

NINJA 実験における原子核乾板の乳剤層膨潤処理の違い  
による角度精度の評価

横浜国立大学 理工学部  
数物・電子情報系学科 物理工学 EP  
南野研究室

1964028 伊藤俊

2023年2月14日

## 概要

NINJA 実験は、J-PARC ニュートリノビームを原子核乾板検出器に照射し、ニュートリノと標的原子核の反応断面積を精密に測定している。原子核乾板は、サブミクロン以下という非常に小さな位置分解能を持つため、ニュートリノ反応点まわりで陽子や荷電パイオンといった飛程が短い粒子を検出することを得意としている。

本研究では、2022 年 11 月に東北大学 電子光理学研究センター (ELPH) で陽電子ビームを照射した原子核乾板の膨潤時間を変えることにより乳剤層の厚みを変化させ、飛跡読み取り装置によるスキャンを行い、解析精度にどのような変化が見られるかを検証した。

# 目次

|            |                   |           |
|------------|-------------------|-----------|
| <b>第1章</b> | <b>ニュートリノ</b>     | <b>3</b>  |
| 1.1        | ニュートリノの発見         | 3         |
| 1.2        | ニュートリノの成り立ち       | 3         |
| 1.3        | ニュートリノ振動          | 4         |
| 1.3.1      | 太陽ニュートリノ          | 4         |
| 1.3.2      | ニュートリノ振動          | 5         |
| <b>第2章</b> | <b>NINJA 実験</b>   | <b>6</b>  |
| 2.1        | NINJA 実験          | 6         |
| 2.1.1      | 原子核乾板             | 6         |
| 2.2        | 陽電子ビーム照射試験        | 7         |
| 2.2.1      | 目的                | 7         |
| 2.2.2      | 実施場所及び日程          | 8         |
| 2.2.3      | 陽電子ビーム            | 8         |
| 2.2.4      | 陽電子照射試験のセットアップ    | 9         |
| 2.2.5      | ビームサイクル           | 10        |
| 2.2.6      | 電動アクチュエーター        | 11        |
| 2.2.7      | 実験手順              | 13        |
| <b>第3章</b> | <b>フィルムの現像、膨潤</b> | <b>16</b> |
| 3.1        | 現像                | 16        |
| 3.1.1      | 現像の原理             | 16        |
| 3.1.2      | 現像の手順             | 16        |
| 3.2        | 膨潤                | 18        |
| 3.2.1      | 膨潤の原理             | 19        |
| 3.2.2      | 膨潤の手順             | 19        |
| <b>第4章</b> | <b>原子核乾板の解析</b>   | <b>23</b> |
| 4.1        | HTS               | 23        |
| 4.2        | スキャンの手順           | 24        |
| 4.3        | スキャンデータの変換        | 25        |
| 4.4        | スキャンデータの解析        | 26        |
| 4.5        | トラックランキング         | 28        |

|             |                                |           |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 4.6         | 隣り合うプレートのベーストラックの角度差 . . . . . | 35        |
| 4.7         | ベーストラックとマイクロトラックの角度差 . . . . . | 36        |
| <b>第5章</b>  | <b>まとめと今後の展望</b>               | <b>40</b> |
| 5.1         | まとめ . . . . .                  | 40        |
| 5.2         | 今後の展望 . . . . .                | 40        |
| <b>付録</b>   |                                | <b>41</b> |
| A           | 誤差の計算 . . . . .                | 41        |
| <b>謝辞</b>   |                                | <b>42</b> |
| <b>参考文献</b> |                                | <b>45</b> |

# 第1章 ニュートリノ

## 1.1 ニュートリノの発見

1930年頃、原子核のベータ崩壊の研究において、問題が生じていた。ベータ崩壊は以下のように表される。

$$A \rightarrow B + e^- \quad (1.1)$$

A は親核、B は娘核、 $e^-$  は電子である。これは二体崩壊なので、崩壊後の粒子のエネルギーは運動学的に決めることができる。すなわち、親核 A が静止しているとき、B と  $e^-$  は互いに反対方向に、等しい運動量を持って崩壊し、エネルギー保存則により、電子のエネルギーは以下のようになる。

$$E = \left( \frac{m_A^2 - m_B^2 - m_e^2}{2m_A} \right) c^2 \quad (1.2)$$

しかし、実際の実験によると、電子のエネルギーはある幅を持つことがわかった。式 (1.2) はその範囲においての電子のエネルギーの最大値となっていた。

この理論と実験のずれに関しては二つの説があった。Niels Henrik David Bohr (Bohr) は当初エネルギー保存則が破れていると考えたが、Wolfgang Ernst Pauli (Pauli) はベータ崩壊の際に、娘核と電子の他に何か別の粒子が放出されていると考えた。この粒子は電荷保存のために中性である必要があった。また、電子のエネルギーの最大値が式 (1.2) に到達していることから、非常に軽いことが示唆された。結論を言うと、後者の Pauli の考えが正しく、この非常に軽く、電氣的に中性な粒子は Enrico Fermi (Fermi) によって、ニュートリノと名付けられた。なお、ベータ崩壊で出てくるのは反ニュートリノである。

よって、ベータ崩壊は次のように表される。

$$A \rightarrow B + e^- + \bar{\nu} \quad (1.3)$$

$\bar{\nu}$  は反ニュートリノである。

## 1.2 ニュートリノの成り立ち

現在、物質を構成する最小単位は素粒子と呼ばれ、レプトン、クォーク、力を媒介する素粒子、質量を与える素粒子の四種類に分かれている。以下に、主な素粒子を示す [2]。

表 1.1: 主な素粒子

|      | 電荷量             | 第一世代                  | 第二世代                     | 第三世代                     |
|------|-----------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| クォーク | $+\frac{2}{3}e$ | $u$<br>(アップ)          | $c$<br>(チャーム)            | $t$<br>(トップ)             |
|      | $-\frac{1}{3}e$ | $d$<br>(ダウン)          | $s$<br>(ストレンジ)           | $b$<br>(ボトム)             |
| レプトン | $-e$            | $e$<br>(電子)           | $\mu$<br>(ミュー粒子)         | $\tau$<br>(タウ粒子)         |
|      | 0               | $\nu_e$<br>(電子ニュートリノ) | $\nu_\mu$<br>(ミューニュートリノ) | $\nu_\tau$<br>(タウニュートリノ) |

ニュートリノには対応する素粒子の種類によって、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノが存在することが分かっている。

近年まで、ニュートリノの質量は0であると考えられてきたが、それは間違いであることが分かった。さらに、ニュートリノは長距離飛行すると、別のタイプのニュートリノに変化し、さらに、またしばらくすると元に戻るというニュートリノ振動現象が知られている。次の章では、このニュートリノ振動について、詳しく説明する。

## 1.3 ニュートリノ振動

先の章で述べたように、ニュートリノは長距離飛行すると、別のニュートリノに変化する。まずは、ニュートリノ振動発見の契機となった、太陽ニュートリノの説明を行う。

### 1.3.1 太陽ニュートリノ

太陽内部での核反応からは、ニュートリノも放出される。そこで、Raymond Davis Jr たちは、宇宙線バックグラウンドを取り除くために、鉱山の地下深くで太陽からやってくる電子ニュートリノの観測実験を行なった。

電子ニュートリノの反応は以下で表される。



この反応で生じる Ar を観測するために、大量の塩素をタンクに溜めて実験を行なった。その結果、式 (1.4) で生じる Ar は確かに観測されたが、その量は予測値の 1/3 程度であった。

当初、この結果は Ar の観測漏れなどが疑われていたが、別の検出法を使った実験においても、同様の結果が得られたため、この問題は太陽ニュートリノ問題と呼ばれるようになった。

### 1.3.2 ニュートリノ振動

1968年、Bruno Pontecorvo (Pontecorvo) は太陽ニュートリノ問題に対して、ニュートリノが飛行中に別の種類のニュートリノに変化するという解決策を提案した。これがニュートリノ振動である。

ニュートリノ振動理論は1962年に Pontecorvo・坂田昌一・牧二郎・中川昌美によって定式化された。まず、3世代のニュートリノ  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  は量子力学的な重ね合わせにより、次のように表される。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

U はユニタリ行列、 $\nu_i$  はニュートリノの質量固有状態である。すなわち、式(1.5)は3種類のニュートリノ  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  が質量固有状態の重ね合わせで表されることを意味している。

簡単のため、2種類のニュートリノ（電子ニュートリノとミューニュートリノ）について考える。この系の安定な状態は二つの直行する固有状態で表される。

$$\nu_1 = \cos \theta \nu_\mu - \sin \theta \nu_e \quad (1.6)$$

$$\nu_2 = \sin \theta \nu_\mu + \cos \theta \nu_e \quad (1.7)$$

初期状態が電子ニュートリノの場合、 $\nu_e = 1, \nu_\mu = 0$  なので  $\nu_1(0) = -\sin \theta, \nu_2(0) = \cos \theta$  となる。

よって、時刻  $t$  の時、

$$\nu_1(t) = -\sin \theta e^{-iE_1 t/\hbar} \quad (1.8)$$

$$\nu_2(t) = \cos \theta e^{-iE_2 t/\hbar} \quad (1.9)$$

ゆえに、式(1.6), 式(1.7)を  $\nu_\mu$  について解くと、

$$\nu_\mu(t) = \cos \theta \nu_1(t) + \sin \theta \nu_2(t) = \sin \theta \cos \theta \left( -e^{-iE_1 t/\hbar} + e^{-iE_2 t/\hbar} \right) \quad (1.10)$$

よって、時間  $t$  が経過した後に、電子ニュートリノがミューニュートリノに変化する確率  $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}$  は、

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = |\nu_\mu(t)|^2 = \left[ \sin^2(2\theta) \sin^2 \left( \frac{E_2 - E_1}{2\hbar} t \right) \right] \quad (1.11)$$

である。式(1.11)は時刻  $t$  の変化により、振動することがわかる。これがニュートリノ振動である。

## 第2章 NINJA 実験

### 2.1 NINJA 実験

NINJA 実験では、乳剤層、ベース層、乳剤層のサンドウィッチ構造の原子核乾板検出器を用いてニュートリノ反応の精密測定をおこなっている。

#### 2.1.1 原子核乾板

原子核乾板は写真のフィルム的一种であり、高い位置分解能を持つ。図 2.1に、本研究に用いた原子核乾板の構造を示す。

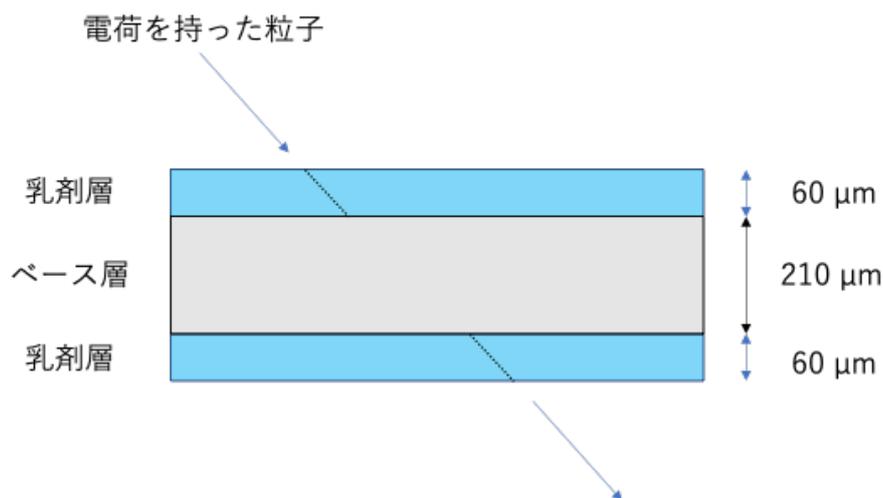


図 2.1: 原子核乾板の構造

原子核乾板は、支持体であるプラスチックベースに、主にゼラチンからなる乳剤層を塗布することで作成される。乳剤層に含まれる AgBr 結晶付近を荷電粒子が通過すると、AgBr が電離され、 $\text{Ag}^+$  が還元されることで銀粒子が作られる。銀粒子が複数集まると、潜像核と呼ばれる銀クラスターになる。この潜像核を現像によって、化学的に成長させることで、顕微鏡や Hyper track selector (HTS) などの飛跡読み取り装置で読み取れるようにする。図 2.2が原子核乾板の顕微鏡写真であり、黒点（銀粒子）が直線上に並んでいるものが荷電粒子による飛跡である。銀粒子は新型の大粒子乳剤のものなので、従来型（約 200 nm）より大きく、約 310 nm である。

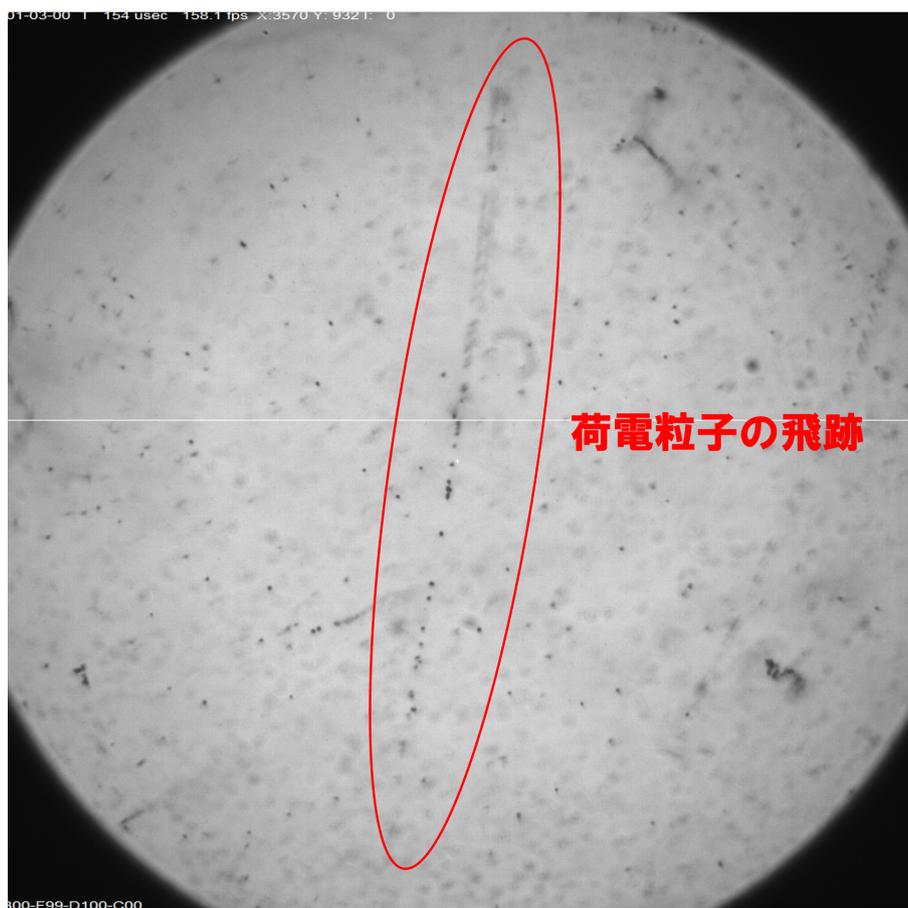


図 2.2: 原子核乾板の顕微鏡写真

## 2.2 陽電子ビーム照射試験

2022 年 11 月、名古屋大学、東邦大学、東北大学、横浜国立大学が共同で東北大学光理学研究センター (ELPH) で原子核乾板への陽電子ビーム照射試験を行った。

### 2.2.1 目的

本実験の目的は NINJA 実験における原子核乾板の新型乳剤で制作された原子核乾板の性能評価である。新型乳剤は従来の乳剤に比べて現像後の銀粒子サイズが 1.5 倍であり、スキャン時の感度が高くなることが期待されている。

### 2.2.2 実施場所及び日程

陽電子ビーム照射試験は東北大学光物理学研究センター (ELPH) の GeV ガンマ照射室で行った。実験の日程は 2022/11/8 - 11/12 で、最初の 2 日間で実験の準備を行い、残りの日程で原子核乾板へ陽電子ビームを照射した。

### 2.2.3 陽電子ビーム

ELPH 実験の陽電子ビームの発生機構について説明する。図 2.3は ELPH 施設の概略図である。

1. 電子線形加速器にて、電子が最大 100 MeV まで加速される。
2. 電子線形加速器からシンクロトロン (1.3 GeV ブースター・ストレージリング) に電子が入射後、加速される。シンクロトロンで電子が加速されるときに、電子の制動放射により、0.8 - 1.3 GeV のガンマ線が放出される。
3. GeV ガンマ照射室にて、ガンマ線をターゲット金属 (タングステンまたは金) に照射し、電子・陽電子対生成を起こし、双極電磁石 RTAGX により電子のみを取り除き、陽電子ビームを発生させる。陽電子ビームの運動量は、加速器を駆動する電流に比例するので、この電流を調整することで陽電子ビームの運動量を調整した。

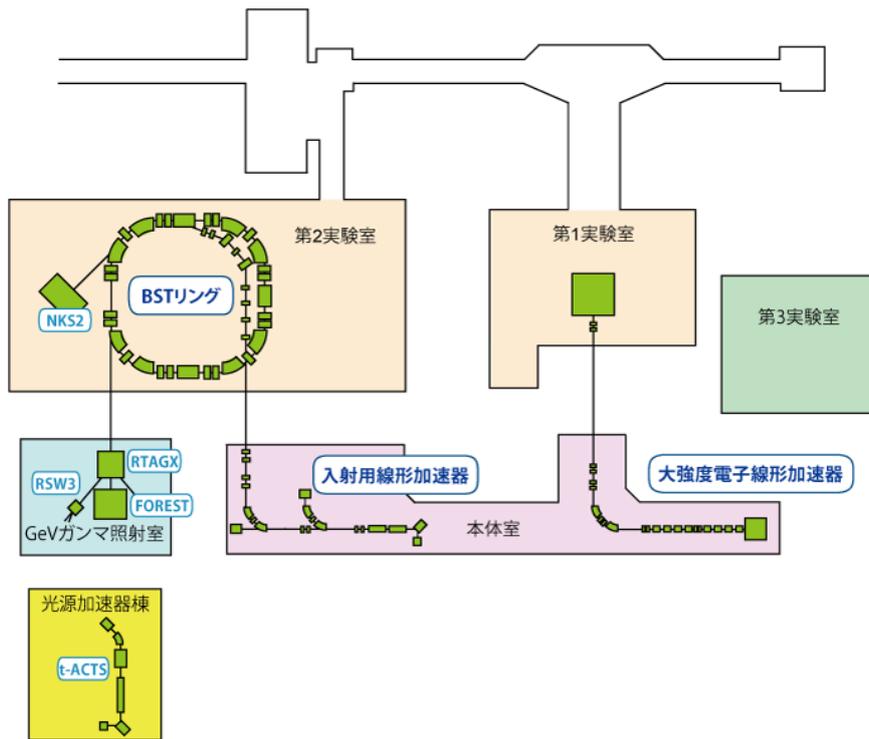


図 2.3: ELPH ビームライン [5]

#### 2.2.4 陽電子照射試験のセットアップ

陽電子ビーム照射試験のセットアップを次に示す。

- 照射ビーム: 陽電子 (300-800 MeV/c)
- 原子核乾板検出器: 水 ECC、鉄 ECC、原子核乾板のみの ECC

ECC とは Emulsion Cloud Chamber の略称で、標的となる物質（水、鉄など）と原子核乾板を交互に重ね合わせた検出器である。私が本研究で解析を行ったのは、標的となる物質を含まない原子核乾板のみを 8 枚重ね合わせた ECC である。図 2.4 に実験時の ECC のセットアップを示す。

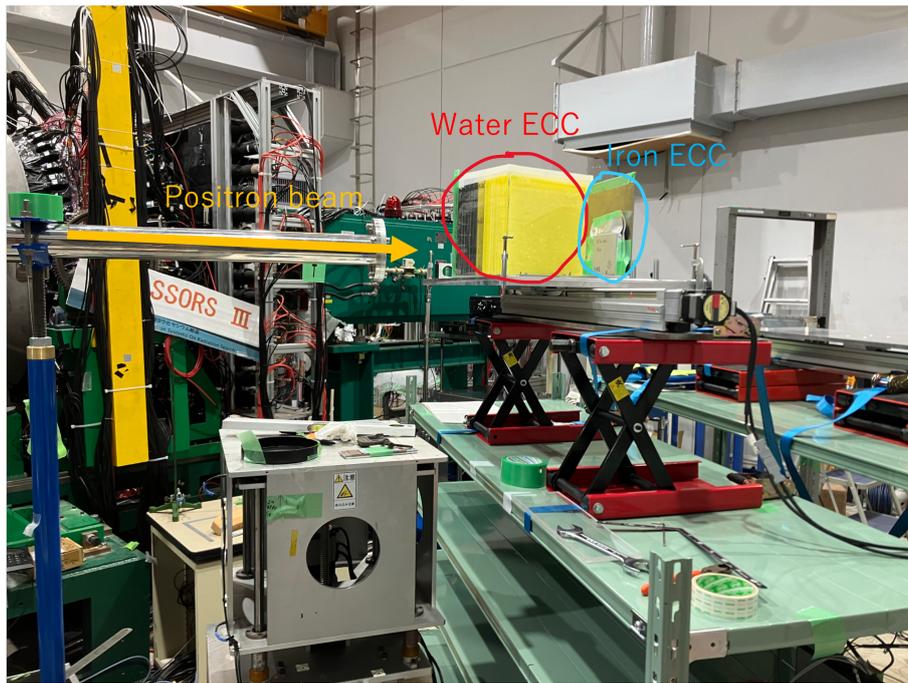


図 2.4: ELPH 陽電子ビーム照射実験装置

### 2.2.5 ビームサイクル

ELPH の陽電子ビームは 10 秒間照射され、7 秒間停止するというサイクルを持つ。より具体的には、5 秒間、サイクロトロンに電子の供給を行い、2 秒かけて入射した電子を加速し、10 秒間、加速電子からの制動放射でターゲットの金属（本実験では Au）にガンマ線の照射を行い、陽電子を得るという仕組みである。図 2.5 にビームサイクルを示す。



図 2.5: ビームサイクル

原子核乾板にビーム照射される時間が長いほど、原子核乾板に記録されるトラック密度は大きくなる。解析に都合の良いトラック密度は 2000 - 3000 本/cm<sup>2</sup> 程度であるので、電動アクチュエーターを用いて照射時間を調整した。

なお、1 周期あたりの陽電子ビームの照射本数の測定は薄型プラスチックシンチレーターを用いて行なった。図 2.6 に薄型プラスチックシンチレーターのセットアップを示す。陽電子ビームが薄型プラスチックシンチレーターの有感部を通過すると、シンチレーション光が発生する。このシンチレーション光を光電増倍管 (PMT) によって増幅し、NIM モジュールによって、電気信号としてカウントした。



図 2.6: 薄型プラスチックシンチレーターのセットアップ

薄型プラスチックシンチレーターの有感部面積を  $2.25\text{cm}^2$  として、3 バンチ分の陽電子ビームカウントを測定した。その結果を表 2.1 に示す。

表 2.1: 陽電子ビームの照射本数

| 運動量 (MeV/c) | 陽電子ビームの本数/bunch/cm <sup>2</sup> | ターゲット金属 |
|-------------|---------------------------------|---------|
| 300         | 1170                            | Au      |
| 500         | 1680                            | Au      |
| 800         | 932                             | Au      |

## 2.2.6 電動アクチュエーター

陽電子ビーム試験において、私が制御を担当した電動アクチュエーターについて説明する。前節で説明したように、解析の都合上 原子核乾板へのビームの照射本数を調整する必要があり、そのために電動アクチュエーターを用いた。また、陽電子ビームを照射している間、研究者は照射室に

入ることはできないので、電動アクチュエーターを遠隔操作することで、原子核乾板検出器への陽電子ビームの照射位置、照射時間を調整した。

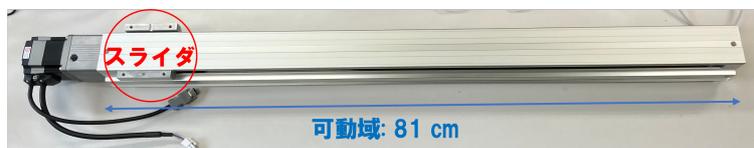


図 2.7: 電動アクチュエーター

図 2.7が電動アクチュエーターである。電動アクチュエーターにはモーターが搭載されており、それによって、スライダ部を駆動する。電動アクチュエーターの制御には、専用ソフトウェアである MEXE02 [11] を使用し、スライダの座標、移動速度、停止時間などをプログラムした。図 2.8に陽電子ビーム試験の際の電動アクチュエーターのセットアップを示す。



図 2.8: 実験時の電動アクチュエーターセットアップ

陽電子ビーム試験時はスライダ部にアルミ製の板を取り付け、その上に水 ECC、鉄 ECC、原子核乾板のみの ECC を設置した。

## 2.2.7 実験手順

### 1. 実験装置の設置

まず、実験装置の組み立てを行なった。アクチュエータの土台となるラックの組み立て、アクチュエーターと ECC の間に挟むアルミ板の設置、ビームが適切な位置に照射されるためのレーザー墨出し機によるアライメント調整などが主な作業内容である。

## 2. ビーム照射

本研究に用いた原子核乾板のみの ECC への照射は、12.5 cm × 10.0 cm サイズの原子核乾板へ 500 MeV/c の運動量の陽電子ビームを  $\tan \theta = 0, -0.5, 1, -4, 5$  方向に行なった。照射した陽電子ビームのバンチ数は  $\tan \theta = 0, -0.5$  の時 3、 $\tan \theta = 1$  の時 5、 $\theta = -4$  の時 9、 $\tan \theta = 5$  の時 10(11 バンチ目も少し入ってしまった) である。ビームの照射位置を図 2.9 に示す。

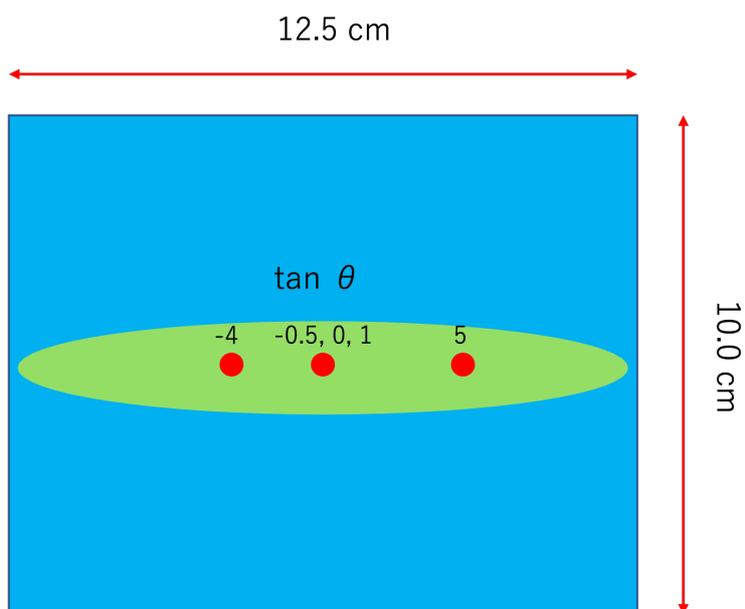
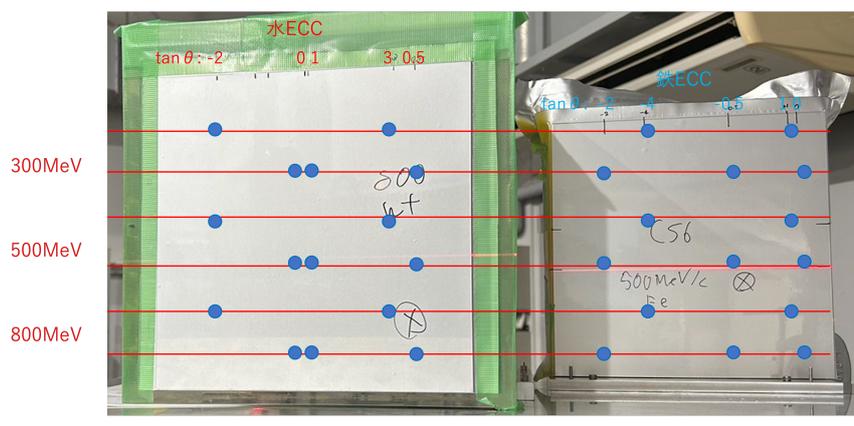


図 2.9: 解析に使用した原子核乾板のビーム照射位置

赤点が陽電子ビームであり、ビームは図 2.9 の面から裏へ突き抜ける方向へ照射された。

次に、水 ECC, 鉄 ECC へ照射を行なった。これらには 300 MeV/c, 500 MeV/c, 800 MeV/c の異なる運動量で照射した。照射位置を示した図 2.10 を次に示す。



4

図 2.10: 水 ECC、鉄 ECC へのビーム照射位置

ECC の高さの調整は、電動アクチュエーター土台下に配置したジャッキによって行なった。また、照射角度を変える際には、アクチュエーター上スライダ部に固定されたアルミ板に固定ジグを移動させ、ネジで固定することで、精密に行なった。

## 第3章 フィルムの現像、膨潤

2022年11月8日から11日にELPHで陽電子ビームの照射を行なった原子核乾板を2022年12月8日から11日に名古屋大学F研で現像、膨潤、銀取りを行った。以下で詳しく説明する。

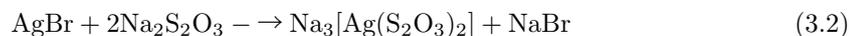
### 3.1 現像

#### 3.1.1 現像の原理

ビーム照射後の原子核乾板の乳剤層には潜像核と呼ばれる銀粒子のクラスターが存在する。しかし、潜像核のままでは飛跡読み取り装置による読み取りが困難であるため、還元剤を用いて、潜像核周辺の銀イオンを還元することで潜像核を成長させる。



潜像核を十分成長できた段階で、酸性溶液に原子核乾板を浸して現像を停止させる。そして、反応せずに残っているAgBrを取り除くために、チオ硫酸ナトリウムと反応させ、除去する。これが定着である。



これらの現像から定着までの作業は、原子核乾板に光が当たると感光してしまうため、暗室で行う。本研究では、原子核乾板への影響が少ない赤外線ライトを用いて、暗室で作業を行なった。

#### 3.1.2 現像の手順

##### 1. 現像

まず、原子核乾板は光が当たらないようアルミニウム製のパックで真空の状態で梱包されているので、それを開封することから始めた。開封後は原子核乾板に記載されたidと原子核乾板の四隅の厚みを測り、記録した。そして、原子核乾板を現像液に入れるためのラックに移し、現像を開始した。図3.1が現像を行う現像液で満たされている恒温層である。図3.2が、現像の一連の作業を行う際に、原子核乾板を設置するラックである。図3.2の溝部分に原子核乾板を設置し、現像時にはこのラックごと現像液に沈め、現像作業を行なった。

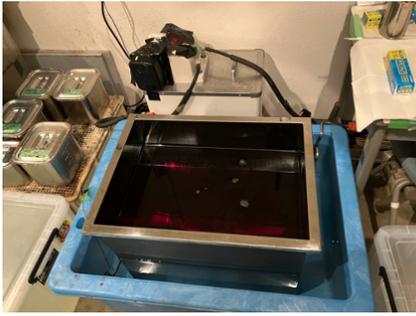


図 3.1: 現像液と恒温装置 (写真上部)

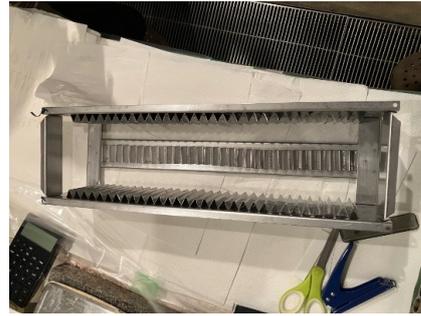


図 3.2: ラック

現像液の温度は  $20 \pm 0.2$  °C で調整し、現像時間は 25 分間である。この現像液につける作業が、一連の作業の中で最もデリケートなので、温度、時間ともに精密に行なった。

### 2. 停止

停止は潜像核の成長を止める作業である。そのため、還元剤である現像液に対して、停止液は酸性である。停止液は室温で原子核乾板を 10 分間浸した。

### 3. 定着

定着は原子核乾板中に残った AgBr とチオ硫酸ナトリウムと反応させ、AgBr を取り除く作業である。定着液は室温で、原子核乾板を約 90 分間浸した。暗室で行う作業はここまでである。

### 4. 水洗

水洗は原子核乾板表面に残った銀などを取り除く作業である。水洗の際は水道水による流水で約 120 分行った。その後、乾燥時に原子核乾板に水滴跡を残さないために、原子核乾板をドライウェルと呼ばれる界面活性剤に 30 秒浸した。

### 5. 乾燥

水洗を行った後は原子核乾板を乾燥させる。この時、湿度が低い (30 %以下) と原子核乾板の乳剤層が割れてしまう可能性があるため、加湿器などで湿度を高く保つようにした。乾燥は約 12 時間で完了した。

### 6. 銀取り

乾燥した原子核乾板の表面には銀が残っているので、99.5 % のエタノールを含ませたケイドライで原子核乾板を擦った。これは、エタノールによって、表面の乳剤ごと削り取るのだが、1  $\mu\text{m}$  にも満たないので解析上問題ない。実験に使用した 12.5 cm  $\times$  10.0 cm (以降、オペラサイズと呼ぶ) の原子核乾板では 1 枚あたり約 30 分かかった。図 6 は銀取りの前後の原子核乾板である。銀取り後の原子核乾板は、銀が取り除かれて透明になっている。

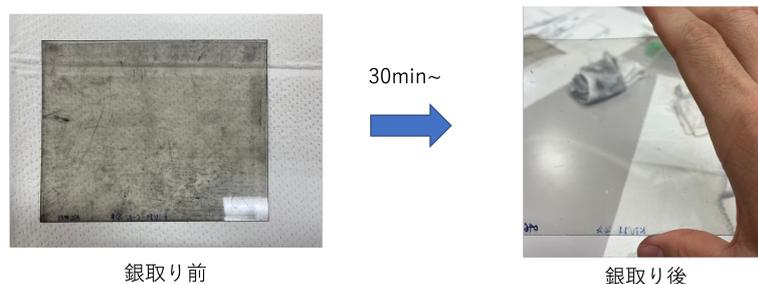


図 3.3: 銀取り

### 3.2 膨潤

現像後の原子核乾板は乳剤層から余分な AgBr が抜け、乳剤層の厚さは現像前と比べて約半分となる。HTS による飛跡読み取りでは、乳剤層の厚さが概ね現像前以上でないと飛跡の読み取りが難しくなるので、膨潤によって乳剤層を膨らませる。さらに、本研究では、通常の解析では乳剤層厚を現像前とほぼ同じ厚さ 60  $\mu\text{m}$  (1.0 倍) を目指して膨潤するところを、一部の原子核乾板で 72  $\mu\text{m}$  (1.2 倍), 84  $\mu\text{m}$  (1.4 倍) で膨潤した。本研究では、原子核乾板の厚さが解析にどのような影響を及ぼすかを考察する。なお、これ以降の記述では 1.0 倍での膨潤を標準倍率での膨潤と記述する。図 3.4 が本研究で用いたフィルムの配置図であり、原子核乾板 id を付与した。乳剤層の現像前からの膨潤倍率は 3 と 6 以外の原子核乾板は 1.0 倍である。

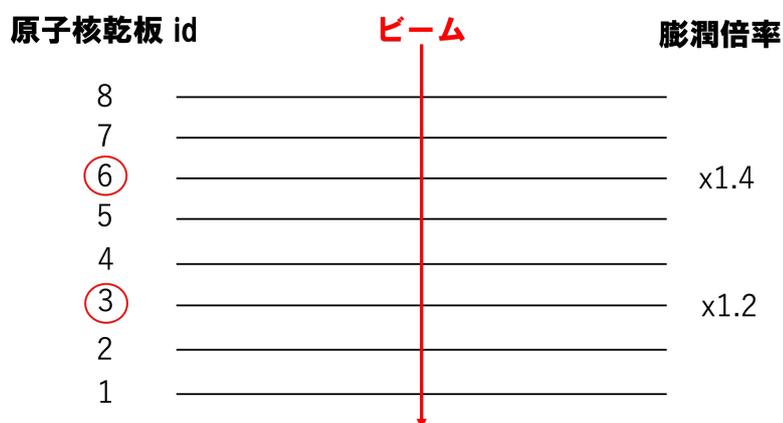


図 3.4: 原子核乾板情報

### 3.2.1 膨潤の原理

膨潤では、まず、原子核乾板を水につけ、乳剤層を水で膨らませる。しかし、このまま原子核乾板を取り出すと徐々に水が抜けてしまうので、水をグリセリンで置換する。原子核乾板を乾燥させた後はグリセリンのみが原子核乾板に残り、グリセリンは蒸発することはないので、膨潤が完了する。本実験ではグリセリン濃度は 22 - 35 % で行った。式 (3.3) に、原子核乾板を水で膨らませた時の目標厚の関係式を示す。

$$\text{水浸時の目標厚} = \frac{\text{最終的な目標厚} - \text{乾燥時の実測厚}}{\text{グリセリン濃度}} + \text{乾燥時の実測厚} \quad (3.3)$$

図 3.5 に式 (3.3) で使われている変数を示す。実際の膨潤作業では、式 (3.3) に従って、グリセリン濃度が 22 - 35 % の範囲に収まる厚さまで原子核乾板を水で膨らませた。その後、式 (3.3) から必要なグリセリン濃度を逆算し、乳剤層の水をグリセリンで置換する。

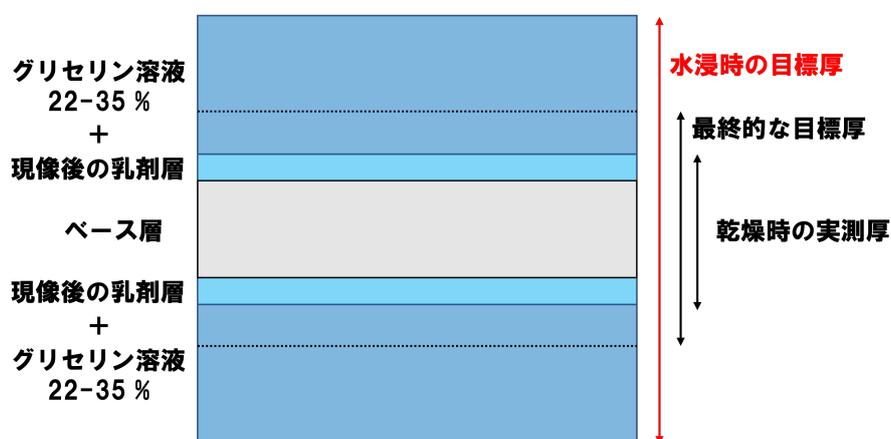


図 3.5: 膨潤のイメージ

### 3.2.2 膨潤の手順

#### 1. 水浸

まず、原子核乾板の片側長辺を 2 点吊るし棒にクリップで繋げた。その後、原子核乾板を水につけ、膨潤を開始した。図 3.6 は水浸中の原子核乾板である。



図 3.6: 膨潤：水浸

水浸を行う最初の原子核乾板は、後の原子核乾板の水浸を行う時間の参考にするために、水浸時間に対する原子核乾板の厚さを記録した。図 3.7は縦軸に原子核乾板の厚さ、横軸に膨潤を開始してから経過した時間をとったグラフである。

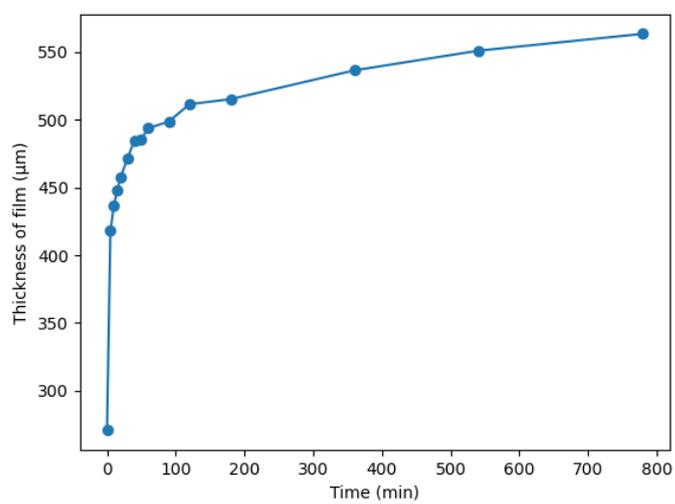


図 3.7: 水浸時間と原子核乾板の厚さ

図 3.7の原子核乾板は現像前の 1.4 倍の厚さを目指して水浸を行った原子核乾板なので、約 16 時間水浸を行ったが、他の 1.0 倍の原子核乾板では水浸時間は 2 時間程度であった。

## 2. グリセリン置換

水浸で目標厚に達した原子核乾板は直ちにグリセリン溶液に浸す。これは、原子核乾板を水から引き上げた後、空气中に原子核乾板を晒しておくとう水が抜けてしまい、乳剤層が薄くなってしまうためである。原子核乾板をグリセリン溶液に浸しておく時間は 30 - 40 分程である。図 3.8は原子核乾板をグリセリン溶液につけている様子である。グリセリン溶液は無色透明であるが、粘性がある。



図 3.8: 膨潤：グリセリン

表 3.1に、それぞれの原子核乾板の膨潤データを示す。

表 3.1: 膨潤データ

| PL番号 | 現像前<br>全体厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | 現像後<br>全体厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | 膨潤後<br>全体厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | グリセリン<br>濃度 % | 目標全体<br>厚( $\mu\text{m}$ ) | 乾燥後<br>全体厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | 乾燥後目標全<br>体厚( $\mu\text{m}$ ) | 乾燥後目標乳剤<br>厚からの誤差 | 乳剤厚の現像<br>前からの倍率 |
|------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|
| 8    | 330.75                          | 279.25                          | 481.25                          | 25            | 485.25                     | 326.5                           | 330.75                        | -0.012849584      | 0.964803313      |
| 7    | 330.25                          | 274.75                          | 493.25                          | 25            | 496.75                     | 329.25                          | 330.25                        | -0.003028009      | 0.991683992      |
| 6    | 333.75                          | 270.75                          | 580                             | 35            | 592.18                     | 386.25                          | 383.25                        | 0.007827789       | 1.424242424      |
| 5    | 332.5                           | 282                             | 494.25                          | 25            | 498.35                     | 324.25                          | 332.5                         | -0.02481203       | 0.932653061      |
| 4    | 332                             | 288                             | 499.5                           | 24            | 497.46                     | 327.5                           | 332                           | -0.013554217      | 0.963114754      |
| 3    | 331                             | 273.75                          | 510.5                           | 22            | 506.46                     | 361.5                           | 355.2                         | 0.017736486       | 1.252066116      |
| 2    | 329.25                          | 273.25                          | 504.75                          | 22            | 527.795                    | 330.25                          | 329.25                        | 0.003037206       | 1.008385744      |
| 1    | 329.5                           | 279.5                           | 511.5                           | 22            | 506.77                     | 328.5                           | 329.5                         | -0.003034901      | 0.991631799      |

膨潤の倍率 1.4 倍、1.2 倍の原子核乾板は、水浸時間との兼ね合いから 35 % という比較的高濃度のグリセリン溶液で置換を行った。表 3.1は、現像から膨潤に至るまでの原子核乾板の実測した厚さを記している。ベース層は 210  $\mu\text{m}$  なので乳剤厚は表 3.1に記されている原子核乾板全体の厚さから 210  $\mu\text{m}$  引いて計算している。なお、表 3.1に示す通り、それぞれの

原子核乾板の実際の乳剤厚の膨潤倍率は目標とする乳剤厚の膨潤倍率と完全に同じではないが、簡単のためこれ以降の記述では 1.4 倍の PL6 などのように表 3.1 に従って呼称する。膨潤後の原子核乾板は、乾燥を防ぐため、空気などが隙間に入らないようシリコンオイルを塗りつけて、市販のクリアファイルに挟んで保存した。

## 第4章 原子核乾板の解析

原子核乾板の解析は Hyper track selector(HTS) と呼ばれる飛跡読み取り装置によって、原子核乾板の乳剤層にある飛跡を読み取る。飛跡データの解析は、その読み取った飛跡データを用いて行う。

### 4.1 HTS

Hyper track selector (HTS) [4] は従来の飛跡読み取り装置 (S-UTS) よりも、600 倍の視野面積を持つ対物レンズと 72 個の 2M ピクセルの撮像素子で構成されるモザイクカメラ、36 台の解析用 PC からなる。HTS による飛跡読み取り (スキャン) では通常、乳剤層片面あたり 16 層の断層画像を撮影する。通常原子核乾板の乳剤層の厚みは約  $60 \mu\text{m}$  なので、画像間隔は約  $4 \mu\text{m}$  となる。撮影した画像を銀粒子と背景で 2 値変換する処理を行う。この 2 値化する際の明るさの閾値はユーザーが任意に設定できる。飛跡の探索には、ある角度の飛跡が垂直に並ぶように、画像をシフトさせ、飛跡が存在した画像を足し合わせた数を Pulse height(PH) と定義し、この PH がある閾値 (本研究では 8) を超えた場合、飛跡としてデータを得る処理を行っている。図 4.1 は HTS による飛跡探索の概念図である。

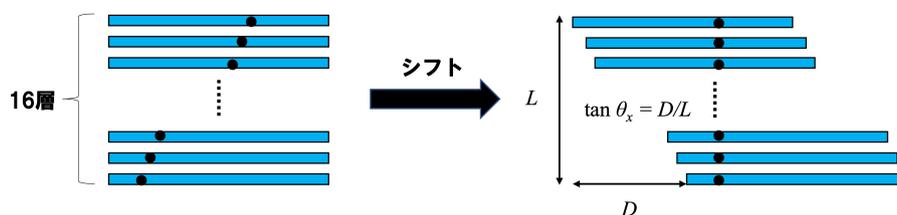


図 4.1: HTS による飛跡探索

原子核乾板で、測定される飛跡の情報は、座標  $(x, y)$ 、角度  $(\tan\theta_x, \tan\theta_y)$ 、PH、Volume pulse height(VPH) である。同一の飛跡であっても、PH による飛跡選択では複数本の飛跡として認識されてしまうことがある。この時に飛跡の一本化を行い、その複数本の飛跡の PH の合計を取ったものが VPH で、主に飛跡の濃さの指標として用いられる。図 4.2 が HTS で、画像奥に見えるのがスキャンデータを処理する PC 群である。



図 4.2: HTS

## 4.2 スキャンの手順

次に、実際に行った HTS によるスキャン作業について説明する。

### 1. 原子核乾板の亚克力板への設置

まず、原子核乾板と外枠を亚克力板の上に設置した。原子核乾板はスキャン中にずれないように、セロハンテープにより亚克力板に固定した。外枠はフィルムとレンズの間に注入するシリコンオイルが漏れないために使った。図 4.3 が亚克力板に設置した原子核乾板である。

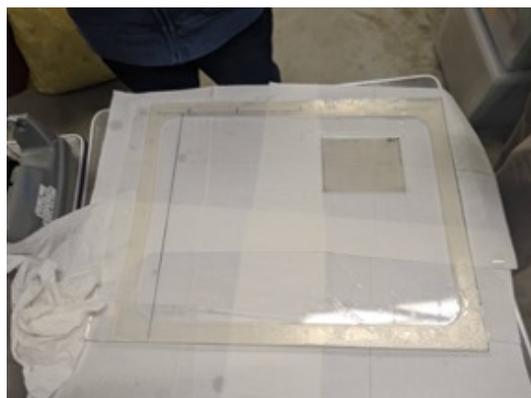


図 4.3: 原子核乾板のセッティング

## 2. HTS へ原子核乾板の設置

次に、HTS の台座に先ほどのアクリル板セットを設置した。そして、原子核乾板と HTS のレンズとの間にスポイトでシリコンオイルを注入した。このとき、原子核乾板とレンズの間に空気が入らないよう、原子核乾板とレンズを近づけておく必要がある。図 4.4が先ほどのアクリル板に設置した原子核乾板を HTS に取り付けたときの写真である。

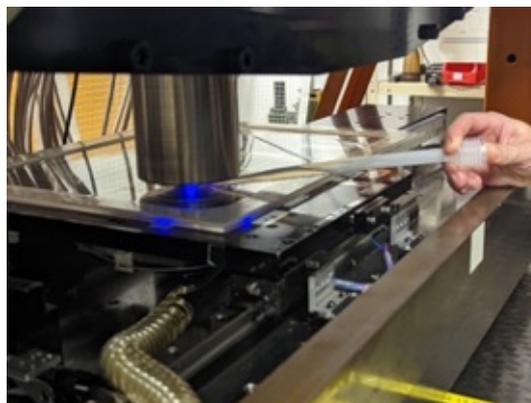


図 4.4: 原子核乾板の HTS への取り付け

## 3. スキャン

制御用 PC から HTS によるスキャンを実行した。16 層通常スキャンではオペラサイズ ( 12.5 cm × 10.0 cm ) の原子核乾板で 10 - 15 分程度かかった。スキャンにかかる時間は原子核乾板のコンディションやスキャン時に設定するパラメータなどにより変化する。

## 4.3 スキャンデータの変換

スキャンを行うと、それぞれの原子核乾板の乳剤層中での飛跡情報が得られる。これらの飛跡情報は照射した陽電子ビーム以外にも、環境放射線による低エネルギー電子による飛跡なども含まれる。照射した陽電子ビームの飛跡情報のみを取得したいので、データの変換を行い、順次ノイズなどを落としていく。図 4.5は、原子核乾板に記録されたデータを表す。 $\theta_{m1x}$ ,  $\theta_{m1x}$  は、それぞれ上下の乳剤層に記録されたマイクロトラックにおける角度情報である。 $\theta_{bx}$  はベース層に記録されたベーストラックにおける角度情報である。

### 1. マイクロトラック

乳剤層に記録された飛跡はマイクロトラックと呼ばれる。1 枚の原子核乾板からはベース面に対して上側、下側の 2 層分のマイクロトラックが得られる。マイクロトラックには主に飛跡の角度、座標、PH (Pulse height)、VPH (Volume pulse height) が含まれる。

### 2. ベーストラック

ベース面に接する上下のマイクロトラックを接続したものがベーストラックと呼ばれる。マ

マイクロトラックが記録される乳剤は柔らかく変形しやすいので、角度精度は低いですが、ベーストラックは硬く変形しにくいベース層を基準に作られるので、マイクロトラックよりも角度精度は高くなる。

### 3. リンクレット

2枚のプレート間のベーストラックを接続したものがリンクレットと呼ばれる。2枚のプレートでつながるトラックを抜き出すので、一枚のプレートのみで偶然繋がってしまったトラックなどのノイズを減少させることができるので、今回の解析では主にリンクレットのデータを用いた。

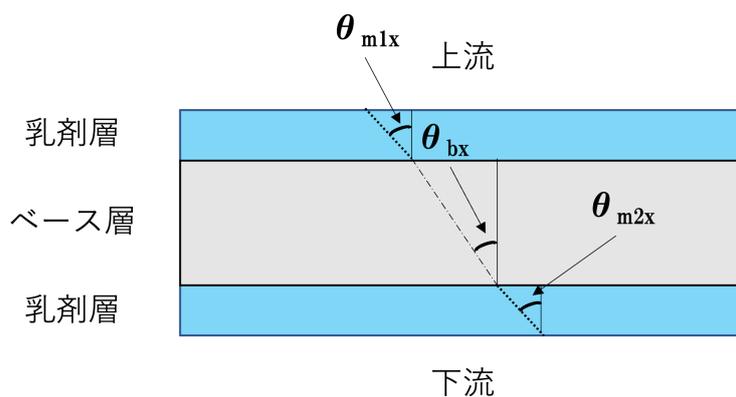


図 4.5: 原子核乾板に記録されたデータ

## 4.4 スキャンデータの解析

本研究では陽電子ビームを照射した 8 枚の原子核乾板の解析を行なった。図 4.6 に、原子核乾板に付与したプレート (PL) 番号と膨潤を行った倍率 (記述がないものは 1.0 倍) とその配置を示す。以降の記述でプレート (PL) を原子核乾板と同義で使う。

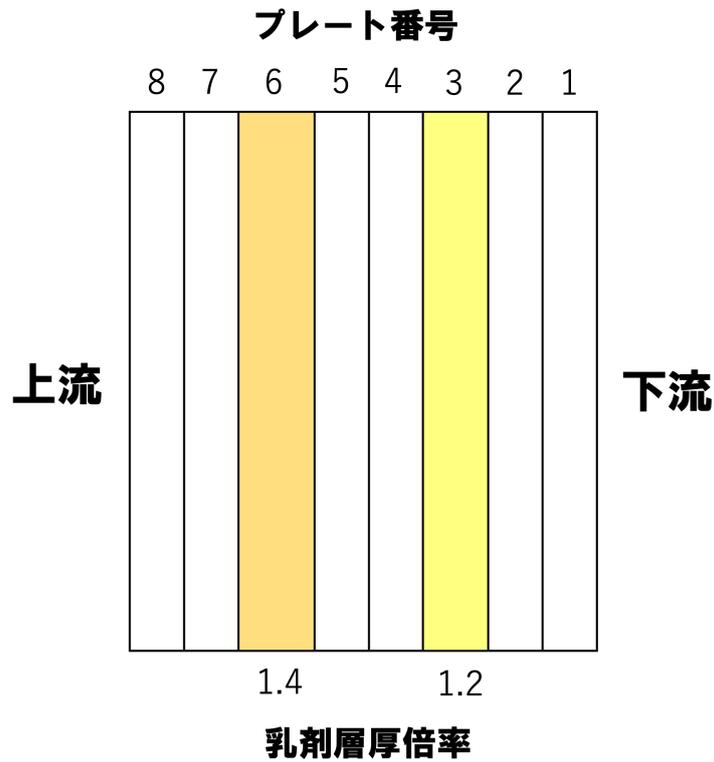


図 4.6: 解析したプレートの位置関係

本研究で行ったスキャンは通常スキャン ( $\tan \theta = \pm 2.2$  まで読み取る) なので、 $\tan \theta = 0, -0.5, 1, -4, 5$  方向に照射したビームのうち、 $\tan \theta = 0, -0.5, 1$  のみを読み取った。読み取ったベーストラックの角度分布は次のようになった。なお、原子核乾板の端は、それぞれの原子核乾板おけるノイズの大きさに個体差があったので、原子核乾板端 2 cm 以内の飛跡はカットした。

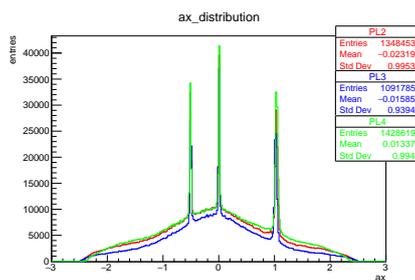


図 4.7: PL2, PL3, PL4 のベーストラック角度分布

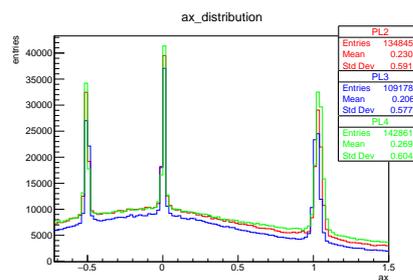


図 4.8: PL2, PL3, PL4 のベーストラック角度分布 (拡大)

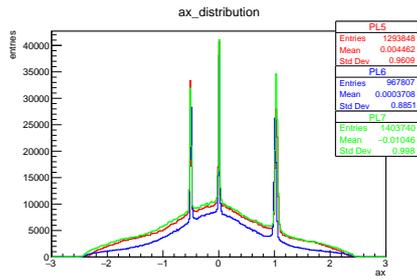


図 4.9: PL5, PL6, PL7 のベーストラック角度分布

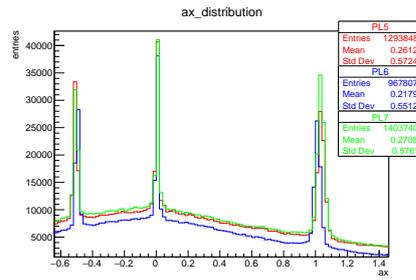


図 4.10: PL5, PL6, PL7 のベーストラック角度分布 (拡大)

図 4.7、図 4.8は標準倍率で膨潤を行った原子核乾板 PL2, PL4 と、その 2 枚の原子核乾板に挟まれた 1.2 倍の膨潤を行った原子核乾板 PL3 の角度分布である。図 4.9、図 4.10は標準倍率で膨潤を行った原子核乾板 PL5, PL7 と、その 2 枚の原子核乾板に挟まれた 1.4 倍で膨潤を行った原子核乾板 PL6 の角度分布である。

これらを見ると、どの原子核乾板にも  $\tan \theta = 0, -0.5, 1$  に照射したビームのピークが存在することがわかる。図 4.7、図 4.9から、乳剤厚を増した PL3, PL6 は共に、両隣のプレートと比べて、照射したビーム以外のノイズと考えられるシグナルの分布が少なくなっていることがわかる。図 4.8、図 4.10から、PL3, PL6 は共に、両隣のプレートと比べて、照射したビームのものと考えられるシグナルのピークが小さくなっている。さらに、この傾向は角度が大きくなるほど顕著になっているように見える。

## 4.5 トラックランキング

本実験においてノイズと呼んでいるものは主に、環境放射線によるガンマ線のコンプトン散乱による電子の飛跡である。他に、宇宙線や乳剤中の銀粒子が偶然の一致によって繋がったものなどがある。これらのノイズは線形性が低く、大部分は一枚のプレートのみで繋がると考えられるので、リンクレットを作成した時点で大部分は落とせると考えられる。

また、トラックランキングと呼ばれる飛跡の線形性を利用して、ベーストラックの時点でノイズをカットする手法がある。飛跡の線形性からのずれは、次の式で表される。

$$Linearity = \sqrt{(\tan\theta_{bx} - \tan\theta_{mx1})^2 + (\tan\theta_{bx} - \tan\theta_{mx2})^2 + (\tan\theta_{by} - \tan\theta_{my1})^2 + (\tan\theta_{by} - \tan\theta_{my2})^2} \quad (4.1)$$

Linearity の各変数については図 4.5にある通りで、ベーストラックの角度成分、マイクロトラックの角度成分 (上下の乳剤層で 2 つ) はそれぞれ x, y 方向の 2 成分もつ。次に VPH (Volume Pulse Height) は本章で説明した通り、飛跡の濃さを表す。

式 (4.1) を横軸にとり、縦軸に VPH (Volume Pulse Height) をとると、 $|\tan\theta_{bx}| < 0.1$  の範囲で図 4.11のようなグラフが得られる。

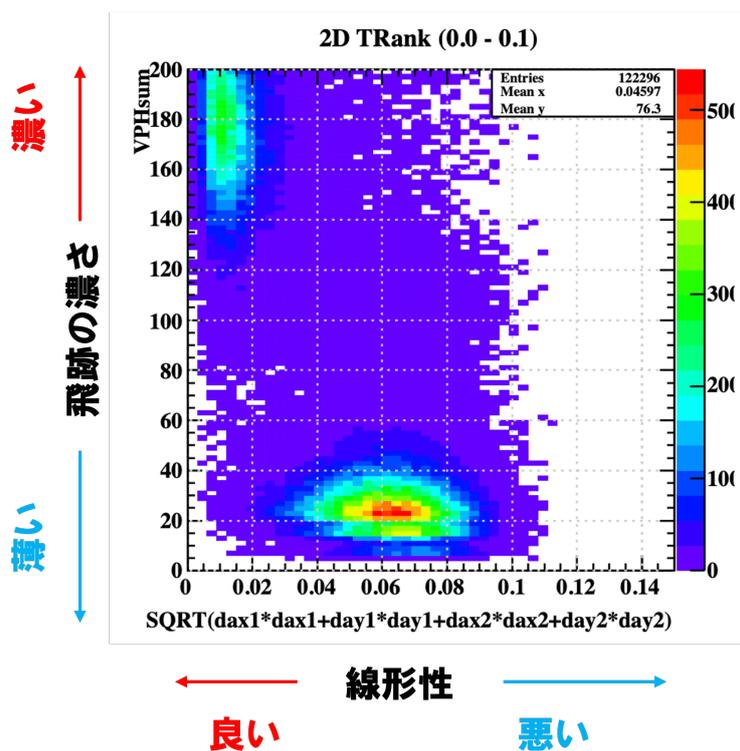


図 4.11: トラックランキング前の標準倍率 PL の VPH vs Linearity ( $|\tan\theta_{bx}| < 0.1$ )

図 4.11の下側に集まっている飛跡がコンプトン散乱などによるノイズ飛跡である。また、左上に集まっている飛跡が本研究で照射した陽電子ビームによる飛跡であると考えられるため、トラックランキングによって下側のノイズを分離すると、図 4.12のようなグラフが得られる。

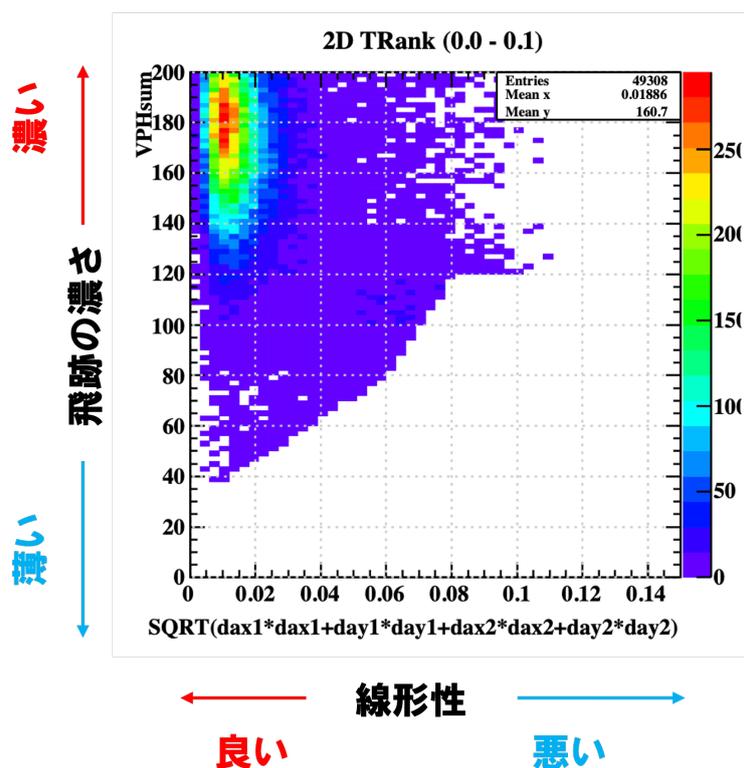


図 4.12: トラックランキング後の標準倍率 PL の VPH vs Linearity ( $|\tan\theta_{bx}| < 0.1$ )

図 4.12から、トラックランキングによりノイズトラックを削減されたことが確認できる。トラックランキングの前後で、トラックの本数は 122296 本から、49308 本に減少しており、59.7% の飛跡がカットされた。

図 4.13から図 4.21に、膨潤厚が標準倍率の PL4、1.2 倍の PL3、1.4 倍の PL6 のトラックランキング前の VPH vs Linearity とトラックランキング後の VPH vs Linearity を飛跡の角度毎に示す。

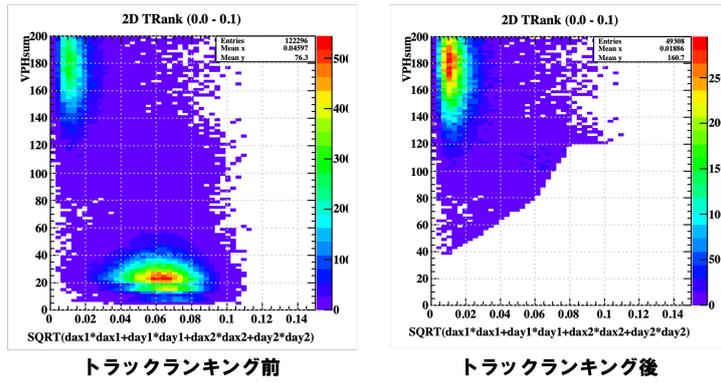


図 4.13: 標準倍率 PL4 の VPH vs Linearity ( $|\tan\theta_{bx}| < 0.1$ )

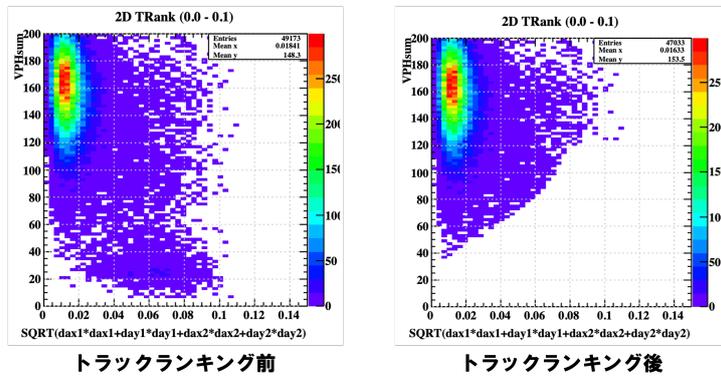


図 4.14: 1.2 倍率 PL3 の VPH vs Linearity ( $|\tan\theta_{bx}| < 0.1$ )

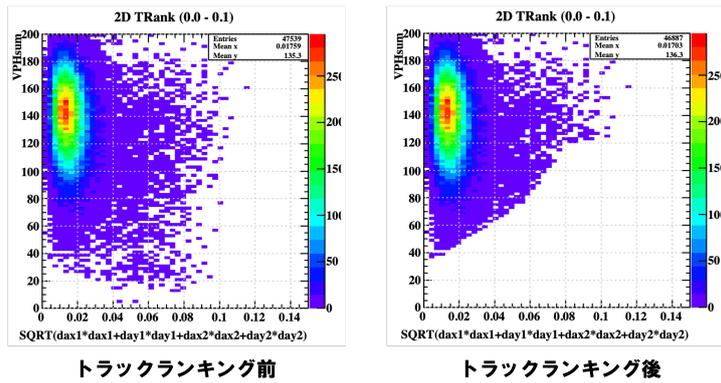


図 4.15: 1.4 倍率 PL6 の VPH vs Linearity ( $|\tan\theta_{bx}| < 0.1$ )

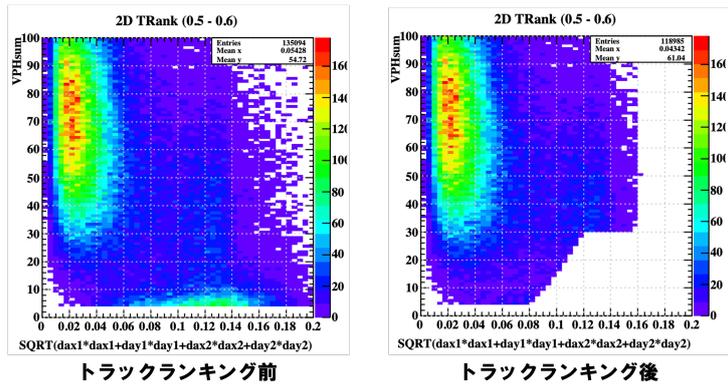


図 4.16: 標準倍率 PL4 の VPH vs Linearity ( $0.5 < |\tan\theta_{bx}| < 0.6$ )

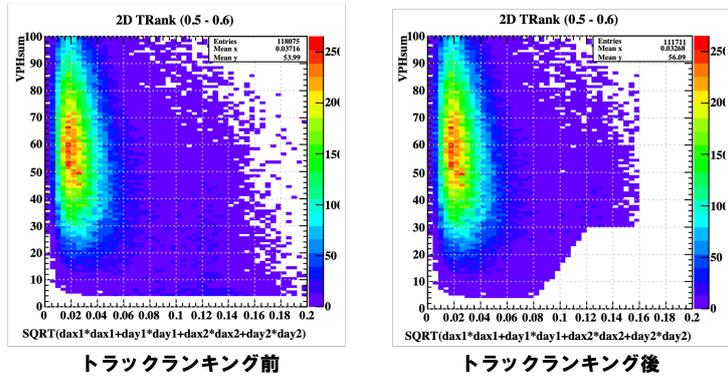


図 4.17: 1.2 倍率 PL3 の VPH vs Linearity ( $0.5 < |\tan\theta_{bx}| < 0.6$ )

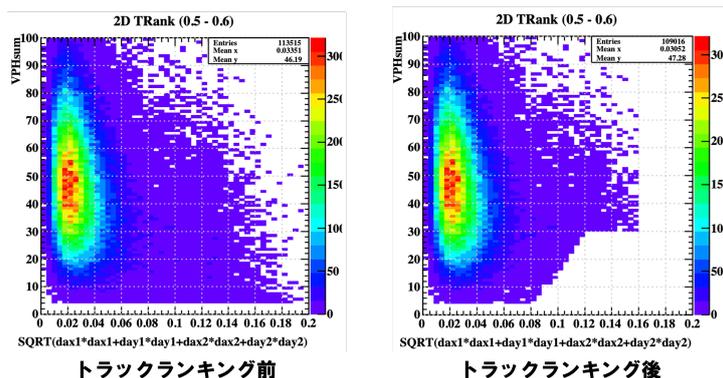


図 4.18: 1.4 倍率 PL6 の VPH vs Linearity ( $0.5 < |\tan\theta_{bx}| < 0.6$ )

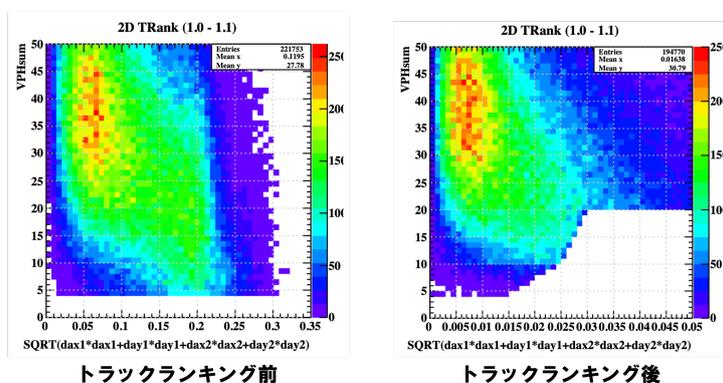


図 4.19: 標準倍率 PL4 の VPH vs Linearity ( $1.0 < |\tan\theta_{bx}| < 1.1$ )

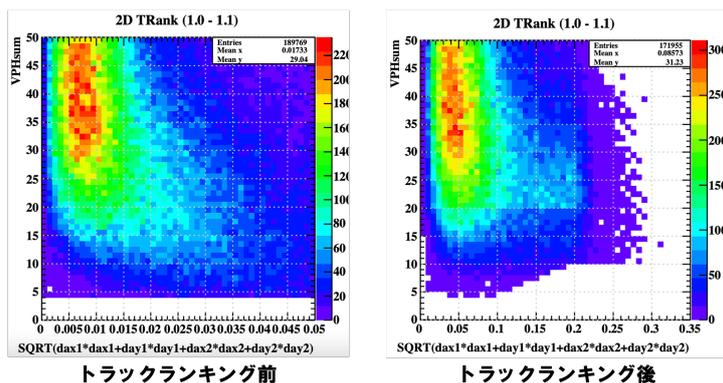


図 4.20: 1.2 倍率 PL3 の VPH vs Linearity ( $1.0 < |\tan\theta_{bx}| < 1.1$ )

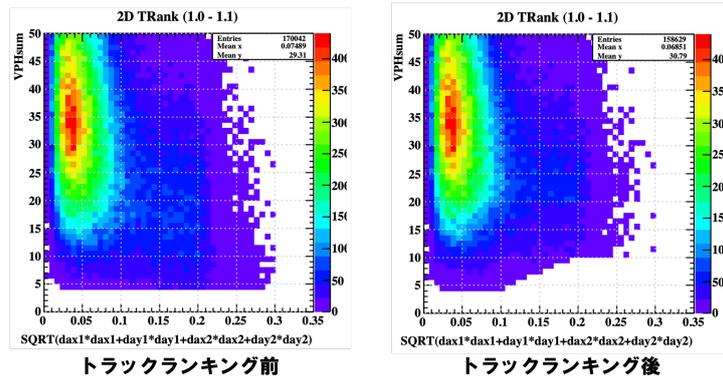


図 4.21: 1.4 倍率 PL6 の VPH vs Linearity ( $1.0 < |\tan\theta_{bx}| < 1.1$ )

$|\tan\theta_{bx}| < 0.1$  の範囲の、図 4.13、図 4.14、図 4.15 より、膨潤厚を増していくと、トラックランキング前のノイズが減少している。トラックランキングにより飛跡の減少率は標準倍率の PL4 が 59.68%、1.2 倍の PL3 が 4.35%、1.4 倍の PL6 が 1.37% となり、膨潤倍率を増した PL3、PL6 ではトラックランキング前の時点で多くのノイズをカットできていることが確認できる。

$0.5 < |\tan\theta_{bx}| < 0.6$  の範囲の、図 4.16、図 4.17、図 4.18 も同様に、トラックランキングによる飛跡の減少率は標準倍率の PL4 が 11.92%、1.2 倍の PL3 が 5.34%、1.4 倍の PL6 が 3.96% となり、膨潤倍率を増すとトラックランキング前のノイズが減少していることが確認できる。ただし、 $|\tan\theta_{bx}| < 0.1$  の範囲の時ほど、この傾向は顕著ではない。

$1.0 < |\tan\theta_{bx}| < 1.1$  の範囲の、図 4.19、図 4.20、図 4.21 では、トラックランキングによる飛跡の減少率は標準倍率の PL4 が 12.17%、1.2 倍の PL3 が 9.39%、1.4 倍の PL6 が 6.71% と、膨潤倍率を増すほど減少しているが、この傾向は、より小角度の飛跡ほど顕著ではない。また、トラックランキング前の標準倍率で膨潤を行った PL4 はノイズとシグナルの境界が混じり合っているように見える。この傾向は角度の大きい飛跡ほど顕著になり、トラックランキングによりシグナルもカットしてしまうことが問題になる。ここで、膨潤厚を増した PL3、PL6 を見ると、ノイズ領域の分布そのものが薄くなっているように見える。

以上の結果を踏まえると、膨潤倍率を増すことにより、コンプトン散乱由来の電子によるノイズなどを低減できることがわかった。ただし、飛跡の角度が大きくなればなるほど、その効果は小さくなった。PL6 に関しては、 $|\tan\theta_{bx}| < 0.1$  の範囲において、トラックランキングによるノイズカットが 1.37% 程度であったことから、トラックランキングそのものを施す必要がないと考えられる。このことは、トラックランキングにより、シグナルをカットしてしまうことをなくすため、膨潤を増すことによるメリットであると考えられる。しかし、図 4.13 から図 4.21 から、すべての角度において、膨潤倍率を増すとトラックランキング後の飛跡の本数が減少している。よって、膨潤を増すことにより、ノイズのみならずシグナルも減少させてしまう可能性があるため、検証が必要であると考えられる。

## 4.6 隣り合うプレートのベーストラックの角度差

リンクレットから、隣り合うプレートのベーストラックの角度 ( $\tan\theta_{bx}$ ) 差の分布は、飛跡の角度別に図 4.22、図 4.23、図 4.24に示す。隣り合うプレートの乳剤厚は、図 4.22、図 4.23、図 4.24の左から PL3 と PL4 のペアが 1.2 倍と標準倍率、PL4 と PL5 のペアは標準倍率同士、PL5 と PL6 のペアが標準倍率と 1.4 倍である。

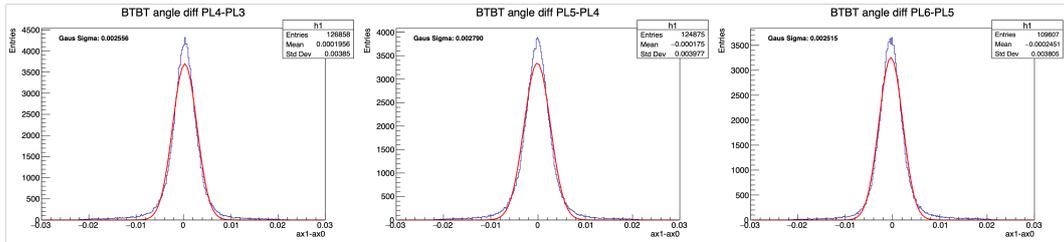


図 4.22: 隣り合うベーストラックの角度差 PL4-PL6 ( $-0.1 \leq \tan\theta_{bx} \leq 0.1$ )

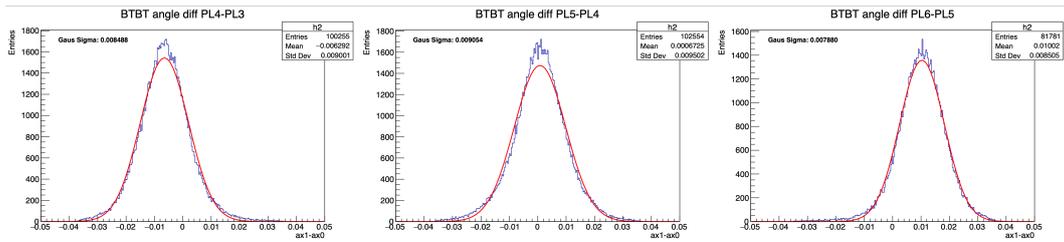


図 4.23: 隣り合うベーストラックの角度差 PL4-PL6 ( $-0.6 \leq \tan\theta_{bx} \leq -0.4$ )

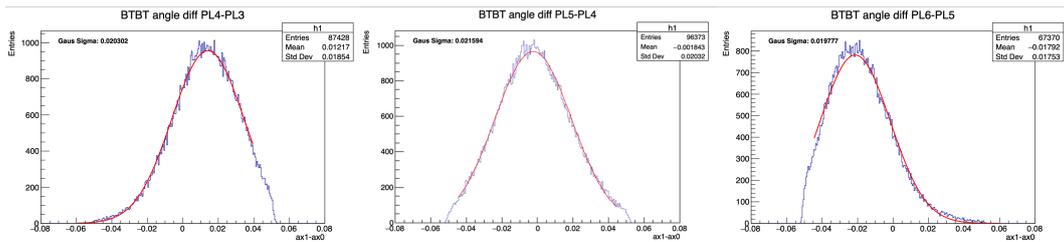


図 4.24: 隣り合うベーストラックの角度差 PL4-PL6 ( $0.9 \leq \tan\theta_{bx} \leq 1.1$ )

ベーストラックの角度精度はガウス関数によってフィッティングした時の、標準偏差  $\sigma/\sqrt{2}$  で評価する。この統計誤差の計算は付録 A に記す。表 4.1にそれぞれのプレート間における標準偏差  $\sigma/\sqrt{2}$  を示す。

表 4.1: ベーストラックの角度精度

|                                    | PL4-PL3 | PL5-PL4 | PL6-PL5 |
|------------------------------------|---------|---------|---------|
| $-0.1 \leq \tan\theta_b \leq 0.1$  | 0.0018  | 0.0020  | 0.0018  |
| $-0.6 \leq \tan\theta_b \leq -0.4$ | 0.0060  | 0.0064  | 0.0056  |
| $0.9 \leq \tan\theta_b \leq 1.1$   | 0.0144  | 0.0153  | 0.0140  |

図 4.22、図 4.23、図 4.24 と表 4.1 の結果から、すべてのトラックの角度において、ベーストラックの角度精度は乳剤厚を最も大きくした PL6 と標準倍率の PL5 のペアが最も高く、二番目に乳剤厚を大きくした PL3 と標準倍率の PL4 のペア、三番目に標準倍率同士の PL4、PL5 のペアという順番になった。このことから、乳剤厚を大きくするとベーストラックの角度精度は向上することがわかった。ベーストラックは乳剤厚に関係のないベース層における飛跡情報であるので、ベーストラックの角度精度は乳剤厚変化の影響を受けないと予測していたが、予想と反する結果となった。しかし、ベーストラックはベース面に接するマイクロトラックの情報を用いるので、乳剤厚が大きいプレートはそのマイクロトラックの精度が高かったためにベーストラックの精度が向上したと考えることができる。

乳剤厚を増したプレートと標準倍率のプレートのペアにおいて、トラックの角度が大きいほどベーストラック差の分布が中央からずれている。リンクレットでは同一のトラックを接続するため、本来この分布は 0 を中心に広がるはずである。標準厚同士のペアではこのずれは見られないことから、乳剤厚を増したことによって起こったと考えられるが、詳細な原因については現在調査中である。

## 4.7 ベーストラックとマイクロトラックの角度差

マイクロトラックは乳剤層に記録された飛跡情報なので、マイクロトラックの角度精度は膨潤厚の違いの影響を受けると考えられる。ベーストラックはベース両面に接する乳剤層のマイクロトラックを仮想的に接続したものであり、ベーストラックの角度精度がマイクロトラックよりも優れていることを考慮すると、マイクロトラックの角度精度はベーストラックとの角度差で議論できる。

図 4.25、図 4.26、図 4.27 はベーストラックの  $\tan\theta_{bx}$  からマイクロトラックの  $\tan\theta_{m2x}$  を引いた分布である。異なるトラックの角度において、図 4.25 は乳剤厚が 1.2 倍の PL3 と標準倍率の PL4 のベーストラックとマイクロトラックの角度差を比較しており、図 4.26 は乳剤厚が標準倍率の PL5 と 1.4 倍の PL6 で同様の比較をしている。図 4.27 は特に角度差が大きな  $0.9 \leq \tan\theta \leq 1.1$  における標準倍率の PL5、1.2 倍率の PL3、1.4 倍率の PL6 を比較している。

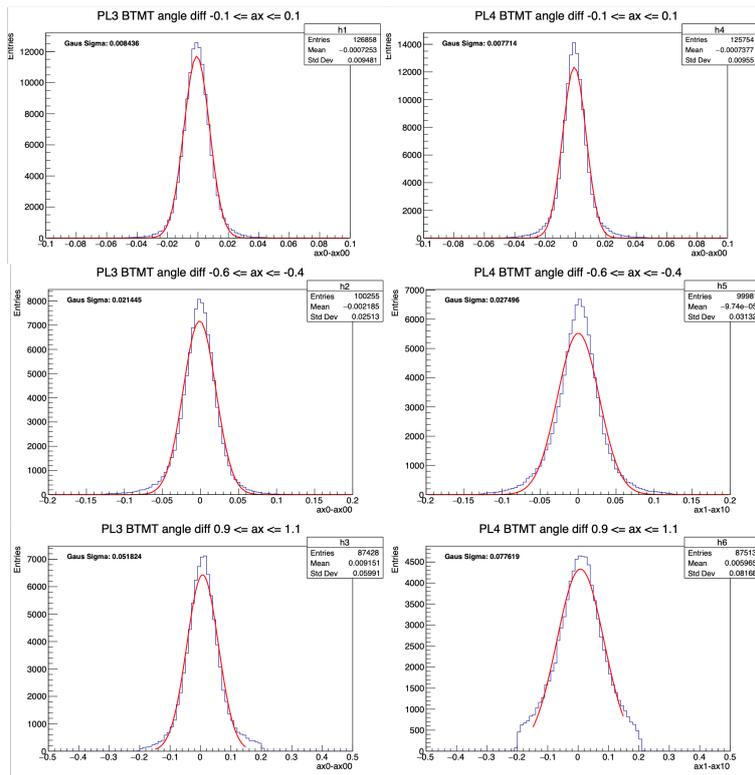


図 4.25: ベーストラックとマイクロトラックの角度差 (左: 1.2 倍率の PL3、右: 標準倍率の PL4)

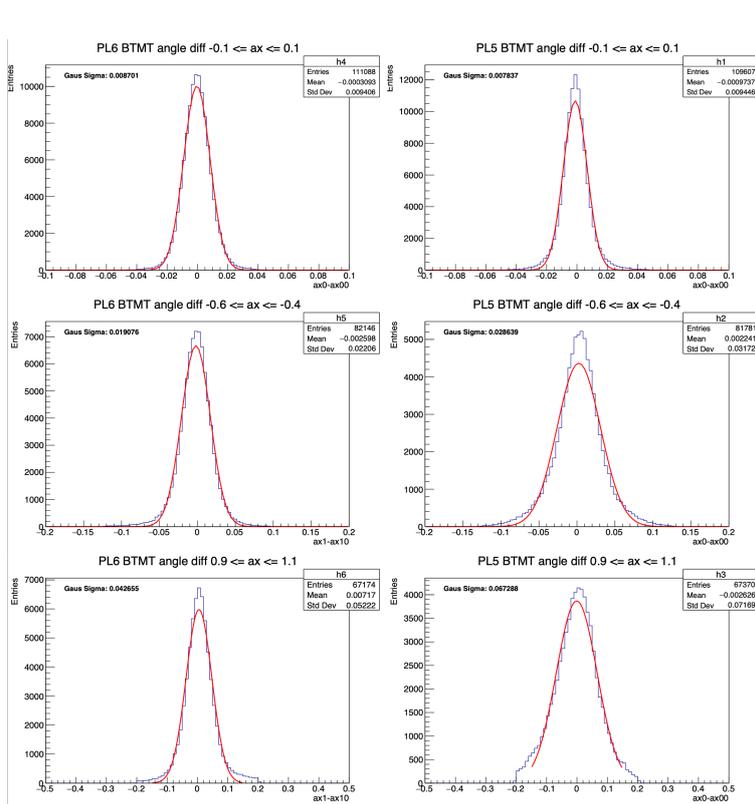


図 4.26: ベーストラックとマイクロトラックの角度差 (左: 1.4 倍率の PL6、右: 標準倍率の PL5)

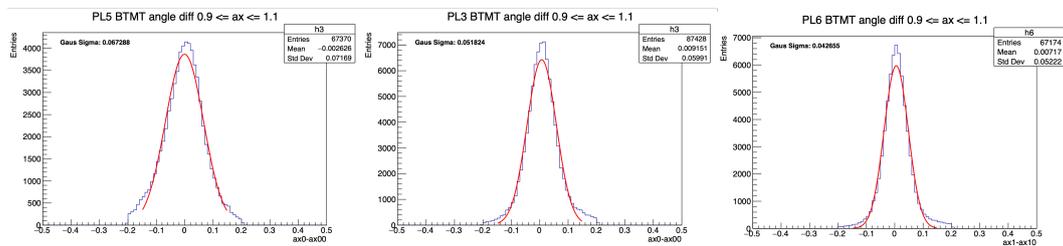


図 4.27: ベーストラックとマイクロトラックの角度差 (左: 標準倍率の PL5、中: 1.2 倍率の PL3 右: 1.4 倍率の PL6)

マイクロトラックの角度精度は、ガウス関数によって角度差をフィッティングした時の標準偏差  $\sigma$  で評価する。表 4.1 にそれぞれのプレート間における標準偏差  $\sigma$  を示す。



## 第5章 まとめと今後の展望

### 5.1 まとめ

本研究では、膨潤により原子核乾板の乳剤層の厚さを変化させ、解析精度に与える影響を調査した。その結果、コンプトン散乱による電子の飛跡などのノイズを、 $-0.1 \leq \tan\theta_b \leq 0.1$ において標準倍率の原子核乾板では59.68%含んでいたのに対して、1.4倍率の原子核乾板では1.37%のみ含んでいた。よって、膨潤倍率を増やすことにより、大きなノイズ低減効果が得られることがわかった。このことは、トラックランキングによる人為的なノイズのカットを行わずに解析を行うことができる可能性を示唆しており、トラックランキングによる誤ったシグナルの除去をなくすことができる。ただし、乳剤厚を増すことは、読み取る飛跡の本数を減少させていたのので、読み取りたいシグナルに関しても低減している可能性がある。角度精度に関しては、ベーストラック、マイクロトラックともに向上しており、表4.1と表4.2を比較すると、その傾向はマイクロトラックにおいてより顕著に見られた。これはマイクロトラックが乳剤層に刻まれたデータであり、本研究で変化させたのが乳剤層の厚さであるからだと考えられる。

### 5.2 今後の展望

今回の調査では、主に原子核乾板一枚の角度分布や角度精度について論じた。今後は、複数枚の原子核乾板で同一の飛跡を接続し、膨潤により乳剤厚を増した原子核乾板と標準厚の原子核乾板との間で飛跡接続効率を調べたい。さらに膨潤により乳剤厚を増すことによる影響は、マイクロトラックからベーストラックを選択する際に大きく関係すると考えられるので、ベーストラックの選択効率を調べたい。また、膨潤倍率を増すことによりシグナルを低減させている可能性があるのので、飛跡の接続効率などからその影響を調査したい。

# 付録

## A 誤差の計算

隣り合うベーストラック同士の角度差、ベーストラックとマイクロトラックの角度差などのある分布の差の標準偏差  $\sigma$  は、式 (1) で計算される。

$$(M_1 \pm \sigma_1) - (M_2 \pm \sigma_2) = M_1 - M_2 \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

$M_1$  は分布 1 の測定値、 $M_2$  は分布 2 の測定値、 $\sigma_1, \sigma_2$  はそれぞれの標準偏差である。隣り合うベーストラック同士の角度差の場合、隣り合うプレートのベーストラックの角度精度は概ね同じ ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ) と仮定して、式 (1) は式 (2) のように計算できる。

$$M_1 - M_2 \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = M_1 - M_2 \pm \sqrt{2}\sigma_1 \quad (2)$$

よって隣り合うベーストラック同士の角度差分布において片方のベーストラックの角度精度 ( $\sigma_1$ ) を知りたい場合は、隣り合うベーストラック同士の角度差分布に、ガウス関数でフィッティングして得た  $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{2}\sigma_1$  を  $\sqrt{2}$  で割る必要がある。ベーストラックとマイクロトラックの角度差において、マイクロトラックの角度精度を求める場合は、ベーストラックの角度精度 ( $\sigma_1$ ) がマイクロトラック ( $\sigma_2$ ) の角度精度よりも十分良いと仮定 ( $\sigma_1 \ll \sigma_2$ ) して式 (3) のように計算できる。

$$M_1 - M_2 \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = M_1 - M_2 \pm \sigma_2 \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} + 1} \approx M_1 - M_2 \pm \sigma_2 \quad (3)$$

したがって、ベーストラックとマイクロトラックの角度差分布に、ガウス関数でフィッティングして得た  $\sigma$  と一致する。

# 謝辞

本研究では多くの方々に助けていただきました。その皆様に深く感謝を申し上げます。

指導教官の南野彰宏教授には、ご多忙の中お時間を割いていただき、ご指導をいただきました。疑問を放置せず、正しく理解しようとする姿勢をととても尊敬しております。

福田努特任講師をはじめとする名古屋大学 f 研究室 NINJA 実験グループの皆様には、大変お世話になりました。福田努特任講師には解析に関するアドバイスなど、とても丁寧に指導していただきました。森元祐介客員研究員は、右も左も分からない私に現像作業を教えてくださいました。B4の皆さんは、一緒に現像などの作業を行ない、色々と教えていただきました。スキャン時には、河原剛義さんに、夜遅くまで作業に付き合ってくださいました。稲元柊さん、渡辺祐仁さん、霞綺花さんには、解析に関して教えていただきました。全体を通して、松尾友和さんにはその豊富な知識で助けていただきました。NINJA の皆様、本当にありがとうございました。

ELPH 実験の際には、準備や片付けで、東邦大学の谷田部直人さん、中川涼太さんには、アクチュエーターセットアップの手助けしていただきました。

同研究室の先輩方、Lluis さん、永井さん、鈴木さん、天内さん、工藤さん、守山さんには、アドバイスなどをいただき、とても助かりました。また、同僚方、近藤さん、柴山さん、島村さん、長村さんからは研究の息抜きになるような談笑に付き合ってください、より一層研究へ打ち込むことができました。秘書の山田さんには、何度も出張や書類の手続きをしていただきました。

一緒に生活している家族からは、食事や家事など、生活面でいつも助けてもらいました。

この一年間、研究を通して、本当にたくさんの方々のことを多くの方々から学ぶことができました。

ここでは名前を挙げられなかった方々も含めて、重ねて深く御礼を申し上げます。

# 目次

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | 原子核乾板の構造  | 6  |
| 2.2  | 原子核乾板の顕微鏡写真   | 7  |
| 2.3  | ELPH ビームライン [5]   | 9  |
| 2.4  | ELPH 陽電子ビーム照射実験装置   | 10 |
| 2.5  | ビームサイクル   | 10 |
| 2.6  | 薄型プラスチックシンチレーターのセットアップ  | 11 |
| 2.7  | 電動アクチュエーター  | 12 |
| 2.8  | 実験時の電動アクチュエーターセットアップ  | 13 |
| 2.9  | 解析に使用した原子核乾板のビーム照射位置  | 14 |
| 2.10 | 水 ECC、鉄 ECC へのビーム照射位置   | 15 |
| 3.1  | 現像液と恒温装置 (写真上部)   | 17 |
| 3.2  | ラック   | 17 |
| 3.3  | 銀取り   | 18 |
| 3.4  | 原子核乾板情報   | 18 |
| 3.5  | 膨潤のイメージ   | 19 |
| 3.6  | 膨潤：水浸   | 20 |
| 3.7  | 水浸時間と原子核乾板の厚さ   | 20 |
| 3.8  | 膨潤：グリセリン  | 21 |
| 4.1  | HTS による飛跡探索   | 23 |
| 4.2  | HTS   | 24 |
| 4.3  | 原子核乾板のセッティング  | 24 |
| 4.4  | 原子核乾板の HTS への取り付け   | 25 |
| 4.5  | 原子核乾板に記録されたデータ  | 26 |
| 4.6  | 解析したプレートの位置関係   | 27 |
| 4.7  | PL2, PL3, PL4 のベーストラック角度分布  | 27 |
| 4.8  | PL2, PL3, PL4 のベーストラック角度分布 (拡大)                                     | 27 |
| 4.9  | PL5, PL6, PL7 のベーストラック角度分布  | 28 |
| 4.10 | PL5, PL6, PL7 のベーストラック角度分布 (拡大)                                     | 28 |
| 4.11 | トラックランキング前の標準倍率 PL の VPH vs Linearity ( $ \tan\theta_{bx}  < 0.1$ ) | 29 |
| 4.12 | トラックランキング後の標準倍率 PL の VPH vs Linearity ( $ \tan\theta_{bx}  < 0.1$ ) | 30 |
| 4.13 | 標準倍率 PL4 の VPH vs Linearity ( $ \tan\theta_{bx}  < 0.1$ )           | 31 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.14 | 1.2 倍率 PL3 の VPH vs Linearity ( $ \tan\theta_{bx}  < 0.1$ ) . . . . .       | 31 |
| 4.15 | 1.4 倍率 PL6 の VPH vs Linearity ( $ \tan\theta_{bx}  < 0.1$ ) . . . . .       | 31 |
| 4.16 | 標準倍率 PL4 の VPH vs Linearity ( $0.5 <  \tan\theta_{bx}  < 0.6$ ) . . . . .   | 32 |
| 4.17 | 1.2 倍率 PL3 の VPH vs Linearity ( $0.5 <  \tan\theta_{bx}  < 0.6$ ) . . . . . | 32 |
| 4.18 | 1.4 倍率 PL6 の VPH vs Linearity ( $0.5 <  \tan\theta_{bx}  < 0.6$ ) . . . . . | 33 |
| 4.19 | 標準倍率 PL4 の VPH vs Linearity ( $1.0 <  \tan\theta_{bx}  < 1.1$ ) . . . . .   | 33 |
| 4.20 | 1.2 倍率 PL3 の VPH vs Linearity ( $1.0 <  \tan\theta_{bx}  < 1.1$ ) . . . . . | 33 |
| 4.21 | 1.4 倍率 PL6 の VPH vs Linearity ( $1.0 <  \tan\theta_{bx}  < 1.1$ ) . . . . . | 34 |
| 4.22 | 隣り合うベーストラックの角度差 PL4-PL6 ( $-0.1 \leq \tan\theta_{bx} \leq 0.1$ ) . . . . .  | 35 |
| 4.23 | 隣り合うベーストラックの角度差 PL4-PL6 ( $-0.6 \leq \tan\theta_{bx} \leq -0.4$ ) . . . . . | 35 |
| 4.24 | 隣り合うベーストラックの角度差 PL4-PL6 ( $0.9 \leq \tan\theta_{bx} \leq 1.1$ ) . . . . .   | 35 |
| 4.25 | ベーストラックとマイクロトラックの角度差 (左: 1.2 倍率の PL3、右: 標準倍率の PL4)                          | 37 |
| 4.26 | ベーストラックとマイクロトラックの角度差 (左: 1.4 倍率の PL6、右: 標準倍率の PL5)                          | 38 |
| 4.27 | ベーストラックとマイクロトラックの角度差 (左: 標準倍率の PL5、中: 1.2 倍率の PL3 右: 1.4 倍率の PL6)           |    |
| 4.28 | 乳剤厚の違いによる HTS による飛跡読み取り角度の違い . . . . .                                      | 39 |

## 参考文献

- [1] ニュートリノ反応精密測定実験 NINJA | 名古屋大学 F 研 (<https://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/experiment/ninja/>)
- [2] David J. Griffiths, グリフィス素粒子物理学, 丸善出版, 2019
- [3] 森元祐介 (2020, 東邦大学, 学位論文) 「原子核乾板による 1 GeV 領域のニュートリノ-原子核反応の検出 Detection of neutrino-nucleus interactions in the 1 GeV energy region with nuclear emulsion」
- [4] 吉本雅浩 (2018, 名古屋大学, 学位論文) 原子核乾板の超高速自動飛跡読み取り装置 HTS
- [5] 東北大学光理学研究センター (ELPH) (<https://www.lns.tohoku.ac.jp>)
- [6] 谷原祐史 (2020, 横浜国立大学, 修士論文) 「電子ニュートリノ反応測定に向けた原子核乾板を用いた運動量測定と粒子識別」
- [7] 内木茉柚子 (2021, 名古屋大学, 修士論文) 「NINJA 実験におけるニュートリノ反応に伴う大放出角粒子の自動飛跡測定」
- [8] 谷原祐史 (2018, 横浜国立大学, 卒業論文) 「(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」
- [9] 森田大暉 (2022, 横浜国立大学, 卒業論文) 「鉄 Emulsion Cloud Chamber を用いた大角度陽電子飛跡の再構成」
- [10] 鈴木陽介 (2019, 名古屋大学, 修士論文) 「原子核乾板を用いた水標的ニュートリノ反応検出器の開発及び解析手法の確立」
- [11] オリエンタルモーター株式会社、サポートソフト MEXE02 (<https://www.orientalmotor.co.jp/products/detail.action?hinmei=MEXE02>)