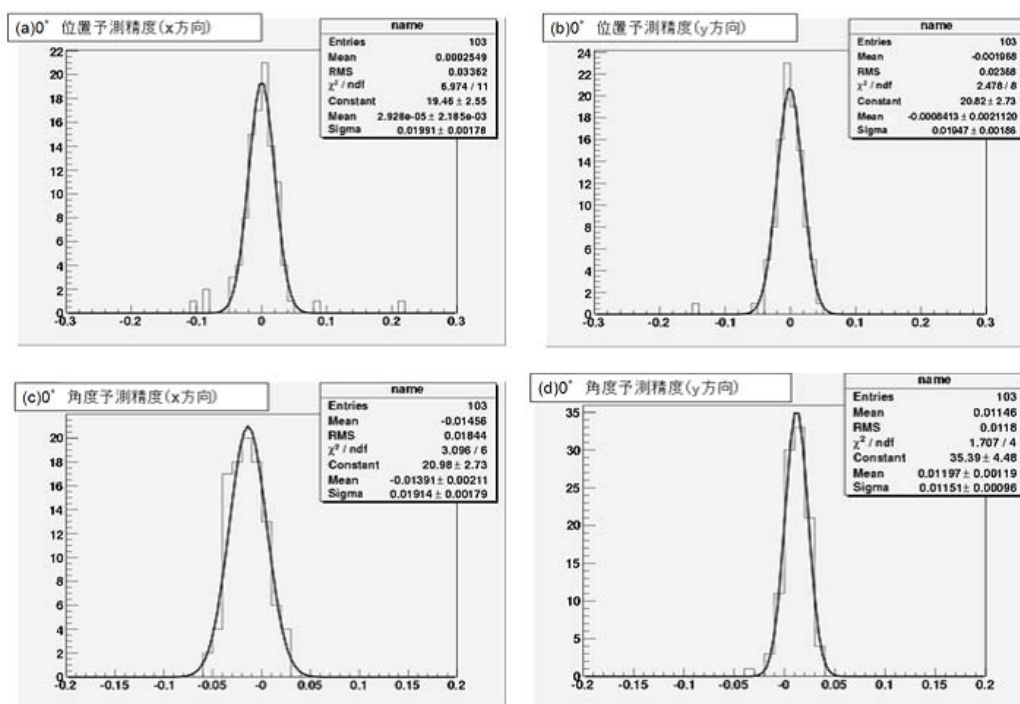


図 5.1: 0°入射トラックの (a) 位置予測精度 (x 方向) (b) 位置予測精度 (y 方向) (c) 角度予測精度 (x 方向) (d) 角度予測精度 (y 方向) (横軸単位は mm)

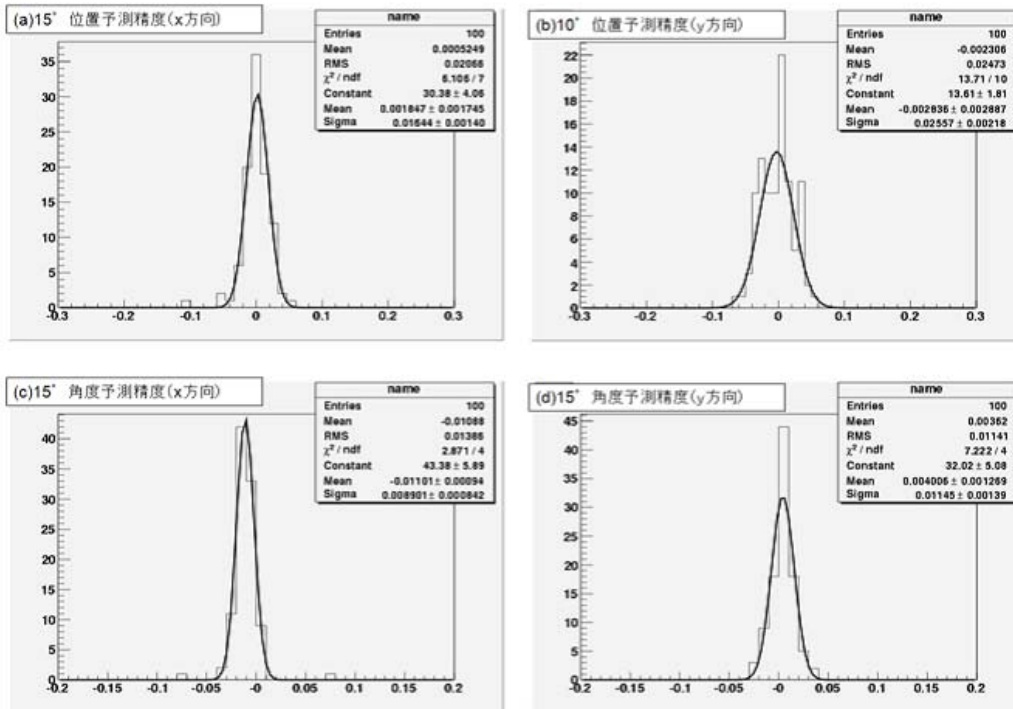


図 5.2: 15 °入射トラックの (a) 位置予測精度 (x 方向) (b) 位置予測精度 (x 方向) (c) 角度予測精度 (x 方向) (d) 角度予測精度 (y 方向) (横軸単位は mm)

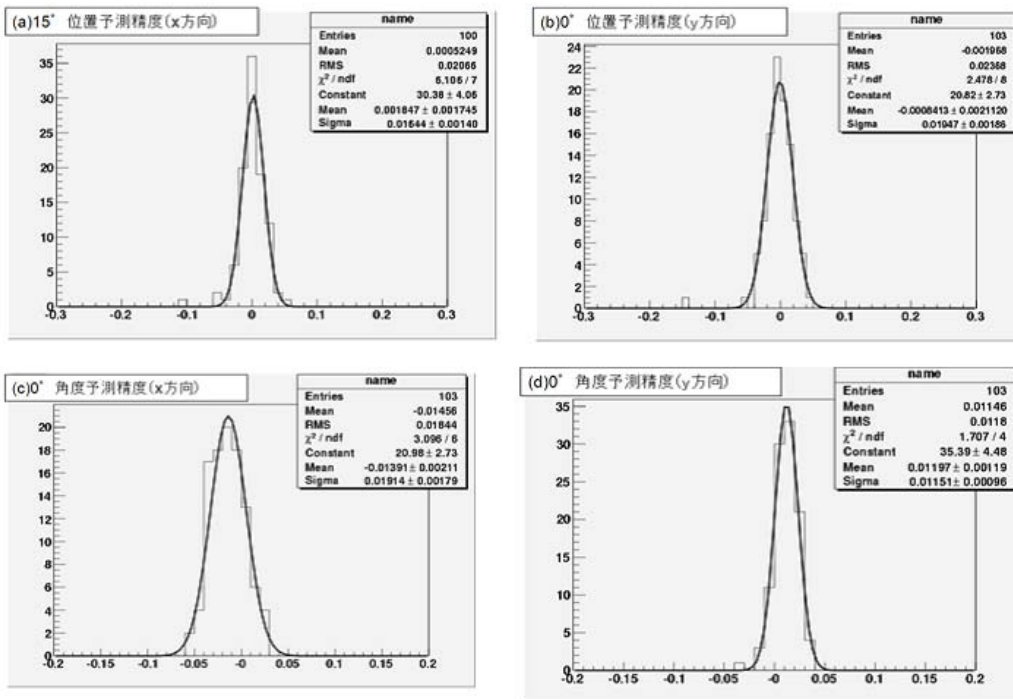


図 5.3: 25 °入射トラックの (a) 位置予測精度 (x 方向) (b) 位置予測精度 (x 方向) (c) 角度予測精度 (x 方向) (d) 角度予測精度 (y 方向) (横軸単位は mm)

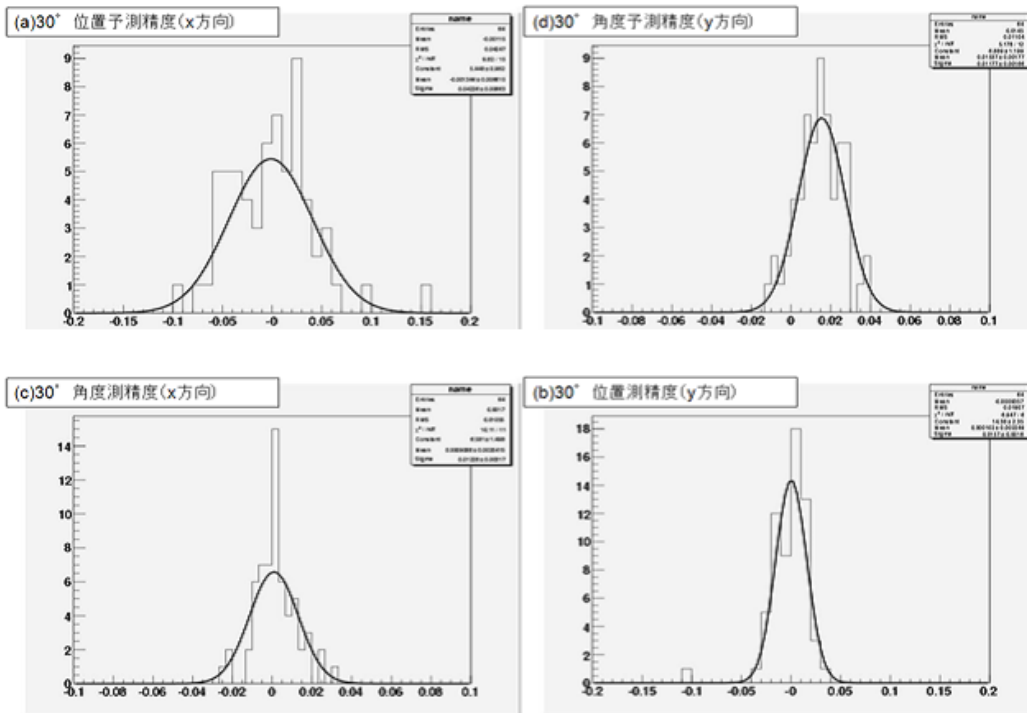


図 5.4: 30°入射トラックの (a) 位置予測精度 (x 方向) (b) 位置予測精度 (y 方向) (c) 角度予測精度 (x 方向) (d) 角度予測精度 (y 方向) (横軸単位は mm)

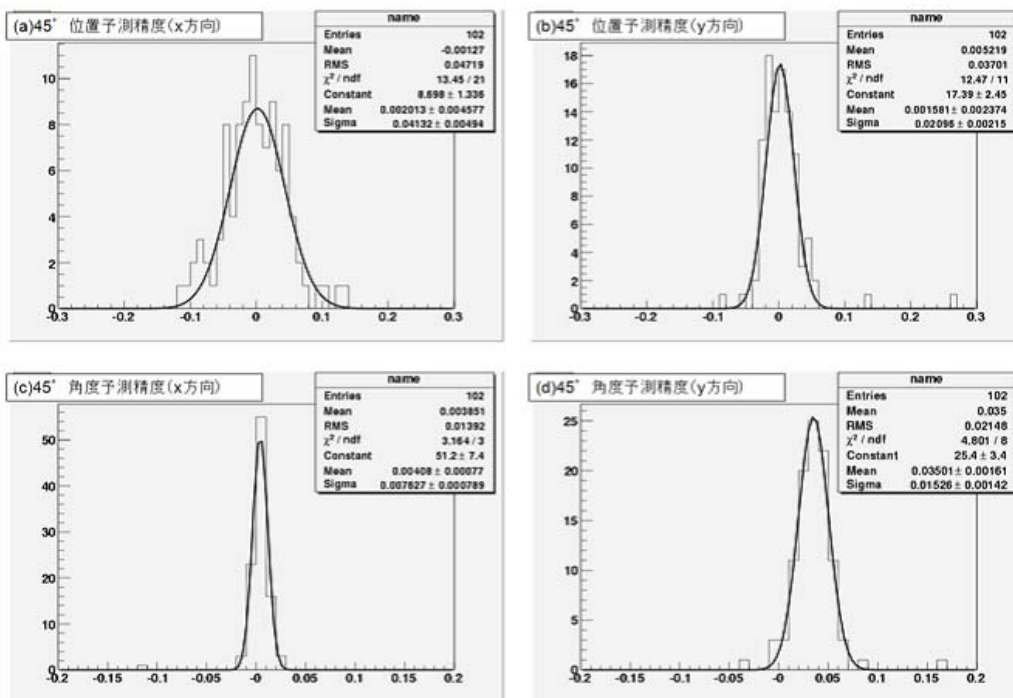


図 5.5: 45°入射トラックの (a) 位置予測精度 (x 方向) (b) 位置予測精度 (y 方向) (c) 角度予測精度 (x 方向) (d) 角度予測精度 (y 方向) (横軸単位は mm)

表 5.1: R78 実験で得られた位置予測精度、角度予測精度

	位置予測精度 [μm]	角度予測精度 [mrad]
x 方向 (0 °)	19.9 \pm 1.8	19.1 \pm 1.8
y 方向 (0 °)	19.5 \pm 1.9	11.5 \pm 1.0
x 方向 (15 °)	16.4 \pm 1.4	8.9 \pm 0.8
y 方向 (15 °)	25.6 \pm 2.2	11.5 \pm 1.4
x 方向 (25 °)	45.4 \pm 6.8	10.6 \pm 0.8
y 方向 (25 °)	26.0 \pm 3.0	13.8 \pm 1.2
x 方向 (30 °)	42.3 \pm 6.6	12.3 \pm 3.2
y 方向 (30 °)	15.7 \pm 1.6	11.8 \pm 1.7
x 方向 (45 °)	41.3 \pm 5.0	7.6 \pm 0.8
y 方向 (45 °)	21.0 \pm 2.2	15.3 \pm 1.4

R78 実験では角度を変えると多くの場合で位置予測精度に関しては約 45 μm 以内、角度予測精度に関しては約 15 mrad 以内であるという結果を得た。これらの値は同様の性能評価実験をシンチレーションファイバーを用いて行った場合の値 (表 5.2) に比べて大幅に向上している [24]。

表 5.2: シンチレーションファイバーの予測精度

	位置予測精度 [μm]	角度予測精度 [mrad]
x 方向	194	44
y 方向	113	25

次に R78 実験より得られた結果より、E07 における予測精度の推定を行う。R78 実験は E07 実験とほぼ同じセットアップであるが、E07 実験での予測精度を求めるためには

- 入射粒子が 140MeV でなく数十 MeV 程度の Ξ^- 粒子
- システムをエマルションムーバーにのせる

の 2 点を考慮しなければならない。ここでエマルションムーバーとはシステムを自動的に移動させてビーム照射位置を変えるための台である。これにより大面積のエマルションにまんべんなくビームを照射することができる。その位置読み出し精度は約 10 μm である [18]。

まず粒子を 140 MeV の陽子からエマルションで静止する数十 MeV の Ξ^- 粒子に変えると、多重散乱の式

$$\theta_0 = \frac{13.6}{vp} \frac{[\text{MeV}]}{z} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left(1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right) \quad (5.1)$$

より多重散乱の効果は4倍程度になる。式(5.1)において θ_0 は散乱される角度のr.m.sであり、 v, p はそれぞれ入射粒子の速度、運動量であり、 $\frac{x}{X_0}$ は散乱長あたりの物質の厚さである。ここで式(4.2)より系統誤差を除いた誤差 $\sigma'_{残差}$

$$\sigma'_{残差} = \sqrt{\sigma_{システムの分解能}^2 + \sigma_{多重散乱}^2} \quad (5.2)$$

において多重散乱の効果をもとにすると、 Ξ^- 粒子に関しても位置予測精度に関しては約 $50 \mu\text{m}$ 、角度予測精度に関しては約 16 mrad という値が得られる。さらにビーム照射中にエマルシオンを動かす台であるエマルシオンムーバの位置決定精度 $10 \mu\text{m}$ を考慮すると、位置予測精度は約 $50 \mu\text{m}$ 、角度予測精度は約 20 mrad となる

位置予測精度の値はDSSDの効率が100%であるとする、予測値に顕微鏡を移動したときに20倍倍率($350 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$)ではほぼ100%の確率で、また50倍倍率($140 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$)では70%の確率で Ξ^- 粒子候補のトラックが観測できることを示している。

また図5.6にある角度のトラックが予測された時に、ダミートラックが発見される $\delta\theta$ mrad内に観測される確率を示す。ここでダミートラックとは予測された候補を探索した場合に得られる真の候補以外のトラックのことであり、 100 mrad の角度予測精度であったE373実験ではその確認に全解析時間の60%が費やされた。一方DSSDエマルシオン混合システムの角度予測精度は約 20 mrad なので $250 \mu\text{m}$ 四方ダミートラックが存在する確率は0.1%である。よってダミートラックの追跡の手間を省くことが可能となり時間の大幅な短縮につながることを期待される。

以上よりDSSDエマルシオン混合システムはE07実験の要求をみたすことが示された。次にDSSD単体での位置分解能を求める。

ここで $\sigma_{システムの分解能}$ は

$$\sigma_{システムの分解能} = \sqrt{\left\{ \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 + \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1} \right)^2 \right\} \sigma_{DSSD分解能}^2 + \sigma_{エマルシオンの分解能}^2} \quad (5.3)$$

ここで、 d_1 はDSSD間の距離で 1.5 mm 、 d_2 の値はエマルシオンDSSD間の距離で 1.4 mm である。これよりDSSDの位置分解能は

$$\sigma_{DSSDの分解能} = \sqrt{\frac{(\sigma'^2_{残差} - \sigma_{多重散乱}^2) - \sigma_{エマルシオンの分解能}^2}{\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 + \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1} \right)^2}} \quad (5.4)$$

と書ける。 $\sigma'_{残差}$ は表0°入射のx方向の位置残差、y方向の位置残差の平均をとって 21.3 、またGEANT4による0°入射した際のシミュレーションの値より $\sigma_{多重散乱}$ は 4.41 とした。これよりDSSDの位置分解能 $11.2 \mu\text{m}$ と求められた。この値は一般にストリップ検出器が持つ検出器のデジタル情報のみを用いた際の位置分解能

$$\frac{\text{ストリップ間隔}}{\sqrt{12}} = 14.4 \mu\text{m} \quad (5.5)$$

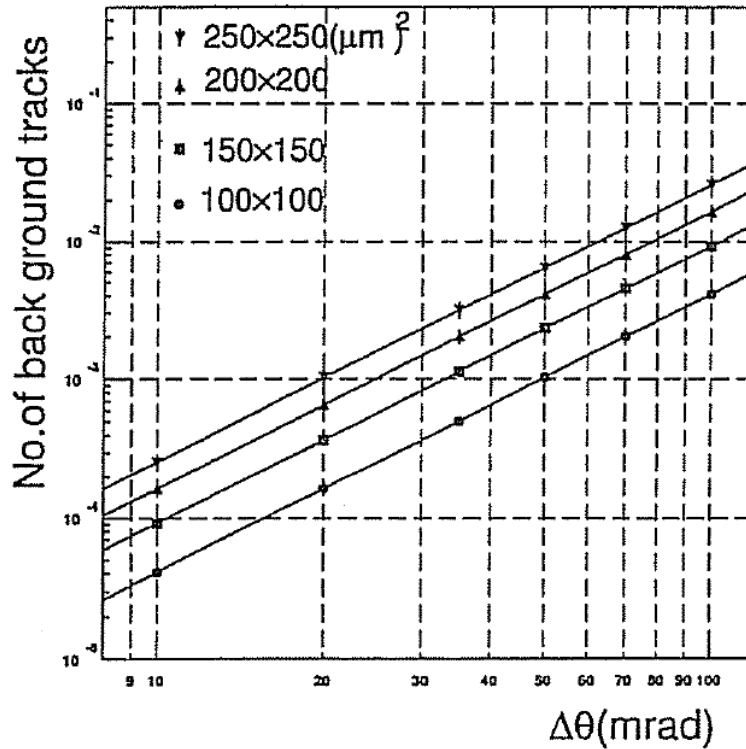


図 5.6: E176 より予測される $\delta\theta$ 内に存在するバックグラウンドトラックの数

よりも良い値となっている。これは DSSD の解析の際にクラスタリングを行ったからである。

次に測定により得られた予測精度と GEANT4 のシミュレーションによる予測精度の比較を行った。シミュレーションのセットアップを図 5.7 に示す。分解能を σ としたガウス分布を用いて DSSD、エマルジョンのヒットポジションをなまして、DSSD 2 枚のトラックによる予測値とエマルジョン中のトラックの残差を求めた。この際、DSSD の位置分解能を $11.2 \mu\text{m}$ 、エマルジョンの位置分解能を $1 \mu\text{m}$ とした。実際の測定同様、残差のヒストグラムをガウス分布でフィットした時の σ の値を予測精度とした。シミュレーションによる予測精度の結果を表 5.3 に示す。

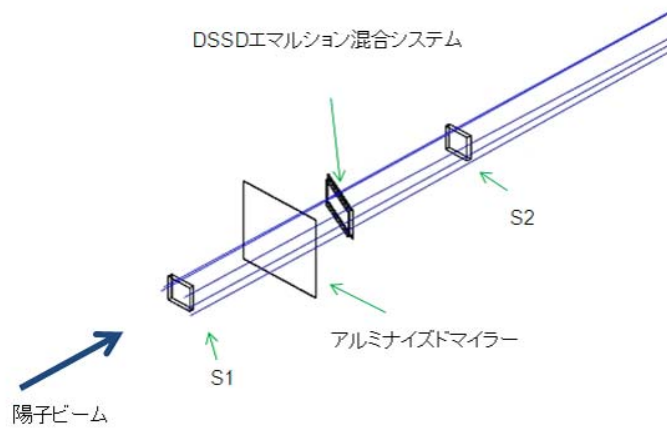


図 5.7: シミュレーションのセットアップ

表 5.3: 得られた位置予測精度、角度予測精度

	位置予測精度 [μm]	角度予測精度 [mrad]
x 方向 (0 °)	20.1 ± 0.8	7.7 ± 0.2
y 方向 (0 °)	20.2 ± 0.5	7.5 ± 0.2
x 方向 (15 °)	21.3 ± 0.8	7.2 ± 0.2
y 方向 (15 °)	20.0 ± 0.6	6.9 ± 0.2
x 方向 (25 °)	19.1 ± 0.6	6.5 ± 0.2
y 方向 (25 °)	21.4 ± 0.7	7.6 ± 0.2
x 方向 (30 °)	18.4 ± 0.5	7.18 ± 0.2
y 方向 (30 °)	19.7 ± 0.6	7.65 ± 0.2
x 方向 (45 °)	15.2 ± 0.5	6.4 ± 0.2
y 方向 (45 °)	21.8 ± 0.6	8.1 ± 0.2

次に位置予測精度、角度予測精度の測定された値、シミュレーションの値の角度依存を図 5.8 に示す。

シミュレーションによれば位置予測精度、角度予測精度ともに回転角度が増えるにつれて、ゆるやかに小さな値になる。

これはエマルジョンに入射する角度が大きいほど予測値の精度が良いということである。表 5.4 に示すように R78 実験の入射粒子である 140 MeV の陽子は多重散乱の効果が小さいため、予測値の精度は DSSD の位置分解能のみで決まるからである。

次に測定値であるが、y 方向の位置予測精度、角度予測精度は誤差の範囲内で同一の値をとっている。シミュレーションよりも大きな値をとっているが、これは式 4.3 で表わされるアライメントによる系統誤差 $\sigma_{\text{アライメント}}$ のうち $\sigma_{DSSD-DSSD}$ が位置調整によって取

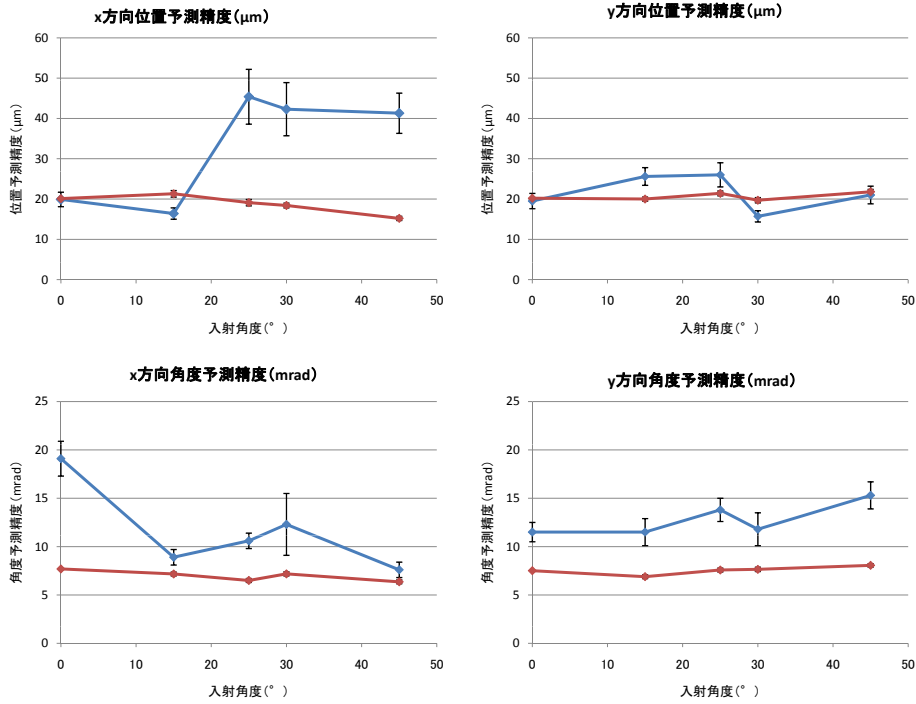


図 5.8: 測定値、シミュレーションの角度依存 (青は測定値、赤はシミュレーション値)

表 5.4: 多重散乱の角度依存性 (μm)

0 °	15 °	25 °	30 °	45 °
4.4 ± 0.2	4.5 ± 0.2	4.7 ± 1.5	5.1 ± 0.2	6.3 ± 0.2

り除かれていないことによる。DSSD-DSSD の位置補正のパラメータには (1)x 方向の平行移動 (2)y 方向の平行移動 (3)z 軸方向の並行移動 dz(4)xy 平面上での回転 θ_{xy} (5)xz 平面上での回転 θ_{xz} (6)yz 平面上での回転 θ_{yz} の 4 種類のパラメータがある。これらのうち前述したように (1)dx と (2)dy の調整はコリメータのヒットパターンをみることにより行った。30 °陽子入射の場合に各々の系統誤差を意図的にシミュレーションに組み込んだ結果を表 5.6 に示す。

表 5.6 より、(1)(2)(3) に比べて (4)(6) が予測精度を悪くするのに大きな寄与をすることがわかった。今回は位置調整のパラメータに (4)(6) を含んでいないので測定結果が実際より大きな値になっていると考えられる。

次に x 方向の測定された位置予測精度には角度間でかなりのばらつきがあるが、0 ° ~ 15 °、25 ° ~ 45 ° の範囲では誤差の範囲内で同じ値を持つ。

x 方向の角度間の位置予測精度の差異には

1. σ 多重散乱 の角度依存性

表 5.5: 得られた位置予測精度、角度予測精度

表 5.6: シミュレーションによる系統誤差のシミュレーション ((4) の角度予測精度は χ^2 の値が大きいため除いている。)

	xpos[μm]	ypos[μm]	xang[mrad]	yang[mrad]
系統誤差なし	15.2	21.8	6.4	8.1
(1) dx = 200 μm	15.7	23.0	6.1	8.5
(2) dy = 200 μm	16.8	23.5	5.8	7.7
(3) dz = 200 μm	17.4	23.9	6.2	8.3
(4) $\theta_{xy}=2^\circ$	38.7	26.7	-	-
(5) $\theta_{xz}=2^\circ$	15.0	19.8	6.2	7.2
(6) $\theta_{yz}=2^\circ$	58.0	37.0	5.1×10	5.2×10

2. σ_{DSSD} の位置分解能の角度依存性

3. $\sigma_{\text{アライメント}}$ の変化

4. 除去しきれない系統誤差

の原因が考えられる。1. について、角度が大きくなると予測精度が悪くなる原因として多重散乱の効果がある。表 5.4 にシミュレーションによる多重散乱の角度変化を示す。結果入射角度が増えるにつれ多重散乱の度合いは増えるが、その増加率は小さい。よって多重散乱は主原因ではない。

2. について位置予測精度の角度依存性は DSSD の位置分解能の角度依存性によるものであるという可能性がある。これは解析時に用いたクラスタリングの手法による。入射陽子がシリコンに落とすエネルギーはランダウ分布に従う。よって角度が大きくなり、クラスタリングサイズおよび落とすエネルギーが増えると、今回用いたエネルギーを重みとして線形に掛け合わせて重心を求める手法は必ずしも妥当ではないという可能性がある。DSSD を少なくとも 3 枚を用意してさまざまな角度でビームに当てて位置分解能の角度依存性を調査することが必要である。この効果を検証するのはこれからの課題である。

3. の $\sigma_{\text{アライメント}}$ の変化であるが、これは $\sigma_{DSSD-DSSD}$ が主たる原因である。測定は 0° 、 15° 、 25° 、 45° の順番でセットアップを変えたので、 25° にセットアップを変える時に何か不確定な系統誤差が生じた可能性がある。DSSD-DSSD 間の位置調整を行うか、今回解析を行った #7D-6 のエマルション以外のエマルションを解析することによってこの原因の妥当性が明らかになる。

4. の系統誤差の不確定要素の一つにエマルションの伸縮によるものがある。エマルションはゼラチン物質であり、現像した後も温度、湿度に伴い伸縮する。一般にこの効果を定量的に評価することは困難であるが、今回用いた薄型のエマルションではその効果は小さ

いとされる。

以上より、シミュレーションとの不一致を検証し、また真の予測精度を求めるには

- DSSD のパラメータを含めた位置調整を行う。
- DSSD の分解能の角度依存性を調べる。
- 統計を上げる。

必要があるが、これはこれからの課題である。

第6章 画像処理を用いた位置較正手法

6.1 カウンター・エマルション実験の位置較正手法

エマルションは $1\ \mu\text{m}$ より良い位置分解能を持つが、このエマルション本来の性能を発揮しようとするならばカウンター、エマルションの位置較正を高精度で行うことが重要である。通常カウンター・エマルション混合システムにおいて最初の位置較正は、カウンターとエマルション同時にマーカーを打つことによって行う。E373 実験ではこの目的のために X 線ストロボを用いた。E07 実験ではこれに代わりビームを用いた手法を検討しているが、これについては付録 A で述べる。

一方 R78 実験ではこれに類する工夫がなされなかったため、最初期の DSSD、エマルション間の位置較正に多くの時間を要した。解析時に用いた手法として、DSSD による予測を参照せずに約 $3\ \text{mm}$ 四方の領域でトラックサーチを行って得た「エマルションのヒットパターン」を「DSSD による予測のヒットパターン」と見比べることを複数回繰り返すことにより最初の位置較正を行った (no-predicted search)。この手法では最初期の位置較正を行うのに 1.5 か月の時間を要した。

また式 (4.3) で表わされる $\sigma_{\text{アライメント}}$ の内、顕微鏡にセットアップする際の系統誤差が大きいので、顕微鏡にエマルションを設置し直す度に上述の作業を行う必要がある。また上記の位置較正手法はシステムの角度依存性を考慮して 0° トラックを用いて行うのが適当であるが、 0° トラックは顕微鏡では点として観察されるためエマルションの点状のバックグラウンド (Fog) の中から肉眼で見つけるのは非常に困難である。そこで顕微鏡写真を計算機に取り込み、その画像を計算機で処理することによって 0° トラックを全自動で認識して、それを位置較正に用いる手法を考案した。

6.2 画像処理による 0° トラック認識

エマルション中のトラックを画像認識する手法は既に確立されており [27]、E373 実験でもプレディクションを基にした全自動トラックサーチが行われた [15]。それらの手法ではプレディクションの角度ですらしながらエマルションの断面図を重ね合わせて、最も濃くなった部分をトラックとするというアルゴリズムが用いられる。しかしこの手法ではトラックの認識は顕微鏡をハードウェアで高度に制御しつつ行う必要がある。

そこで、今回は一定領域の顕微鏡写真をデジタル画像データとして計算機上に取り込み、画像データにソフトウェア的な処理を施すことによって0°トラックを探索する手法を試みた。尚、画像処理プログラム作成にはIntel社により提供されている画像処理ライブラリであるOpenCV(Open Source Computer Vision Library)を用いた[28]。

以下、トラックの認識率を議論するために

$$R_t = \frac{N_t}{N_{all}} \quad (6.1)$$

$$R_f = \frac{N_f}{N_{all}} \quad (6.2)$$

の2種類の量 R_t 、 R_f を定義する。ここで N_t は正しく認識した0°トラックの数であり、 N_f は誤って認識したトラックの数である。また N_{all} はエマルジョンに記録された全ての0°トラックの数である。

このように定義すると R_t は「ある0°トラックを正しく認識できる確率」となり、 R_f は「0°トラックでないものを認識してしまう確率」となる。また R_t が1に近ければ近いほど、また R_f が0に近ければ近いほど良いアルゴリズムということになる。今回は肉眼でのサーチでは $R_t = 1$ 、 $R_f = 0$ であると仮定する。従って肉眼でサーチして発見された0°トラックが真にエマルジョンに記録されたトラックに等しいとし、 N_{all} は肉眼でサーチした場合のトラック数となる。

尚、以降「DSSDによる予測がトラックを正しく認識する確率」を $R_{t:prediction}$ 、「誤って認識する確率」を $R_{f:prediction}$ とする。また「画像処理による自動認識によってトラックを正しく認識する確率」を $R_{t:auto}$ 、「誤って認識する確率」を $R_{f:auto}$ と表記する。

最初期に位置較正を行うためには、0°トラック認識するアルゴリズムは R_f 、すなわち後に定義する「トラック候補が偶然にトラックと認識されてしまう確率」 $R_{accidental}$ が非常に小さいことが必要である。また最初の位置合わせを行うには $R_{t:auto}$ は $R_{t:prediction}$ と同等、もしくはそれ以上の値である必要がある。以降用いる記号の定義一覧を表6.1に示す。

以下にこれらの条件を満たすように考案した0°トラック認識アルゴリズムについて述べる。

6.3 直線認識のアルゴリズム

6.3.1 トラック候補の選出

画像処理の第一段階として、まず二値化をする必要がある。すなわち明度にある閾値を設けて、それより低いかあるいは高いかでトラックと背景を分けなければならない。二値化を行う際に

1. 密度の不均一さによる明度の不均一性

表 6.1: 記号の定義

記号	定義
N_t	正しく認識したトラック数
N_F	誤って認識したトラック数
N_{all}	エマルジョンに記録された全てのトラック数
$N_{candidate}$	pre process を行った後のトラック候補数
N_{cell}	画像を区分けしたセルの数
$N_{prediction}$	DSSD で予測されたトラック数
N_{data}	残差を求めるのに用いることのできるトラック数
R_t	正しく認識する割合
R_f	誤って認識する割合
$R_{accidental}$	偶然トラックと認識される割合
$R_{t:prediction}$	DSSD によって正しく認識される割合
$R_{f:prediction}$	DSSD によって誤って認識される割合
$R_{t:aujto}$	画像処理によって正しく認識される割合
$R_{f:prediction}$	画像処理によって正しく認識される割合

2. 露光されていない AgBr が現像の際銀として析出する不均一な黒い点 (Fog)

の二点を考慮することが重要であり、これらを除去するのに今回は以下の手法を用いた (pre process)。

まず 1. に関しては、元画像からぼかし画像を作りその画像を元画像から引いてやるという処理を行った。これにより場所による明度の差異が無くなり、一定の濃淡を持つ画像が得られた (図 6.1)。

次に 2. に関しては以下の 4 段階の処理を行った。また二値化済みの画像に各処理を適用した図 6.2 に示す。

• グループ化

ある閾値を用いて画像を二値化した後、ある白色ピクセルに関して隣接する 8 ピクセルの中に同じ白色のピクセルがあればこれらを同一グループの要素とする。この処理により、画像中の興味ある領域 (ROI) をまとめて処理できるようになり、ROI の重心、面積、周囲長を返すことが可能となる。

• ノイズ除去

クロージング処理とは収縮処理後、膨張処理を行うことで黒い背景から白い点状のノイズを除去する手法である。詳しい説明は [29] にある。

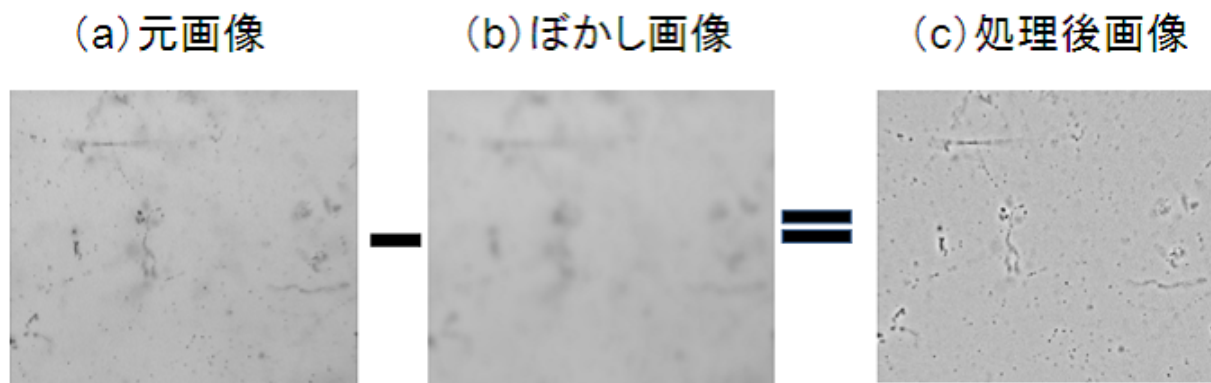


図 6.1: 明度不均一性を除くための処理

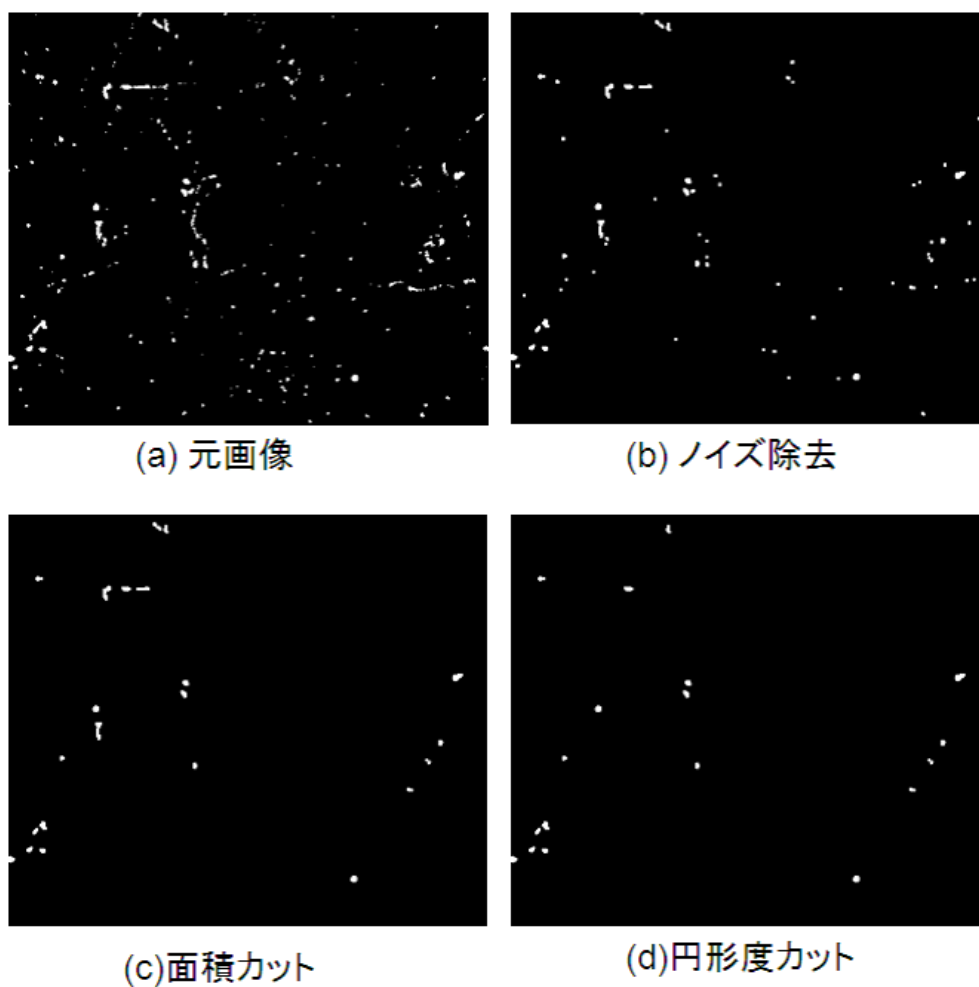


図 6.2: Fog 除去のための処理

- 面積によるカット

0°トラックの面積は R78 実験では約 $10 \mu\text{m}^2$ であった。そこで今回は面積について $2.24 \mu\text{m}^2$ から $15.0 \mu\text{m}^2$ というカットをかけた。これらはそれぞれ 20 ピクセルから 200 ピクセルに対応する。

- 円形度によるカット

円形度とは

$$\mathfrak{R} = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (6.3)$$

で定義される量である。尚、 S は図形の面積であり、 L は図形の周囲長である。 \mathfrak{R} は真円では 1 となり、複雑な図形ほど小さくなる。今回は $0.7 < \mathfrak{R} < 1.3$ というカットを適用した。

これらのカットを順番に適用し、最終的に残った点をトラック候補とした。

6.3.2 直線トラックの認識

0°トラックはエマルジョン中で深さ方向に焦点を変えてもほとんど同じ位置に存在する点状のトラックとして観測される。その特性を用いて以下の方法で 0°トラックの認識を行った。

最初にエマルジョン約 $4\text{mm} \times$ 約 1.5mm の領域の顕微鏡写真を自動で計算機上に取り込んだ。顕微鏡の一視野は $140 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ であり、深さ方向に $8 \mu\text{m}$ 毎に焦点を変えながら 5 層分で合計 $30 \times 15 \times 5 = 2250$ 枚の画像が得られた。

各々の画像につき前述の pre process を行いトラック候補を選出した後、画像を 20 ピクセル四方のセルに区分けしてトラック候補が存在するセルにフラグを立てた。ここでセルの一辺の 20 ピクセルは $15 \mu\text{m}$ に相当する。一つのセルに関して深さ方向に 5 枚の画像を調べた時に 5 枚ともにフラグが立っているセル、もしくは 4 枚にフラグが立っておりかつもう一枚に関しては隣接する 8 セルにフラグがたっているセル内に 0°トラックが存在するとした。一連の処理の例を次ページの図 6.3 に示す。

6.4 結果及び考察

二値化を行った際の閾値を変化させた時の、 R_t 、 R_f 、 $R_{accidental}$ の値の変化を図 6.4 に示す。

ここで $R_{accidental}$ はトラック候補でない点が偶然、0°トラックと認識されてしまう確率で

$$R_{accidental} = \left(\frac{N_{candidate}}{N_{cell}} \right)^{N_z} \times (9 \times 2 - 1) \times N_{capture} \quad (6.4)$$

で定義する。ここで

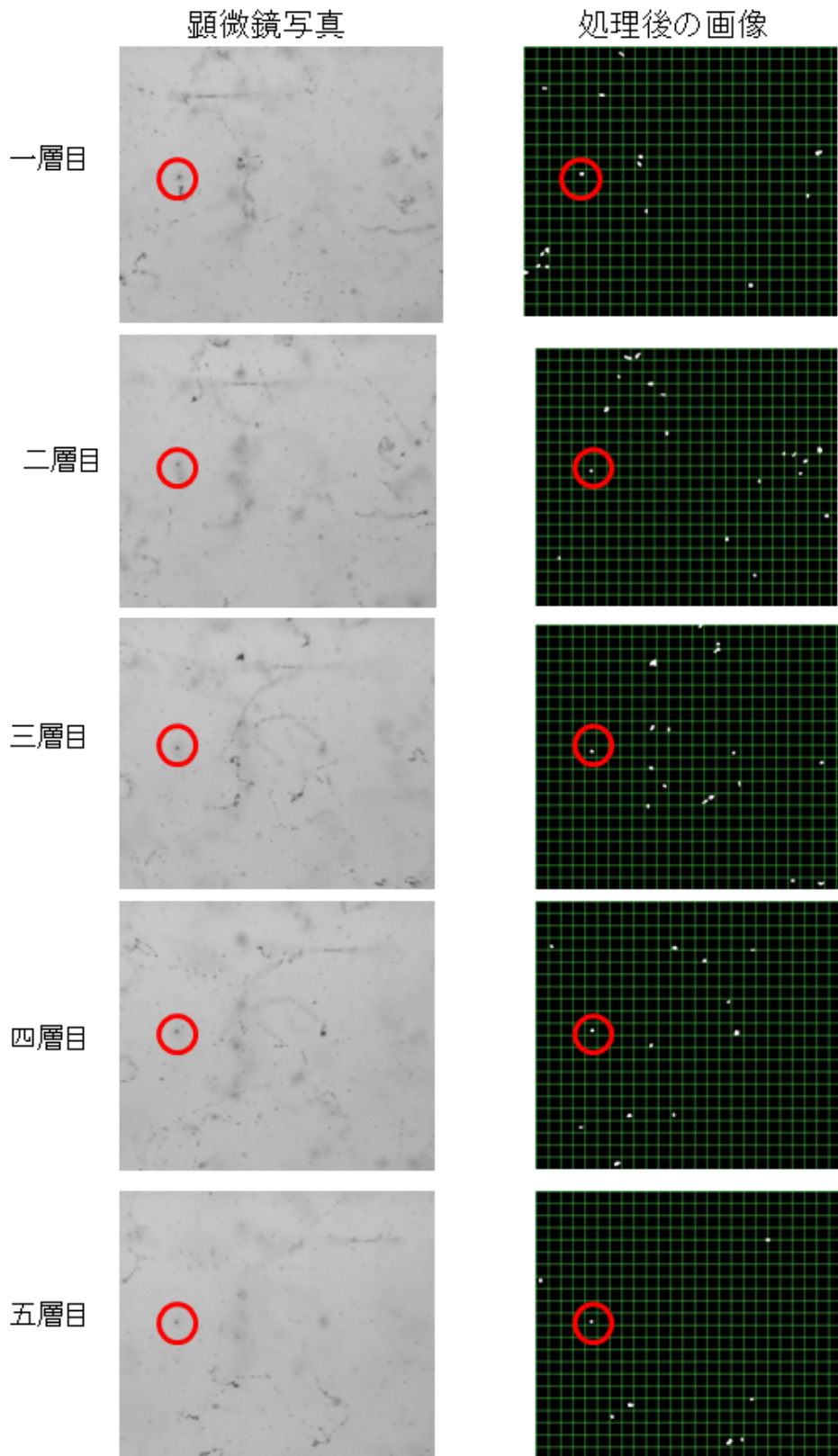


図 6.3: 認識アルゴリズム (赤丸が0°トラック)

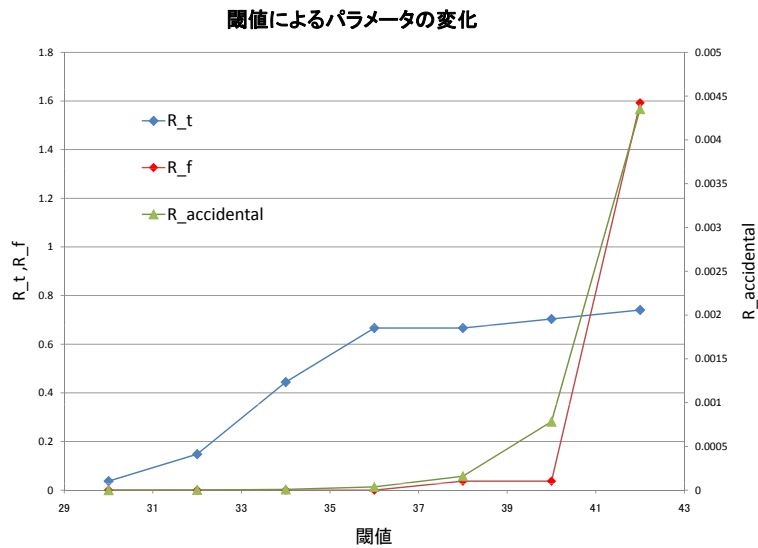


図 6.4: R_t 、 R_f 、 $R_{accidental}$

- $N_{candidate}$ は一画面上に含まれるトラック候補の数
- N_{cell} は一画面を区分けしたセルの数で、今回用いたアルゴリズムでは 550 セル
- N_z は z 軸方向の層数であり、今回用いたアルゴリズムでは 5
- $(9 \times 2 - 1)$ は一つの候補に対してトラックと認識されうる場合の数
- $N_{capture}$ は取り込んだ画像数で今回は 2250

である。

図 6.4 のように R_t は閾値を上げていくにつれて一定値になるのに対し、 R_f は閾値を上げていくとある地点で急激に増加することが見て取れる。従ってこのアルゴリズムは R_f を低くするようにパラメータを設定することが容易であるという利点がある。具体的には $R_{accidental}$ を一定領域サーチする毎に確認し、値が急激に大きくなれば閾値を下げてその領域のサーチをやり直すということを行う。

次に約 4 mm × 約 1.5 mm の範囲でのこの領域での予測と、画像認識トラックの比較を行う。

図 6.5 に (1) 肉眼で確認されたトラック (2) 閾値 38 で画像処理で認識されたトラック (3) DSSD による予測トラックのヒットポジションの分布図を示す。また表 6.2 に DSSD の予測値による N_t 、 N_f 、 R_t 、 R_f 、画像認識の N_t 、 N_f 、 R_t 、 R_f の値を示す。

R_t 、 R_f の値は DSSD の予測による値と画像認識による値とでほぼ同じであり、同様の陽子トラックのパターンを見出すことが可能である (図 6.5 の黄色部分)。これを用いて最初の対応付けを短時間で行うことが可能になった。

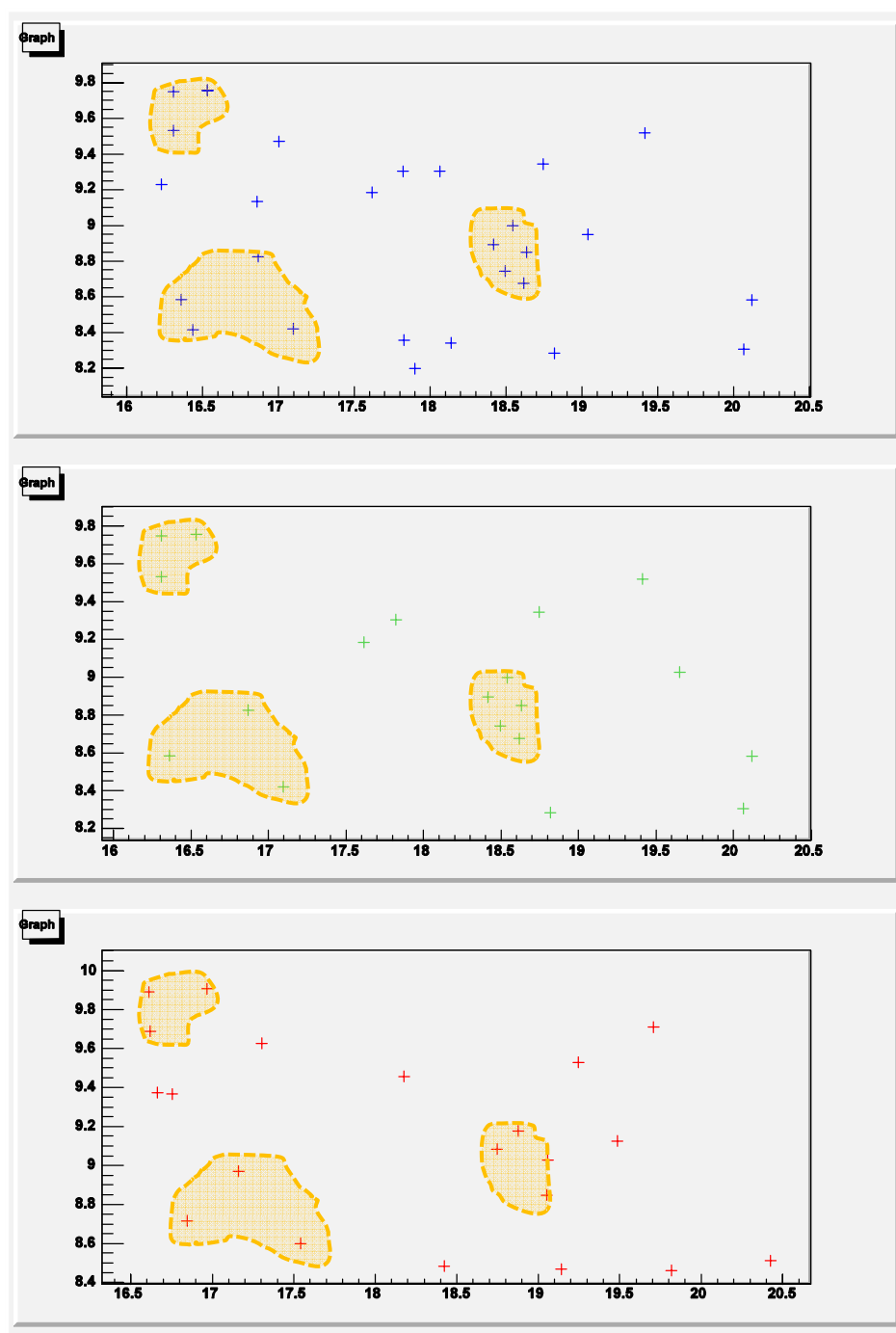


図 6.5: 上段から (1) 肉眼で確認されたトラック (2) 閾値 38 で画像処理で認識されたトラック (3) DSSD による予測トラックのヒットポジション。黄色部分は特徴的なビームパターン。

表 6.2: 予測値の N_t 、 N_f 、 R_t 、 R_f 、画像処理の N_t 、 N_f 、 R_t 、 R_f の値 (N_{all} は 27)

	予測	画像処理
N_t	19	18
N_f	1	1
R_t	0.70	0.67
R_f	0.037	0.037

次に 0 °トラック認識の応用として、DSSD との位置残差、角度残差に関する統計を上げること考える。R78 実験において 0 °トラックのトリガー数、すなわち DSSD によって予想された 0 °トラックの数 $N_{prediction}$ は表 3.2 より 18540 である。尚 $N_{prediction} = N_{t:prediction} + N_{f:prediction}$ である。予測値と画像処理によるトラックが対応づけられる数 N_{data} は、

$$N_{data} = N_{all} \times R_{t:prediction} \times R_{t:auto} \quad (6.5)$$

$$= \frac{N_{prediction}}{R_{t:prediction} + R_{f:prediction}} \times R_{t:prediction} \times R_{t:auto} \quad (6.6)$$

ここで誤差は

$$\begin{aligned} \delta N_{data} = N_{data} & \left\{ \left(\frac{R_{f:prediction} R_{t:auto}}{(R_{t:prediction} + R_{f:prediction})^2} \right)^2 \delta R_{t:prediction}^2 \right. \\ & + \left(\frac{R_{t:auto}}{R_{t:prediction} + R_{f:prediction}} \right)^2 \delta R_{t:prediction}^2 \\ & \left. + \frac{R_{t:prediction} R_{t:auto}}{(R_{t:prediction} + R_{f:prediction})^2} \delta R_{t:prediction}^2 \right\}^{0.5} \end{aligned} \quad (6.7)$$

と書ける。

表 6.2 より誤差を含めて

- $R_{t:prediction} = 0.70 \pm 0.017$
- $R_{f:prediction} = 0.037 \pm 0.0070$
- $R_{t:auto} = 0.67 \pm 0.081$

となるので、 N_{data} として 11798 ± 315 個のデータが得られると期待できる。これは肉眼によってサーチした場合のデータ数の 100 倍であり、予測精度または DSSD の分解能を現在の値の 10 倍の精度で求めることが可能になる。現在は R_t を高め、さらに広範囲をサーチするためのアルゴリズムを開発中である。

6.5 E07実験への応用

6.1で述べた通り、カウンター・エマルジョン混合システムを用いた実験で最も困難な点はカウンターによる予測の座標と、エマルジョンの座標の最初の対応付けである。付録Aで示すように、J-PARCの実験では陽子ビームを用いた位置較正手法を検討している。しかしこの方法を用いる際に用いるスリットのサイズは工作上的限界より、数百 μm 以上に限られる。もしスリットを用いずに粒子のトラックをDSSDとエマルジョンの位置較正に用いることができれば、数十 μm の精度で最初の位置較正を行うことが可能となる。具体的な手法はまだ検討中であるが、位置較正に用いる粒子の候補としてはエマルジョン中のトラックが濃く現れる、低エネルギー陽子もしくは ^3He が挙げられる。

ある一定の領域にまんべんなく粒子を入射し、その領域に対してプレディクションとエマルジョンの位置較正パラメータを決定してやることにより、エマルジョン全領域での最初期の位置合わせのパラメータの指標として用いることができる。

またエマルジョン間の位置較正にも 0° トラックが利用できる。E373の解析ではエマルジョン間のトラックのつながりは肉眼で行っていた。反応を起こさなかった K^- ビーム粒子を自動で認識し、そのビームパターンをエマルジョン間で自動的にマッチさせることが可能になれば解析速度はおよそ3倍になると見つめられる。今回作成したプログラムでは最小電離粒子の 0° トラックは、その点の小ささのために認識できなかったが、6.1で述べたE373実験で使用されている手法を用いれば K^- ビームのマップを作成し、エマルジョン間の位置較正に用いることは原理的には可能である。

これらの手法はいずれも現在検討中のものであるが、実現した暁には解析時間を大幅に短縮できると期待される。

第7章 まとめと展望

J-PARC-E07 実験で用いる DSSD エマルジョン混合システムの位置予測精度、角度予測精度を求めるため、RCNP において性能評価実験を行った。J-PARC 実験に即したセットアップで陽子ビームを角度を変えて入射し、DSSD2 枚によるエマルジョン中のトラックの予測精度を測定した。その結果、位置予測精度に関しては $50 \mu\text{m}$ 以内、角度予測精度に関しては 20 mrad 以内という結果が得られた。これは J-PARC 実験の要求を十分満たす値である。また DSSD の位置分解能として $11.2 \mu\text{m}$ という値が得られた。次の段階としてはダイヤモンドターゲット-エマルジョン間、DSSD-エマルジョン間等のパラメータを変化させてシミュレーションを行うということがある。準自由反応 $p(K^-, K^-)\Xi$ による Ξ は非常に寿命が短いため、できるだけダイヤモンド標的とエマルジョンを近づけたい。しかし DSSD による予測分解能を上げるためにはできるだけ DSSD 間を離れた方が良い。E07 実験までにシミュレーションでこれらの最適値を求める必要がある。

尚、R78 実験では測定されたトラックの予測精度がシミュレーションと合わないという結果になった。この理由として検証法として (1)DSSD のパラメータを含めた位置調整を行う。(2)DSSD の分解能の角度依存性を調べる。(3)統計を上げる。が挙げられる。

また画像処理技術を用いて 0° 入射トラックを自動的に認識する手法を開発した。約 65% の認識率が得られ、R78 実験の最初の位置較正の時間を短縮することが可能になった。これからの課題としてトラック認識アルゴリズムをより確かなものとするとともに、R78 のエマルジョン中で肉眼で対応付けの 100 倍である約 10000 個の 0° トラックの認識を試みる。また E07 実験の位置較正手法に利用する手法も検討中である。

謝辞

この修士論文を書くに当たって本当に多くの方にお世話になりました。

今井憲一教授は私がストレンジネス物理学の研究に携わるきっかけを与えて下さいました。また R78 実験を始め、多くの実験の機会を与えて下さいました。また、研究に行き詰っているときにはいつも声をかけて頂き、有益なヒントを下さいました。

私の指導教官である永江知文教授はいつも私のことを気にかけて下さいました。本論文に関する有益なアドバイスをいくつもいただきました。またチェンバーの製作にかかわる機会を与えて下さり、その中で得られた経験は非常に貴重なものでした。

谷田聖助教には研究生活、私生活において頭にも体にも栄養を与えていただきました。実験手法、物理の基礎にかんする氏との議論の中で生まれたアイディアは数知れません。本修士論文を仕上げるにあたってもお忙しい中、昼夜を問わず相談に乗っていただきました。本当にありがとうございました。

村上哲也助教には研究生活を送る上で様々なアドバイスをいただき実験物理学者としての姿勢を教えてくださいました。また何か問題が起こった時には一番頼りになる存在でした。

また常見俊直博士は多くの方とふれあう機会を与えて下さいました。また研究、特に画像処理に関してはお世話になりっぱなしで、行き詰った時に答えて下さる的確なアドバイスは非常にありがたかったです。また本論文に関するもお忙しい中非常に丁寧な添削をしていただきました。

また同研究室の早田尚史さんにはシミュレーション、画像処理、実験技法について、また E07 実験に関して非常に多くの知識を与えて下さいました。トリガーの作り方等、実験を共に行う中で教えていただいたことはあらゆる場面で応用することができました。

Joseph Parker さんには R78、実験に参加していただき、準備不足の中でケーブル等の便宜を図っていただきました。

銭広十三さんは研究に関する事項以外にも、公私にわたる相談に乗っていただきました。行き詰っているときに銭広さんのおおらかな人格に何度もすくわれました。庄司幸平さんには DAQ、プログラムをはじめ多くのことを教えて頂きました。出張から帰ってきた庄司さんとの会話の中で、一人で数か月悩んだことが一瞬で解決することもありました。

關義親さん、大樂誠司さんは研究生活を楽しいものに変えてくれました。お酒の飲み方を教えてもらいました。

廣瀬昌憲 さんにはR78 実験をはじめ実験に参加していただきました。いつも最後まで起きているタフネスさにはいつも驚かされました。

同じ回生の池田真也君、唐津謙一君、平岩聡彦君、吉田晃君のおかげで研究生活を楽しく過ごすことができました。君たちが同回生でよかったです。

修士1回の胡子昇一郎君、中西怜央奈君、中村克朗君、林勇治君、森津学君にもエマルションサーチ等の作業を手伝っていただきました。私一人で行っていた時の数倍の解析速度になり、本研究の結果を出す上で、非常に大きな役割を果たしてくれました。同じストレンジネス物理学を研究する林君、森津君には特にお世話になりました。実験に関する両氏との議論は私にとって非常に有益でした。また事務作業等も受け持ってください、非常にありがたかったです。

また現在社会でご活躍されている、先輩でありかつ良き友人である上垣内さんには昨年度本当にお世話になりました。修士一回時、原子核実験の知識が全くなかった私に実験の基礎を丁寧に教えてくださいました。上垣内さんの存在は常に私の目標でした。

岐阜大学では仲澤和馬教授には研究会、実験を通じてエマルションの魅力等、様々なことを教えてくださいました。またR78 実験、R80 実験に参加する機会を与えて下さいました。鵜養美冬博士にはチェンバー修理等でいろいろお世話になりました。またKEK にいるときはいつも食事に誘って下さり、娯楽の少ない中で唯一の楽しみでした。長谷川麻実さん、両角祐樹君にはご自身の卒業研究でお忙しい中、突然の訪問にも快く応えていただきました。また現在、社会でご活躍されている久保伸也さんはR78 実験ではエマルションの現像等を担当してくれました。R78 実験では欠かせない存在でした。

KEK にいる時には高橋俊行准教授に非常にお世話になりました。仕事の遅い私を見守ってくれ、要所で適切なアドバイスを頂きました。また高橋智則さんにはKEK での生活の大半をとともに過ごしプログラム、チェンバーの基礎に関して多くのことを教えていただきました。京都から一人でKEK に滞在していた私にとって頼れる先輩として非常に心強かったです。

東北大学の田村裕和教授は研究会等を通じて非常に興味深いお話を聞かせていただきました。また東北大学にお邪魔した時はいつも声をかけて下さいました。三輪浩司 助教にはgeant4 のシミュレーションをはじめ非常に多くのことを教えていただきました。東北にお邪魔した際は送り迎えまでしてもらってありがとうございました。白鳥昂太郎さんには年の近い先輩として研究会等で色々とお話を聞いて下さいました。

理研の外川学さんはDSSD のアナライザを書いていただきました。アナライザは非常に明確な内容であり、拡張するのが容易でした。博士論文作成という非常にお忙しい中、SSD の動作法に関してつきっきりで指導していただきました。おかげで短期間でSSD を扱うことができるようになりました。それだけでなく、実験に対する姿勢等も教えていただきました。

核理研の石川貴嗣助教は実験に関して多くのサポートをしていただきました。ケーブルの長さの測り方、ビームのレートの上げ方等、普段は聞けないお話も多く聞かせていただ

き非常に役に立ちました。

RCNP の與曾井優准教授はセンターで実験するときにはいつも参加してくれて有益な助言をいただきました。R78 実験、R80 実験の際、PMT、ケーブルをはじめ様々な実験器具を快く貸していただきました。

これらの方々以外にも、数えきれないの方々にご協力していただきました。その触れ合いの中で得られた経験全てが私の研究を進める原動力となりました。

最後に素直でない私をいつも陰ながら心配し、励ましてくれた祖父母、叔父叔母、そして父母、姉に最大限の感謝の気持ちを送ります。

皆さん本当にありがとうございました。

付録A ビームを用いた位置較正の手法 (R80実験)

カウンター・エマルジョン混合システムでは、顕微鏡での探索を始める前にカウンター系の座標とエマルジョンの座標を対応付けなければならない。過去の実験ではカウンター (E176 実験では SSD、E373 実験ではシンチレーションファイバーバンドル)、エマルジョンと同時に細いスリットを通った X 線ストロボを照射し位置較正用のマーカをつけることにより位置較正を行った。しかしこの手法には X-ray ストロボを設置、照射する時間が必要であり、高純度の K^- ビームを用いる J-PARC 実験の場合はこの時間は全ビームタイムの 2 割を超える可能性がある。またターゲット周辺は Ge 検出器をはじめ多くの検出器が設置してあり、非常に重い X 線ストロボを設置する空間も限られる。

そこで J-PARC 実験では位置較正用のために低エネルギー陽子ビームをスリットを通して、DSSD、エマルジョン混合システムに入射してマーカをつける手法を検討している。これにより、位置較正のためのマーカをつける手間、時間を大幅に短縮できると期待できる。また X 線を用いた手法では上流の薄型エマルジョンにのみマーカが残ったが、ビームを用いることにより厚型エマルジョンにもマーカをつけることができる。これによりエマルジョンスタック全体の位置較正が可能になる。またビームの広がりによりエマルジョンの順番の区別をつけることも可能になる。

我々はビームを用いた位置較正を検証するために 2007 年度 RCNP の H コース散乱槽下流の陽子ビームを用いてテスト実験を行った (R80 実験)。セットアップを図 A.1 に示す。

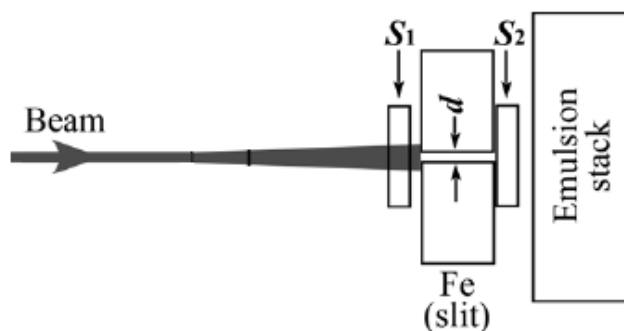


図 A.1: r80 実験のセットアップ

ビーム上流からシンチレーション検出器 S1, スリット、シンチレーション検出器 S2 エ

マルシヨンの順番に配置した。S1のS2のコインシデンス数を見て照射量を決定した。エマルシヨンはJ-PARCで用いる新型のエマルシヨンを用了。薄型エマルシヨンプレート(プラスチック支持板の両側に0.1mm)、厚型エマルシヨンプレート(0.05mmプラスチック支持板の両側に0.45mm)×12枚を1モジュールとして、スリットの大きさ、ビーム照射密度を変えて、マーカーとして最適な条件を探した。ビームスリットは一辺が、0.3、0.5、1.0 mmの3種類を用了、ビーム照射密度は0.5, 1.0, 5.0, 10.0 × 10⁵ 個/mm²の4種の条件で照射を行った。

現在エマルシヨンの現像を終え岐阜大学において解析中である。一例としてスリット幅を変えた際のマーカーの顕微鏡写真を図A.2に示す。エマルシヨンにマーカーが記録され、スリットの幅によりマーカーの大きさが変化することが見て取れる。

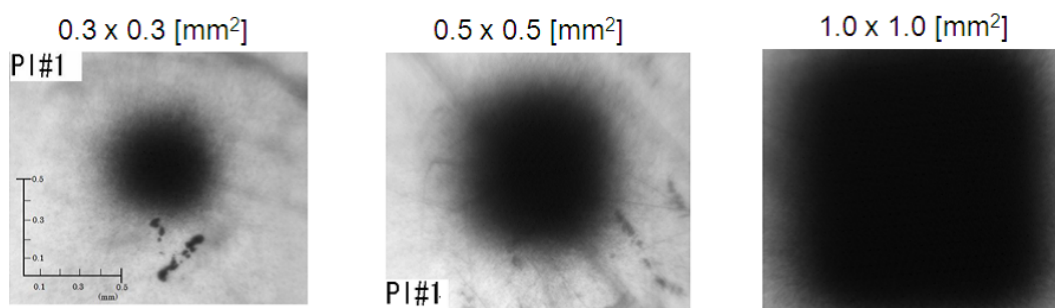


図 A.2: r80 実験で照射されたエマルシヨンの写真

付録B DSSDの基本性能

以下に DSSD の基本性能を一覧にして示す。これらのデータは主に参考文献 [26] によるものである。

表 B.1: DSSD の基本性能

シリコン厚さ	300 μm
シリコン面積	640 \times 320 mm^2
ストリップ幅	50 μm
ストリップ数	1280ch(p-side), 640ch(n-side)
基盤	10 \times 10 \times 2 μm
読み出し	1920ch シリアル差動出力 クロック周波数
S/N 比 #1	31.03 \pm 0.16(p-side) 24.46 \pm 0.13(n-side)
#12	33.81 \pm 0.33(p-side) 27.71 \pm 0.26(n-side)
動作電圧 #1	60V (電流値 \sim 1 μA)
#12	70V
位置分解能	50 / $\sqrt{12}$ = 14.4 μm (バイナリ読み出し) 11.2 μm (0 °クラスタリング後)
効率	p-side 94.8 % n-side 92.9 %
線形性	35fC(10MIP in 300 μm Si)
DAQ レート	2.5kHz(5MHz clock 1920channel)
増幅率	12.5mV/fC(1MIP in 300 μm Si)
消費電力	1 VA 当たり 177mW

参考文献

- [1] H.Bando, T.Motoba and J.Zofka, Int. J. Mod. Phys. A5(1990) 4021
- [2] T.Nagae Strangeness nuclear physics at J-PARC, *Proc.HYP2006* (2007)
- [3] O. Hashimoto and H. Tamura, Spectroscopy of L Hypernuclei. Progress in Particle and Nuclear Physics **57** (2006) 564-653
- [4] Phys. Rev. Lett. 38, (1977) 195 - 198
- [5] T.Sakai, K.Shimizu, and K.Yamazaki, Prog. Theor. Phys.Suppl. **137**,121 (2000),nucl-th/9912063
- [6] A. Rusek et.al.,Phys.Rev.C **52** (1996) R15
- [7] T.Watanabe et.al., Eur.Phys.J.A **33** (2007) 265-268
- [8] J.K.Ahn Journal of the Korean Phys.Soc. ,vol45 No2, (2004)323-328
- [9] C.J.yoon , Ph.D. thethis, Kyoto University, 2007(unpublished)
- [10] H.Bando , Prog.Theor.Phys **67** (1982) 699
- [11] T.Yamada and C.Nakamoto, Phys.Rev.Lett **C62** (2000) 034319
- [12] J.Schaffner et al. , Ann, Phys **235** (1994) 35-37
- [13] S.Aoki,et.al.,Prog.Theor.Phys.**85**(1991)1287-1298
- [14] C.B.Dover et.al.,Phys.Rev**C44**(1991)1905
- [15] A.Ichikawa , Ph.D. thethis, Kyoto University, 2001(unpublished)
- [16] H.Takahashi , Ph.D. thethis, Kyoto University, 2003(unpublished)
- [17] H.Takahashi etal. , Phys.Rev.Lett **87** (2001) 212502
- [18] K.Nakazawa, The E07 experiment at J-PARC

- [19] E.Hiyama,et.al.,Phys.Rev.**C66**(2002)024007
- [20] K.Itonaga Nucl.Phys. **A691** (2001) 197c.
- [21] C.J.Batty, E. Friedman, and A. Gal,vPhy. Rev **C59** (1999) 295
- [22] D.Zhu , C.B.Dover, A.Gal, Phys.Rev.Lett **67** (1991) 2268
- [23] T.Hiraiwa , master thethis, Kyoto University, 2007(unpublished)
- [24] A.Ichikawa , master thethis, Kyoto University, 1997 (unpublished)
- [25] S.Aoki et.al., Nucl. Instrum. Meth **A274**(1989)64-78
- [26] S.Kamigaito , master thethis, Kyoto University, 2006(unpublished)
- [27] S.Aoki etal. , Nucl. Instrum. Meth **B51** (1990) 466
- [28] Intel OpenCV, <http://www.intel.com/technology/computing/opencv/>
- [29] 奈良先端科学技術大学 OpenCV プログラミングブック製作チーム OpenCV プログラミングブック、マイコミ (2007)