

## 修士論文

# J-PARC E07実験における beam 照射及び 原子核乾板中の $\Xi$ -粒子飛跡自動追跡

岐阜大学大学院 教育学研究科  
総合教科教育専攻 仲澤研究室

後藤 良輔

最終更新 平成 29 年 11 月 8 日

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>2</b>
1.1	はじめに . . . . .	2
1.2	Double- $\Lambda$ Hyper 核 . . . . .	3
1.3	原子核乾板 . . . . .	4
1.4	光学顕微鏡 . . . . .	5
1.5	KEK-PS E373 実験 . . . . .	7
1.6	J-PARC E07 実験 . . . . .	7
<b>2</b>	<b>J-PARC E07 実験 2ndRun</b>	<b>9</b>
2.1	Refresh 処理の実施 . . . . .	9
2.1.1	実施背景 . . . . .	9
2.1.2	原理 . . . . .	11
2.1.3	実施環境 . . . . .	11
2.2	GridMark 照射環境の最適化 . . . . .	12
2.2.1	暗室の拡張 . . . . .	12
2.2.2	GridMark ネガ . . . . .	12
2.2.3	GridMark 照射装置 . . . . .	14
2.3	E07 実験 beam 照射 . . . . .	15
2.3.1	2ndRunbeam 照射 . . . . .	15
2.3.2	作業内容 . . . . .	15
2.3.3	EmulsionCasette での真空度 . . . . .	16
2.3.4	EmulsionCasette の固定法確立 . . . . .	16
2.3.5	照射した乾板の密度 . . . . .	16
2.4	現像 . . . . .	18
2.4.1	原理 . . . . .	18
2.4.2	実施環境 . . . . .	18
<b>3</b>	<b>荷電粒子飛跡追跡の自動化</b>	<b>19</b>
3.1	目的 . . . . .	19
3.2	$\Xi^-$ 候補 & beam 認識に用いる画像処理 . . . . .	19
3.2.1	コントラスト処理 . . . . .	19
3.2.2	ガウシアンフィルタ処理 . . . . .	20
3.2.3	画像の白黒反転 . . . . .	21
3.2.4	二値化 . . . . .	22
3.3	座標変換 . . . . .	23
3.4	自動追跡の要素技術 . . . . .	23
3.4.1	P-bar パターンマッチ . . . . .	23
3.4.2	$\Xi^-$ 候補飛跡の選択 . . . . .	24

3.4.3	K <sup>-</sup> beam パターンマッチ . . . . .	24
3.4.4	表面認識 . . . . .	25
3.4.5	荷電粒子飛跡追跡 . . . . .	25
4	E07 乾板における開発プログラムでの追跡実績	26
5	まとめ	27
	付録	27
	謝辞	27

# 1 序論

## 1.1 はじめに

私たちを含め、身の回りの物質は原子からできている。その原子核は原子核と電子から構成されており、原子核は陽子と中性子で成り立つ。さらに、陽子や中性子はクォークで構成されている。

クォークは、up(u)、down(d)、strange(s)、charm(c)、top(t)、bottom(b) の6種類がある。(以降は () 内の文字で省略する。) u と d 以外のクォークを含む粒子は非常に寿命が短いため地球上に存在していない。私たちは s クォークを含む粒子の相互作用について研究を進めている。

相互作用を調べる理由として中性子星がある。中性子星は直径が約 10km でその質量が太陽の約 1~2 倍と非常に高密度な星である。そのため、中性子星の平均密度は原子核の平均密度の約 2.5 倍となる。

図 1 は密度に対する粒子の存在量を示している。通常の原子核の密度領域では n、p が存在している。しかし、中性子星の密度領域では、n、p に加えて s クォークを含む  $\Lambda$ 、 $\Xi^-$  が存在することが図から分かる。これは、中性子星内部の p の量が増大すると、n の化学ポテンシャルが  $\Lambda$  の化学ポテンシャルを上回るようになり、n が  $\Lambda$  に変位する方がエネルギー的に安定するため起こる。そのため、中性子星の内部構造を探るためには s クォークを含む  $\Lambda$ 、 $\Xi^-$  から粒子間の相互作用を求めることが必要である。

一般に粒子の相互作用を調べるためには粒子同士の衝突散乱実験を行うが、私たちの研究で使用する  $\Lambda$  粒子は uds の 3 つのクォークからなり、その寿命は  $10^{-10}$  秒であるため、衝突実験によって相互作用を知ることは不可能である。そのため、 $\Lambda$  粒子の相互作用を求めるには原子核の中に  $\Lambda$  粒子持つものを生成し、核の崩壊過程から相互作用を求めるという手法しかない。

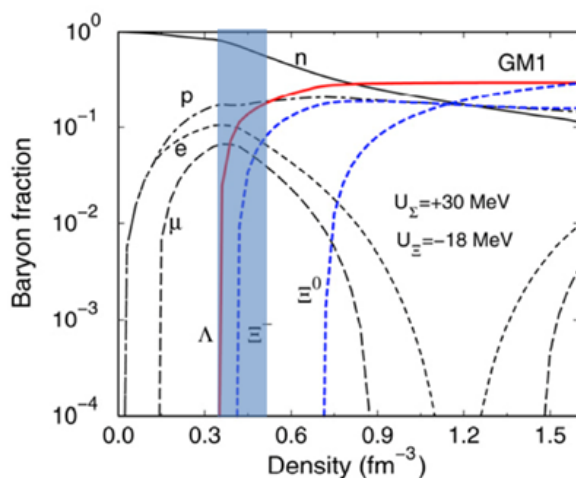


図 1: 密度に対する粒子の存在量

## 1.2 Double- $\Lambda$ Hyper 核

通常の核に  $\Lambda$  粒子を 2 つ持たせたものが Double- $\Lambda$ Hyper 核である。Double- $\Lambda$ Hyper 核を生成するため、 $K^+, K^-$  反応により  $\Xi^-$  粒子を生成する。 $K^+, K^-$  反応は式 (1) の反応である。そして、生成された  $\Xi^-$  粒子を原子核に吸収させることで式 (2) の反応を起こし  $\Lambda$  粒子を生成する。

$$K^- + p \longrightarrow \Xi^- + K^+ \quad (1)$$

$$\Xi^- + p \longrightarrow \Lambda + \Lambda + 28.6 \text{ Mev} \quad (2)$$

E07 実験では、 $K^-$  粒子を生成し Diamond Target に照射することで  $\Xi^-$  粒子を生成する。そして、生成された  $\Xi^-$  粒子を原子核乾板中で静止させる。 $\Xi^-$  粒子は電離損失により  $\Xi^-$  粒子の持つエネルギーが減少していく。エネルギーが減少した後に乾板中の原子核に吸収されることで、核内の陽子と反応を起こす。これらの反応により生成された 2 つの  $\Lambda$  粒子が原子核の中にとどまると、Single- $\Lambda$ Hyper 核や Double- $\Lambda$ Hyper 核が生成される。

E07 実験では上述したとおり原子核乾板の外で  $\Xi^-$  粒子を生成し、乾板中で  $\Xi^-$  粒子を反応させる。しかし、それ以外にも  $K^-$  粒子が原子核乾板の中の原子核と反応し Double- $\Lambda$ Hyper 核ができる場合もある。

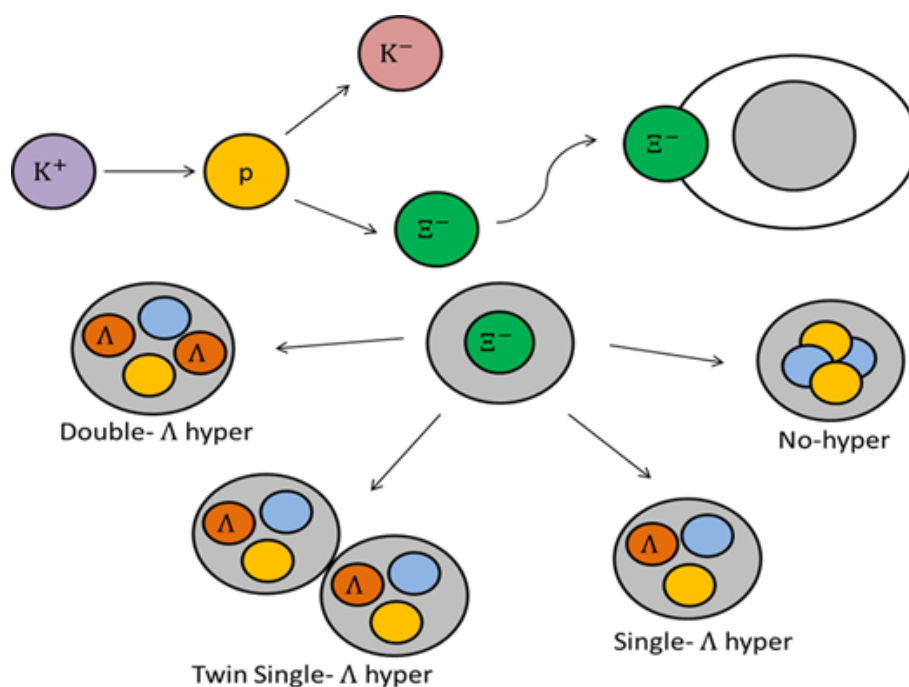


図 2: Hyper 核生成過程

### 1.3 原子核乾板

原子核乾板とは非常に高感度な写真フィルム的一种で、荷電粒子の通過した跡を記録する検出器である。私たちが実験で使用する  $\Lambda$  粒子の寿命は非常に短いため、Hyper 核の生成・崩壊事象をすべて記録できる原子核乾板を使う必要がある。

原子核乾板の利点としては大きく分けて2点ある。

一点目は、現像処理を行うことで半永久的に顕微鏡による観測を可能にすることである。原子核乾板中を荷電粒子が通ることで、原子核乾板の主成分である AgBr が電離され銀原子が生成される。現像処理により、銀が成長し 1 $\mu$ m 程度の粒となり (grain)、荷電粒子の飛跡が grain の連なり (track) として現れ、その状態を保持する。そのため、原子核乾板を破損しない限り一度記録した Hyper 核の生成・崩壊事象や Hyper 核以外の荷電粒子秘跡を何度でも同じ状態で観測することができる。

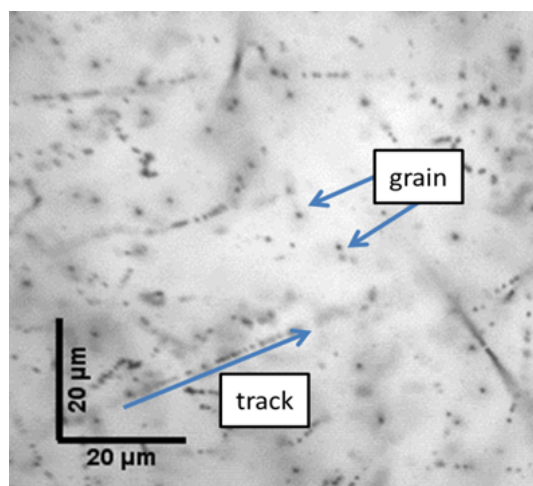


図 3: 原子核乾板中に飛跡が記録される流れ

二点目は、サブミクロン精度での空間分解能を持つことである。生成される銀粒子の大きさが  $\mu$ m オーダーのため、その大きさでの位置分解能が出る。また、乾板に記録された飛跡の長さ、太さは通過した荷電粒子のエネルギーや電荷に依存する。そのため、私たちは記録された Hyper 核事象の飛跡の長さや角度からエネルギーを計算することで  $\Lambda$ - $\Lambda$  間に働く相互作用を算出することができる。

原子核乾板は Base に Emulsion を塗布して作成している。Base とはポリスチレンフィルムで作られた支持体である。Emulsion は通常の写真乳剤よりもハロゲン化銀の含有量が高く、最小電離損失に対して感度を持っているものである。E07 実験で使用する原子核乾板 1400 枚 (薄型:200、厚形:1200) はすべて岐阜大学で製造された。

E07 実験で使用する乾板は 40m の Base に 450m の乳剤を塗布する厚型乾板と、180m の Base に 100m の乳剤を塗布する薄型乾板の二種類である。

薄型乾板は SSD と emulsion との接続に使用される。薄型乾板は base が厚く、乳剤が薄く塗布されているため現像の前後で乾板の変形が小さい。そのため、記録された飛跡の角度や位置を明確に求められる。

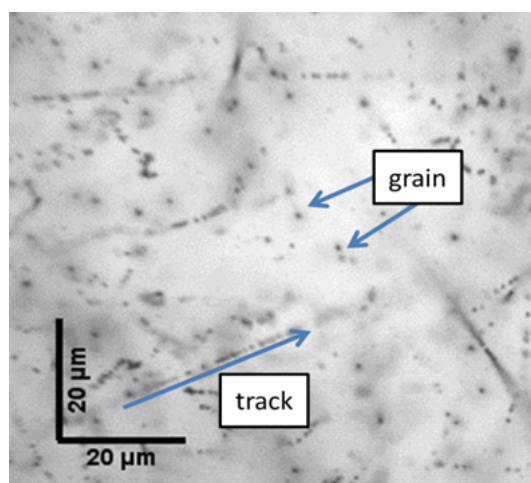


図 4: 原子核乾板中に記録される track と grain の様子

厚形乾板は照射された三粒子を乾板中で静止させ、娘粒子の飛跡を記録するために用いられる。

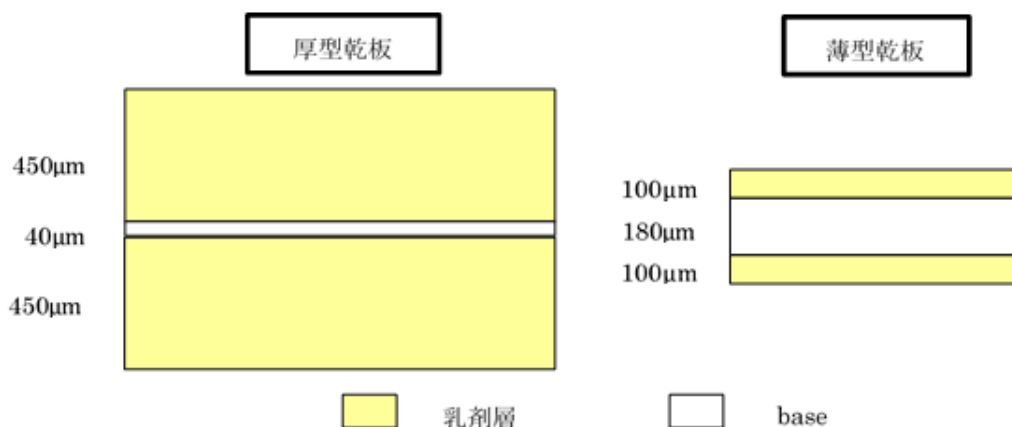


図 5: 使用する原子核乾板の規格

## 1.4 光学顕微鏡

光学顕微鏡を用いて、現像後の原子核乾板に記録されている track を追跡、観察する。使用する顕微鏡は、モーターによって水平方向 (x, y 方向) に約 1m の精度で位置制御し、エンコーダーによって鉛直方向 (z 方向) に約 0.1m の精度で稼働できる。この顕微鏡により、原子核乾板表面の推測される位置で目的の track を探し、 $\Xi^-$  粒子候補を見つけ、track を原子核乾板上面から下面まで追跡していく。

PC を接続することで、この光学顕微鏡を制御している。CCD カメラを顕微鏡に設置することで、顕微鏡で観察したものを画像として取得する。取得した画像を PC

の画面上に表示することや、顕微鏡の稼働に活用している。E<sup>-</sup>粒子自動追跡には、50 倍の対物レンズを使用している。

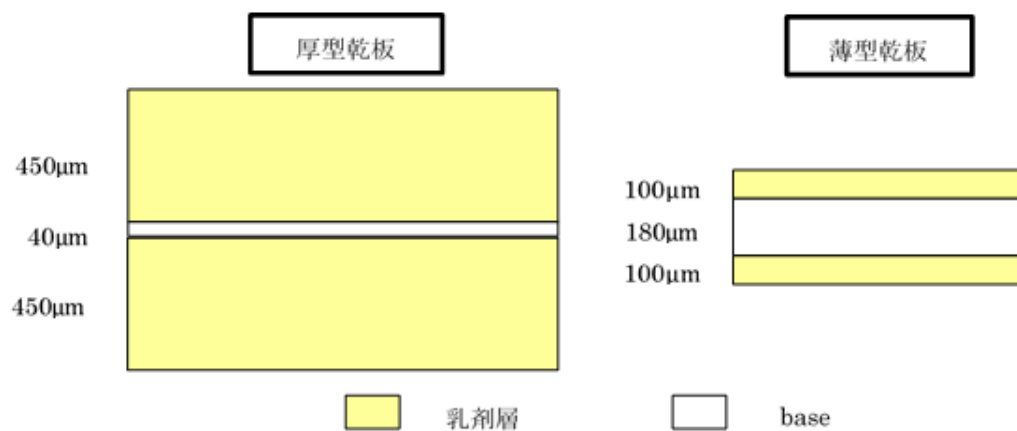


図 6: 光学顕微鏡



## 1.5 KEK-PS E373 実験

E373 実験は E176 実験に続く Double- $\Lambda$ Hyper 核検出実験である。[1] [2] E176 実験の約 10 倍の Double- $\Lambda$ Hyper 核の検出を目標にし、エマルジョンとカウンターを組み合わせたハイブリッド-エマルジョン法を取り入れて実施された。約 1000 の  $\Xi^-$  粒子吸収事象が見積もられ、光学顕微鏡を用いた半自動飛跡追跡により全モジュールの解析が終了している。解析の結果、約 600 例の  $\Xi^-$  粒子吸収事象を検出し、7 例の Double- $\Lambda$ Hyper 核を検出した。その中の 1 例でのみ崩壊モードを一意に決定することができ、この 1 例を NAGARA Event と名付けた。

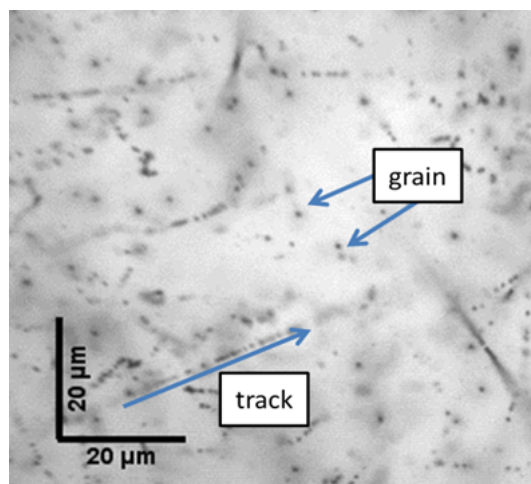


図 7: Nagara event と Kiso event

## 1.6 J-PARC E07 実験

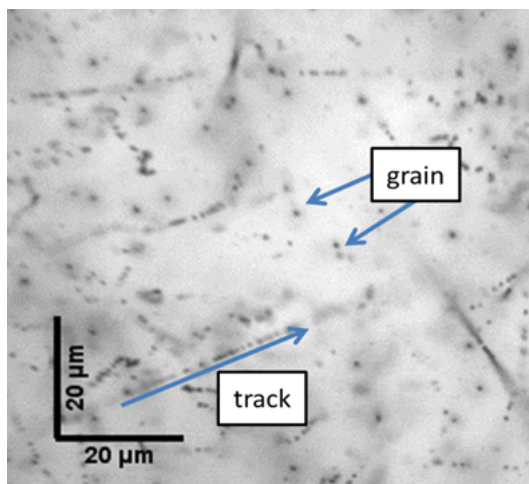
J-PARC E07 実験はハイブリッド-エマルジョン法により KEK-PS E373 実験の 10 倍の統計量を目指す実験である。表 1 は J-PARC E07 実験と KEK-PS E373 実験の比較をしたものである。表にあるように、beam の  $K^-/\pi^-$  を約 3.5 倍、原子核乳剤の量を約 3 倍にすることで 10 倍の  $\Xi^-$  粒子静止事象を実現する。

SSD は電荷をもった粒子が通過した際に、通過した粒子が原子核乾板スタックのどの位置にどのような角度で照射されているかの情報を記録するものである。原子核乾板スタックを 2 つの SSD で挟むことで、Diamond Target で生成された  $\Xi^-$  粒子だけでなく、原子核乾板内で反応した  $\Xi^-$  粒子の情報も記録できる。SSD の情報を使い、emulsion に記録された飛跡の中で  $\Xi^-$  粒子である確率の高い飛跡のみを追跡することでいち早く Double- $\Lambda$ Hyper 核を検出する。SSD の精度と前回の検出器の精度の違いを示す。これがハイブリッド-エマルジョン法である。

表 1: J-PARC E07 実験と KEK-PS E373 実験の比較

	KEK-PS E373 実験	J-PARC E07 実験
$\Xi^-$ 粒子静止事象	$\sim 10^3$	$\sim 10^4$
$K^-/\pi^-$	1/4	6/1
原子核乳剤量	0.8t	2.1t

表 2: 原子核乾板中に記録される track と grain の様子



## 2 J-PARC E07 実験 2ndRun

J-PARC E07 実験は 1stRun を 2016 年 6 月 18 日～30 日に、2ndRun を 2017 年 5 月～7 月に実施した。1stRun では 18stacks、2ndRun では 100stacks の beam 照射に成功した。beam 照射を行うにあたり使用する原子核乾板のバックグラウンド削減法の実施、原子核乾板の真空パック法の確立、現像等を実施した。

本章では J-PARC E07 実験 beam 照射、現像においての実施内容及びその手法について述べる。強制現像退行処理と原子核乾板の現像に関する詳細な情報及び処理の評価については大橋修士論文に記載する。

### 2.1 Refresh 処理の実施

#### 2.1.1 実施背景

J-PARC E07 実験で使用する原子核乾板約 1400 枚はすべて岐阜大学ダブルハイパー核実験棟にて制作した。制作は 2013 年 12 月～2014 年 3 月の期間で完了している。当初の予定では乾板製造後すぐに beam 照射を実施する予定であったが、J-PARC での放射能漏れ事故により実験は延期になった。

製造した原子核乾板は現像されるまで空気中の宇宙線やコンプトン電子を記録していく。これらのバックグラウンドが増加すると、beam 照射後の解析に支障を来す恐れがある。そこで、宇宙線の影響が少ない神岡鉱山内に鉛ブロックで箱を作り、製造した原子核乾板を保管した。

図 8 は製造からの時間経過による原子核乾板記録された宇宙線、コンプトン電子の増加稽古を示している。赤色が岐阜大学の冷蔵庫内で保管した場合、青色が神岡鉱山鉛箱内で保管した場合である。二つの線の傾きを比較すると、神岡鉱山内で保管したことで非常に多くのバックグラウンドを削減することができたということが分かる。

しかし、製造から beam 照射まで 2 年の期間が経過したため、神岡鉱山内で保管していたとしても解析に支障を及ぼすレベルまでバックグラウンドが蓄積してしまった。図 10 はコンプトンの蓄積量に対する beam 検出効率を示したものである。図から beam 検出効率が著しく低下することが分かる。また、図 11 はバックグラウンド蓄積量の違う乾板での輝度値の位置変化を示している。図からバックグラウンドの増加により、コントラストが悪くなることが分かる。

これらのことから、蓄積されたバックグラウンドの消去のために原子核乾板に対して強制潜像退行処理 (Refresh 処理) を実施した。

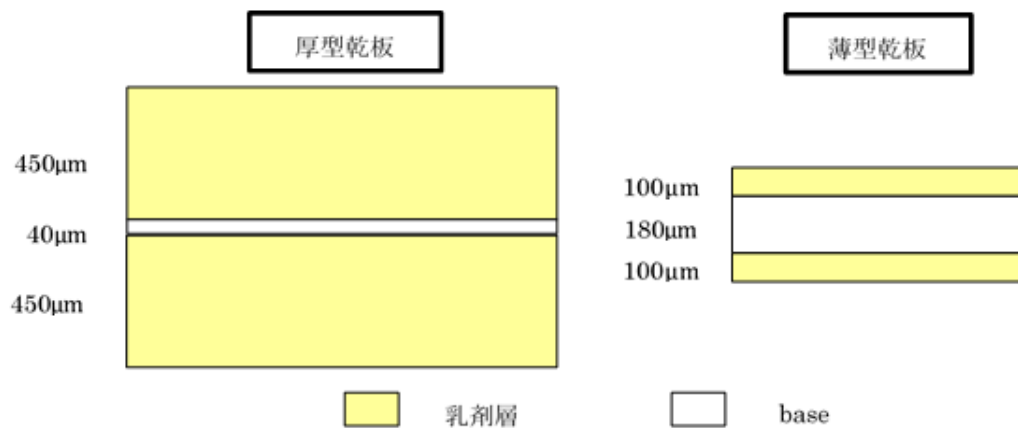


図 8: 乾板に記録されたコンプトンと宇宙線

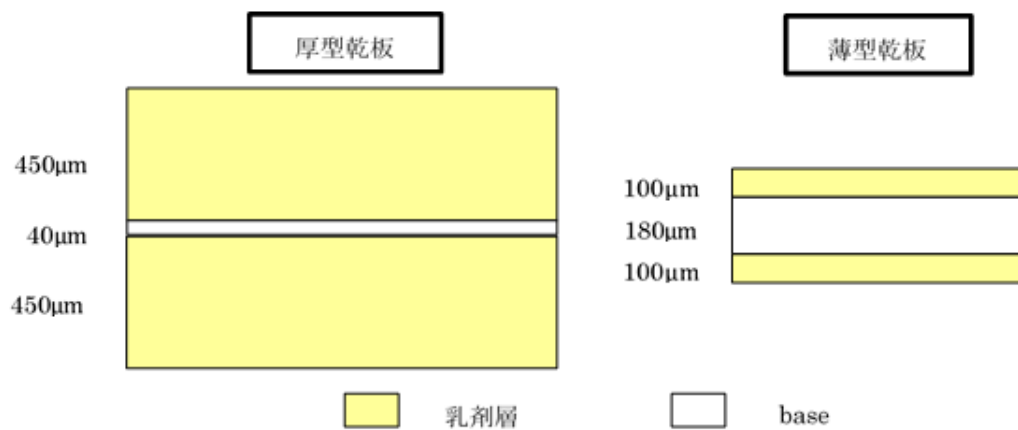


図 9: 神岡鉱山内の鉛ブロック中に原子核乾板の保管状況

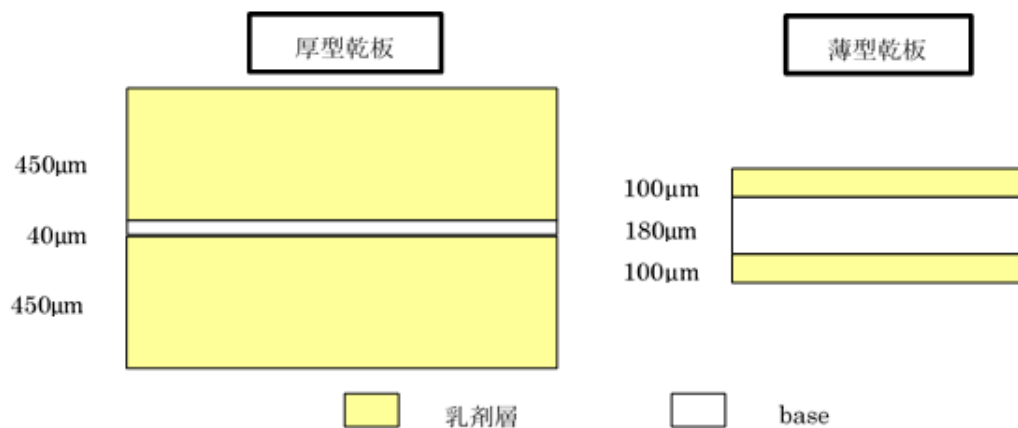


図 10: コンプトンの蓄積量に対する beam の検出効率

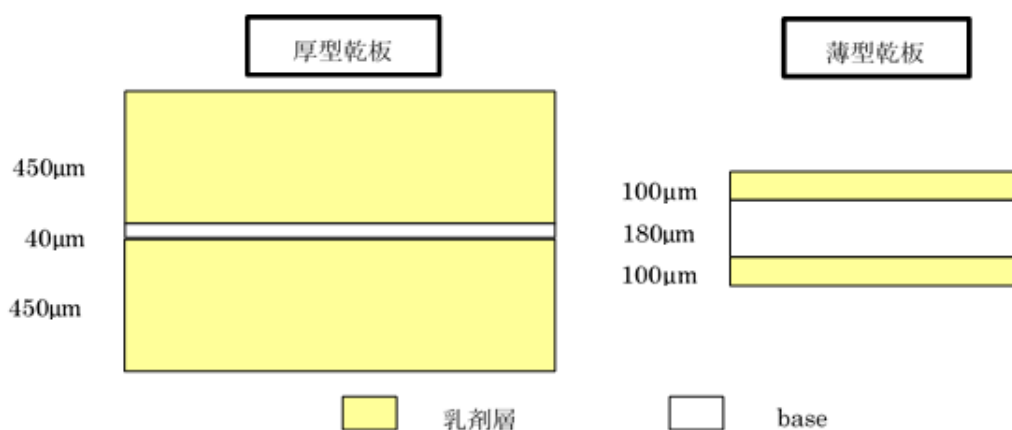
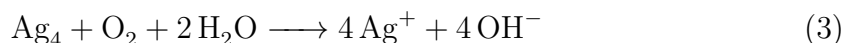


図 11: バックグラウンド蓄積量の違う乾板での輝度値の位置変化

### 2.1.2 原理

写真フィルムには撮影してから現像するまでに時間を経ると、映像が消えていく性質 (潜像退行性) がある。[式 (3)] また、潜像退行性は高温高湿度の環境で著しく進むことが明らかになっている。



原子核乾板は塗布されてから現像されるまでの間に、自然放射線や宇宙線の影響を受け潜像が蓄積される。そこで、蓄積された潜像を消去するための手法として強制潜像退行処理 (Refresh 処理) と呼ばれる方法が開発されている。[3] Refresh 処理は原子核乾板の持つ現像退行性を利用する。式 3 の反応を起こすことで、形成されていた潜像核がイオンになり現像されない状態になる。この化学反応は温度が高くなるほど反応が促進されるため、原子核乾板を高温高湿度の環境下に置くことで潜像退行が促進される。よって、Refresh 処理により beam 照射の前に記録された Background を消去できる。強制潜像退行処理による潜像核が消去される模式図を入れる。

### 2.1.3 実施環境

- リフレッシュ処理を行うには温度●度、湿度●%の環境を●時間維持する必要がある。
- リフレッシュ処理を行うためその環境を維持する装置を作成した。
- 1stRun では温度・湿度の調整を手動で行ってきたが、2ndRun では温度・湿度の調整を自動で制御させた。[村本卒論]
- 湿度と厚みのグラフを載せて制御できていると書く。

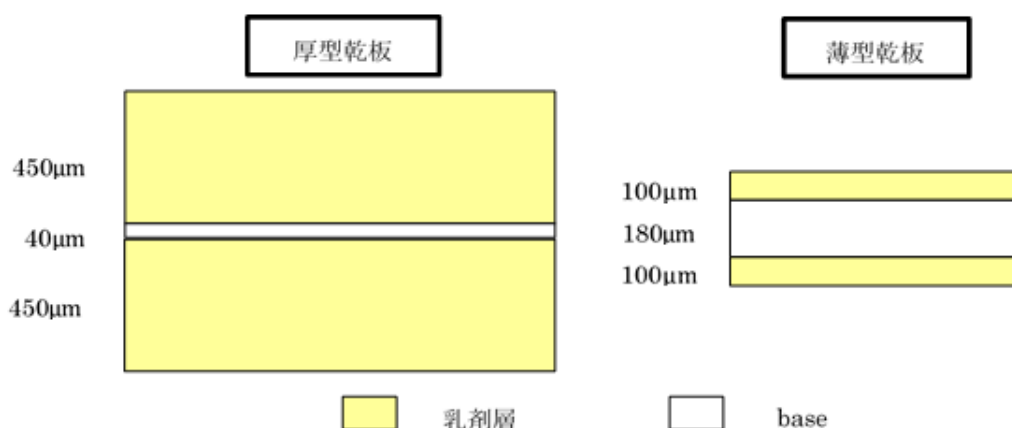


図 12: Refresh 処理模式図

Refresh 処理の実施には温度 25 度、湿度 90 % の環境を維持することが必要である。そこで、温度と湿度をコントロールするチェンバーを作成した。このチェンバーは 1 度の処理で 100 枚の原子核乾板の Refresh 処理を実施可能である。1stRun ではこの装置を使い 4 回の Refresh 処理を実施し、温度湿度の制御を手動で行った。2ndRun では 13 回の Refresh 処理を、温度・湿度の調整を自動制御で実施した。[村本卒論]

## 2.2 GridMark 照射環境の最適化

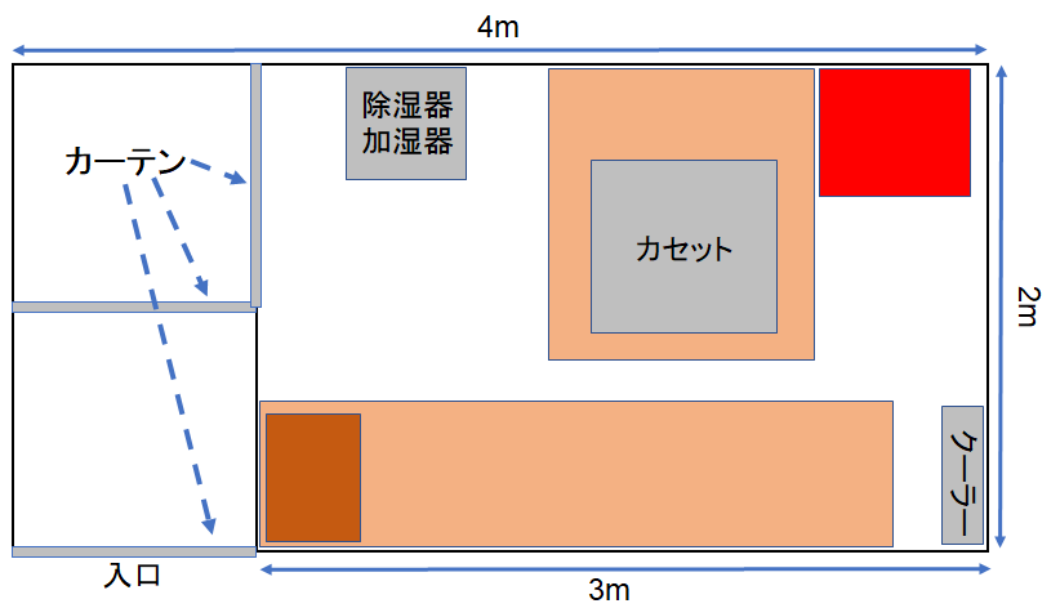
### 2.2.1 暗室の拡張

1stRun では beam 照射後の原子核乾板を岐阜に持ち帰り、現像の数日前に岐阜で Grid マークを照射した。beam 照射から Grid マーク照射までの間に乾板の変形があったせいか、Grid マークの位置ズレが一様でなかったため一視野内に飛跡を持つてくることが困難になった。そこで、2ndRun では beam 照射後の原子核乾板に対して J-PARC 内の暗室下で GridMark 照射を実施した。そのため 2017 年 3 月に GridMark 照射装置を設置するため暗室の拡張を行った。

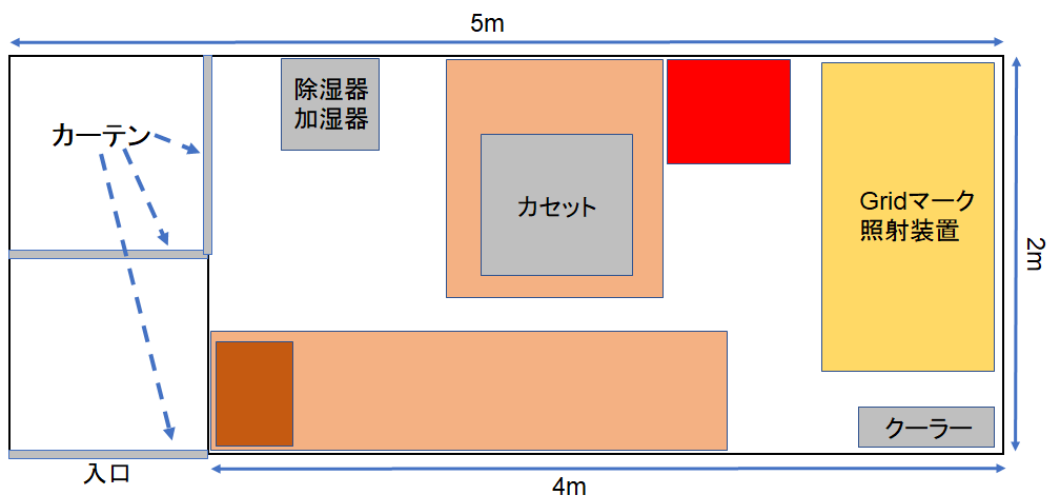
図 13 は暗室の拡張前、拡張後を示したものである。横の長さを 1m 拡張することで、Grid マーク照射装置を設置する場所を確保した。

### 2.2.2 GridMark ネガ

2016 年に E07 実験 testRun にて beam 照射を実施した。その際、原子核乾板に焼き付けた Grid マークの中はネガのつまりにより場所により照射されていないものが存在していた。1stRun の Grid マーク照射の際は図 14 の装置を使用してネガのつまりを除去しながら照射を行った。しかし、1stRun の原子核乾板においても Grid マークが照射されていない箇所が存在した。これらを受けてネガの変更を行った。E07



(a) 拡張前暗室内図



(b) 拡張後暗室内図

図 13: 暗室拡張前後の内図

実験と同様に発注し、2ndRun の原子核乾板には図 15 を使い Grid マークを照射した。

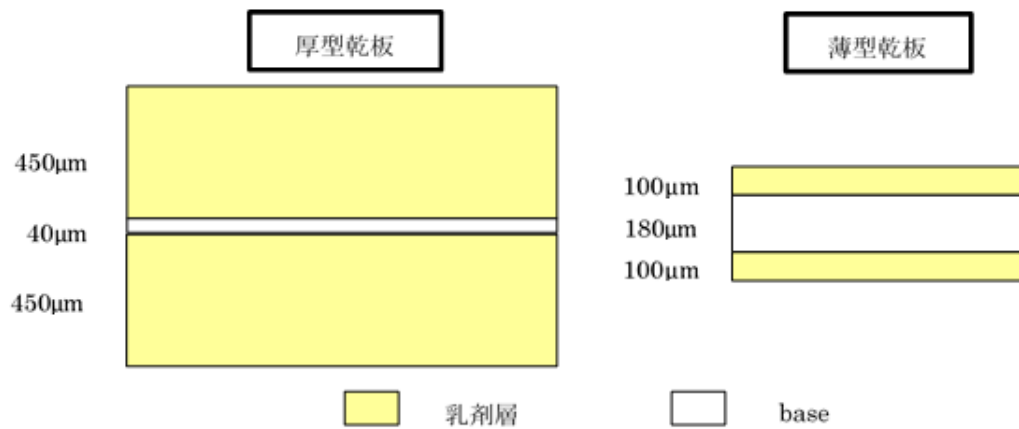


図 14: ネガのつまり除去装置

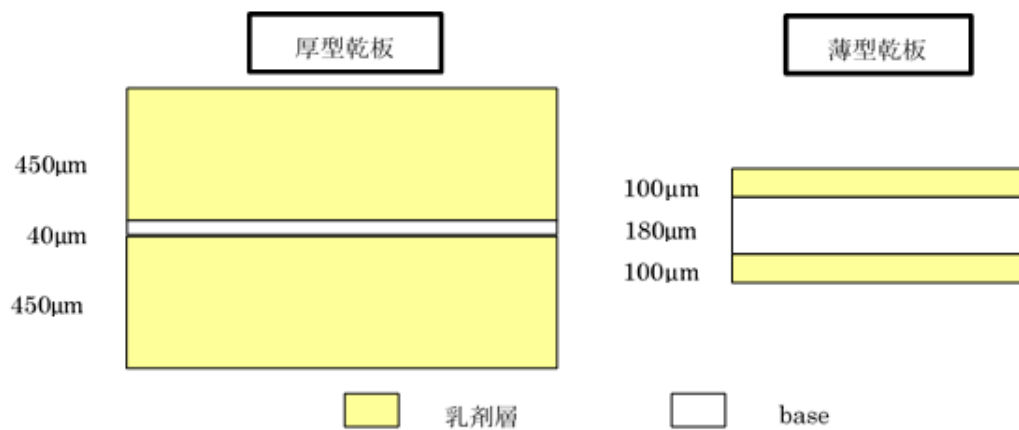


図 15: 2ndRun ネガ

### 2.2.3 GridMark 照射装置

- 1stRun 乾板は人がストップウォッチを使い、10 秒間露光するということを●枚の乾板に対して実施した。
- この手法では 1mod 分照射するのに●時間が必要になるとともに、精神的疲労が大きいので変更した。
- 一瞬で●rpm? 露光できるように作り替えた。
- 装置はこんな感じである。



E071stRun ではタイマーを用いて 10 秒間原子核乾板に露光した。(田村卒論) 参照論文と同様の手法で 1mod 分照射するのに約 1 時間半の時間が必要になるとともに時間をストップウォッチを使って計測していたため、多大な精神的疲労を負うことになっていた。E07 実験 2ndRun では beam 照射後すぐに Grid マークを照射する。従来の手法から変更することで照射の時間短縮及び疲労の削減のために照射装置の改造を行った。

田村卒論を確認して、露光時間、最終的にどれくらい照射すれば良いのか、照射装置の構造の写真を引用して載せる。

吉田氏が組んだ回路の図を載せる。2ndRun の Grid マークはこの装置を使用して焼き付けた。田村さんの卒論から Grid マークを焼き付けるのにどれくらい照射する必要があるのかを確認して引用する。

## 2.3 E07 実験 beam 照射

### 2.3.1 2ndRunbeam 照射

- 日をかけて原子核乾板 ● 枚すべてに beam 照射を行った。
- beam ライン等の図。Runend の図を見せて終了。
- 何日かけて実施したかを記す。照射 Mod 数/月日 の図

2017 年 5 月 ● 日～7 月 ● 日にかけて 100stacks の原子核乾板すべてに beam 照射を行った。

### 2.3.2 作業内容

ここでは emulsion カセットに乾板を詰める作業と乾板をカセットから出す。作業について書く。

遠藤修論を参考文献にする。

- 乾板を冷蔵庫から出す。
- 袋から乾板を開けて乾板の重さ・厚さを測定し、乾板の番号を記録、乾板の MOD 番号を書く。

暗室内で原子核乾板を EmulsionCasette に詰める際の流れは以下の通りである。

1. グリスを塗った、O リングをはめ込む。
2. カセットの 4 つ角に L 字の SUS 板を置く。
3. 乾板を SUS 板に沿って原子核乾板 13 枚をカセットに入れる。

### 2.3.3 EmulsionCasette での真空度

- 遠藤修論にある基準をクリアすることを確認しながら実施。
- ある真空度グラフをのせ、適切に行えたということを示す。
- 残りの Mod に関しては付録にあると記す。

### 2.3.4 EmulsionCasette の固定法確立

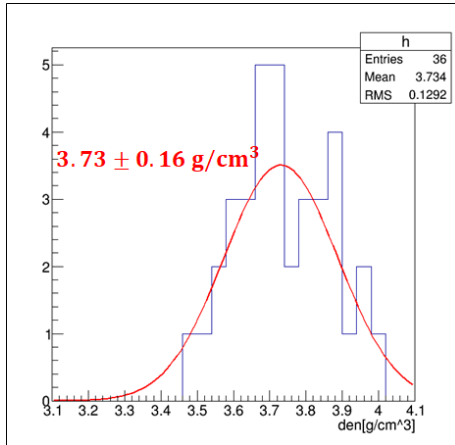
1stRun の beam 照射ではカセットの S U S 箔が 18 回のカセットでの真空パックにより●回はがれた。2ndRun の beam 照射では 100 回の真空引きを行う必要があるため、この頻度で S U S 箔が剥がれた場合対応しきれない。そこで、カセットの S U S 箔にかかる負荷軽減のための装置が開発された。[遠藤修論] 図でその開発したカセット固定のための治具を見せる。この治具を使用して、2ndRun の照射を行った。これにより、2ndRun では 100 回の真空引きに対して 1 度しか S U S 箔が剥がれなかった。

### 2.3.5 照射した乾板の密度

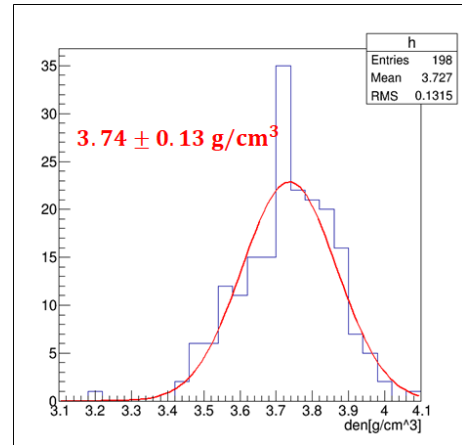
2ndRun では 1stRun と同様に emulsionCasette に乾板を入れる前に乾板の厚さと重さの測定、beam 照射後に乾板の重さを測定することで beam 照射により乾板の重さに大きな変動がないかを確認した。照射の前後で重さが 1.0g 以上異なっていた場合は、再度厚さ重さの測定をして記録した。乾板の重さは電子天秤を用いて、乾板の厚さはシックネスゲージを用いて乾板の 4 カ所を測定した。

図 17 は厚形乾板の 1stRun 乾板での密度の測定結果と 2ndRun 乾板での密度の測定結果である。1stRun 乾板の密度は Refresh 未処理の乾板、2ndRun は Refresh 処理実施乾板での密度でヒストグラムを作成した。比較すると、1stRun と 2ndRun で使用した原子核乾板に大きな違いは無いように見える。また、Refresh 処理の有無で原子核乾板の密度が変化しないことが分かる。

薄型乾板でも同様に密度の比較をした。図 18 を見ると、1stRun の薄型乾板は厚形乾板より密度が大きく算出されていたが、2ndRun で使用した薄型乾板でも同様の傾向になった。伊藤修論の可塑剤の量による密度の違いについても記述する。

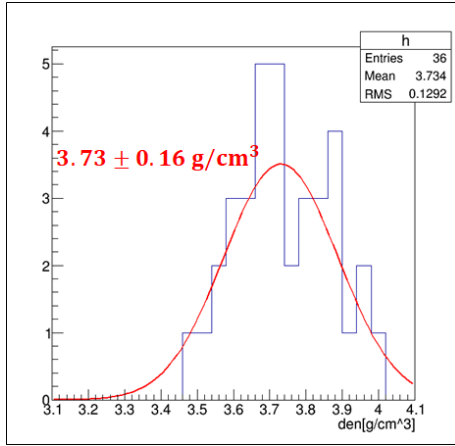


(a) 電子天秤

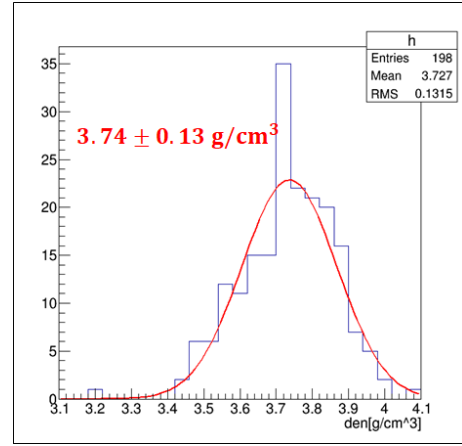


(b) シックネスゲージ

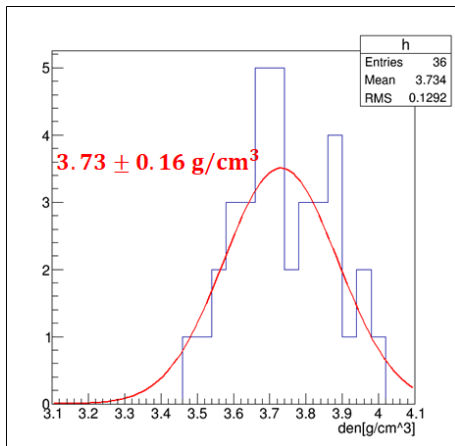
図 16: 使用した電子天秤とシックネスゲージ



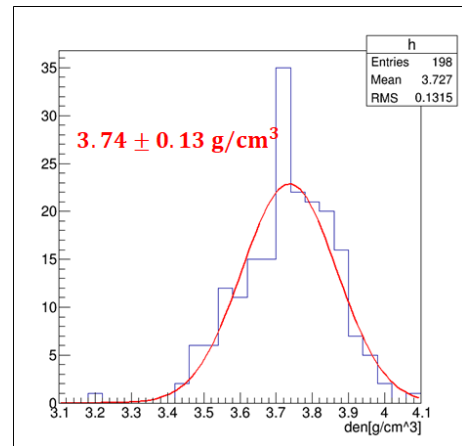
(a) 1stRun 厚形乾板密度 可塑剤 6.0cc



(b) 2ndRun 厚形乾板密度 可塑剤 6.0cc

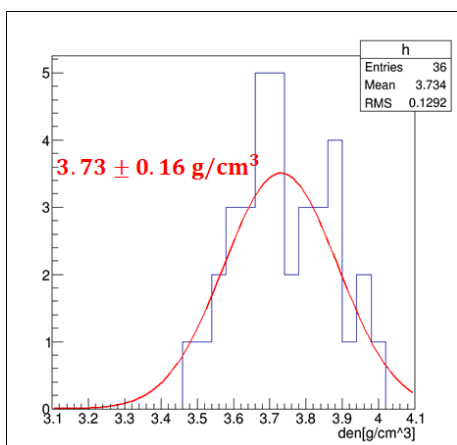


(c) 1stRun 厚形乾板密度 可塑剤 7.5cc

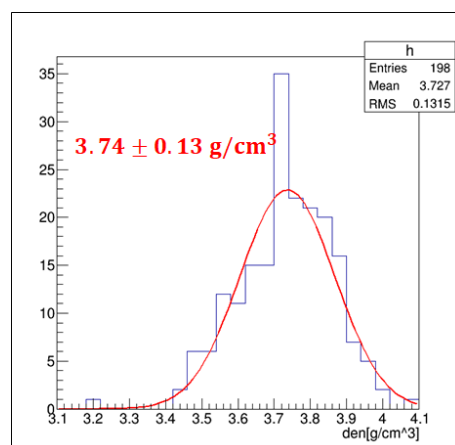


(d) 2ndRun 厚形乾板密度 可塑剤 7.5cc

図 17: 厚形乾板の密度比較



(a)1stRun 薄型密度



(b)2ndRun 薄型密度

図 18: 薄型乾板の密度比較

## 2.4 現像

- 原子核乾板すべて現像している。
- 現像の行程
- 1stRun は●年に●枚終了、2ndRun は●年に●枚終了予定
- 現像の詳細な記述は大橋修論に記載する。 それなら実施環境とどれくらい行ったのかを記載すればいいかな。

### 2.4.1 原理

過去に開発された現像手法にならい実施した。原子核乾板の現像には予浸 (pre-soark)、現像 (Cold.dev Hot.dev)、現像 (Cold.dev Hot.dev)、停止 (Stop)、定着 (Fix2/4、Fix4/4)、水洗 (Wash) の工程がある。原子核乾板はこの順で工程を実施することで、記録した荷電粒子飛跡を顕微鏡で観察できるようになる。各工程について記載をする。予浸 (presoark) 乾膜である emulsion に水分を含ませる過程である。この処理により現像の過程で現像液が浸透しやすくする。現像 (Cold.dev Hot.dev) 停止 (Stop) 定着 (Fix2/4、Fix4/4) 水洗 (Wash)

### 2.4.2 実施環境

### 3 荷電粒子飛跡追跡の自動化

#### 3.1 目的

E373 実験では人が約  $2.0 \times 10^4$  本の  $\Xi^-$  候補を顕微鏡を使い静止点まで追跡した。この追跡には約数年が必要となった。先に記述したが、今年度実施された J-PARC E07 実験ではハイブリッド-エマルジョン法により E373 実験の約 10 倍の統計量を検出することを目指している。今回実施された E07 実験では、E373 実験より精度の高い検出機である SSD を使うことで追跡すべき飛跡を増やさないようにしている。しかし、その条件であっても追跡すべき  $\Xi^-$  候補飛跡が E373 実験の本数を超えることが予想されるため、機械が自動で飛跡を静止点まで追跡するプログラムが必要になった。

この章では  $\Xi^-$  候補飛跡のために使用・開発した要素技術について記述する。SSD と E373 実験の際に使用された検出機の精度をまとめた表を示す。

#### 3.2 $\Xi^-$ 候補 & beam 認識に用いる画像処理

##### 3.2.1 コントラスト処理

原子核乾板中を撮影した画像は、画像を撮影した原子核乾板の位置により見え方が異なる。図 19 は同一乾板内で撮影した写真で、視野中心に見えるのは追跡対象にしている  $\Xi^-$  候補飛跡である。二つの写真の違いは原子核乾板の位置で、左が上側乳剤層、右が下側乳剤層で撮影したものである。図より撮影地点が異なれば画像のコントラストが大きく異なることが分かる。そこで原子核乾板中で撮影した画像を、撮影地点によらず飛跡情報を取得するために画像のコントラストの違いをなくす必要がある。

コントラストとは、画像の濃淡情報の分布の広さに関する性質で、画像の最大輝度を  $I_{max}$ 、最小輝度を  $I_{min}$  とするとき式 (4) で表す。コントラスト処理に使う変化式はまた調べて記入する。

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (4)$$

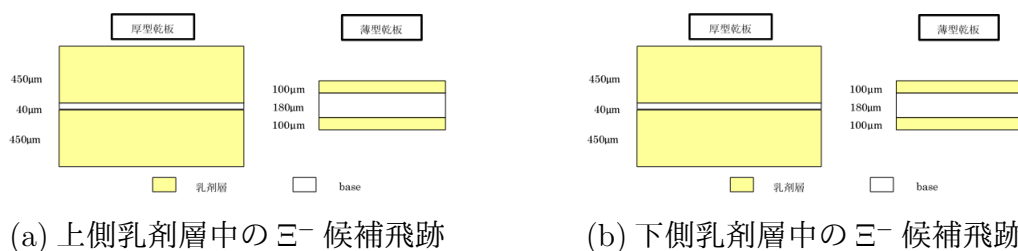
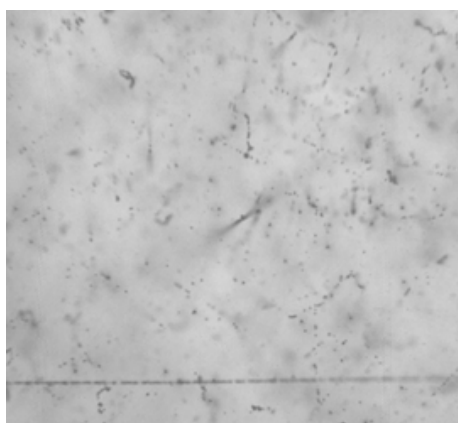
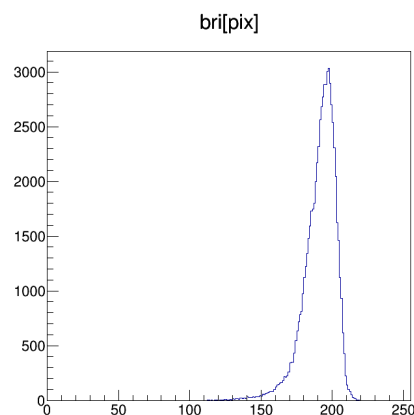


図 19: 撮影地点によるコントラストの違い

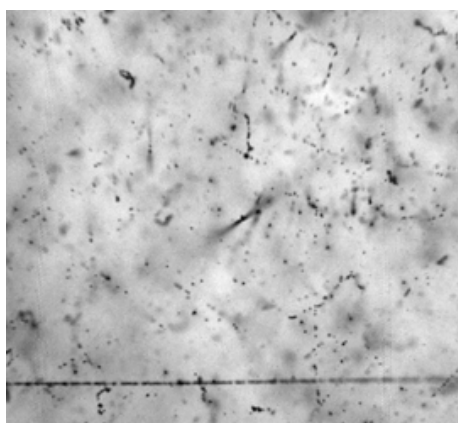
画像のコントラストをよくするために用いる式は以下の通りである。図 20 はこの式を使用して画像にコントラスト処理を施した画像である。図の c、d を比較すると、コントラスト処理により画像の輝度値の明暗の幅が広がったことが分かる。



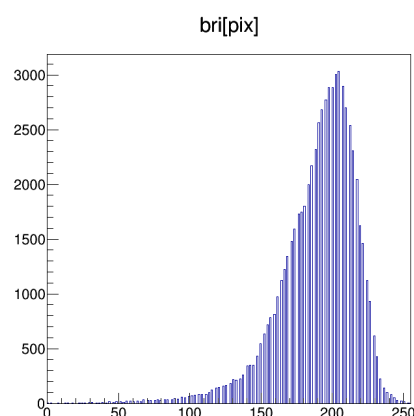
(a) コントラスト処理前



(b)a の輝度値分布



(c) コントラスト処理後



(d)c の輝度値分布

図 20: コントラスト処理によるコントラストの違い

### 3.2.2 ガウシアンフィルタ処理

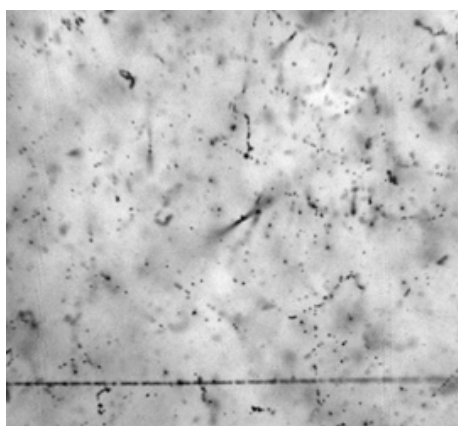
撮影された画像には意図していないノイズが含まれている。機械に飛跡を認識させるために、画像を構成する 1 つ 1 つの pixel に割り当てられた輝度値情報を利用する。画像処理によりなめらかな濃淡変化画像に与え、画像に含まれるノイズなどの不要な濃淡変動を軽減する。(平滑化)

ガウシアンフィルタとは、画像の平滑化を行うために設定する平滑化フィルタの一例である。フィルタによって覆われる領域内の画素の値がフィルタの原点に近いほど大きな重みをつけるが、この重みをガウス分布に近づけたフィルタを指す。そ

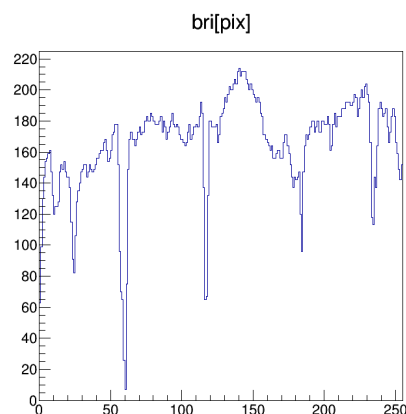
の際の二次元ガウス分布は式 (5) で表される。

$$h_g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

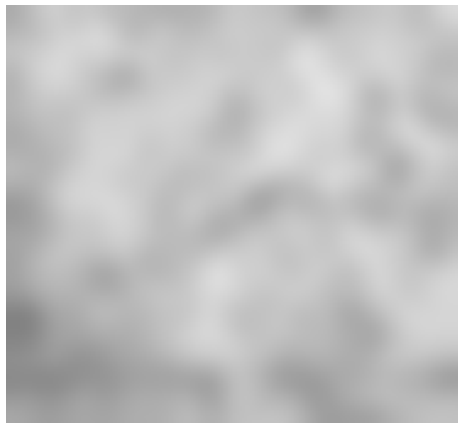
画像中のある画素を中心に指定範囲 (カーネルサイズ) 内で注目画素に近いほど輝度値の平均値を計算するときの重みを大きくするように処理をかけることである。式は次の通りである。この式を使い、処理を実施した。



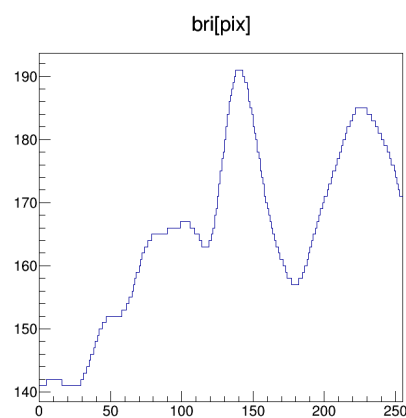
(a) ガウシアンフィルタ処理前



(b)a の中央行の輝度値



(c) ガウシアンフィルタ処理後



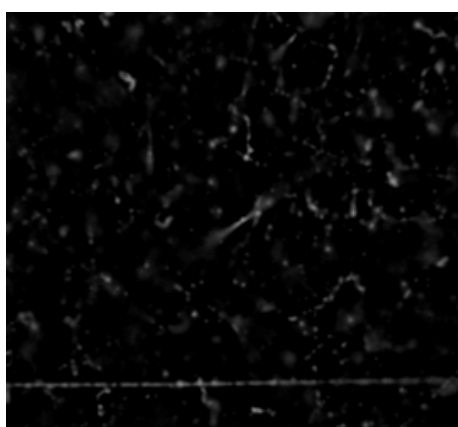
(d)c の中央行の輝度値

図 21: ガウシアンフィルタ処理による輝度値の違い

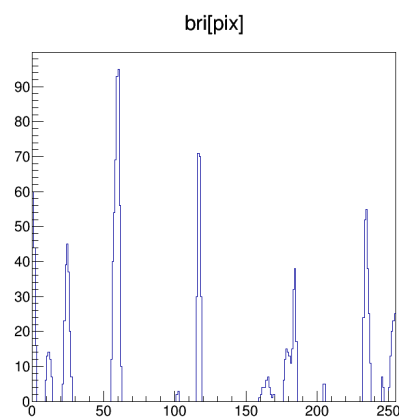
### 3.2.3 画像の白黒反転

次の二値化処理を実施するため、画像の白黒を反転させる必要がある。ガウシアンフィルタ処理を施した画像から、コントラスト処理を施した画像の輝度値の差を取ることで白黒を反転する。図 21 の (c) の画像の輝度値から (a) の輝度値情報を引

いて作成したのが図 22 である。図 22 を見れば分かるように差分を取ることで、黒色であった部分が白色に反転した。



(a) 図 21 の (c)-(a)



(b)(a) の中央行の輝度値

図 22: 輝度値差分処理後の画像

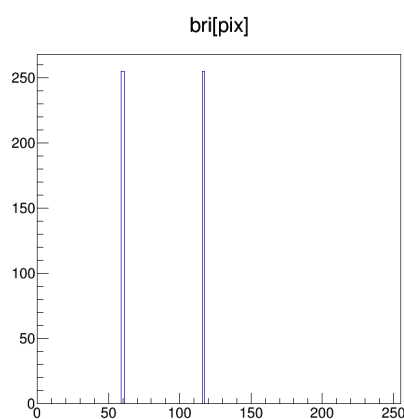
### 3.2.4 二値化

図 22 を見ると、視野中心にある飛跡情報以外に多くの輝度値情報が記録されていることが分かる。これらの情報は飛跡追跡を実施するのに不必要であり、飛跡の誤検出を招く恐れがある。そこで、二値化処理により指定した輝度値以下のピクセルの輝度値をゼロにする。これにより飛跡以外の不要な輝度値情報を消す。

図 23 は二値化処理前後の画像とその指定した行の輝度値を示したものである。図より二値化処理により飛跡以外の不要な輝度値情報が減少したことが分かる。



(a) 図 22 の (a) の二値化処理後画像



(b)(a) の中央行の輝度値

図 23: 二値化処理後の画像



### 3.3 座標変換

- affine 変換について書く。
- 追跡の際に考える必要のある座標系について書く。
- それらの座標系をつなぐために affine 変換をつかい、目的の飛跡の位置に行くことが必要である。

追跡すべき飛跡情報は Detector 座標系 (SSD 座標系)、Grid 座標系 (現像前座標系)、Stage 座標系 (現像後座標系) の 3 座標系で表すことができる。Detector 座標系は SSD の検出座標系である。Grid 座標系は emulsion に beam 照射をして現像をする前の座標系である。Stage 座標系は顕微鏡で原子核乾板を観察する際の座標系である。

SSD で検出された候補飛跡は Detector 座標系で記録されている。検出された候補飛跡を原子核乾板で観察するためには Detector 座標系、Grid 座標系、Stage 座標系への変換を適切に行う必要がある。その座標間の変換を適切に行うために affine 変換を使用する。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} \quad (6)$$

式 (6) を使い、座標変換を行う。x,y が座標変換後の座標、X,Y が座標変換前の座標、2 行 2 列の行列が線形変換について、p,q が平行移動の成分になる。x,y と X,Y が対応している地点を 3 点以上検出し、式を解くことで各変換パラメータを出取得できる。その変換パラメータを使い、対応がっていない地点の座標を推定する。

### 3.4 自動追跡の要素技術

#### 3.4.1 P-bar パターンマッチ

- SSD と emulsion の位置ズレを取得するのに必要。
- 乾板の四隅に照射されているものを使う。(なぜ P-bar を使うのか、どのように P-bar が照射されているか確認する。)
- どのように P-bar を取得するのか (スキャンする場所等を書く) を書く。
- 四隅のうち 3 点箇所パターンマッチがとれればズレが取得できる。(精度について書く。)

原子核乾板には SSD と emulsion の照射時の位置差を取得するために反陽子ビームが照射されている。照射されているのは乾板の四つ角 1cm1cm の領域であり、SSD と原子核乾板に対して垂直に照射されている。照射されている反陽子 beam の濃度は 1 平方センチあたり 10 の 4 乗である。k-beam は乾板に対して 10 の 6 乗照射されており、SSD と emulsion のパターンマッチをするには密に照射されすぎているので p-bar が必要になる。

角から 1cm ずつ内陸側に移動し、そこで 5mm × 5mm の領域をスキャンする。上側乳剤層と下側乳剤層をスキャンし、base を挟んで接続された垂直な beam を選び出すことで、原子核乾板薄型一枚目での飛跡集団のパターンを取得する。また、SSD に記録された垂直な飛跡集団を選び出すことで SSD に記録された飛跡集団のパターンを取得する。

SSD と原子核乾板薄型一枚目での飛跡集団同士でパターンマッチを行うことで、SSD と emulsion の座標系の対応をつける。

### 3.4.2 $\Xi^-$ 候補飛跡の選択

- 追跡の際に考える必要のある座標系について書く。
- それらの座標系をつなぐために affine 変換をつかい、目的の飛跡の位置に行くことが必要である。

追跡するために、SSD で検出した  $\Xi^-$  候補と pl01 に記録された荷電粒子飛跡の対応をつける。先述した P-bar パターンマッチにより、SSD と原子核乾板の座標の対応がついている。SSD で検出された  $\Xi^-$  候補の位置情報と角度情報を使い、 $\Xi^-$  候補の位置を薄型原子核乾板 1 枚目の base 上面まで外挿する。これにより  $\Xi^-$  候補の薄型原子核乾板 1 枚目の base 上面における位置がおおよそ分かる。この薄型原子核乾板 1 枚目の base 上面における位置情報と角度情報を合わせて prediction(pred) とする。

pred の座標を中心にして  $\Xi^-$  候補の角度により、原子核乾板中をスキャンする範囲を設定する。設定した範囲を元に、原子核乾板の上側乳剤層、下側乳剤層を scan し、原子核乾板中に記録されている荷電粒子飛跡を検出する。検出した飛跡の中から、base をまたいで繋がるものを薄型一枚目を通して飛跡 (basetrack) として記録する。basetrack は位置情報、角度情報を持っている。pred と basetrack の中から、角度がおおよそ似ている飛跡を追跡対象として下流の原子核乾板に接続し、飛跡追跡を行う。

### 3.4.3 K-beam パターンマッチ

- emulsion と emulsion の位置ズレを補正するために行う。
- これにより、例 pl01 で記録された飛跡と pl02 で記録された飛跡の対応付けをする。

- どこをスキャンして、どのようになるのかを書く。模式図を書く。

beam 照射は、エマルジョンカセットに 13 枚の原子核乾板を入れ、真空度を保ち beam 照射中に原子核乾板がずれないようにして実施した。しかし、原子核乾板一枚一枚違いがあり、現像の前後での変形も一様ではないため、上流の原子核乾板の位置情報と下流の原子核乾板の位置情報は対応していない。そこで、beam 照射時に原子核乾板に対して垂直に照射されている K-beam を使い、上流乾板と下流乾板の位置の対応をつける。

#### 3.4.4 表面認識

- 乳剤層と非乳剤層の境界面を取得するために行う。
- 乾板中の位置における輝度値の違いを示す。

原子核乾板中の飛跡を認識するために、原子核乾板の乳剤と非乳剤の地点を正確に捉える必要がある。図●は原子核乾板の乳剤層と非乳剤層で撮影した画像である。乳剤中で撮影した画像の場合は飛跡等が記録されているが、非乳剤層では記録されない。この画像に対して画像処理を実施したのが図●である。図より乳剤層か非乳剤層かにより画像処理後の画像中で輝度値情報を持つピクセルの数が異なることが分かる。輝度値情報を持つピクセルの数により乳剤層か否かを判断する。

顕微鏡操作し、乾板中の焦点が合っている箇所の Z 軸だけを動かし 3m 間隔で画像を撮影し、画像処理を実施する。その操作を行い、輝度値情報を持つピクセルの数を縦軸、Z 座標を横軸に取り作成したのが図●である。図より輝度値が急激に変化している箇所が 4 箇所ほど存在している。その部分が乳剤層と非乳剤層の境界になる。各境界面を認識する閾値を設定し、乳剤層である座標を求める。

#### 3.4.5 荷電粒子飛跡追跡

## 4 E07 乾板における開発プログラムでの追跡実績

## 5 まとめ

### 付録

これは付録でいいかな ??? 原子核乾板中に記録された Hyper 核 event を解析するためには記録されている原子核乾板の密度が重要になる。記録された飛跡の飛程からエネルギーを算出する際に乾板の密度が必要になるからである。現在核種が一意に決定されている 'NagaraEvent' の解析には event 付近に記録された  $\alpha$  崩壊飛跡を 50 例使用し、乾板の密度を計算して 0.00 とした。

表 0 は Nagara の各 track の長さ、角度を示している。track の長さ、角度が一定で、原子核乾板の密度を変化させたとき B/E がどれだけ変化するかを確認した。図 0 はその変化を示している。図から分かるように密度の変化によって B/E は大きく変化する。そのため原子核乾板の密度を正確に求めること、密度が解析において非常に重要であることが分かる。

図を入れる。

### 謝辞

ああああああああああああああああああああああああああああああ

### 参考文献

- [1] 「Double- $\Lambda$ Hyper nuclei observed in a hybrid emulsion experiment」 PHYSICAL REVIEW C NUCLEAR PHYSICS Vol.88, No.1, July 2013
- [2] 「 "NAGARA event" が語る相互作用—KEK-PS E373 ダブルハイパー核実験—」 仲澤和馬 (岐阜大学)、高橋仁 (京都大学)、PS-E373 共同実験グループ 高エネルギーニュース Vol.20 No.5 p.206 2002
- [3] 学位論文「大規模実験用高性能原子核乾板 OPERA Film の開発」第四章 Refresh 処理 名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 F 研究室 中村 著 (2005 年)