

(仮) J-PARC E71実験 (NINJA プロジェクト) へ向けた新型  
原子核乾板の製作及びCERN ビーム照射実験による既存の原  
子核乾板の性能評価

横浜国立大学 理工学部  
数物・電子情報系学科 物理工学EP  
学籍番号 1564311  
谷原 祐史

平成 31 年 2 月 13 日

## 概要

原子核乾板は、古くから用いられている素粒子検出器の1つで荷電粒子の飛跡をサブミクロンという高い精度で3次元的に記録することができる写真フィルム的一种である。2019年4月からJ-PARCで開始されるE-71実験においてこの原子核乾板の長所を生かして、低エネルギーニュートリノ反応事象の精密測定及びニュートリノ反応断面積の高い精度での測定を目標としている。そのインストールを前に実際に用いる原子核乾板の作成を名古屋大学F研究室NINJAメンバーを中心に共同で行った。また、2017年CERNで行われたビーム照射実験で実際に用いられた原子核乾板の処理、及びスキヤニングとその性能評価を行った。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>ニュートリノ振動</b>	<b>1</b>
1.1	ニュートリノ	1
1.2	ニュートリノ振動	1
<b>第 2 章</b>	<b>T2K 実験と NINJA 実験</b>	<b>4</b>
2.1	T2K 実験の概要	4
2.2	NINJA 実験の概要	4
<b>第 3 章</b>	<b>原子核乾板の製造と処理</b>	<b>5</b>
3.1	原子核乾板とは	5
3.2	製造記録	6
3.2.1	ベース下塗り処理	6
3.2.2	乳剤塗布	10
3.2.3	現像	10
3.2.4	膨潤	11
<b>第 4 章</b>	<b>CERN ビーム照射試験</b>	<b>14</b>
4.1	試験概要	14
4.2	HTS による照射プレートのスキャン	14
4.2.1	HTS (Hyper Track Selector) の概要	14
4.2.2	スキャン記録	16
4.2.3	スキャン結果	17
<b>第 5 章</b>	<b>原子核乾板の解析と粒子識別</b>	<b>23</b>
5.1	飛跡検出効率の評価	23
5.2	プレート間における飛跡ズレの評価	30
5.2.1	多重電磁散乱のの効果の見積もり	33
5.3	粒子識別	33
5.3.1	ベーテブロッホの式と VPH	34
5.3.2	手法と解析	35
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>39</b>

# 第1章 ニュートリノ振動

## 1.1 ニュートリノ

1930年、パウリは $\beta$ 崩壊でエネルギー保存則と角運動量保存則を成り立たせるためには、電子と共に質量が極めて小さく、電荷が0でスピンの1/2である粒子が放出されていることを仮定すれば良いと主張した。この主張を根元に、1932年にフェルミがニュートリノの存在を予言した。そして1956年にライネスらの実験によって原子炉から生じたニュートリノの検出に成功した。全ての物質は、レプトンとクォークと呼ばれる素粒子から形成される。クォークは6種類あり、それぞれ2つを1組として第1世代、第2世代、第3世代とする。電子の仲間は荷電レプトンと呼ばれ、電子、 $\mu$ 粒子、 $\tau$ 粒子の3つに分類される。ニュートリノもレプトンの仲間で電荷を持たないため中性レプトンと呼ばれる。

## 1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノには、電子ニュートリノ $\nu_e$ 、ミューニュートリノ $\nu_\mu$ 、タウニュートリノ $\nu_\tau$ の3種類がありこれらが飛行している間に別の種類のニュートリノ(例： $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ )に姿を変えてしまうことをニュートリノ振動と呼んでいる。ニュートリノには、3つの異なる質量固有状態がある。これを $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle, |\nu_3\rangle$ とすると相互作用の固有状態 $|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle, |\nu_\tau\rangle$ は、質量固有状態が混合した状態として表現することができる。

### 1. 2世代

まずは簡単のため、 $\nu_e$ と $\nu_\mu$ の2世代で議論する。先述のようにニュートリノフレーバーは異なる質量状態の混合状態であるので、

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

と表現することができる。

ここで、

$$U = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

は、ユニタリ行列である。 $(UU^* = I)$

(1.1)より、

$$(1.3)$$

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle \quad (1.4)$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle \quad (1.5)$$

と表現することができる。この固有状態の時間発展は、

$$|\nu_e(t)\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle \exp(-i\frac{E_1 t}{\hbar}) + \sin\theta |\nu_2\rangle \exp(-i\frac{E_2 t}{\hbar}) \quad (1.6)$$

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle \exp(-i\frac{E_1 t}{\hbar}) + \cos\theta |\nu_2\rangle \exp(-i\frac{E_2 t}{\hbar}) \quad (1.7)$$

自然単位系を扱うことと前提とすれば、光速  $c = 1$ 、プランク定数  $\hbar = 1$  である。

$$E_1 = \sqrt{p^2 + m_1^2} \quad (1.8)$$

$$E_2 = \sqrt{p^2 + m_2^2} \quad (1.9)$$

であり、更に、ニュートリノは、超相対論的であると仮定されるので、Lorentz 因子  $\gamma \gg 1$  である。すなわち、

$$\gamma = \frac{E}{m_0 c^2} = \frac{\sqrt{p^2 + m_0^2}}{m_0} \gg 1 \quad (1.10)$$

なので、 $p \gg m_0$  ゆえ、

$$E = \sqrt{p^2 + m_0^2} = p \sqrt{1 + (\frac{m_0}{p})^2} \simeq p + \frac{m_0^2}{2p} \quad (1.11)$$

したがって、 $\nu_\mu$  の時間発展は、 $\Delta m^2 = m_1^2 + m_2^2$ ,  $z = p + \frac{m_1^2}{2p}$ ,  $t = \frac{x}{c} = x$  とすると、

$$|\nu_\mu(t)\rangle = \exp(-izt) (-\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle \exp(-i(\frac{\Delta m^2}{2p})x)) \quad (1.12)$$

と表すことができる。

ニュートリノは、粒子であると同時に波であるので、量子力学的解釈が可能なので、 $\nu_{mu}$  から  $\nu_e$  へと変化する確率 ( $\nu_{mu}$  の消失確率)  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  は、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2 = \frac{1}{2} \sin^2 2\theta (1 - \cos(\frac{\Delta m^2}{2p}x)) \quad (1.13)$$

$p \gg m$  なので  $E = \sqrt{p^2 + m^2} \approx p$

更に、 $x = L$  と置き、 $\sin^2 \frac{\theta}{2} = \frac{1 - \cos\theta}{2}$  も利用して、(1.12) を変形すると、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin(\frac{\Delta m^2}{4E}L) \quad (1.14)$$

となる。ここで、 $\hbar, c$  を残した状態で計算した際の  $\sin$  の中身を検討する。 $\frac{\Delta m^2 c^3}{4E\hbar}L \rightarrow \frac{\Delta m^2 c^4}{4E\hbar c}L$  について、次元を考えると、 $\frac{[\text{MeV}]^2 [\text{cm}]}{[\text{MeV}] [\text{MeV} \cdot \text{cm}]}$  ゆえ、無次元である。 $\sin$  の引数は、[rad] ゆえ、この単位はラジアンである。

ここで、 $\Delta m c^2$  [eV<sup>2</sup>],  $E$  [MeV],  $L$  [m] の単位で測定することを考えて、測定値をそのまま (1.13) に代入できるように式を変形する。

$$[\text{eV}] = [10^{-6} \text{MeV}], [\text{m}] = [10^2 \text{cm}], \hbar c = 197 \times 10^{-13} \text{MeV} \cdot \text{cm} \quad (1.15)$$

であるから、

$$\frac{\Delta m^2 c^4}{4E\hbar c}L \rightarrow \frac{\Delta m^2 c^4 L [\text{eV}^2 \cdot \text{m}]}{E [\text{MeV}]} \frac{10^{-10}}{4 \times 197 \times 10^{-13}} \rightarrow 1.27 \frac{\Delta m^2 L [\text{eV}^2 \cdot \text{m}]}{E [\text{MeV}]} \quad (1.16)$$

となるので、(1.13)は、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin(1.27 \frac{\Delta m^2}{E} L) \quad (1.17)$$

と書き換えることができる。これが2世代の場合のニュートリノ振動の起こる確率である。

## 2. 3世代

続いて、 $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ の3種類からなる3世代を扱う。ニュートリノフレーバーは、質量状態の混合した状態なので(1.1)同様の記述ができ、以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix} \quad (1.18)$$

(1.18)のユニタリ行列 $U$ は、Pontecorvo氏、牧氏、中川氏、坂田氏の4名によって提唱されたPMNS行列 $U_{PMNS}$ として知られている。

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{-i\delta_{CP}s_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta_{CP}s_{13}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.19)$$

ただし、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ ,  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ とした。

第1番目の行列は、大気ニュートリノによる行列、第2番目はリアクターによる行列、第3番目は、太陽ニュートリノによる行列である。第2番目の行列の一部の要素には $e^{-i\delta_{CP}}$ が含まれている。この $\delta_{CP}$ は、DiracのCP位相と呼ばれ、CP対称性の破れを議論する上で重要なポイントとなる。

2世代の時と同様に各々の固有状態(フレーバー)の時間発展を求めたのちに $\nu_\mu$ の消失確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ を計算すると、

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &\simeq \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 2\theta_{31} \frac{\sin^2(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} - aL)}{\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} - aL} (\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E})^2 \\ &+ \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{31} \sin 2\theta_{12} \frac{\sin^2(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} - aL)}{\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} - aL} \cdot \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \cdot \frac{\sin aL}{aL} \cdot \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \cos(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} + \delta_{CP}) \\ &+ \cos \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin^2 aL}{(aL)^2} \cdot \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \end{aligned} \quad (1.20)$$

と近似的に求められる。ここで $aL$ は物質効果を表す項で $a$ が物質効果そのものを表す。飛行距離 $L$ が大きければ大きいほど物質効果の影響が大きくなる。

## 第2章 T2K実験とNINJA実験

T2K実験とNINJA実験についての概要を述べる。

### 2.1 T2K実験の概要

T2K実験とは、茨城県東海村の大強度陽子加速施設J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) にて作られたニュートリノビームを構内の前置検出器および295 km離れた茨城県飛騨市神岡町の神岡鉱山内部にある後置検出器スーパーカミオカンデで検出する実験で、ニュートリノ振動に関してより精密なパラメータ測定とCP対称性の破れの研究を目的としている。

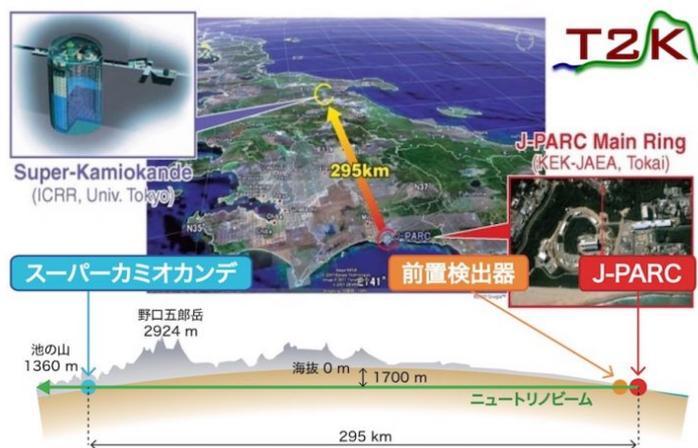


図 2.1: T2K 実験概略図。[1]

### 2.2 NINJA実験の概要

NINJA実験 (Neutrino Interaction research with Nuclear Emulsion and J-PARC Accelerator) とは、サブミクロンという制度で3次的に荷電粒子 (素粒子や放射線) の飛跡を記録できる写真フィルム的一种である原子核乾板を用いたニュートリノ反応の精密測定を目的として行う実験である。乳剤に荷電粒子の飛跡を記録しそれを写真フィルム同様、現像をすると飛跡が増幅されるのでそれを自動飛跡読み取り装置を用いて数値データに変換し解析を行っている。ここからは、E71実験での概要を述べていく。

- 1.

## 第3章 原子核乾板の製造と処理

本章では、J-PARC E71 実験で使用する原子核乾板の実際の製造過程について述べる。その後、ビーム測定後の現像及びスキャンに到るまでの処理について述べる。ビーム測定を除く一連の作業は、名古屋大学東山キャンパス理学棟 D 館にて行った。

### 3.1 原子核乾板とは

原子核乾板は写真フィルム的一种であり、通過する荷電粒子の飛跡を記録する検出器として長く素粒子実験に用いられている。サブミクロンの高い位置分解能を持つが、時間分解能を持たず、ひとたび原子核乾板が製造されると現像されるまでの間荷電粒子の通過と共に飛跡が蓄積していく。そのため、測定を開始するにあたって原子核乾板のインストールを行う際は、事前にリフレッシュと呼ばれる作業を行い製造以来蓄積した飛跡を消すという措置が取られる。

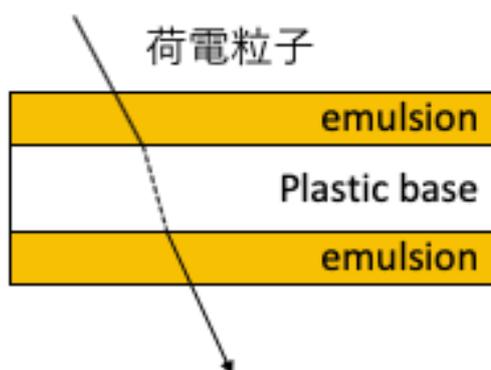
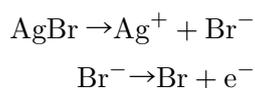


図 3.1: 原子核乾板の簡易図。プラスチックベースの両面に乳剤が塗布されている。

原子核乾板が荷電粒子の飛跡を記録するメカニズムについて簡潔に述べておく。飛跡を記録するのは乳剤層 (emulsion) であり、ここを荷電粒子が通過することによって乳剤中の臭化銀 (AgBr) 結晶にぶつかることにより、結晶内部に電子  $e^-$ -正孔対  $Ag^+$  が生じる。



そして電子はトラップされ格子間銀イオン  $Ag^+$  と結合して銀原子を生成する。



銀原子周辺ではさらに電子トラップが起りやすい状態になり、忽ち潜像核と呼ばれる銀クラスターが形成される。それを現像 (Development) によって潜像核を化学的に成長させ直径  $1\mu\text{m}$  の銀粒子として可視化する。詳細は後述する。

## 3.2 製造記録

ECC (Emulsion Cloud Chamber) 9 台に挿入する乾板 (30 cm × 84.5 cm) を予備を含めて約 1,360 枚、2018 年 11 月までに、ECC の後方外側に取り付ける乾板及びその更に後方の CS (Changeable Shifter) や SFT (Scintillating Fiber Tracker) に取り付ける乾板 (39 cm × 110 cm) を 2018 年 12 月に製造した。

### 3.2.1 ベース下塗り処理

まず初めにベース (支持体) となるプラスチック板 (厚さ  $180\mu\text{m}$ ) の処理から始める。これは、主として乳剤の塗布性を向上させる目的があり、下処理が行われていないと適切に乳剤が塗布されず、乾燥後剥がれてしまうことによる原子核乾板の損傷を防ぐ意味合いもある。そのため、乳剤の塗布を行うにあたり、事前に必ずベース下処理を行なっておく必要がある。以下に手順を記す。

#### 1. プラスチックロールを適切な大きさにカット。

まず、プラスチックの切り分け作業の環境を構築した。図 3.1 のようなプラスチックロールの中空部分にバーを通してロールがバーから抜けないように固定したのちに図 3.2 に示すように 2 本の Y 字の支柱を用意し、バーの両端を滑らかに回転するように設置した。図 3.3 中央部のダンボールはプラスチック段ボール (黄) を支えるための台の役割を担い、プラスチック段ボールはベースが机などに触れないようにするためのものである。これは事前にグラシンを外に巻き、アルコールスプレーで拭き取り清潔な状態にした。カットするサイズの大きさは、冒頭でも述べたが、ECC (Emulsion Cloud Chamber) に入れる乾板を製造する際 (~11 月) は横幅 30 cm のプラスチックロールを用い、長さ 84.5 cm に切断、ECC の後方外側に取り付ける乾板及びそのさらに後方の CS (Changeable Shifter) や SFT (Scintillating Fiber Tracker) に取り付ける乾板を製造する際 (12 月) は、横幅 39 cm のプラスチックロールを用い、長さ 110 cm に切断した。(図 3.4)



図 3.2: カットされる前のプラスチックロール

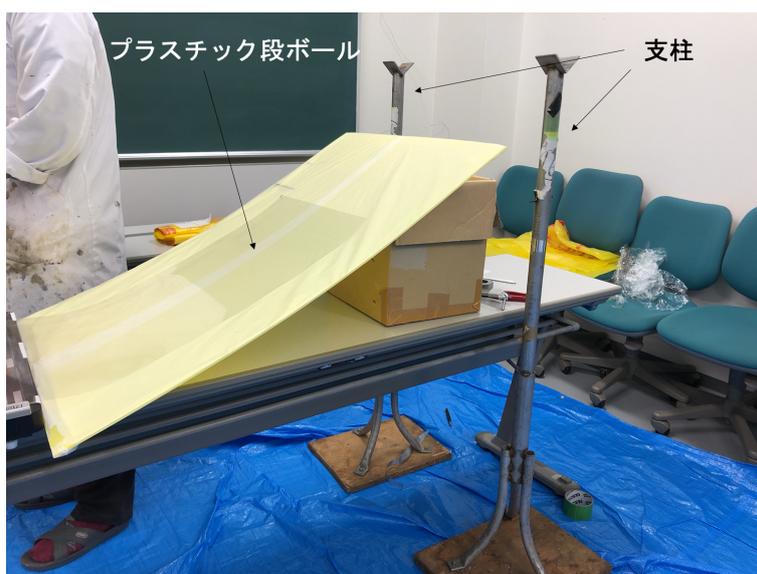


図 3.3: カッティング環境の構築

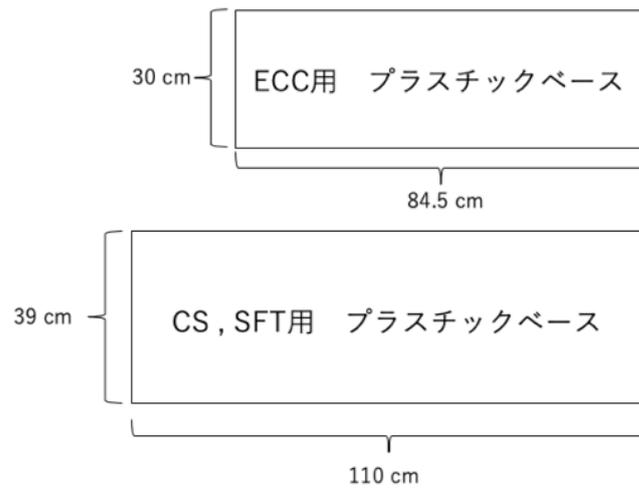


図 3.4: ECC 用プラスチックベースと CS・SFT 用プラスチックベースの比較図

2. プラスチック板表面をゼラチン溶液でコーティング。

下処理作業を行う際、事前に加熱装置（図 3.3）を用いてゼラチン溶液を 40 50 °C に加熱しておいた。適切な温度になったらベースカットを開始し、満遍なくベースをゼラチンに潜らせるという作業を繰り返した。ベース表面に目視できる程度の傷（ブロッキング）が現れるようになったら塗布性の低下が危惧されるためそのロールからのベースの回収を終了し、新しいものに取り替える。

なお、ゼラチン溶液はゼラチン 20 g を 50 °C に加熱した水 1980 cc に溶かしてよく攪拌したのちにドライウエル（水切り剤）10 cc と 5 % クロムミョウバン 4 cc を加えて精製したものをを用いた。



図 3.5: 下塗り処理用のゼラチン加熱装置。トレーにゼラチン溶液を移すのはプラスチックベースをくぐらせやすくするため。ベースをくぐらせたら鍋の上でよくゼラチンを切って乾燥へ移る。

### 3. 乾燥と回収

ゼラチン溶液でコーティングしたベースは、室温程度の部屋で約10時間程度乾燥させた(図3.4)。のちに、乾いたベースを回収し1からの作業を繰り返すという一連の流れである。



図 3.6: ベースの乾燥の様子。洗濯バサミ付きの紐を部屋の上部に固定してベースを洗濯バサミで等間隔に挟んで吊り下げる。ゼラチンがベースから垂れずに残って固まらないように定期的にケイドライで吸わせるようにして拭き取る。

### 3.2.2 乳剤塗布

下処理が終わったベースの両面に対して乳剤<sup>1</sup>の塗布をする。週に2日（火・木）の塗布日を設けて火曜日に表面、木曜日に裏面というサイクルで行なった。乳剤には感光性があり、完全に光を絶った環境下で扱う必要がある。そのため、光の出入り口を黒幕等で覆った暗室で塗布作業を行なった。ここでは、2018年11月13日（火）と15日（木）に実施した塗布作業について述べる。作業は、名古屋大学 M2 鈴木氏、M1 高尾氏、B4 増田氏、及び谷原を中心に行なった。以下にその手順を示す。

#### 1. 乳剤の取り分け

この週の塗布は、プラスチックベース5枚×6サイクル×2日（表裏）、すなわち合計30枚への塗布を行うことになっており、均等な厚さに塗布することを目的として、予め塗布する量だけの乳剤をビーカー（ $142.6 \pm 0.2$  g/ビーカー）に取り分けた。1枚のベース片面に対して使用する乳剤はビーカー2個分であるので、合計120個分となった。

#### 2. 暗室の加湿

乳剤の塗布を行う際、湿度が80%以下だと塗布最中に部分的に乾燥してしまい、平面性を損なう恐れがあるため、80~90%に保つ必要がある。したがって塗布の開始1時間前から暗室内の加湿を始めた。

#### 3. 塗布台にアクリル板を設置しその上にプラスチックベースを置く

プラスチックベース表面に乳剤を均一に塗布するためには、凹凸の無い極めて平面な場所に密着させる必要がある。まず、表裏に真空チャック用の溝を掘ったアクリル板を塗布台に置き十分に密着させた。その上にプラスチックベースを置き、十分に密着させた。そしてアクリル板の真空チャック用の溝に合わせてプラスチックベースの外側の長辺、短辺にビニールテープを貼り付け流した乳剤が外に溢れないように、かつ取り分けた乳剤が均等な厚さに広がるようにした。

#### 4. 溶かした乳剤を流し込む

ベース上に乳剤を流し込み、塗布棒を用いて全体を均等にならすように塗りつけた。泡が付着してしまうと平面性を損ない、測定精度の低下の要因になってしまうため塗布直後のチェックは細心の注意を払う必要があり、直ちに除去を行なった。

#### 5. 乾燥

1サイクルあたり5枚の塗布が終了すると乳剤の流動性が無くなるまで30分間静置させた後、乾燥テントへ移し、相対湿度70%で2日間乾燥させた。

以上の作業を6サイクル行い13日の塗布作業は終了した。2日間乾燥後、15日に再度同じ手順で裏面の塗布を行なった。以下に作成した原子核乾板の枚数を表3.1にまとめる。なお、12月18日~21日は大きめのサイズの乾板作成であるため、塗布台を大きいものに取り替え、1サイクルあたり2枚の塗布を行なった。

### 3.2.3 現像

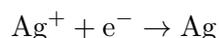
原子核乾板の乳剤層では、荷電粒子が通過すると臭化銀（AgBr）にヒットし、臭化銀に潜像核と呼ばれる銀粒子が発生する。これだけでは荷電粒子の飛跡として見えづらいので、潜像

<sup>1</sup>銀・ゼラチン比率 45:55

表 3.1: 原子核乾板作成記録

	10月16日～18日	11月12日～16日	12月18日～21日
作成種別	ECC	ECC	CS・SFT
サイクル数	5	6	9
総枚数	25枚	30枚	18枚
乳剤総使用量	約 14,260g	約 17,112g	約 18,338.2g

核を有する臭化銀を銀粒子に変えて潜像核を化学的に成長させるのが現像 (Developing) である。現像の流れは、まず、アルカリ性溶液の還元剤に原子核乾板を浸して、潜像核である  $\text{Ag}^+$  を  $\text{Ag}$  に還元させる。(30分程度)



そして、このままだと反応が進み続けてしまうので酸性溶液を加えて反応を止める。これをストップという。(10分)

最後に、反応せずに残った臭化銀 ( $\text{AgBr}$ ) をチオ硫酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) によって除去をする。



この後、表面に銀の微粒子が浮き出るのでそれをケイドライ等でしっかり拭き取る。原子核乾板に蓄積するシグナルをより効率よく見るためには、出来るだけバックグラウンドの蓄積を避けなければならないため、現像の作業は照射試験終了後、暗室下で直ちに行わなければならない。

### 3.2.4 膨潤

先程も述べたが、原子核乾板に対して定着を行うと乳剤層の臭化銀が次の反応式のように溶解し、乳剤層が  $20\sim 30\mu\text{m}$  程度薄くなる。



これによってスキャンによる情報取得効率の低下や層が厚くなることによるノイズの相対的な増加が懸念される。そこで、この問題を解消するためにその薄くなってしまった原子核乾板をグリセリン溶液を用いて厚くするのが膨潤 (Swelling) と呼ばれる作業である。今回行ったのは10枚で、以下にその手順を示す。

#### 1. 25%グリセリン溶液の調液。

今回 12L の 25%グリセリン溶液の調製を行った。したがって必要な 100%グリセリン溶液 ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ) は 3L、水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) は 9L である。グリセリンは密度  $1.26\text{g/L}$  なので  $3,780\text{g}$ 、水は密度  $1.00\text{g/L}$  なので  $4,000\text{g}$  を量りとった。これをしっかりと攪拌させて完成である。

#### 2. 原子核乾板を水に浸ける。

現像が終わった原子核乾板を水浸させ、3～5分ごとに厚みをダイヤルゲージ (新潟精機 ダイアルシグネスゲージ DS-1211) を用いて測定した。厚みの不均一性を考慮して、原子核乾板の四隅の厚みを測定した上で、そのおよその平均値をこの原子核乾板の厚みとした。(図

3.6) 厚みに関しては厳密ではないが、個体によって急激に厚みが増大することもあるので、水を吸いすぎて乳剤層の目標の厚さを超えてしまうことには注意した。なお、ここでの目標値とは、乳剤層での厚みが一番薄い部分であっても  $60\mu\text{m}$  以上である。

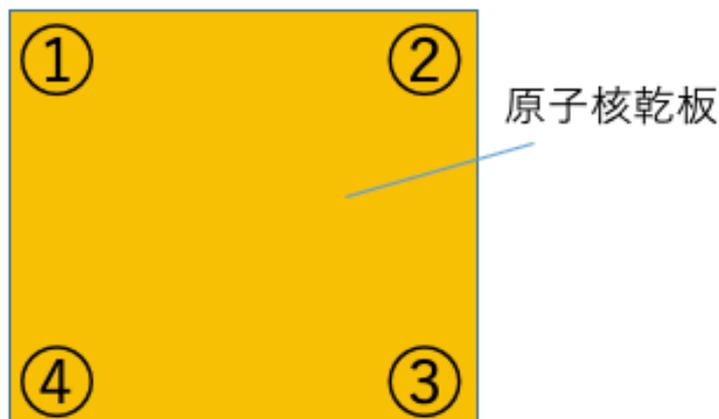


図 3.7: 原子核乾板の厚み測定箇所略図。四隅の厚さのおおよその平均をこのプレートの厚みとしている。



図 3.8: 水浸中の原子核乾板。四隅に穴を開けフックで引っ掛け金属棒に通して固定。出来るだけ液中でも乾板が動かないようにもう他方にも同じように施している。3~5分おきに水から取り出し厚みを計測する。

### 3. 原子核乾板を 25%グリセリン溶液に浸ける。

水から原子核乾板を引き上げ、よく水滴を切って、1で調液した 25%グリセリン溶液に 30~60 分間浸けた。(図 3.8) これによって、2で浸透した水分子を比重差を用いてグリセリンで置換している。

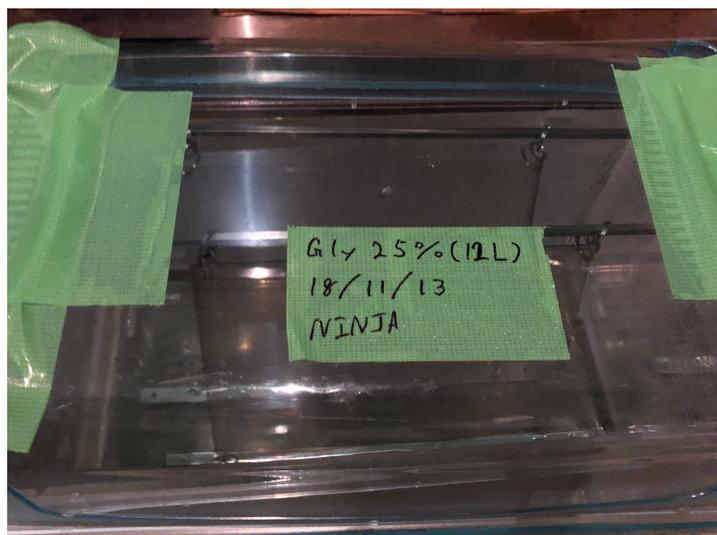


図 3.9: 原子核乾板を 25%グリセリン溶液を浸している様子。水とグリセリンの置換を行なっている。

30 分～60 分後グリセリン溶液から原子核乾板を引き上げ、飛跡読み取り室内（湿度 40～50%）で乾燥させた。（図 3.9）この後自動飛跡読み取り機でスキャンが行われる。



図 3.10: 乾燥中の原子核乾板の様子。（膨潤後）

## 第4章 CERN ビーム照射試験

### 4.1 試験概要

CERN ビーム照射試験は、イタリアの CERN の PS EAST Area T9 beamline にて 2017 年 8 月 15 日に行われた原子核乾板に陽子、パイ中間子、陽電子の 3 種混合ビームを照射する実験である。使用した原子核乾板は乳剤層  $70\mu\times 2$  層+プラスチックベース  $180\mu$ (計  $320\mu\text{m}$ ) である。ECC 部は原子核乾板 24 枚と鉄板 ( $500\mu\text{m}$ )23 枚のサンドイッチ構造で、CS 部は支持体としてアクリル板 ( $2\text{mm}$ ) を 1 枚と原子核乾板 1 枚を挿入した。なお、CS 内の原子核乾板は、ビームのエネルギーごとに置き換えを行なったため計 4 枚を要した。

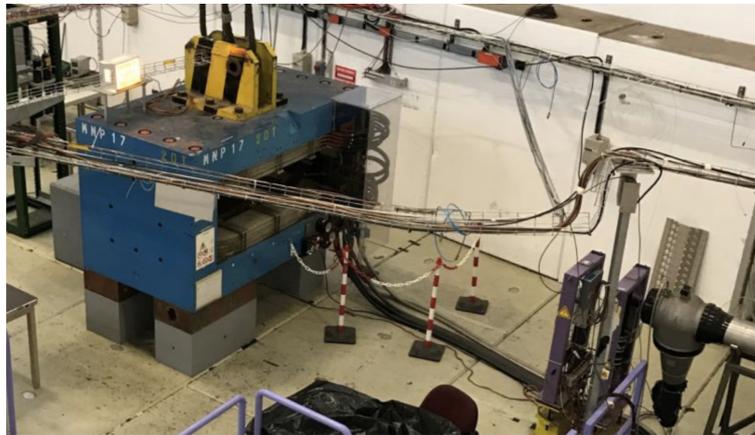


図 4.1: ビームラインの写真。

回転台を用いて CS・ECC の角度を変えそれに応じてエネルギーを変えてビームを照射した。 $\tan\theta_y=0.2$  に対して  $1.2\text{GeV}$ 、 $\tan\theta_y=0.1$  に対して  $0.9\text{GeV}$ 、 $\tan\theta_y=-0.1$  に対して  $0.7\text{GeV}$ 、 $\tan\theta_y=0.1$  に対して  $0.5\text{GeV}$  を CS 内の原子核乾板を取り替えながら照射した。ECC 内の鉄の多重電子散乱の散乱角を測定することによって運動量を測定する。

測定終了後、原子核乾板は CERN にて現像が行われ、日本に持ち帰られた。その中で ECC の PL18~PL24 を実際に膨潤し、スキャンを行なった。なお、現状 PL1~PL13 までは未膨潤状態で名古屋大学に保管されており今後解析を行っていく予定である。

### 4.2 HTS による照射プレートのスキャン

#### 4.2.1 HTS (Hyper Track Selector) の概要

今回、原子核乾板の飛跡読み取りに用いたのは、超広視野型高速原子核乾板読み取り装置 HTS (Hyper Track Selector) である。これは、名古屋大学の中野氏らによって開発された最新型の自動

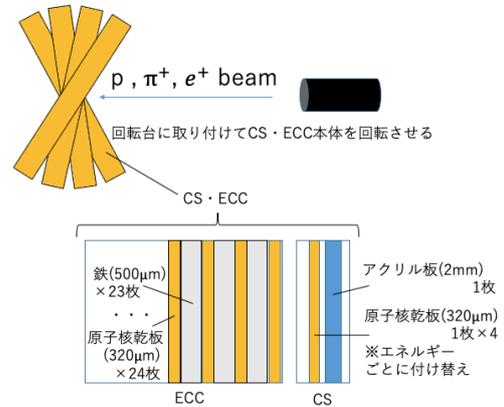


図 4.3: ビーム照射試験セッティング概略図。

図 4.2: 回転台に取り付けられたCS・ECCの写真。

飛跡読み取り装置である。(図 4.1)

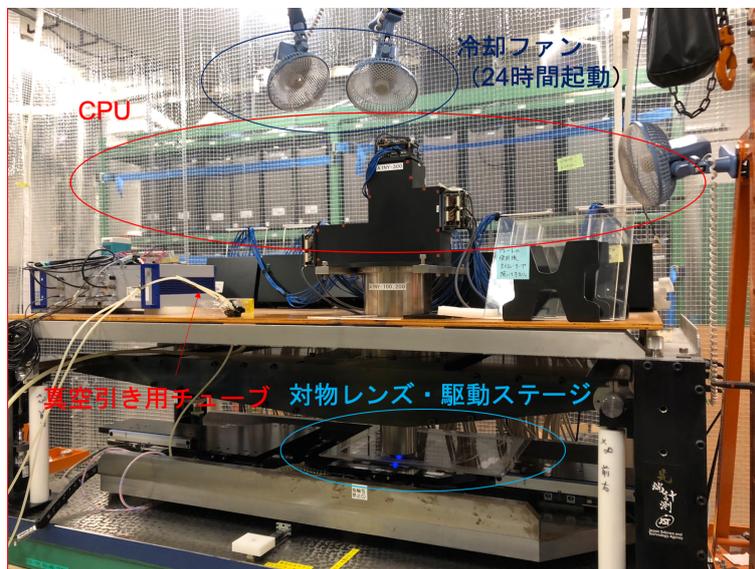


図 4.4: 自動飛跡読み取り機 HTS。左側に伸びているチューブは真空引き用で、下部のステージにプレート貼り付けたアクリル板を載せて真空を引き固定する。

HTS では、従来の自動飛跡読み取り機 SUTS (Super Ultra Track Selector) で、 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  であった読み取り視野が 625 倍の  $5 \times 5 \text{mm}^2$  にまで拡大し、視野の大きさに読み取り視野の数の積

である読み取り速度は従来の  $72\text{cm}^2/\text{h}$  から  $9,000\text{cm}^2$  とおよそ 125 倍になっている。HTS は原子核乾板の乳剤層を映すセンサーと xyz の 3 次元方向に駆動するステージ、撮影した画像を高速で処理する多数の CPU で構成されている。

飛跡読み取りの流れについて述べる。まず乳剤層を 16 分割（表裏で計 32 分割）した断層画像を取得し、荷電粒子の飛跡の位置情報、角度情報、16 層あたりの銀粒子のヒット数情報（PH : Pulse Height）とその飛跡の濃さ情報（VPH : Volume Pulse Height）を CPU でデジタル化し、数値情報として得る。

#### 4.2.2 スキャン記録

2017 年 8 月に CERN でビーム照射した ECC 内のビーム上流側である PL24~PL18 の合計 7 枚（縦  $10.0\text{ cm}$  横  $12.5\text{ cm}$ ）のスキャンを行った。

まず、アクリル板にスキャンプレート貼り付ける。この時気泡が入ってしまうと正確にスキャンができないため十分に密着させた。（図 4.2）そしてステージにセットし真空を引き固定し、その上からフィルム全体を覆う位の油を流した。レンズを操作し表側の乳剤層の飛跡にピントが合うように高さを調節し、スキャンを開始した。最初は、小面積でスキャンをし、乳剤層の厚さのパラメータを適宜設定する。これは、各プレートで膨潤後の乳剤層の厚さがプレートによって異なるためであり、どれだけの深さを読み取るかはこのパラメータによって決まる。もし 1 枚のプレートの乳剤層の厚みに不定性があれば正しくスキャンがされなくなってしまうため、塗布段階での乳剤層の平面性を維持させることは重要である。パラメータを設定したのちに本スキャンを開始した。（図 4.3）

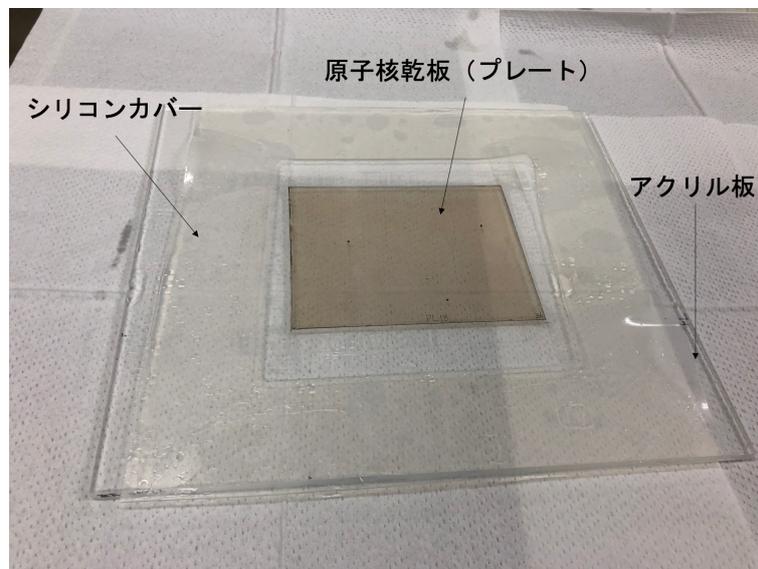


図 4.5: プレートを HTS の駆動ステージにセットする前の状態の写真。アクリル板にプレートを密着させ、油が流れ出ることを防ぐためにその外側をシリコンカバーで囲って塀を作っておく。

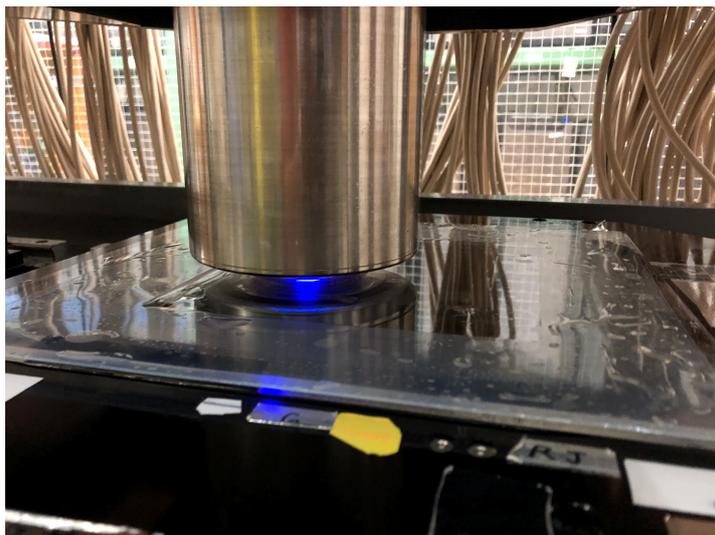


図 4.6: 本スキャンの様子の写真。10.0 cm×12.5 cm サイズでおよそ 1 枚あたり 6~7 分程度の時間を要する。

### 4.2.3 スキャン結果

得られた結果として、ECC 内部ビーム最上流であるプレート番号 24 のプレートについて示す。

#### 1. 位置情報

原子核乾板のどの部分でどれだけのイベントを観測したかの情報である。(図 4.4)

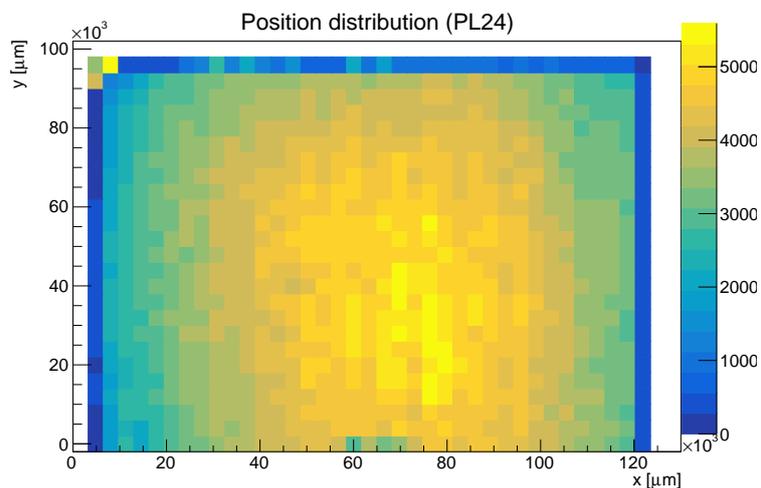


図 4.7: PL24 の位置分布

端の部分が青くなっている（イベント数が落ち込んでいる）のは、原子核乾板の塗布後、乾燥を経てインストール前に適切な大きさにカット（今回は 10.0 cm × 12.5 cm）するのだが、その切断の際に入ってしまったヒビや欠損が影響しているものと思われるが、淵の部分であ

れば直接的な問題となることはない。しかし、中央部分が部分的に青くなっていたり、白落ち（イベントが無い状況）していたら、スキャンが不完全、あるいは原子核乾板自体に傷がついていたり、塗布時に付着した泡がそのまま乾燥して残ってしまっているかといった問題点として考えられる。

## 2. 角度情報

ベースに対してビームがどの角度から入射したのかの情報である。（図 4.5）

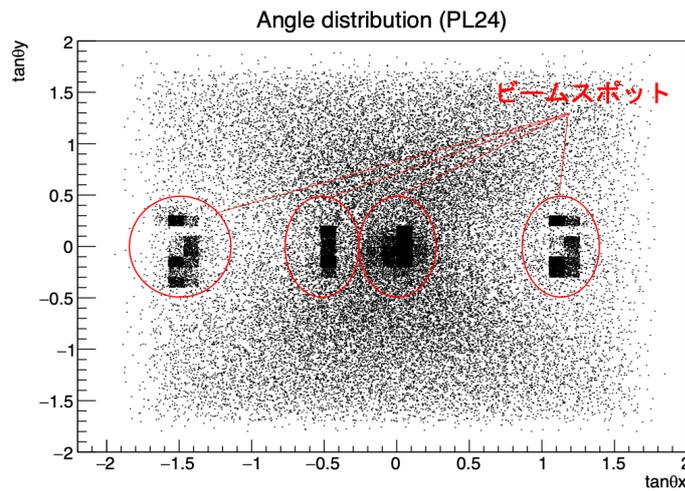


図 4.8: PL24 の角度分布

今回  $\tan \theta_y = -0.2, -0.1, 0.1, 0.2$  の方向からビームを照射しているので、それぞれの部分にスポットがあることを確認できる。

## 3. Pulse Height と Volume Pulse Height

自動飛跡読み取り機では、乳剤層に荷電粒子の飛跡として残された銀粒子の色の濃さ情報である VPH (Volume Pulse Height) と 16 層の断層図に分けた際の銀粒子がいくつの層でヒットしているかの情報である PH(Pulse Height) を調べることが可能である。

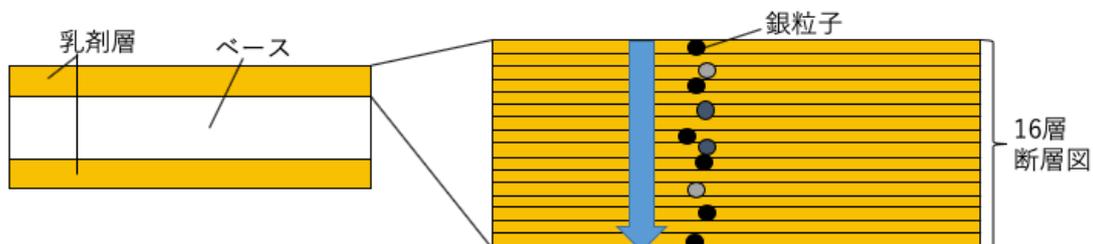


図 4.9: 16 層の断層図に分けた乳剤層のイメージ図

図 4.6 より、銀粒子は 16 層中 10 ヒットであるから  $PH=10$  である。VPH は 16 層断層図内の銀粒子の色の濃さを数値化して表現するものであり、色が濃いと VPH は大きく、色が薄

いと VPH は薄い。これは、VPH が大きいならばエネルギー損失が大きく、VPH が小さいならばエネルギー損失が小さいという電離損失との相関関係がある。

PL24 における角度 ( $\tan \theta = \sqrt{\tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_y}$ ) ごとの VPH の測定結果をベースと乳剤層の角度ズレとの関係

(VPH vs  $\sqrt{(\tan \theta_x - \tan \theta_{x1})^2 + (\tan \theta_x - \tan \theta_{x2})^2 + (\tan \theta_y - \tan \theta_{y1})^2 + (\tan \theta_y - \tan \theta_{y2})^2}$ )  
 として図 4.8～図 4.13 にまとめる。なお、xz 平面での角度について図 4.7 のように定義した。  
 (yz 平面でも同様である)

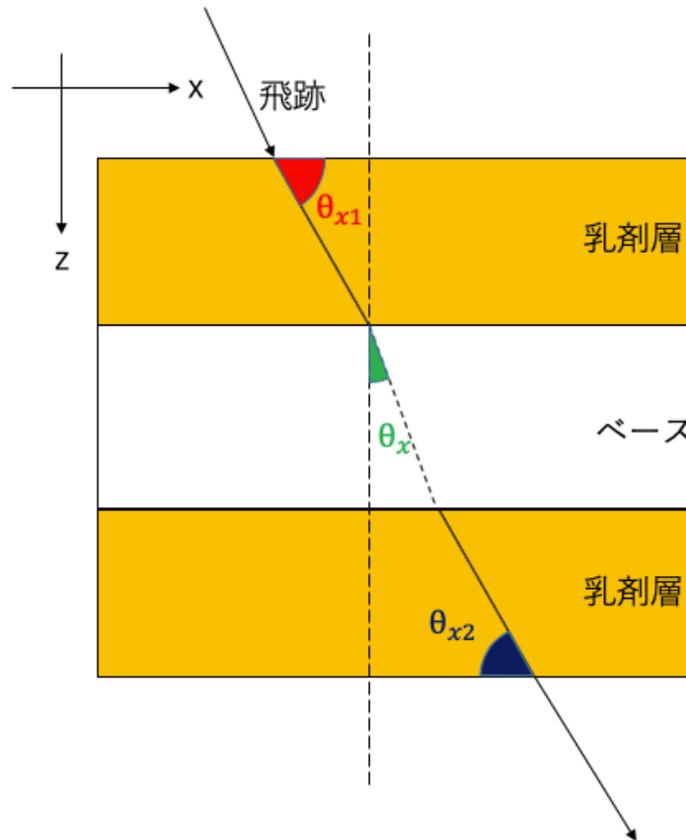


図 4.10: ベースと乳剤層の角度についての定義。

図 4.7 の定義より横軸の数値は、トラックの直線性を表しており大きな値を示すほど、直線性が悪いということになる。 $0 \leq |\tan \theta| \leq 0.2$  のとき、図 4.8 より飛跡が濃くて直線性が良いものと、飛跡が薄くて直線性が悪いものがくっきりと分かれている。これは前者がシグナルで後者が環境放射線等の影響によるノイズであると思われる。このノイズはコンプトン電子等の低エネルギー電子であり、乳剤層内部で止まってしまっているものが、偶然飛跡として上面乳剤層と下面乳剤層で接続されてしまったコインシデンストラックと呼ばれているものである。

角度が大きくなるにつれてシグナルであれ、VPH が低くなり、第 5 章 5.2 で後述するように、角度精度が悪くなっていくので、シグナルとノイズの判別が難しくなっていくと思われる。

続いて、PL24 の上面と下面の乳剤層の PH の合計の分布を図 4.14～図 4.19 にまとめる。

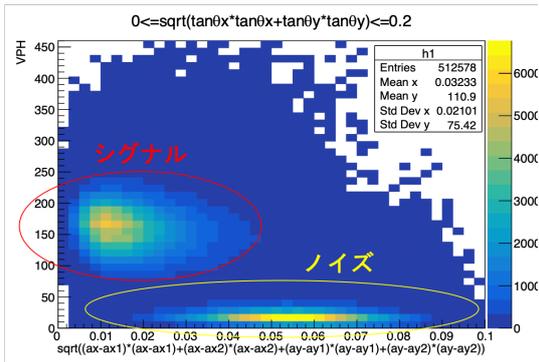


図 4.11:  $0 \leq |\tan \theta| \leq 0.2$

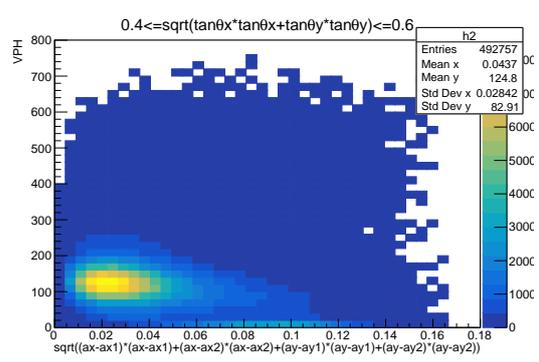


図 4.12:  $0.4 \leq |\tan \theta| \leq 0.6$

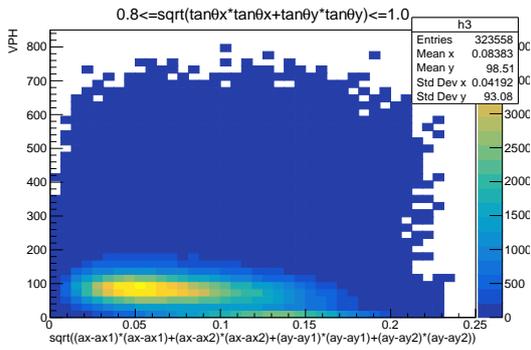


図 4.13:  $0.8 \leq |\tan \theta| \leq 1.0$

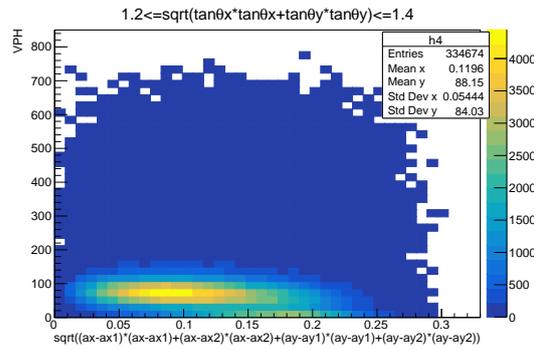


図 4.14:  $1.2 \leq |\tan \theta| \leq 1.4$

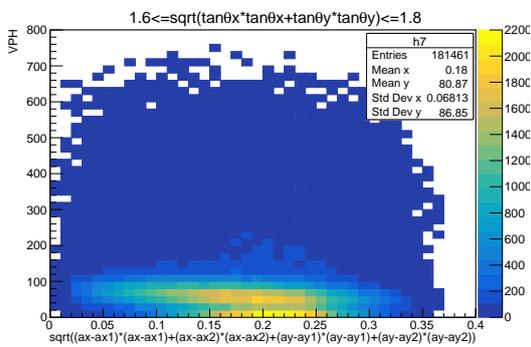


図 4.15:  $1.6 \leq |\tan \theta| \leq 1.8$

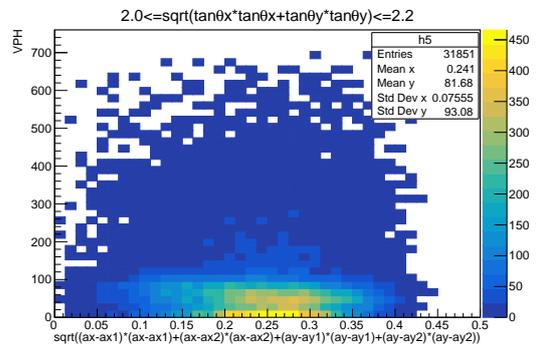


図 4.16:  $2.0 \leq |\tan \theta| \leq 2.2$

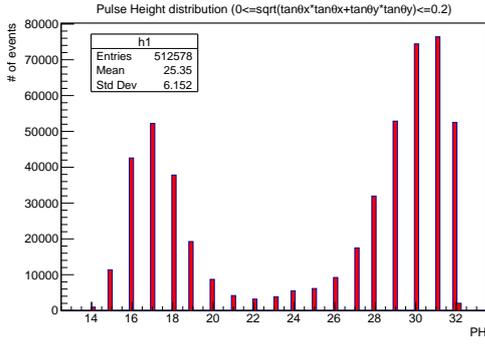


图 4.17:  $0 \leq |\tan \theta| \leq 0.2$

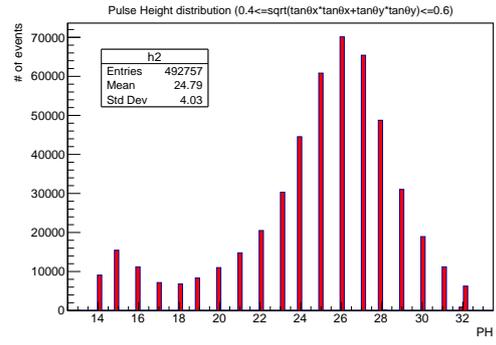


图 4.18:  $0.4 \leq |\tan \theta| \leq 0.6$

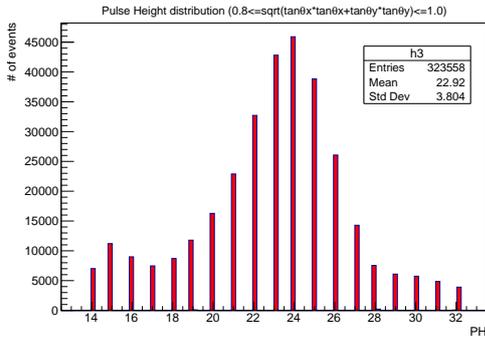


图 4.19:  $0.8 \leq |\tan \theta| \leq 1.0$

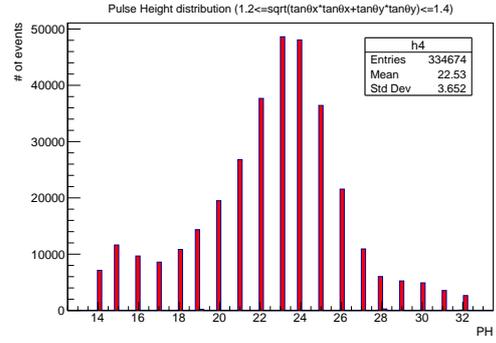


图 4.20:  $1.2 \leq |\tan \theta| \leq 1.4$

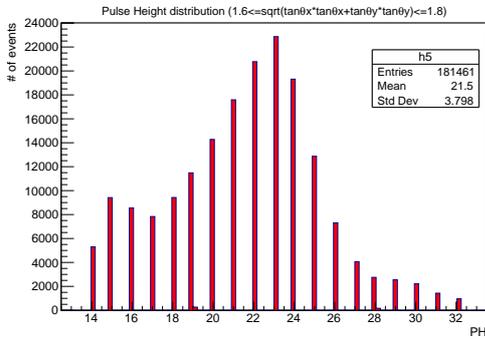


图 4.21:  $1.6 \leq |\tan \theta| \leq 1.8$

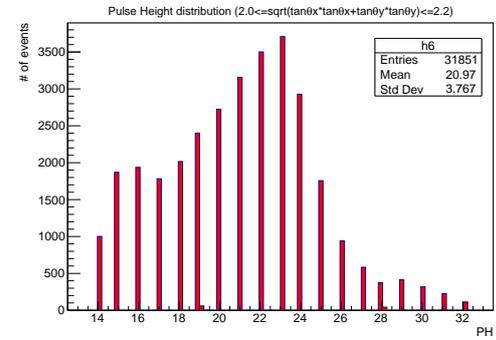


图 4.22:  $2.0 \leq |\tan \theta| \leq 2.2$

PHは小角度では、極端に低いものと32に限りなく近いものに大きく分かれていることがわかる。シグナルは先程述べたように直線性があるため、臭化銀にヒットして銀粒子が1列に並びやすくPHが高くなる傾向があると考えられるが、ノイズは乳剤層内部を不規則に動き、銀粒子が1列に綺麗に並ぶことは少ない。よって飛跡として接続されないものが出てきたり、ヒット数は少ないが偶然接続されてしまうものが出てきてしまうと考えられる。これは、次章で述べる飛跡検出効率にも関係してくる。

## 第5章 原子核乾板の解析と粒子識別

### 5.1 飛跡検出効率の評価

原子核乾板の飛跡読み取りの際、通過したトラックのうち、幾つのトラックが読み取られたかという飛跡検出効率 (efficiency) は重要な性能である。時間分解能を持たないことを補ったり、運動量の測定、及び粒子の崩壊事象における飛跡の散乱角の測定などある程度の枚数の原子核乾板を要する解析で、精密な測定を実現するには、より高い efficiency が要求される。ここでは、PL18～PL24 までの7枚のプレートについての評価を行った。

今回の飛跡検出効率の計算にあたって、条件を5枚以上のプレートを通過している飛跡として選択した。(図5.1) すなわち、

$$\text{プレート番号 } n \text{ の飛跡検出効率} = \frac{\text{プレート番号 } n \text{ のプレートを通過した飛跡本数}}{\text{7枚中5枚以上のプレートを通過した飛跡本数}} \times 100 \quad (5.1)$$

として全7,316,722本の飛跡について5プレート以上通過している飛跡を選別し、ベースに対するビームの角度ごと (i)  $0 < |\tan \theta| < 0.2$  (ii)  $0.4 < |\tan \theta| < 0.6$  (iii)  $0.8 < |\tan \theta| < 1.0$  に飛跡を分けてそれぞれの efficiency をプレートごとに求めた。

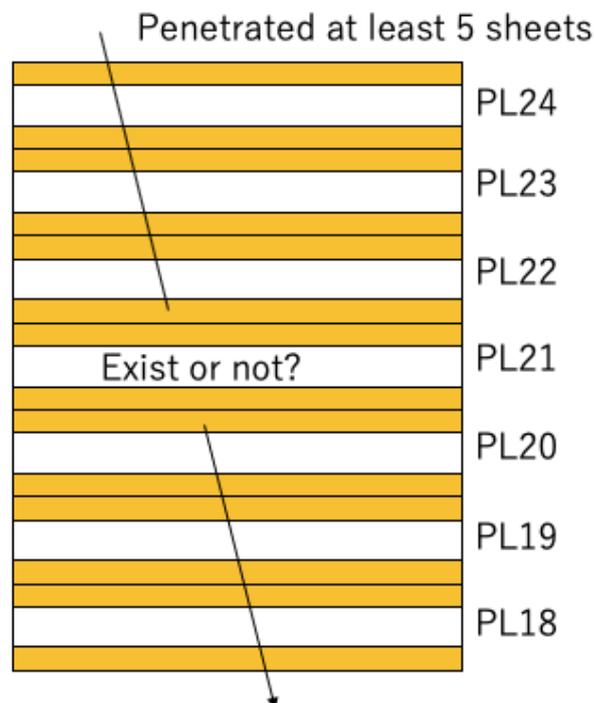


図 5.1: 飛跡検出効率の評価方法。5枚以上のプレート通過が条件。

飛跡検出効率の計算結果をプレートごとに角度で分けて (図 5.2) にプロットした。

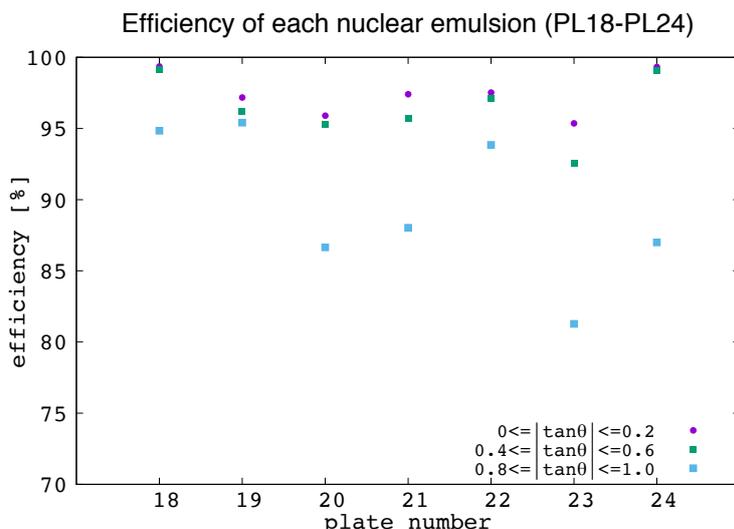


図 5.2: PL18~PL24 までの各プレートごとの飛跡検出効率。紫点が  $0 < |\tan \theta| < 0.2$  の飛跡、緑点が  $0.4 < |\tan \theta| < 0.6$  の飛跡、青点が  $0.8 < |\tan \theta| < 1.0$  の飛跡である。 ( $\tan \theta = \sqrt{\tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_y}$ )

大部分で90%以上をクリアしているが、角度の大きいものについては飛跡検出効率が低くなっている傾向があった。これは、大角度のトラックは斜め方向に荷電粒子が通過し銀粒子としては映っているものの離散的に像が並んでしまい、結果飛跡として再構成できなかったからと考えられる。

図 5.2 のプレート番号 19 とプレート番号 23 に着目すると前者は全体的に高い efficiency を示しているが、後者は全体的に低下している。この両者について、詳細な解析を行う。まず、それぞれのプレートにおける表面、裏面乳剤層での 16 層のうちの銀粒子のヒット数 (PH) (第 4 章 4.23[3]) を比較する。(図 5.4~図 5.7) なお、表裏は図 5.3 のように定めた。

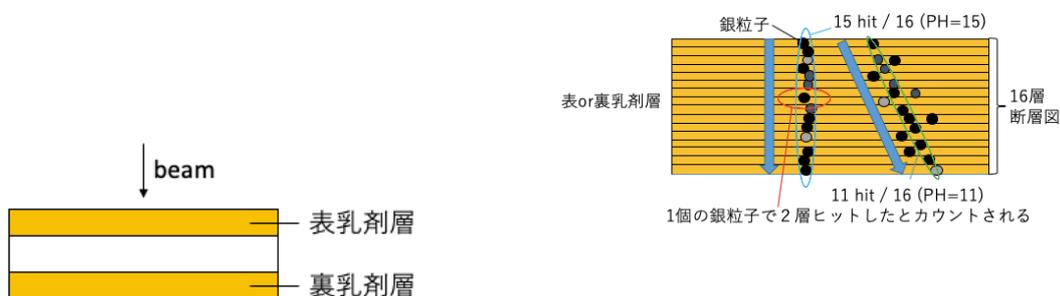


図 5.3: 乳剤層の表裏の定義。

図 5.4: 角度と銀粒子の直線性の概略図。丸で囲った部分が飛跡として再構成される。小角度の場合潜像核 (銀粒子) が一列に並びやすく飛跡の再構成がされやすい。大角度の場合は銀粒子がまっすぐに並びにくく、飛跡として再構成されても PH が低くなる傾向がある。

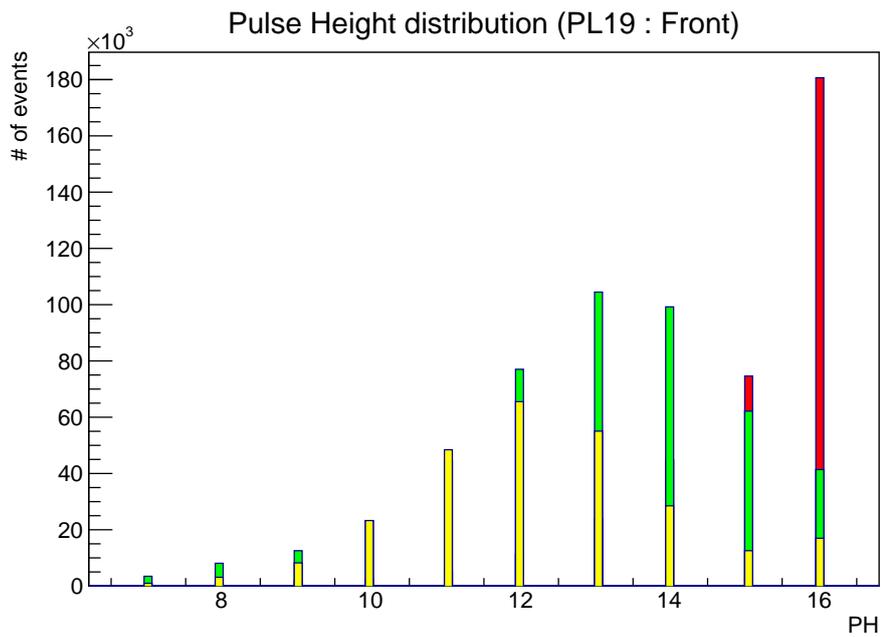


図 5.5: PL19 の PH 分布 (表乳剤層)。 (赤)  $0 \leq |\tan \theta| \leq 0.2$  (緑)  $0.4 \leq |\tan \theta| \leq 0.6$  (黄)  $0.8 \leq |\tan \theta| \leq 1.0$

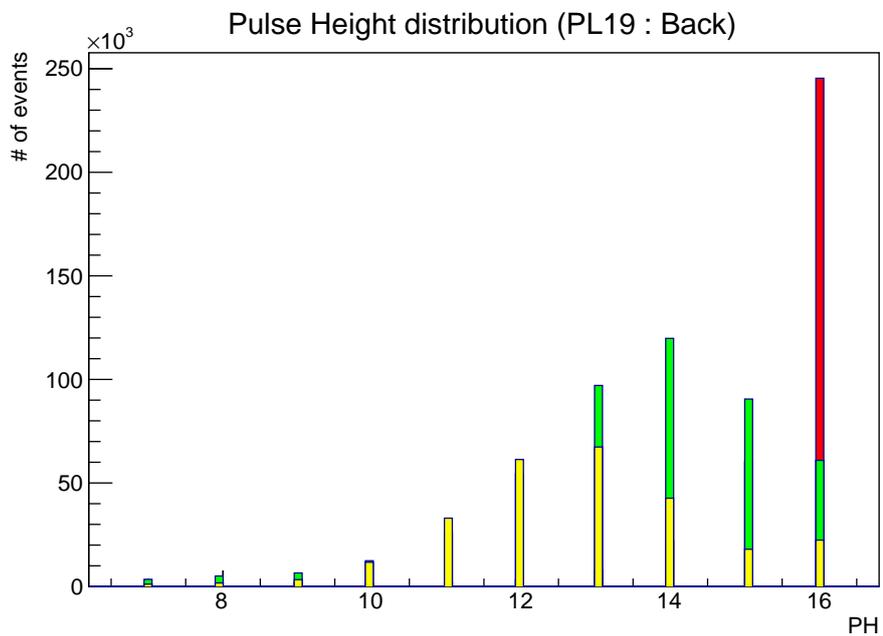


図 5.6: PL19 の PH 分布 (裏乳剤層)。 (赤)  $0 \leq |\tan \theta| \leq 0.2$  (緑)  $0.4 \leq |\tan \theta| \leq 0.6$  (黄)  $0.8 \leq |\tan \theta| \leq 1.0$

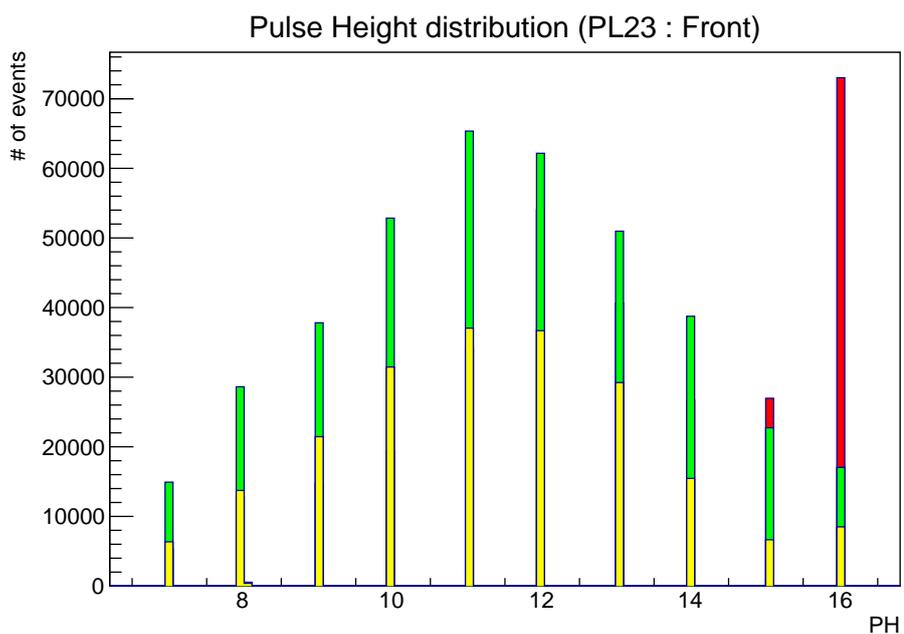


図 5.7: PL23 の PH 分布 (表乳剤層)。 (赤)  $0 \leq |\tan \theta| \leq 0.2$  (緑)  $0.4 \leq |\tan \theta| \leq 0.6$  (黄)  $0.8 \leq |\tan \theta| \leq 1.0$

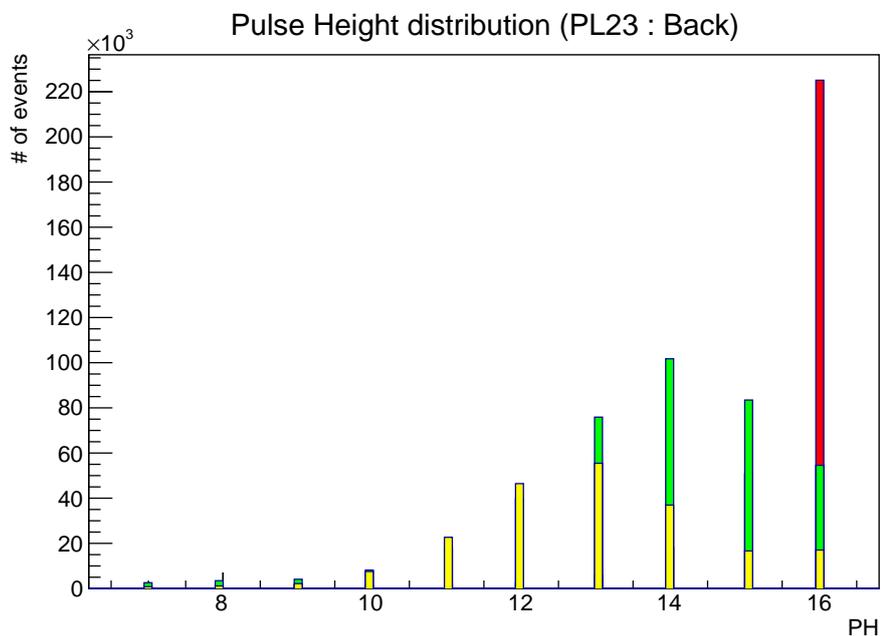


図 5.8: PL23 の PH 分布 (裏乳剤層)。 (赤)  $0 \leq |\tan \theta| \leq 0.2$  (緑)  $0.4 \leq |\tan \theta| \leq 0.6$  (黄)  $0.8 \leq |\tan \theta| \leq 1.0$

小角度の範囲で PH が高い値を示しているのは、小角度すなわち原子核乾板表面に対してほぼ

垂直にビームが飛んできているということで荷電粒子の飛程がより短距離になることに要因があると思われる。HTSは乳剤層を表裏それぞれ16層に分割した断層面で銀粒子が何層でヒットしているかを数えているので、仮にスキャンパラメータとしてスキャンすべき乳剤層を $50\mu\text{m}$ と仮定していれば1層あたりの厚さはおよそ $3\mu\text{m}$ である。したがって、乳剤層の中を荷電粒子がほぼ最短距離で移動できる小角度ならば、1層あたりの厚さが薄いことを理由に、1つの銀粒子の像がもう1つの層に被ってしまい偶然2つの層に銀粒子があるとカウントされてしまう事象が起こりやすくなる。よって、PHは結果的に大きな値を示すと考えられる。逆に角度が大きくなるとダブルカウントされることは少なくなり、より長い距離乳剤層を通過するのでより多くの臭化銀にヒットし潜像核（銀粒子）を形成すると考えられる（乳剤層の厚さ $50\mu\text{m}$ で平均23個）が、実際のところPHは16層中何層でヒットしたかという数値であるので、多くの潜像核が形成されたとしても情報量としては減ってしまうのである。またこれらの銀粒子は等間隔で並んでいるわけではないこともあって、飛跡が直線的にならず、PHが下がっていると考えられる。

各乳剤層における平均のPHを表5.1にまとめた。

表 5.1: 乳剤層ごとの平均のPH (最大PHは16)

	$0 \leq  \tan \theta  \leq 0.2$	$0.4 \leq  \tan \theta  \leq 0.6$	$0.8 \leq  \tan \theta  \leq 1.0$
PL19 (表乳剤層)	15.01	13.01	12.31
PL19 (裏乳剤層)	15.46	13.57	12.83
PL23 (表乳剤層)	12.89	11.47	11.34
PL23 (裏乳剤層)	15.51	13.73	12.95

以上より、PL19とPL23の裏乳剤層における平均のPHは概ね一致しているが、表乳剤層における平均のPHはPL19に対してPL23の方が低い値を示していることが顕著になっていた。このことからPL23に関して裏乳剤層をスキャンした際のスキャンパラメータの設定（スキャンすべき乳剤層の厚さの仮定）に問題があるのではないかと推測した。

そこで、両プレートの位置分布とベースの厚みのスキャンデータを比較する。

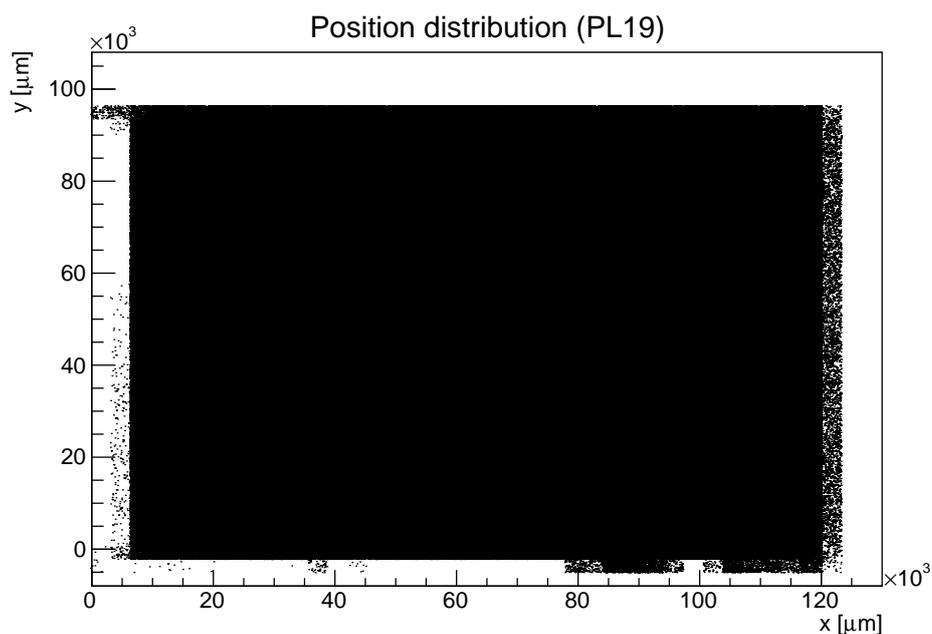


図 5.9: PL19 の位置分布 (散布図)。ヒットがあり、正しくスキャンされた部分は黒くなっている。

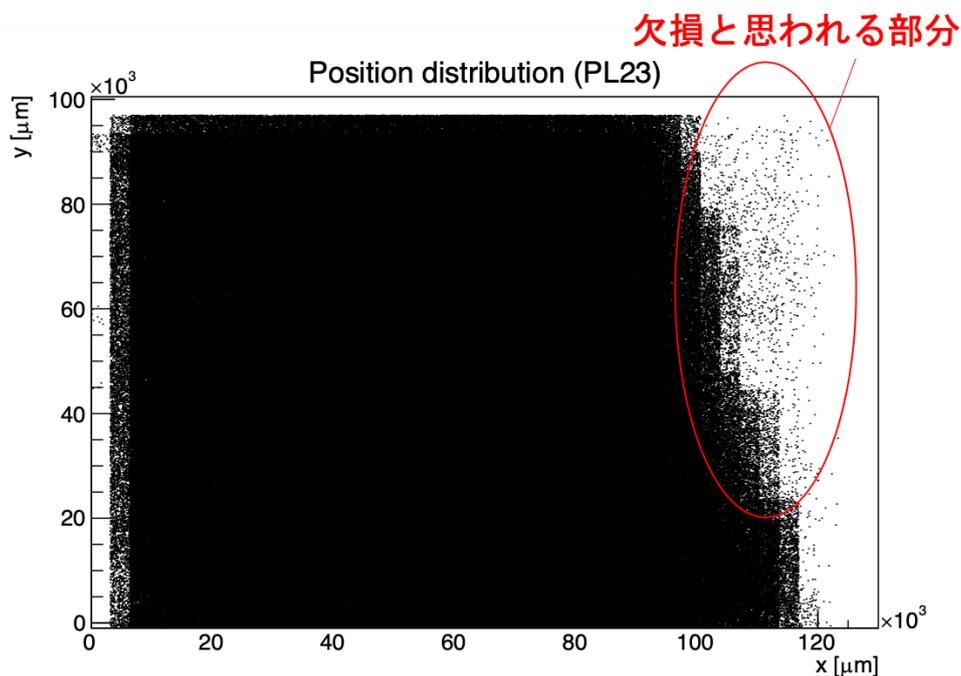


図 5.10: PL23 の位置分布 (散布図)

図 5.8 と図 5.9 を比較すると明らかに PL23 の方は、長辺の  $10\sim 12\text{cm}$  ( $100\times 10^3\sim 120\times 10^3$ ) にかけて欠損が見られることがわかる。この部分だけ上手くスキャンされなかったのが原因であると思われる。

PL19 と PL23 それぞれのベースの厚みデータは図 5.10 と図 5.11 のようになった。

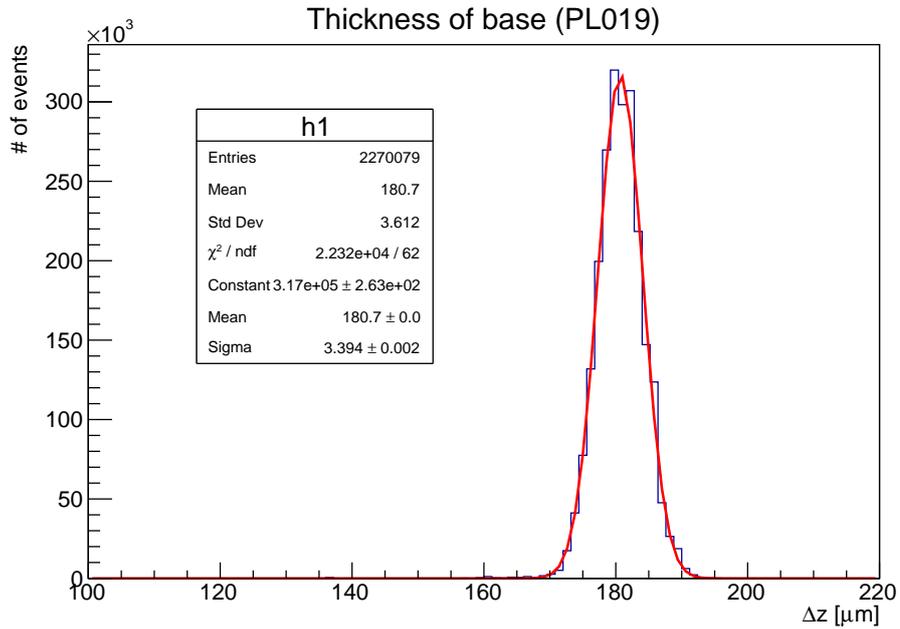


図 5.11: PL19 のベースの厚み分布

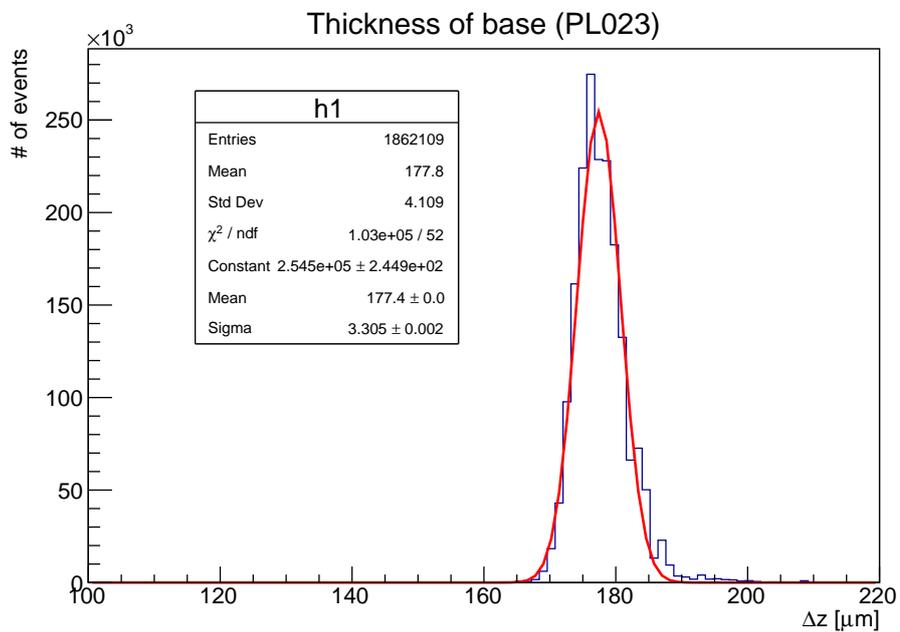


図 5.12: PL23 のベースの厚み分布

PL23 の欠損部分の厚み分布は図 5.12 のようになった。

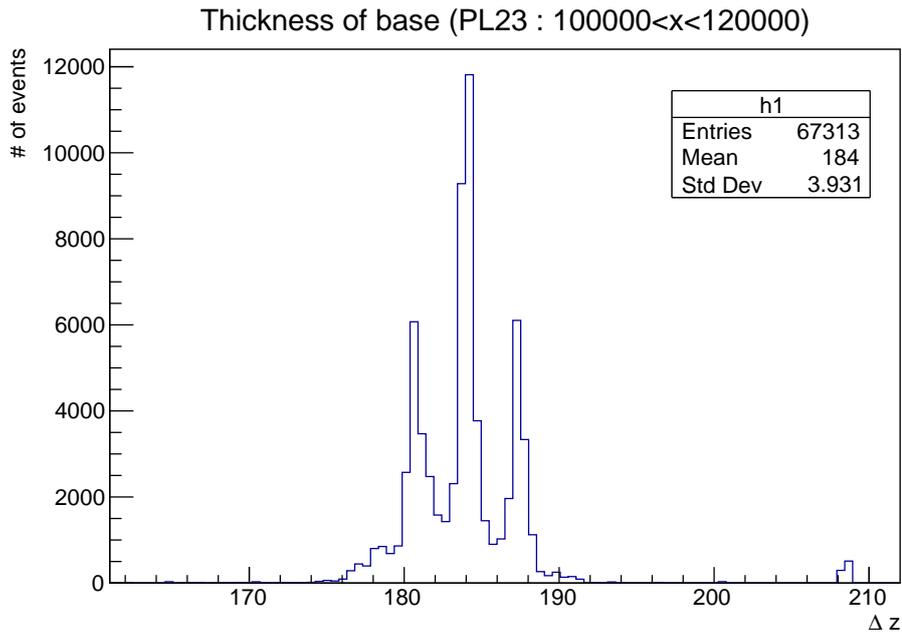


図 5.13: 位置分布の欠損部分だけを取り出した時の PL23 のベースの厚み分布

図 5.10 と図 5.11 から PL23 で若干厚みが  $180\mu\text{m}$  よりも小さくなっているが、全体を見る限りではスキンの深さが大きく影響しているようには見えなかったため、図 5.12 のように PL23 の位置分布の欠損部分をピックアップしてみると全体的に厚くなってしまっており、ピークとなる山が 3 つ存在することがわかる。すなわち厚みの不定性が顕著に現れており、結果としてスキャン時に仮定したパラメータでは PL23 の乳剤層全体をフォローしきれておらず今回のように efficiency の低下の原因になったのだと考えられる。

## 5.2 プレート間における飛跡ズレの評価

自動飛跡読み取り装置 HTS によって得られる情報は、Pulse Height (PH : 銀粒子のヒット数)、Volume Pulse Height (VPH : 飛跡の濃さを表す数値)、飛跡の位置関係 ( $x, y, z$ ) 及び飛跡の角度 ( $\tan \theta_x, \tan \theta_y$ ) である。以下図のように emulsion 層 (乳剤層) にできる飛跡をマイクロトラック、上下のマイクロトラックを繋ぎ合わせてできるプラスチックベース上の仮想の飛跡をベーストラックと呼んでいくことにする。

荷電粒子の飛跡

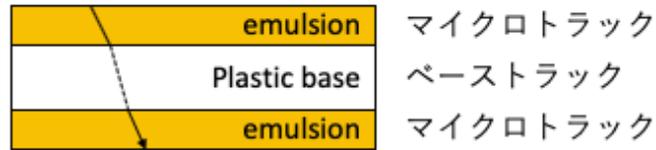


図 5.14: ベーストラック及びマイクロトラックの概念図

複数枚のフィルムを解析するためには、各フィルムに走った飛跡同士を接続する必要がある。接続はプレート間の中間点にベーストラックを外挿することで行う。(図)

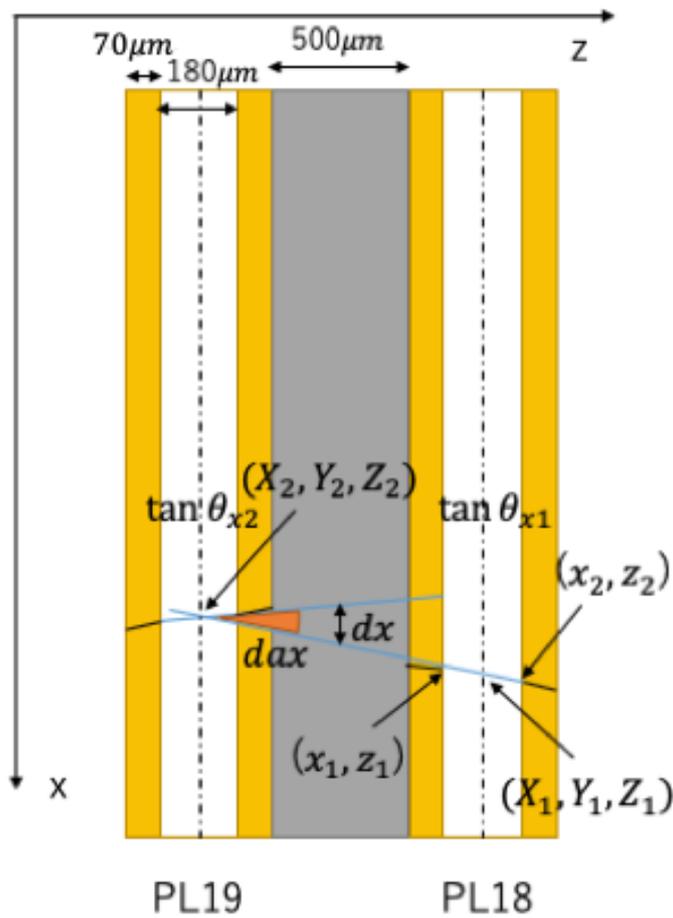


図 5.15: フィルム間飛跡接続の概念図

PL18に着目する。エマルジョンとベースの境界面における飛跡の座標をそれぞれ  $(x_1, z_1)$  及び (

$x_2, z_2$ ) と定めて、 $\tan \theta_{x1}$  を

$$\tan \theta_{x1} = \frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1} = \frac{\Delta x}{\Delta z} \quad (5.2)$$

と定義する。両ベーストラックから飛跡を延長させ PL18 と PL19 のプレート間の中間点にて位置ズレ  $dx$  としてこれを計算する。また両飛跡の延長線同士がなす角を  $dax$  として角度ズレの計算も行う。なお、ここで飛跡接続の際考慮すべき角度ズレ  $dax$  と位置ズレ  $dx$  は PL18 中間点における飛跡の座標を  $(X_1, Y_1, Z_1)$ 、PL19 中間点における飛跡の座標を  $(X_2, Y_2, Z_2)$  としておくと以下の式によって表される。

$$dax = \tan \theta_{x2} - \tan \theta_{x1} \quad (5.3)$$

$$dx = (X_1 - X_2) + \frac{(\tan \theta_{x1} + \tan \theta_{x2})(Z_1 - Z_2)}{2} \quad (5.4)$$

これは、 $dax, dy$  についても同様な表現が可能である。 $dx, dy$  について、これは飛跡の角度が大きくなるとズレが増大してしまうというバイアスをかけた表現となっている。

飛跡接続性能を評価する上で重要なパラメータとなり得る位置ズレと角度ズレについて本項では議論する。

まず根本的に位置ズレや角度ズレが生じる要因にはベーストラックの位置精度や角度精度などが挙げられる。位置精度は、自動読み取り装置 HTS の横方向の読み取り誤差のことであり、これを  $\delta x$  とすれば、 $\delta x = 0.4[\mu\text{m}]$  である。角度精度は、角度依存性があり、深さ方向に対する読み取り誤差 (焦点深度)  $\delta z$  も考慮する必要があり、以下の式で表わすことができる。

$$\sigma_{\tan \theta} = \frac{\sqrt{2}}{\Delta z} \sqrt{\delta x^2 + \delta z^2 \tan^2 \theta} \quad (5.5)$$

HTS において、 $\delta z = 4.0[\mu\text{m}]$  であり、今回ベースの厚み  $\Delta z = 180[\mu\text{m}]$  であるから、顕微鏡の測定精度より期待される角度精度は、 $|\tan \theta| = 0.1$  (と飛跡の角度が小さい  $\sigma_{\tan \theta} = (\frac{\sqrt{2}}{180}) \times \sqrt{0.4^2 + 4.0^2 \times 0.1^2} \sim 4.4[\text{mrad}]$ ) と算出される。

PL18 と PL19 間の飛跡における角度ズレの分布は (図 5.3)～(図 5.5) のようになった。

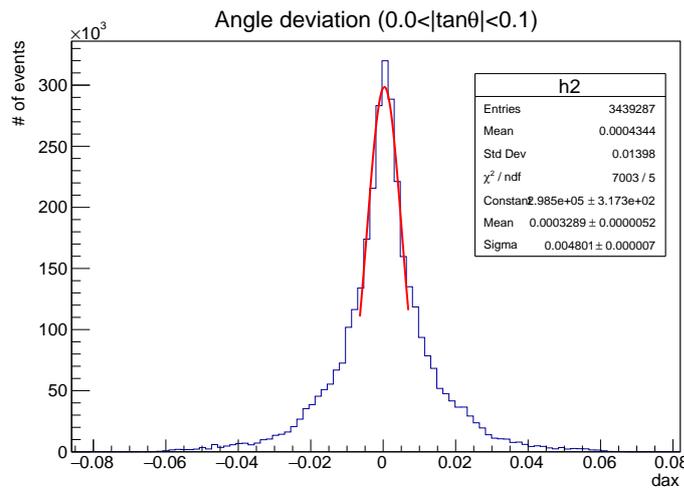


図 5.16:  $0 < |\tan \theta| < 0.1$  における角度ズレ分布

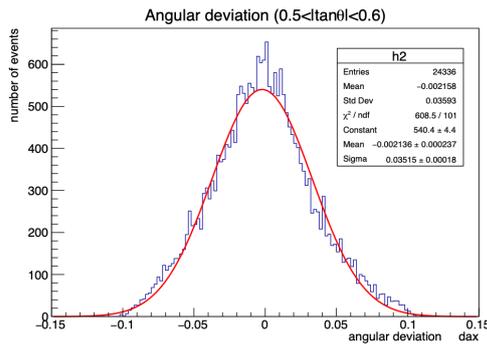


図 5.17:  $0.5 < |\tan \theta| < 0.6$

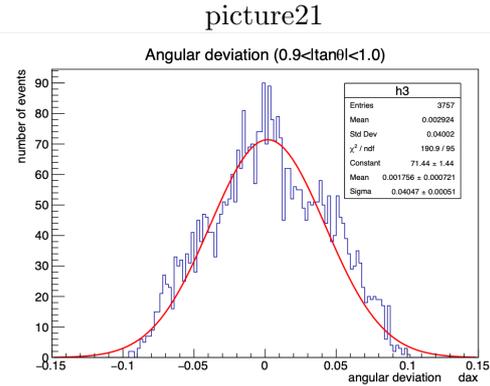


図 5.18:  $0.9 < |\tan \theta| < 1.0$

小角度領域 [ $0 < |\tan \theta| < 0.1$ ] (図 5.3) では、角度ズレは狭小な分布をしていることがわかる。ガウシアンフィッティングの後算出された標準偏差は、 $\sigma_{dax} \sim 0.004801[\text{rad}]$ であった。角度精度 (標準誤差) は、統計学の理論より標準偏差を  $\sqrt{2}$  で割ったものに等しいことから  $0.0034[\text{rad}] = 3.4[\text{mrad}]$  となった。これは測定精度から期待される角度精度内に収まっている。中角度領域 [ $0.5 < |\tan \theta| < 0.6$ ] (図 5.4) では、角度が小さい時に比べてかなりブロードな分布をしている結果となった。同様に角度精度を計算すると  $24.9[\text{mrad}]$  となった。大角度領域 [ $0.9 < |\tan \theta| < 1.0$ ] (図 5.5) における角度精度は  $28.6[\text{mrad}]$  となった。先程の測定精度から期待される角度精度を計算すると、それぞれ  $7.7[\text{mrad}]$ 、 $12.2[\text{mrad}]$  であることから大きな角度領域ではより測定誤差の他に角度精度の悪化に起因する要素があるということが推測できる。

### 5.2.1 多重電磁散乱のの効果の見積もり

フィルム間には今回  $500\mu\text{m}$  の鉄を挿入している (鉛の場合もある)。これは、物質量を多くする目的の支持体として用いられていることのほか、多重電磁散乱を誘発させることで、その効果 (散乱角) を測定することで粒子の運動量を見積もることができる。まず、多重電磁散乱による散乱角と位置ズレの RMS (二乗平均平方根) は

$$\delta\theta_{\text{scat}} = \frac{13.6}{p\beta} \sqrt{\frac{x}{X_0}} z(1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0}) \quad (5.6)$$

$$\delta x_{\text{scat}} = \frac{x}{\sqrt{3}} \frac{13.6}{p\beta} \sqrt{\frac{x}{X_0}} z(1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0}) \quad (5.7)$$

で与えられる。p は粒子の運動量 [MeV/c]、 $\beta = \frac{v}{c}$ 、z は電荷量 (今回は  $z=1$ )、x は透過物質の透過距離 [cm]、 $X_0$  は透過物質の放射線長 [cm] である。

## 5.3 粒子識別

今回の照射試験では陽子、パイ中間子、陽電子の混合ビームが照射されたため、原子核乾板には 3 種の飛跡が蓄積されているはずである。このセクションでは、その識別をモチベーションとして解析を行い、その結果と考察を述べる。

### 5.3.1 ベーテブロッホの式と VPH

VPH はマイクロトラックの飛跡の濃さに対応する数値であり、電離損失に対応するものである。荷電粒子の電離損失を表す理論的な式として Bethe-Bloch の式がある。この式は (5.8) 式で与えられる。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} \frac{\rho N_A Z}{M} \left[ \ln \frac{2m_0 c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (5.8)$$

$ze$  は荷電粒子の電荷量 [C]、 $m_0 c^2$  は電子の静止質量 (0.511MeV)、 $v$  は粒子の速度 [m/s]、 $\rho$  は吸収物質の密度 (今回は鉄なので  $7.87\text{g/cm}^3$ )、 $N_A$  はアボガドロ数 ( $6.02 \times 10^{23}/\text{mol}$ )、 $Z$  は吸収物質の原子番号 (今回は鉄なので 26)、 $M$  は吸収物質のモル質量 (今回は鉄なので  $56\text{g/mol}$ )、 $\beta = \frac{v}{c}$  である。これを陽子、 $\pi$  中間子、陽電子それぞれについての電離損失を各エネルギーの関数としてグラフを描くと以下ようになった。

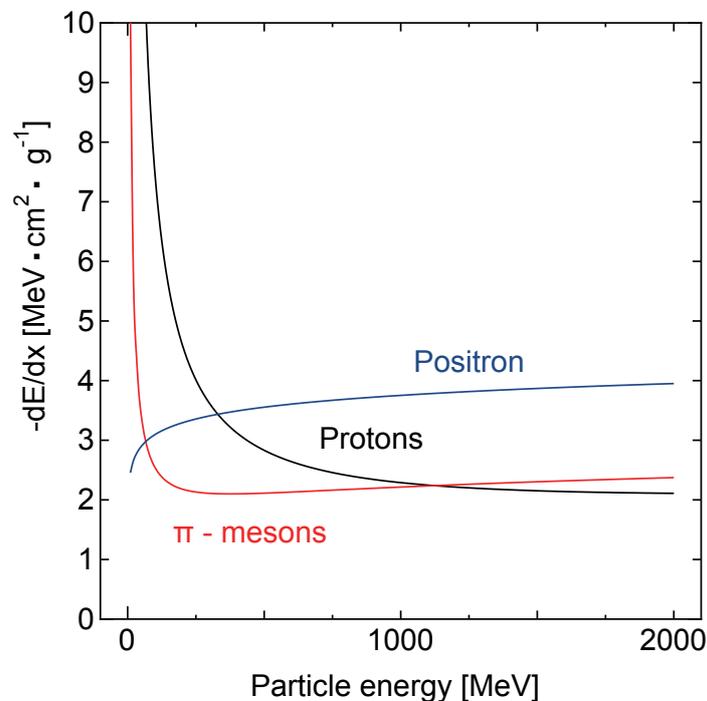


図 5.19: 陽子、 $\pi$  中間子、陽電子のエネルギーと電離損失の関係

これより 1GeV より低いエネルギー (運動量) ならばパイ中間子 < 陽子 < 陽電子と個々の差が顕著になっていることがわかる。また、陽子に関してはエネルギー (運動量) の変化に対して大きく電離損失が下がっていることがわかるが、パイ中間子の場合は 500MeV 以内に大きく落ち込んでからはエネルギー (運動量) の変化に対して殆ど電離損失は変化しないということがわかる。VPH は電離損失を表しているので、陽子、パイ中間子に関して、低エネルギー (低運動量) では個々のピークが顕著に見えるが次第にエネルギー (運動量) が大きくなるにつれ陽子のピークがパイ中間子のピークに重なっていく傾向が見られると予測した上で本解析を行った。

### 5.3.2 手法と解析

まずビームの解析を行うにあたり、ビームのスポットを取り出すことから始めた。回転台に載せた原子核乾板を  $\tan\theta_y$  に関して回転させてビームを照射しているのでビームのスポット情報は角度分布が持っているため、角度分布を示した上で各スポットを選択した。今回 PL18~PL 24 の7枚の中間点にあたる PL21 の角度分布 (図 5.20) を用いた。図 5.21 より4方向にビームスポット

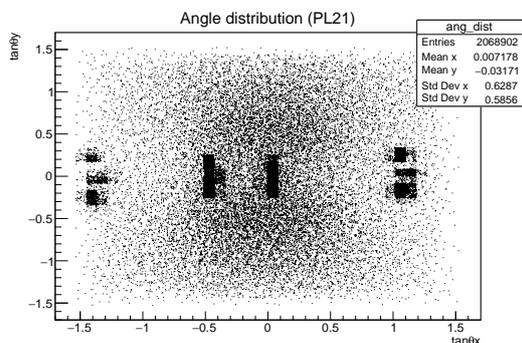


図 5.20: PL21 の角度分布

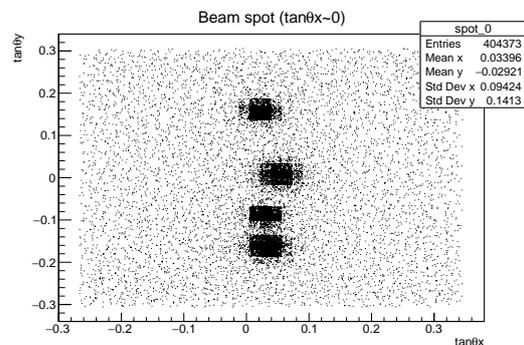


図 5.21:  $\tan\theta_x \sim 0$  付近のビームスポットを選択的に示した図

が分離していることがわかる。さらに各ビームスポットを取り出すと z 図 5.22~図 5.25 になる。

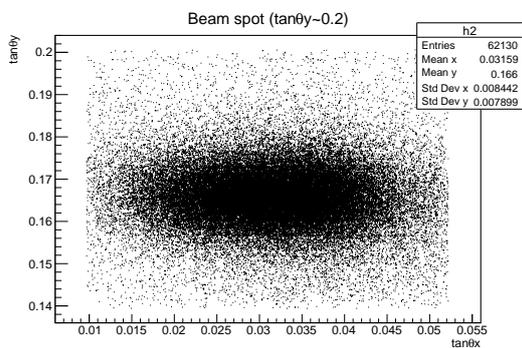


図 5.22: ビームスポット 1

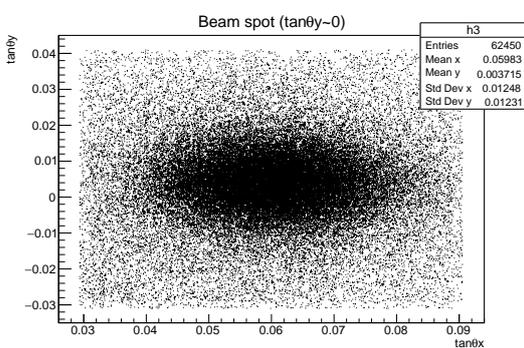


図 5.23: ビームスポット 2

これらより各スポットについて  $\tan\theta_x, \tan\theta_y$  について標準偏差  $\sigma_{ax}, \sigma_{ay}$  を求めると、ビームスポット 1 は  $\sigma_{ax} \sim 0.009898, \sigma_{ay} \sim 0.007132$ 、ビームスポット 2 は  $\sigma_{ax} \sim 0.008288, \sigma_{ay} \sim 0.005193$ 、ビームスポット 3 は  $\sigma_{ax} \sim 0.01165, \sigma_{ay} \sim 0.008734$ 、ビームスポット 4 は  $\sigma_{ax} \sim 0.00909, \sigma_{ay} \sim 0.006039$  となった。この  $\sigma$  について、各スポット  $\pm 2\sigma$  以内をビーム中心として採用した。ビーム中心での各トラックの平均 VPH を計算しプロットすると図 5.26~図 5.29 のようになった。結果として、パイ中間子 (最小電離粒子:MIP) であろうと考えられるピークは VPH が 150 前後で観測されるものの陽子、陽電子のピークは観測されなかった。しかしどのプロットも VPH250 にかけてテールが伸びていることが確認できる。このテールこそが陽子によるものであると思われる。より詳細に確認するために PH で条件を更に絞ることを考える。ビームスポット 1 の VPH と PH の関係を示すと以下ようになる。

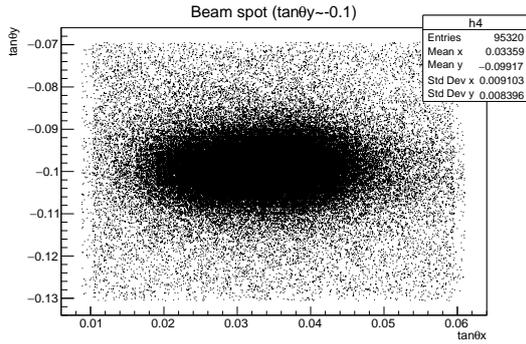


図 5.24: ビームスポット 3

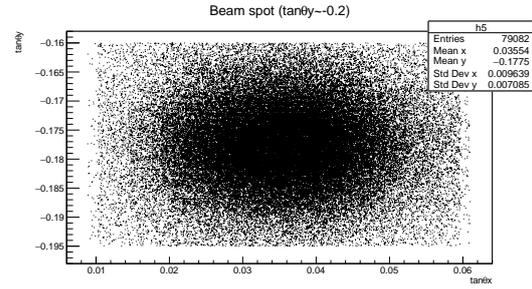


図 5.25: ビームスポット 4

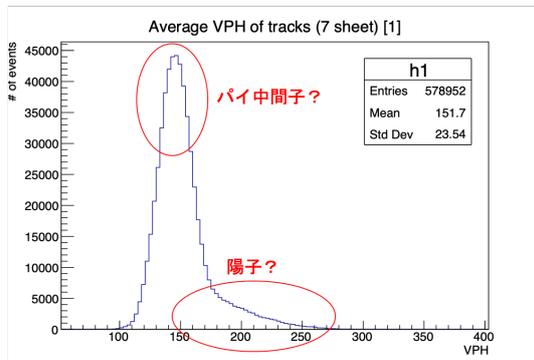


図 5.26: ビームスポット 1 のビーム中心における  
各トラックの平均 VPH

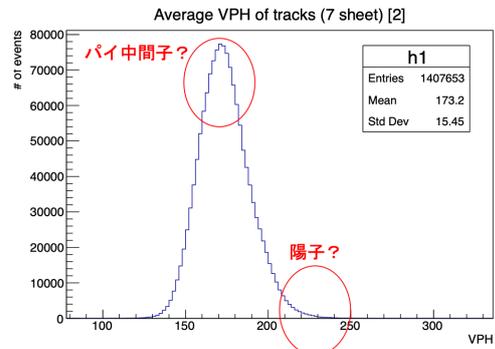


図 5.27: ビームスポット 2 のビーム中心における  
各トラックの平均 VPH

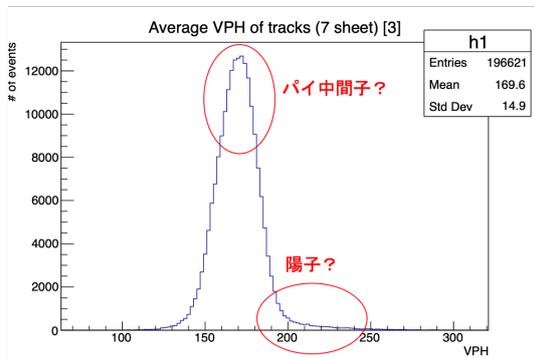


図 5.28: ビームスポット 3 のビーム中心における  
各トラックの平均 VPH

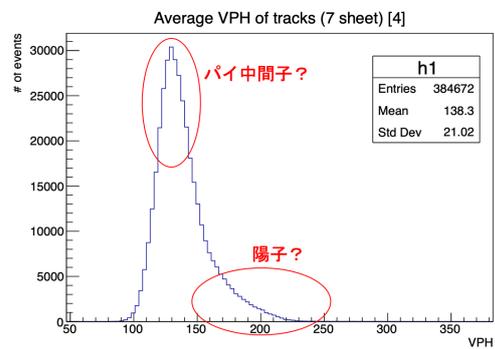


図 5.29: ビームスポット 4 のビーム中心における  
各トラックの平均 VPH

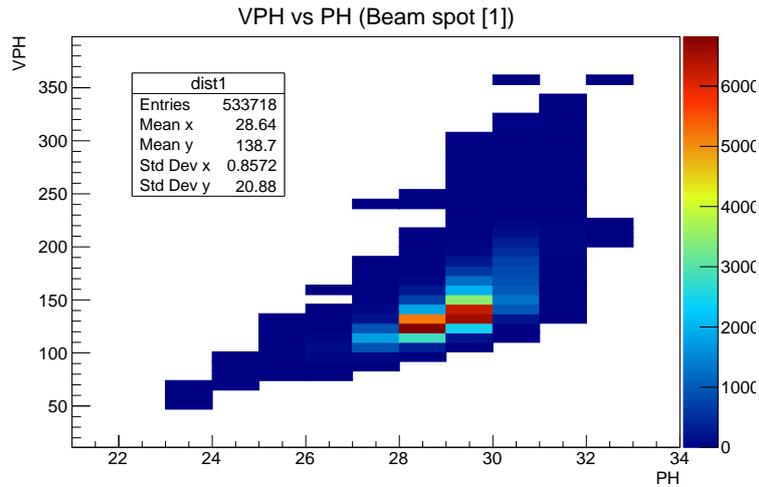


図 5.30: ビームスポット 1 における VPH と PH の相関関係

これより、VPH が大きいと PH も大きくなる傾向があることがわかるので、VPH がパイ中間子よりも大きいと考えられる陽子のスポットを選択的に抽出するため PH でカットをかける。例として、先ほどのグラフより最小電離粒子の割合が比較的低いと考えられる PH31 以上で条件を絞ると次のようになった。

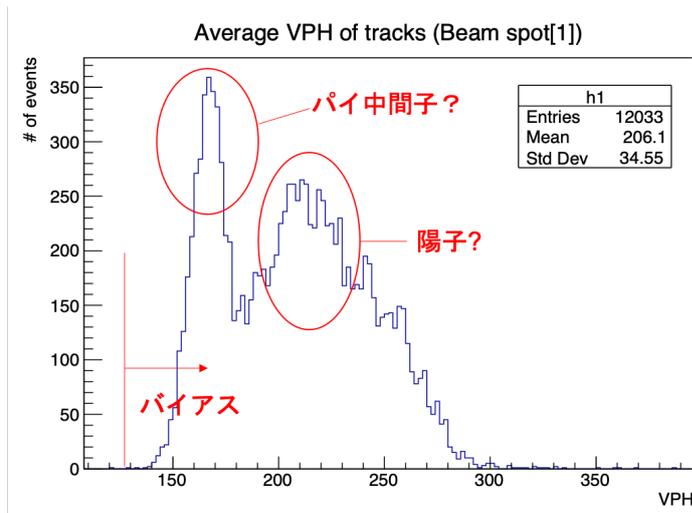


図 5.31: ビームスポット 1 における各トラックの平均 VPH に  $31 \leq PH$  の条件を課したプロット

図 5.31 よりパイ中間子と陽子のピークと思われる 2 つの山が確認できる。しかしながらこれは PH の高い飛跡を選択的に取り出したものであるから若干のバイアスがかかってしまい、MIP と考えられるピークの VPH が PH カット前の図 5.26 と比較して高く出てしまっている。これは VPH が真の  $-\frac{dE}{dx}$  の値とはずれてしまっていることを示していると考えられる。今回のようにピークが明確に分離できなかった原因として、まずは統計量の少なさが考えられる。今回 7 枚のプレートでそのうち 4 枚以上のプレートを貫いた飛跡を選択して解析を行ったが、これでは偶然接続されてしまったノイズトラックを落としきれていないために VPH の低い部分の割合が高くなってしまっ

たのではと考えられる。もし7枚中5枚以上通過のトラックなどを選んだとすれば相対的にVPHが高いもの（濃い飛跡）を選別したことになってしまい先程のようにバイアスのかかったグラフになると思われる。こういった問題点は解析の枚数を増やすことで改善され、テールとして現れていたプロトンと思われるスポットも次第にピークを持つものと考えられる。なぜならより多くのプレートから解析することで少ない枚数でしか貫けないような低エネルギー電子よりもPHの高い飛跡を拾う割合も増えてくるからである。

また陽電子と思われるスポットと思われる部分が見当たらなかったのは、2つの要因があると思われる。まず（陽）電子自体が極めて質量の軽いものであるということ（静止質量0.511MeV）、そして軽いがゆえに支持体である鉄内部の原子核による電場によって、陽電子は加速して電磁波を発生する制動放射（Bremsstrahlung）による影響を電離損失によるエネルギー損失よりも強く受けてしまうからであると考えられる。何れにせよ、統計量を増やして追求することが重要である。

## 第6章 結論

### 謝辞

今回、原子核乾板の作成及び解析を行うにあたり、助言を初めとして、B4として単独で名古屋大学に訪問するにあたり多くのサポートを名古屋大学F研究室の方々にはしていただき、大変な御礼を申し上げます。

特に福田努 YLC 特任助教には名古屋への訪問のサポートや何も分からなかった私への直接の熱心な指導、テレビ会議などによるレクチャーなど忙しい合間を縫って力を注いでいただき大変感謝申し上げます。

またF研究室 M1 高尾さん、M2 鈴木さんにはベース処理を始め、乳剤塗布、現像、膨潤、スキャン、解析に至る一連の流れを丁寧にご指導をしていただき、疑問に感じたことであってもすぐ解決してくださって大変心強く思いました。

そして、F研究室 B4 増田さんとは、塗布作業において慣れない暗室での作業のサポートをしていただきました。

本研究室の M1 浅田さん、岡本さん、D1 の Giorgio には ROOT のセットアップを始め、特にソフトウェア関連について親身になってご指導いただき、B4である未熟な私をサポートをして下さりました。時には、理論についてのレクチャーもしていただき、疑問に感じたことも一緒に考えて解決まで導いてくださり大変な感謝の意を表します。

また、同期である片山さん、佐々木君、山本君はお互いに違う研究をしていたものの、プログラムについて、理論について、ハードウェアについて意見交換をし心が折れそうな時も激励し合いながら活動することができました。本当に感謝をしています。

そして、本研究室の担当教諭である南野准教授は、日々本当に多忙でありながら、研究についての助言や相談、実験ゼミにおける丁寧なご指導、NINJA 実験に携わる契機を作ってサポートしていただき大変な御礼を申し上げます。