

T2K 実験の MUMON における
次期検出器候補 EMT の放射線耐性試験のための
遷移放射を用いた大強度電子ビームプロファイル

東北大学理学部物理学科
B8SB2028 笠間 奏平

2022 年 3 月 31 日

目次

第1章	はじめに	2
第2章	原理	4
2.1	遷移放射	4
2.2	放射体のビームへの影響	5
第3章	ビームテスト	7
3.1	ビームテストのセットアップの概要	8
3.2	ビームテストにおける光学系	9
第4章	実験結果と解析	12
4.1	撮影の結果	12
4.2	画像の距離変換	12
4.3	大強度の解析	15
4.4	大強度時の照射効率	19
第5章	較正の方法	23
5.1	較正による誤差の見積り	23
5.2	較正の問題点	24
第6章	放射光による低強度ビームプロファイル	27
6.1	遷移放射を用いる場合	27
6.2	チェレンコフ放射を用いる場合	28
第7章	まとめ	29
第8章	補足資料	30
8.1	射影変換	30
8.2	バイリニア法	31
	参考文献	33

第 1 章

はじめに

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は、茨城県の東海村から岐阜県の飛騨市までの約 295 km の距離を利用した長基線ニュートリノ振動実験である。東海村の J-PARK で生成されたニュートリノは、飛騨市神岡のスーパーカミオカンデまで打ち出される。J-PARK の前置検出器とスーパーカミオカンデの双方でニュートリノを測定することで、ニュートリノ振動のパラメータを測定している。図 1.1 に T2K 実験の模式図を示す。

ニュートリノの生成は、まず陽子ビームをグラファイト標的に照射し、パイ中間子を生成する。電磁ホーンによって、パイ中間子は収束しディケイボリウムに運ばれる。ディケイボリウムで、パイ中間子は、次の式 (1.1) や式 (1.2) のようにニュートリノとミューオンに崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.2)$$

パイ中間子は、ニュートリノとミューオンに二体崩壊するため、ミューオンの測定を行うことで、間接的にニュートリノの測定を行うことができる。現在のミューオンモニター (以下、MUMON) では、シリコン PIN フォトダイオードやイオンチェンバーが用いられている。

MUMON におけるミューオンフラックスは、電磁ホーンに流れる電流が 250 kA で $1.09 \times 10^5 / \text{cm}^2 / 10^{12} \text{ POT}$ である。ここで POT は Proton On Target である。T2K 実験では、陽子加速器のビーム強度を 1.3 MW に、さらに、電磁ホーンに流す電流を 320 kA に増やすことで、ニュートリノのビーム強度を増やし、統計量を増やすことで実験の感度を上げることを計画している [6]。ミューオンのビーム強度の増加によって、MUMON のシリコン PIN フォトダイオードやイオンチェンバーの放射線劣化や信号量の減少が心配されている。

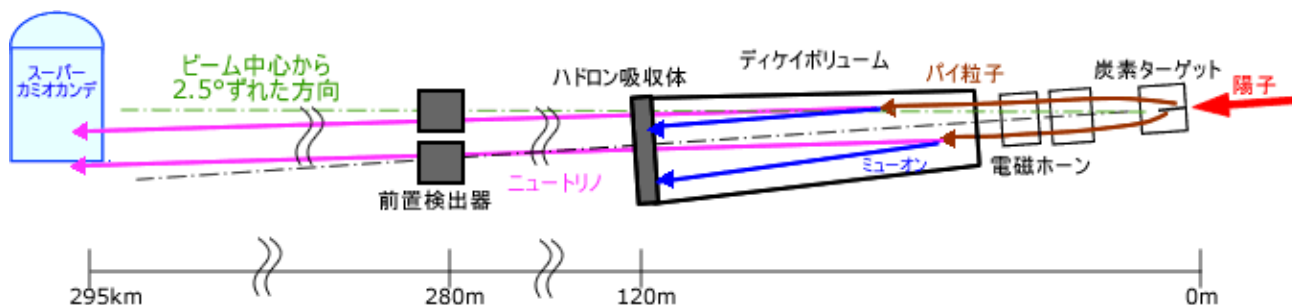


図 1.1: T2K 実験の模式図 [5]

MUMON の新たな検出器として、光電子増倍管の光電面を金属に変更した電子増倍管 (EMT) が期待されている。EMT の放射線耐性と信号の取り始めにみられる EMT の信号の落ち込み (EMT の初期不安定性) の測定のために、これまでに、電子によるビームテストが行われてきた。ビームテストにおけるビームプロファイルには、シリコンフォトダイオードアレイの Si array が用いられてきた。しかし、放射線によって損傷してしまうため Si array を大強度時のビームプロファイルに用いることはできない。

そこで、本実験では、EMT のビームテストにおいて初めてとなる遷移放射光による大強度ビームプロファイルを行った。

第 2 章

原理

2.1 遷移放射

遷移放射 (TR, Transition Radiation) は、誘電率の異なる物質間を荷電粒子が横切るときに起こる。遷移放射は、分極もしくは運動する荷電粒子を考えることにより理解される。

媒質の形成領域長 (formation zone length) は、遷移放射が発生するのに必要な媒質の長さである。形成領域長 D のオーダーは次のようになる。[1][2]

$$D = \frac{\gamma c}{\omega_p} \quad (2.1)$$

ここで、 ω_p は、プラズマ振動数である。媒質のプラズマ振動数は、電子の数密度と質量をそれぞれ n_e 、 m_e として、次のように定義される。

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi n_e e^2}{m_e} \quad (2.2)$$

アルミニウムにおける自由電子の数密度を用いると $\omega_p \approx 1.39 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$ であり、90MeV ($\gamma \approx 180$) の電子について、 D は $1 \mu\text{m}$ 程度である。よって、薄い物体による境界で遷移放射は発生する。

荷電粒子が媒質 1 (誘電率 ϵ_1) から媒質 2 (誘電率 ϵ_2) を横切ったときに前方である媒質 2 に放射される光のスペクトル I は、単位周波数を $d\omega$ 、単位立体角を $d\Omega$ として次のように与えられる。[3]

$$\frac{d^2 I(\theta, \omega)}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \beta^2 \sqrt{\epsilon_2} \sin^2 \theta_2 \cos^2 \theta_2}{\pi^2 c} \times \left| \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)(1 - \beta^2 \epsilon_2 - \beta \sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2 \sin^2 \theta_2})}{(1 - \beta^2 \epsilon_2 \cos^2 \theta_2)(1 - \beta \sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2 \sin^2 \theta_2})(\epsilon_1 \cos \theta_2 + \sqrt{\epsilon_1 \epsilon_2 - \epsilon_2^2 \sin^2 \theta_2})} \right|^2 \quad (2.3)$$

ここで、 θ_2 は荷電粒子の進む向きと光子の波数ベクトルの成す角である。 $\epsilon_1 = \epsilon$ 、 $\epsilon_2 = 1$ とすると、式 (2.3) は次のようになる ($\theta_2 = \theta$)。

$$\frac{d^2 I(\theta, \omega)}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \beta^2}{\pi^2 c} \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2} \times \left| \frac{(\epsilon - 1)(1 - \beta^2 - \beta \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})}{(1 - \beta \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})(\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})} \right|^2 \quad (2.4)$$

$\beta \sim 1$ において、 θ が小さいとして、 $\sin^2 \theta \approx 0$ 、 $\cos \theta \approx 1$ とすると、式 (2.4) の絶対値の項は 1 に近づく。さらに、 $\sin^2 \theta \approx \theta^2$ 、 $\cos^2 \theta \approx 1 - \theta^2$ として、 $\beta^2 = 1 - \gamma^{-2}$ を利用する。

$$\frac{d^2 I}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{\pi^2 c} \frac{\beta^2 \theta^2}{(1 - (1 - 1/\gamma^2)(1 - \theta^2))^2} \quad (2.5)$$

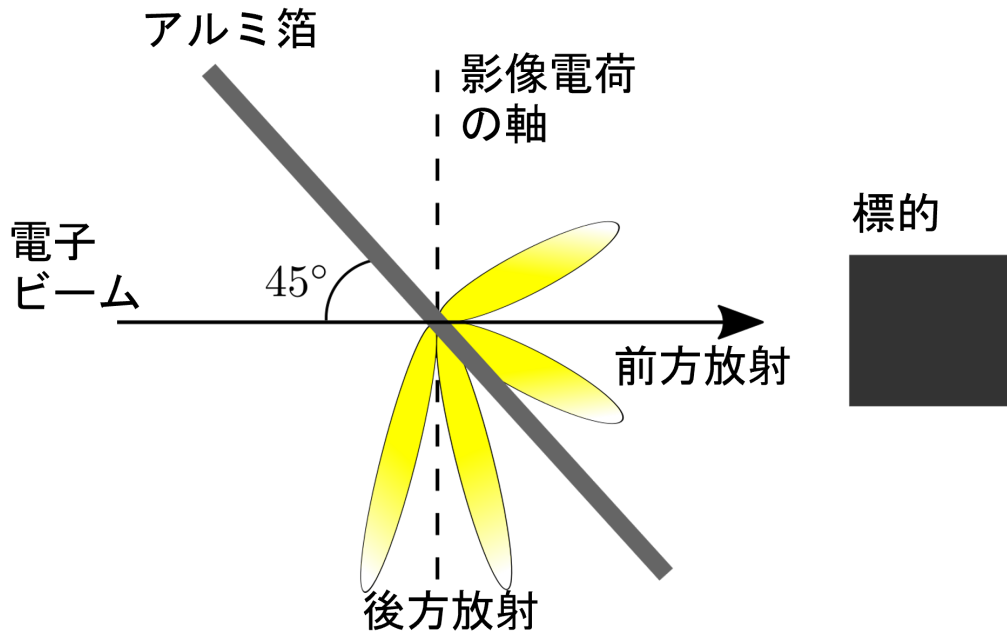


図 2.1: 電子ビームに対し, アルミ箔を 45° だけ傾けた時の放射の様子。

よって, 荷電粒子が相対論的 ($\beta \sim 1$) で, 媒質 (誘電率 $|\epsilon_2| > 1$) から真空 (誘電率 $\epsilon_1 = 1$) を横切ったときの光のスペクトルは, 次のようになる。

$$\frac{d^2 I}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{\pi^2 c} \times \frac{\theta^2}{(\theta^2 + \gamma^{-2})^2} \quad (2.6)$$

これは, 荷電粒子の進行する向きと同じ前方放射である。一方, $\beta \sim 1$ で, 真空 (誘電率 $\epsilon_2 = 1$) から媒質 (誘電率 $|\epsilon_1| > 1$) を横切った時は, 式 (2.3) において $\beta \rightarrow -\beta$ として, 次のようになる。

$$\frac{d^2 I}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{\pi^2 c} \times \left| \frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right|^2 \times \frac{\theta^2}{(\theta^2 + \gamma^{-2})^2} \quad (2.7)$$

これは, 荷電粒子の進行する向きとは反対の後方放射である。後方放射のほうが, 光の強度は減る。前方放射, 後方放射ともに放射が最大となる角は, $\theta \sim 1/\gamma$ であり, 荷電粒子が相対論的であるとき, 非常に小さい角度である。

表面に垂直に入射しない場合は, 放射の形状は変化する。相対論的な電子の場合は, 前方放射の角度は入射角にはあまり依存せず, 後方放射は, 影像電荷の運動方向を軸とした放射となる [3]。したがって, アルミ箔を電子ビームに対し, 45° だけ傾けると, 後方放射は図 2.1 のように, 電子ビームと垂直な向きに放射される。

よって, 光学系を組みカメラで後方放射を撮影することにより, 荷電粒子のビームのプロファイルを行うことができる。本実験では, 電子ビームとアルミ箔の成す角が 45° となるように光学系を組み, アルミ箔から放出される光を測定した。

2.2 放射体のビームへの影響

アルミ箔を設置することによるビームへの影響を考える。

アルミニウムの放射長は, $L_{\text{rad}} = 8.9 \text{ cm}$ である。よって, 0.05 mm のアルミ箔による制動放射によ

るエネルギー損失は,

$$\frac{90 \text{ MeV}}{8.9 \text{ cm}} \times 0.05 \text{ mm} = 0.05 \text{ MeV} \quad (2.8)$$

と電子のエネルギーに比べて非常に小さい。さらに、アルミニウムの臨界エネルギーは 51 MeV なので、衝突によるエネルギー損失は、制動放射によるエネルギー損失よりもさらに小さい。

高エネルギーな荷電粒子が物質を通過するとき、粒子はクーロン散乱によって向きが変わる。運動量 p の電子が物質の経路長 s を通過するとき、角度の発散は次のようになる。[3]

$$\theta_{\text{scat}} = \frac{21}{\sqrt{2}} \frac{1}{\beta pc} \sqrt{\frac{s}{L_{\text{rad}}}} \quad (2.9)$$

ここで、 pc の単位は MeV である。 $\beta \sim 1$, $p \approx 180 \text{ MeV}/c$, $s = 0.05 \text{ mm}$, $L_{\text{rad}} = 8.9 \text{ cm}$ を代入すると、 $\theta_{\text{scat}} = 2 \text{ mrad}$ と非常に小さい。

したがって、アルミ箔を設置することによる電子ビームへの影響は小さいと予想される。

第3章

ビームテスト

ビームテストは、10月20日から10月22日にかけて、東北大学電子光物理学研究センターで行われた。このビームテストの目的は、EMTの放射線耐性と初期不安定性の測定のためである。図3.1にあるように、電子光物理学研究センターの配置図で本体室に存在する入射用線形加速器によって、約90 MeVに加速された電子をビームとしてEMTに照射した。

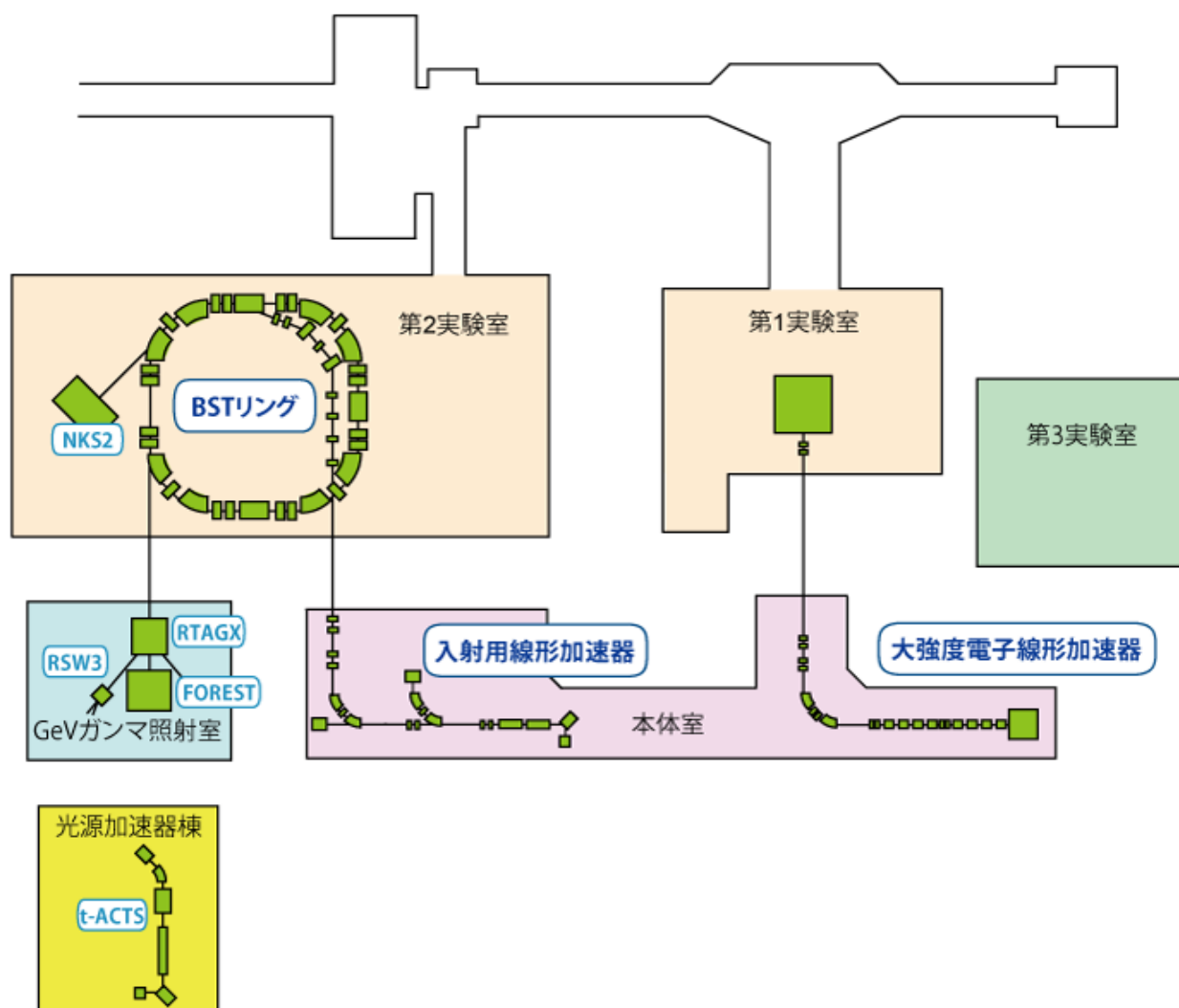


図 3.1: 電子光物理学研究センター実験室配置図 [7]

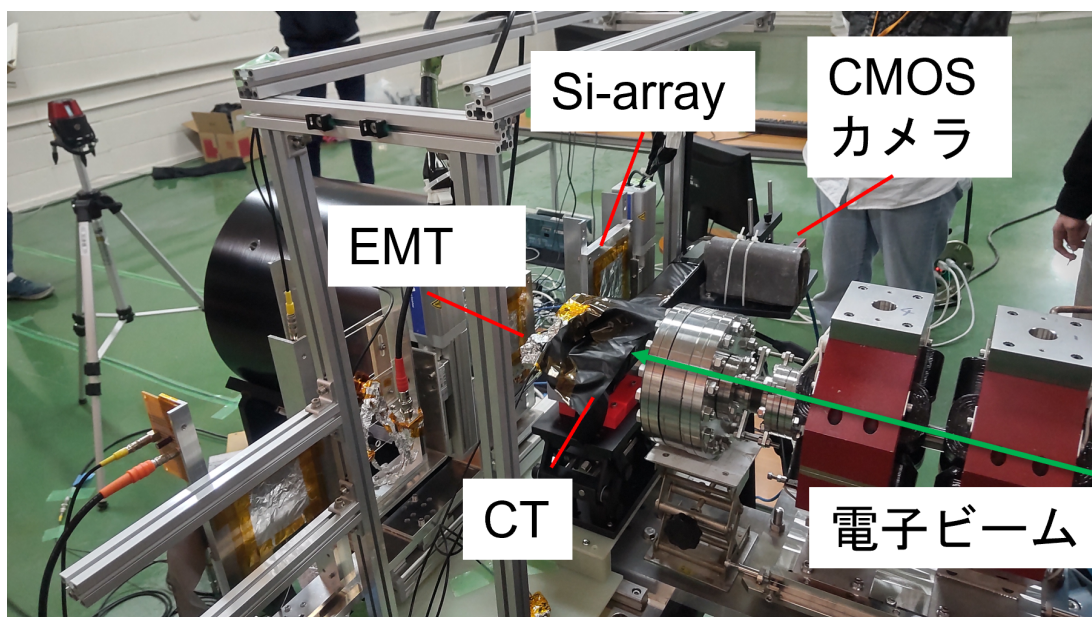


図 3.2: ビームテスト時の実験装置の配置の様子。緑色の矢印の方向に電子ビームが照射される。

表 3.1: ビームの種類とパルスごとの電荷

ビームの種類	パルスごとの電荷
低強度	1 pC/pulse
中強度	300 pC/pulse
大強度	20 nC/pulse

3.1 ビームテストのセットアップの概要

ビームテスト時の実験装置全体の配置の様子の写真を図 3.2 に示す。さらに、ビームテストのセットアップの概要を図 3.3 に示す。ビームテストでは、3 種類のビーム強度を用いて、実験を行った。ビーム強度の種類とおおよその大きさは表 3.1 に示す。本実験において、解析を行ったのは主に大強度のビームであり、大強度のビームは EMT に対する放射線耐性を調べるために照射した。ビームのパルスはビームの種類によらず、7 Hz であった。実験結果と解析の章では、EMT の放射線耐性試験で用いた大強度ビームのプロファイルの結果を述べる。

本実験では、遷移放射を発生させるためのアルミ箔は CT よりもビーム上流に設置した。EMT と Si array は水平および鉛直方向に動くことができる。EMT は、大強度時の測定では、ビームが EMT に一様に当たるように 7 点を中心に移動するようにしていた (7 点照射)。7 点照射をするのは、MUMON におけるミューオンビームの広がり標準偏差で 1 m ほどであるのに対し、ビームテストのビームの広がり 1 cm ほどであるからである。Si array は、低強度ビームのプロファイルを行うために設置された。中、大強度では、Si array は放射線の劣化を防ぐため、ビーム上から離していた。CT は、電磁誘導を利用して、ビームの電荷量を測定する装置である。

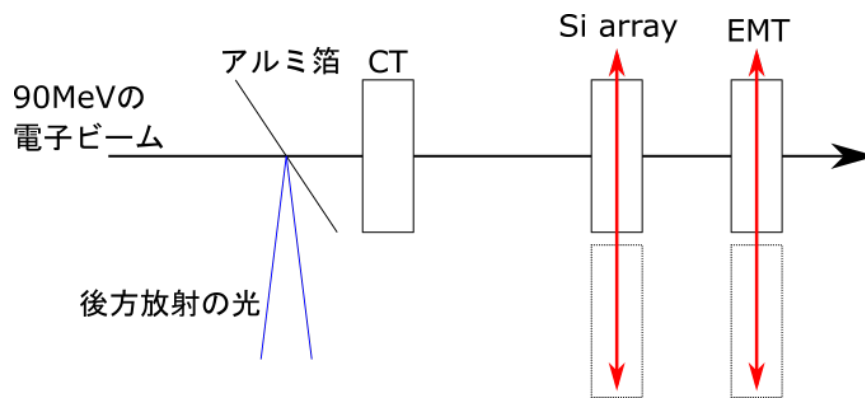


図 3.3: ビームテスト時の実験装置の設計。Si array と EMT は水平および鉛直方向に動くことができる。本実験では、遷移放射のためのアルミ箔は CT よりもビームの上流に設置した。

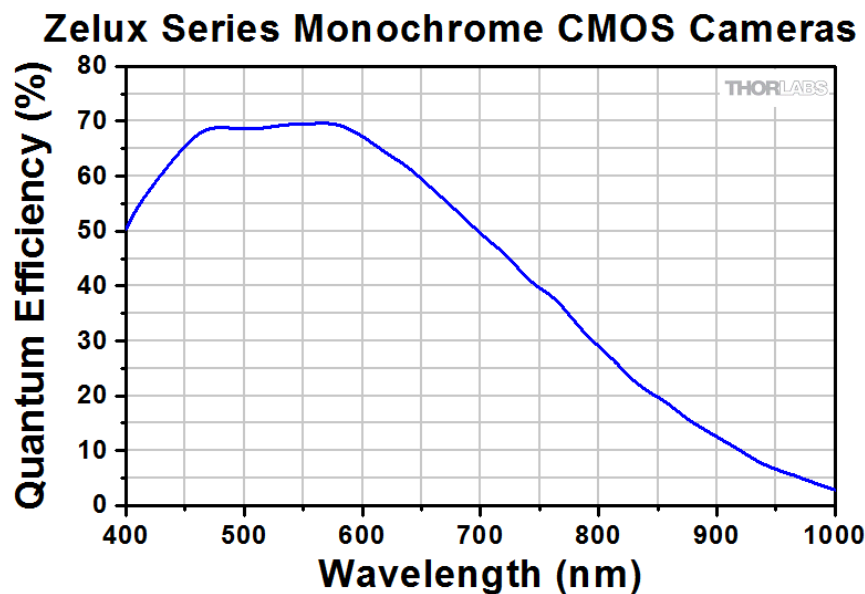


図 3.4: CS165MU の量子効率 [8]

3.2 ビームテストにおける光学系

本実験では、電子ビームのプロファイルのために、光学系を自作し、設置した。光学系の作製の手順や光学系で用いた装置について以下で述べる。

3.2.1 光学系で用いた装置や器具

光学系で用いたカメラは、ソーラボ社製でモノクロ撮影 CMOS カメラの CS165MU である。このカメラの量子効率は、図 3.4 のように、可視光の領域ではおよそ 60% である。量子効率のピークは波長 575 nm において、69% である。また、そのほかのカメラの仕様の一部を表 3.2 に示す。ただし、本実験での撮影は、ADC 分解能は 8 Bits で行った。

レンズには、光を集め、ピントを合わせるために、焦点距離 75 mm のリコー社の FL-BC7528-9M をカメラに取り付けた。ミラーには、ソーラボ社製の CCM1-E02/M を用いた。このミラーの反射率は、 $R_{\text{avg}} > 99\%$ (400-750 nm) である。アルミ箔は、厚さが 0.05 mm のものを用いた。

表 3.2: CS165MU の仕様の一部 [8]

目次	特徴
ピクセルサイズ (Pixel Size)	3.45 μm x 3.45 μm
ADC 分解能 (ADC Resolution)	10 Bits
読み出しノイズ (Read Noise)	<4.0 e- RMS
飽和電荷量 (Full Well Capacity)	$\geq 11\ 000$ e-



図 3.5: 台座の上にカメラとレンズ，ミラー，厚紙を設置したときの様子

3.2.2 光学系の組み立て

カメラとレンズ，ミラーを三脚の台座上にねじで固定し，光路を暗幕と黒い厚紙で覆い，外からの光漏れが少なくなるようにした。台座に，カメラとレンズ，ミラー，黒い厚紙を設置したときの様子を図 3.5 に示す。図 3.5 のように厚紙で光路で囲った後，暗幕をミラーやレンズの間や厚紙の周りに設置し，光漏れが少なくなるようにした。

アルミ箔は貼り付けた後，電子ビームとのなす角が 45° となるように設置した。さらに，レーザー墨出し器でビームの位置の基準を決めるための線に重なるように，アルミ箔の周りに水平方向と鉛直方向にそれぞれペンで線を描いた方眼紙を張り付けた。方眼紙は 1 cm の正方形の穴ができるように切り，レーザー墨出し器と合わせた線は各辺の midpoint を通るようにした。レーザー墨出し器の線は，ビームテストのセットアップの基準となる線であり，特に，EMT は大強度時に 2 つの線の中心として動くようになっている。

これらの三脚やアルミ箔を組み立て，ビームテスト時の光学系を作製した。本実験で作成した光学系の概要は図 3.7 のようになる。アルミ箔から放出された放射光が，CMOS カメラの素子にミラーを反射し，レンズを通して集まるようにした。

撮影した画像は，USB ケーブルを通じてカメラから，Windows マシンに送られる。一方で，カメラ

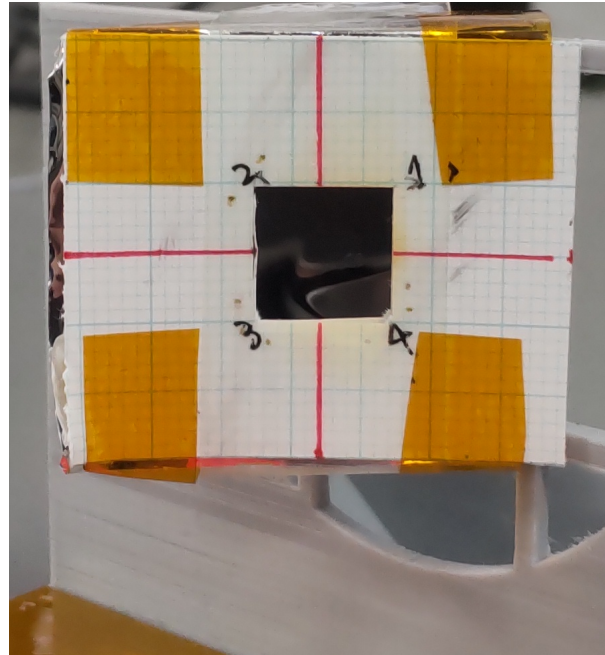


図 3.6: アルミ箔と切り取った方眼紙。1cm の正方形の穴を切り取られた方眼紙と垂直方向、鉛直方向のレーザー墨出し器と合わせた赤い直線がある。

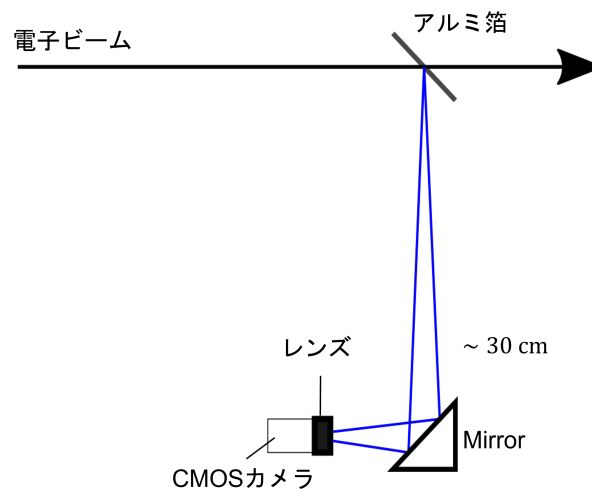


図 3.7: 光学系の概略。アルミ箔から放出される光の光路長がおよそ 30 cm になるように設置した。鏡は、カメラの撮影時にピントが合うために、ビームとの成す角がおよそ 45° となるように設置した。

の撮影は、Windows マシンのソーラボ社のソフトウェアから、露光時間や撮影間隔を変更することができ、このソフトウェアを用いて撮影の命令を行った。

この光学系では、焦点距離 75 mm のレンズ、光路長が 30 cm なので、光学倍率はおよそ $M = -0.25$ である。レンズの公式

$$\frac{1}{-(300 - a)} + \frac{1}{a} = \frac{1}{75} \quad (3.1)$$

を $a < 300$ について解き、 $M = -a/(300 - a) \approx -0.25$ となる。

第 4 章

実験結果と解析

4.1 撮影の結果

ビーム強度が中強度と大強度である時には、アルミ箔からの光を撮影することができた。中強度と大強度の撮影した画像の例を図 4.1 に示す。どちらの画像にも、アルミ箔上とみられる四角形の枠の内側から、光が出ていることが確認できる。一方で、ビーム強度が低強度時には、画像を撮影することができなかった。低強度時における露光時間が最大 5 秒で撮影した写真を図 4.2 に示す。低強度画像を同じ run で足し合わせても、低強度のビームをとらえることはできなかった。図 4.1 や図 4.2 の画像の強度は最大で 255、最小で 0 である。また、画像には、強度が急激に変わる点状のノイズがあることがわかる。

4.2 画像の距離変換

画像からビームプロファイルを行うためには、画像を変換し、画像のピクセルの位置をある基準からの距離に変える必要がある。そのための較正用の画像を図 4.3 に示す。較正用の画像は、光学系を図 3.5 のように、組み立ててから撮影したものである。較正用の画像から、基準となるレーザー墨出し器と合わせた線と方眼紙のマス目を使って、基準からの距離を求めることができる。

しかし、本実験ではビームテスト時に人がビームテストを行った実験室に入るたびに、カメラを設置した三脚が移動してしまい、画像上の方眼紙の位置も移動してしまった。そのため、較正用の画像（図 4.3）を用いて、画像の変換を行うことはできない。

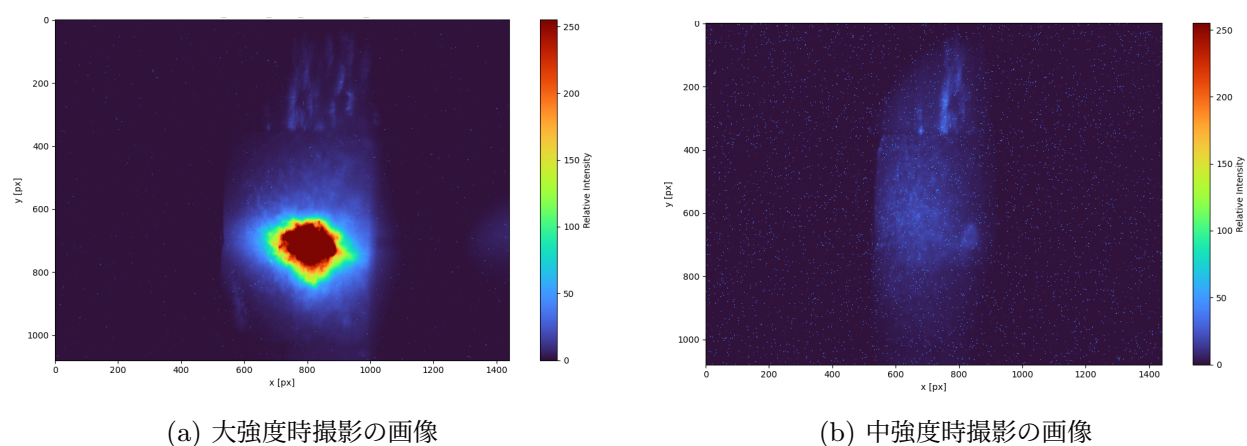


図 4.1: ビームテスト時の画像

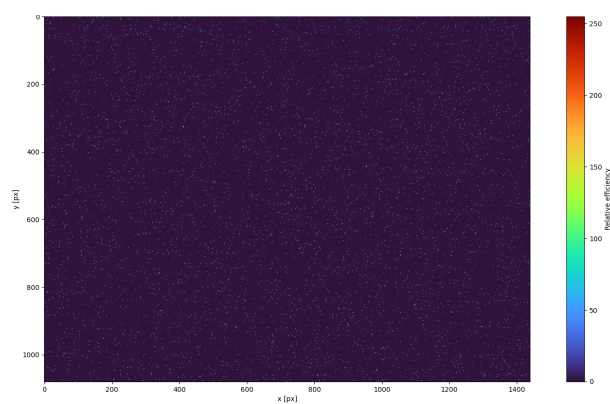


図 4.2: 低強度撮影時の画像

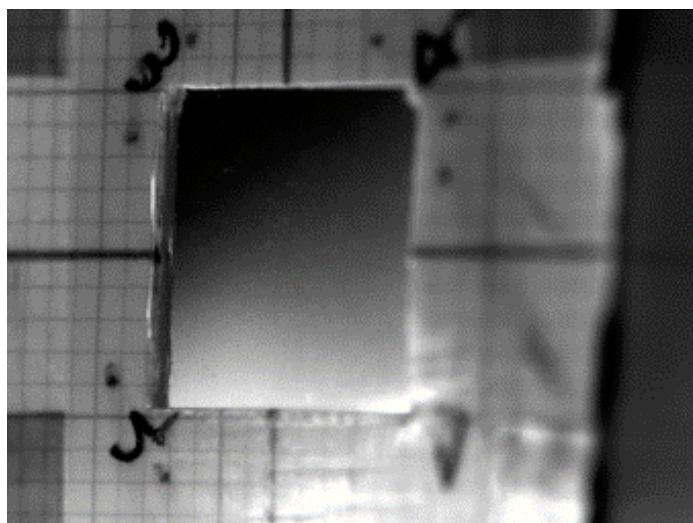


図 4.3: 較正用の画像

1	0	-1	-1	-2	-1
2	0	-2	0	0	0
1	0	-1	1	2	1

図 4.4: sobel のカーネル

したがって、本実験では、方眼紙とアルミ箔の屈折率の違いを利用したエッジ検出により決めた4点から、画像の変換を行うことにした。

4.2.1 エッジ検出

エッジ検出は、次のようにして行った。まず、画像の中からアルミ箔と方眼紙の境界がよく見えるものを選ぶ、もしくは、実験室に人が入っていない期間で足し合わせて境界が見えるようにして、足し合わせた画像を選ぶことで行った。選んだ画像にあるノイズを除去するために、3x3のカーネルで、中央値フィルターをかけた。さらに、エッジ検出のために図4.4にある2つのカーネルを画像にそれぞれかけた。図4.4のそれぞれのカーネルをかけた2つのそれぞれの画像の画素値をそれぞれ2乗し、それら

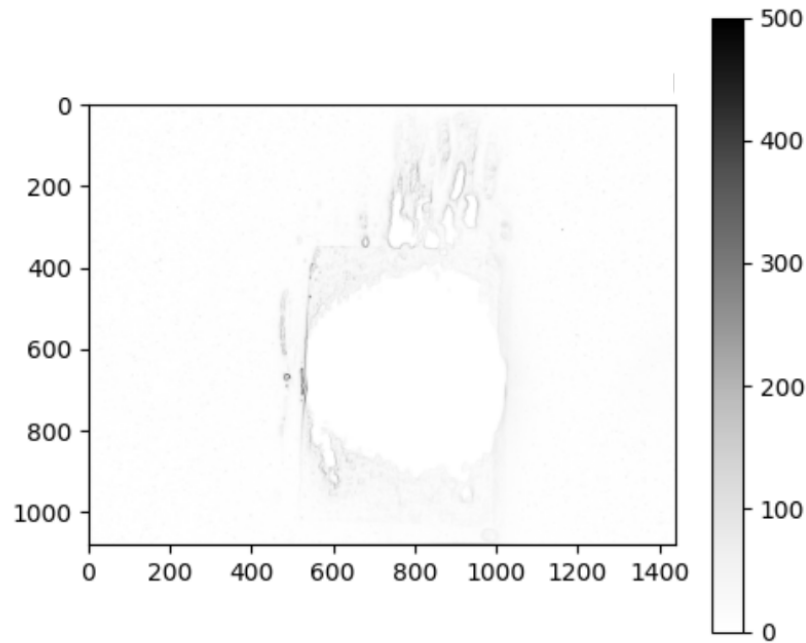


図 4.5: エッジを強調した画像

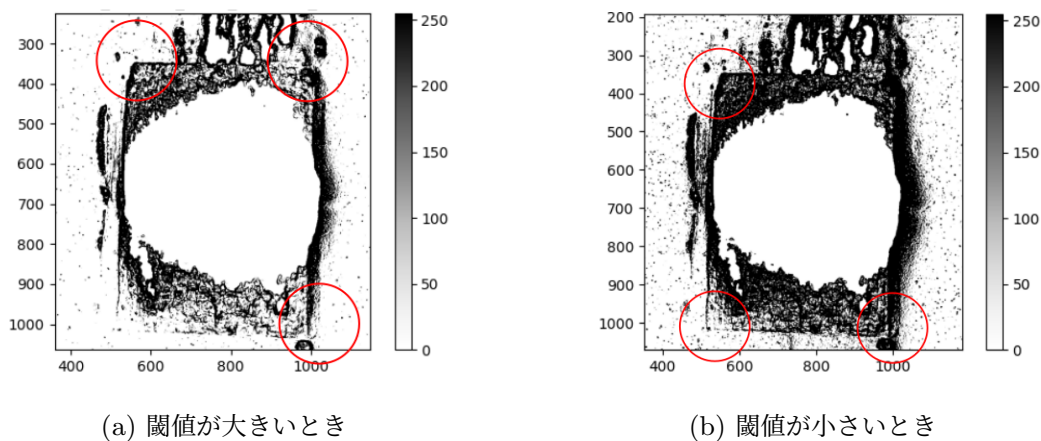


図 4.6: 図 4.5 を 2 値化したときの画像。図の赤丸に四角形の頂点がある。さらに、右側の頂点付近の輪郭の線は左側に比べて横方向に太い。

を足し合わせ、足し合わせた画像の画素値について平方根をとると、次の図 4.5 のような画像を得る。図 4.5 から、輪郭が見えるのが確認できる。この輪郭をアルミ箔と方眼紙の境界とみなすことにする。図 4.5 において、2 値化を行い、2 値化の閾値を変えると、図 4.6 のような画像を得る。図 4.6 の赤丸の中に、四角形の頂点が見える。四角形の頂点が閾値によって、見えるときや見えないときがあるので、頂点が見えるように、閾値を見つけながら探した。このとき、閾値によって頂点の位置が移動しないようなできるだけ広い範囲で、頂点を決めた。さらに、図 4.6 を見てわかるように、輪郭の線の横の太さは左側よりも右側のほうが大きいことがわかる。この傾向は、ほかの画像にも見られた。輪郭の横の太さを 40 px ほどと見積もると、四角形の横の長さは解像度でおよそ 450 px なので、横の長さに対する頂点の決め方の誤差は、片側でおよそ $20/450 \sim 5\%$ と見積もれる。

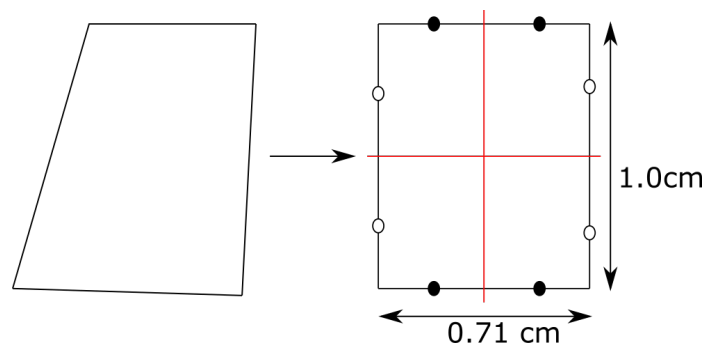


図 4.7: 射影変換の様子。左のようにエッジ検出によって決めた頂点が、右の縦が 1.0 cm, 横が 0.71 cm の長方形の頂点に対応するとして、変換を行った。このとき、墨出し器と合わせた線（右の赤線）は、長方形の中点を通ると仮定した。

4.2.2 画像の変換

このようにして決定した 4 つの四角形の頂点が、方眼紙の穴の辺の長さが 1cm の正方形に対応すると仮定して、射影変換を行った。射影変換についての補足説明は 8.1 節に示す。さらに、射影変換時の画素値の補間に用いた方法であるバイリニア法の補足説明を 8.2 節に示す。射影変換の様子を図で表すと、図 4.7 のようになる。この時、エッジ検出によって決めた頂点は、一辺の長さが縦 1.0 cm, 横 0.71 cm の長方形の頂点に対応するとして、さらに、墨出し器による基準の線は、各辺の中点を通るとした。ここで、縦 1.0 cm, 横 0.71 cm の長方形を変換後の図形としたのは、一辺が 1 cm の方眼紙の穴（図 3.6）は、電子ビームの進む向きから見ると穴の大きさは垂直の向きに 1 cm, 水平方向に $1/\sqrt{2} = 0.71$ cm になるからである。

図 4.5 のもととなった画像とその画像を前節のエッジ検出で決めた頂点を使って射影変換した画像をそれぞれ図 4.8, 図 4.9 に示す。図 4.8 を見てわかるように、変換前の画像には、画素値の急激なピークがノイズとして存在することがわかる。射影変換を行うときに、このノイズが影響することを減らすために、変換前の図 4.8 の画像に、 3×3 をカーネルとする中央値フィルタをかけてから、射影変換を行い、図 4.9 のアルミ箔上の距離に換算した画像を得た。

4.3 大強度の解析

大強度の画像をもとに、大強度時の EMT へのビームに対する照射効率を求める。照射効率は、ビームテストにおいて EMT への電子の照射量を知るための重要なパラメータである。今回のビームテストでは、大強度時には EMT に広くビームが照射されるように、照射を 7 点を中心として分けて行った。ここでは、大強度時のビームプロファイルの解析結果を述べる。

4.3.1 フィットの外挿によるビーム形状の決定

本実験では、大強度時の撮影時に多くの画像で、画素値の飽和が広い範囲にあることが見られた。さらに、方眼紙の穴がビーム全体を覆うほど十分に広くなかったため、ビームの全体を撮影することはできなかった。大強度時撮影の変換後の画像の例を、図 4.10 や図 4.11 に示す。図 4.10 や図 4.11 の左側の画像の白い部分は、画素値が飽和している画素を表している。さらに、右側の散布図は、軸に投影し

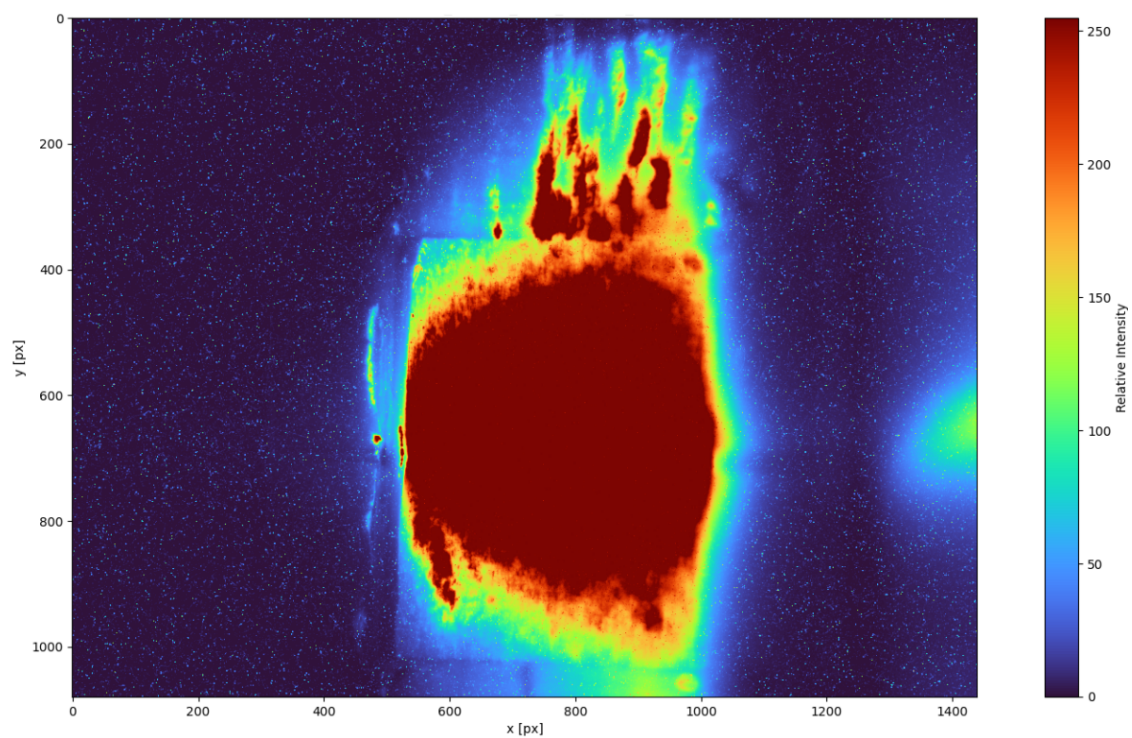


図 4.8: 変換前の図 4.5 のもととなった画像

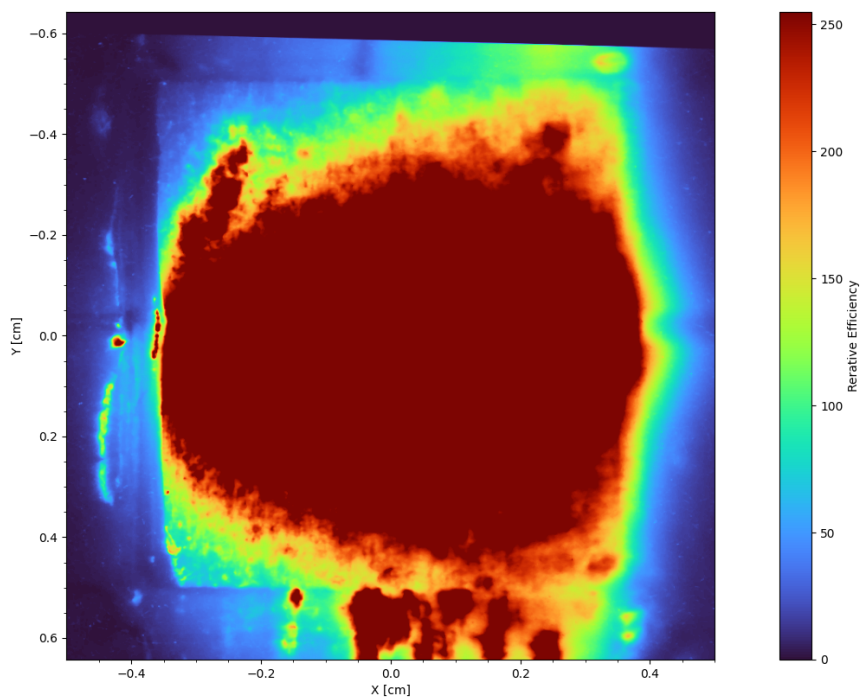


図 4.9: 図 4.8 を変換し, 距離に換算した画像。

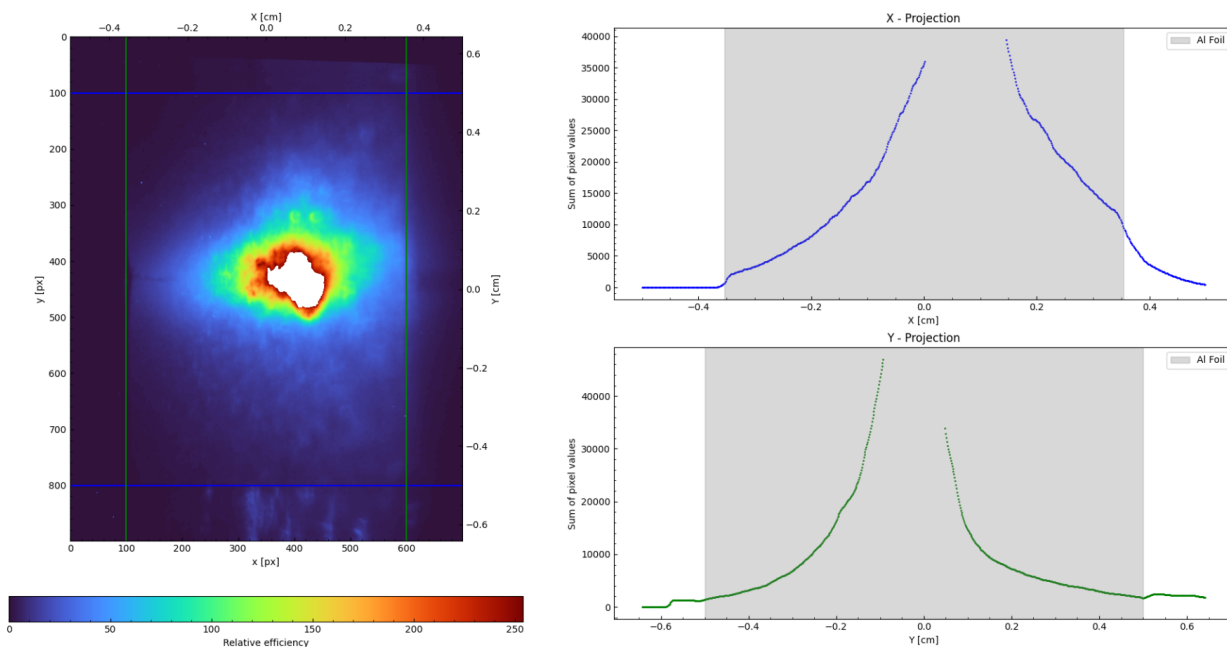


図 4.10: 変換後の大強度の画像（左図）と軸に投影した画素値（右図）。左図の白い部分は、画素値が飽和してしまっている部分であり、青線と緑線に囲まれた部分がエッジ検出でアルミ箔がある範囲と決めた部分である。青線で囲まれた部分の X 軸への投影と緑線で囲まれた部分の Y 軸への投影が、右図のそれぞれ青色の散布図、緑色の散布図である。点のないところは飽和している画素を含むところである。

た画素値を表している。灰色の部分は左側の画像のアルミ箔上に対応する部分である。画素値には、飽和している範囲が存在していて、灰色の境界で投影した画素値の値が、特に、 x 軸の投影では十分に小さくないことがわかる。ほかの大強度を撮影した変換後の画像も、同様の画素値の飽和やビーム全体を覆えていないことが見られた。

したがって、ビームで飽和している範囲や方眼紙に覆われてしまっている範囲における、アルミ箔からの遷移放射本来の画素値を推測する必要がある。

画素値が飽和している範囲やアルミ箔外の画素値を推測するために、変換後の大強度に 3 つのガウス関数の和を仮定してフィッティングを行った。3 つの 2 次元ガウス関数の和を $f(x, y)$ で表すと次のようになる。

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^3 a_i \times \exp \left[-\frac{(x - b_i)^2}{2c_i^2} \right] \times \exp \left[-\frac{(y - d_i)^2}{2e_i^2} \right] \quad (4.1)$$

この関数でフィットするのは、経験的に画像の画素値に対してフィッティングをしたときに、画像の傾向をよくとらえているからである。画素が多いので、画素を 5x5 に区切って、その画素値を平均化して、画素数を 5 分の 1 に減らしてからフィッティングを行った。この時、飽和しているピクセルを 1 つでも含むように平均化した結果の画素値は、飽和しているとみなしてフィットでは用いないようにした。さらに、画素値の誤差はすべて 1 としてフィットを行った。

3 つのガウス関数ではなく、2 つのガウス関数でフィットしたときのフィッティングの結果の例を図 4.12 に示す。図 4.12 の右側の図は、フィット結果を軸に投影したものである。赤線と棒グラフはそれぞれ射影したときのフィットの結果と画素値を表している。赤線が棒グラフに対して、下がってしまっている。

一方、この例を 3 つのガウス関数の和でフィットしたときの結果が図 4.13 のようになる。2 つの 2

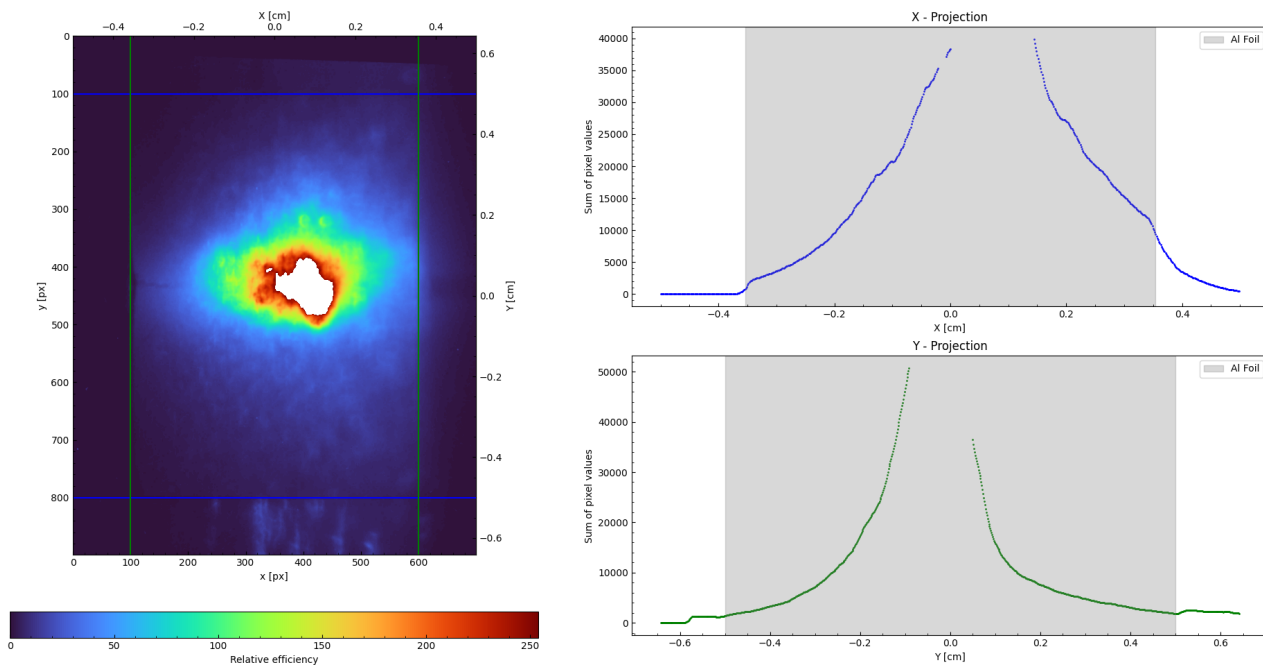


図 4.11: 図 4.10 とは異なる大強度の画像。飽和している部分は、図 4.10 とは異なり、飽和している部分がつながっていない。

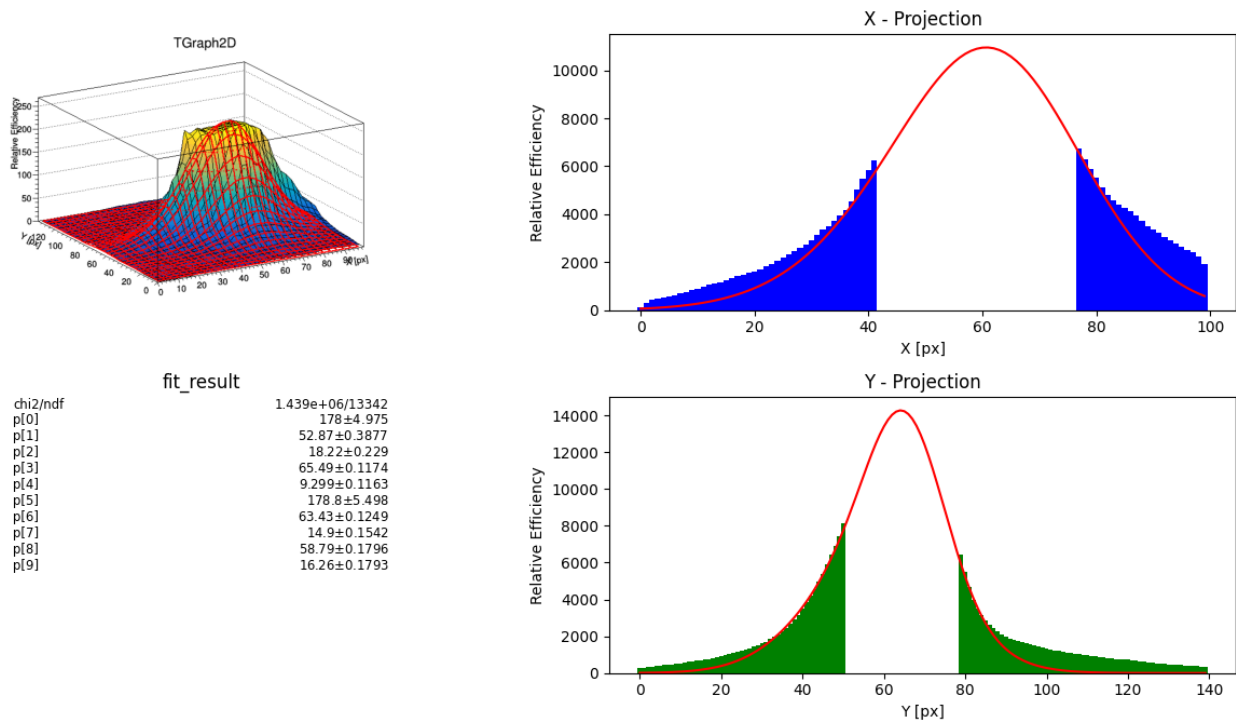


図 4.12: 2つの2次元ガウス関数の和でフィットしたときの結果の例。右側の図は、赤線がフィットの結果の軸への射影を表していて、アルミ箔の上の部分のみを表示している。右側の図の横軸は $1 \text{ px} = 5/70 = 0.07 \text{ cm}$ である。

Run446_211022_1633_exp5mse_70

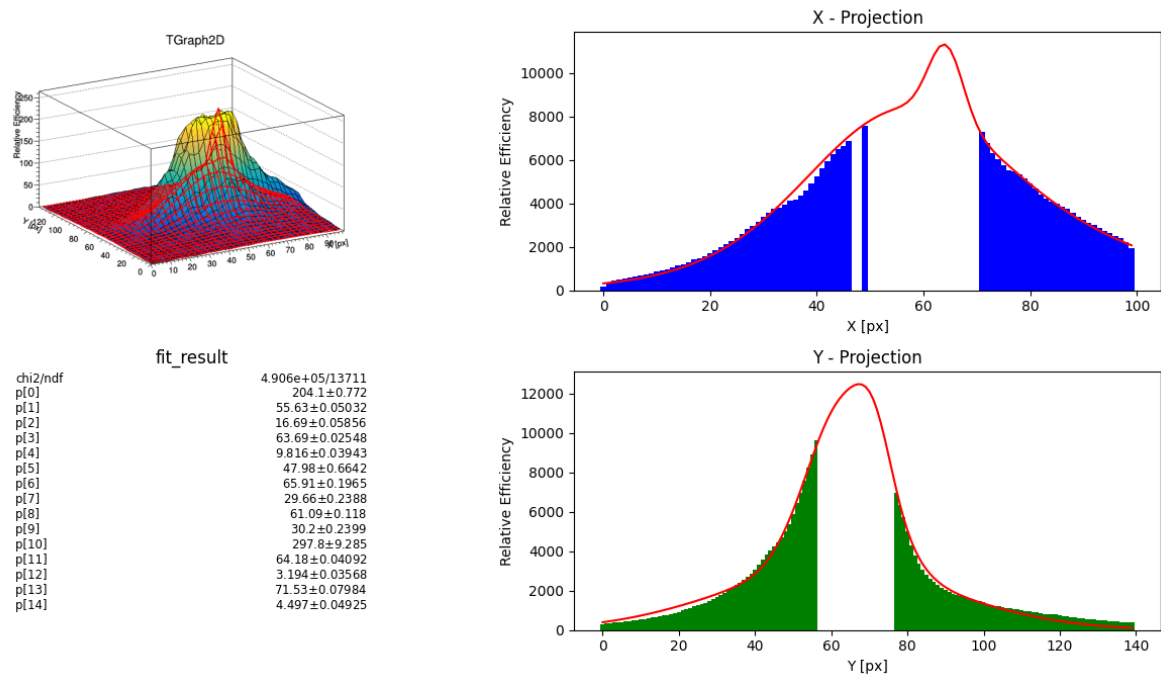


図 4.13: 3つの2次元ガウス関数でフィットしたときの結果の例。図 4.12 と同じ画像をフィットしている。

次元ガウス関数でフィットしたときよりも画素値の裾の特徴をとらえているように見える。さらに、chi2/ndf も、100 ほどから 50 ほどに減少している。

フィットの結果が不自然な例も存在する。その例を図 4.14 に示す。図 4.14 のフィット結果の x 軸への射影（赤線）に不自然なピークがある。しかし、3つの2次元ガウス関数の和以外の関数で、画素値の裾の特徴をよくとらえられるものを見つけていないので、以降の解析では、式 (4.1) の3つのガウス関数の和でフィットした結果を用いることにする。飽和している画素値や、アルミ箔の外側に対応する画素の画素値をフィットの結果で得た関数の値に置き換えた。図 4.10 にフィットの結果を適用すると、図 4.15 のようになる。最大の画素値が1になるように規格化している。

フィッティングする関数については、よりビームの形状をとらえた関数を見つける必要がある。

4.4 大強度時の照射効率

大強度のビームを EMT に照射するとき、EMT を、図 4.16 のように辺の長さが 3.5 mm の正六角形の頂点とそれを中心とする7点を中心とした。

EMT の有効領域を一辺が 8.8 mm の正方形とすると、図 4.15 のビームを7点照射時の相対的な照射量の分布は、図 4.17 のようになる。図 4.15 の画像を図 4.16 を中心にして足し合わせることで、図 4.17 を得た。ビームが、7点照射をしても局在していることが、この図から見る事ができる。ほかの大強度でも、ビームは局在していた。

前節のフィットによる外挿をした結果の画像を用いて、大強度照射時の EMT の照射効率を計算する。照射効率とは、電荷を測定する CT を通過したビームの総電荷のうち、EMT の有効領域に照射された電子の電荷の割合である。図 4.15 を見てわかるように、ビームの大きさは、ビームが通過する CT の内径の 5 cm よりも十分に小さい。CT は通過する電荷量を測るものである。したがって、照射効率

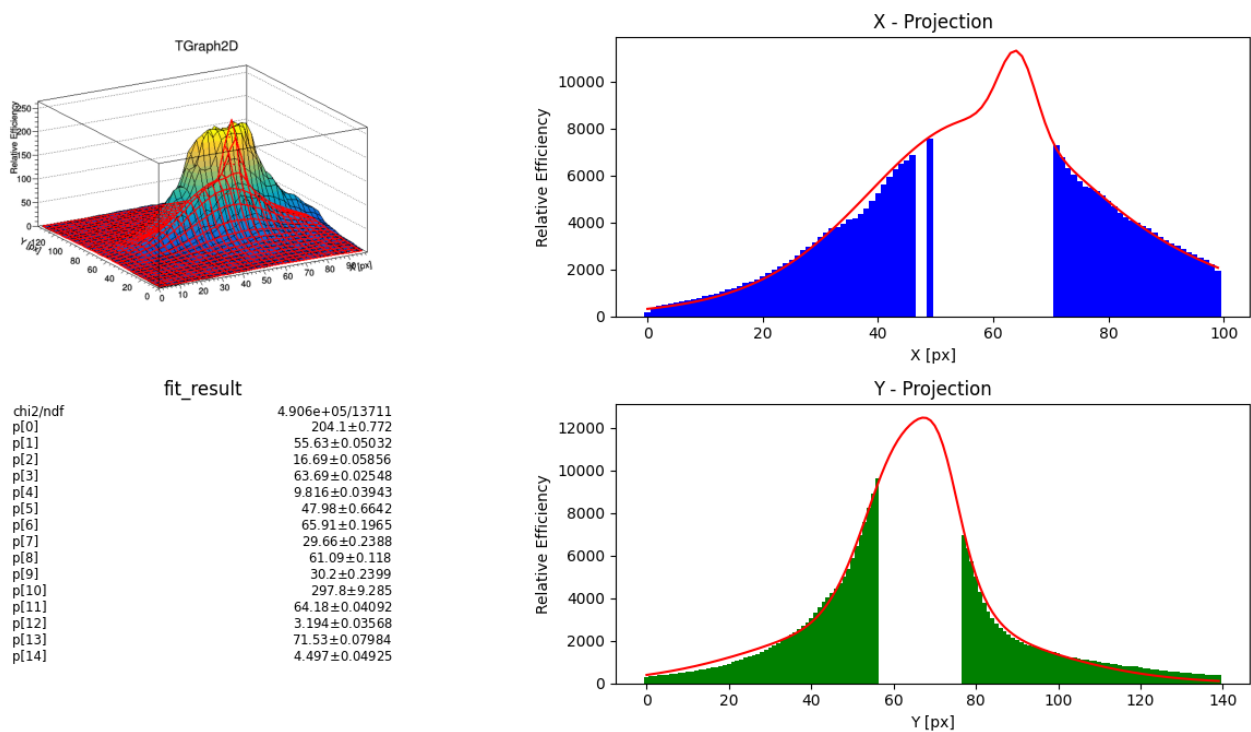
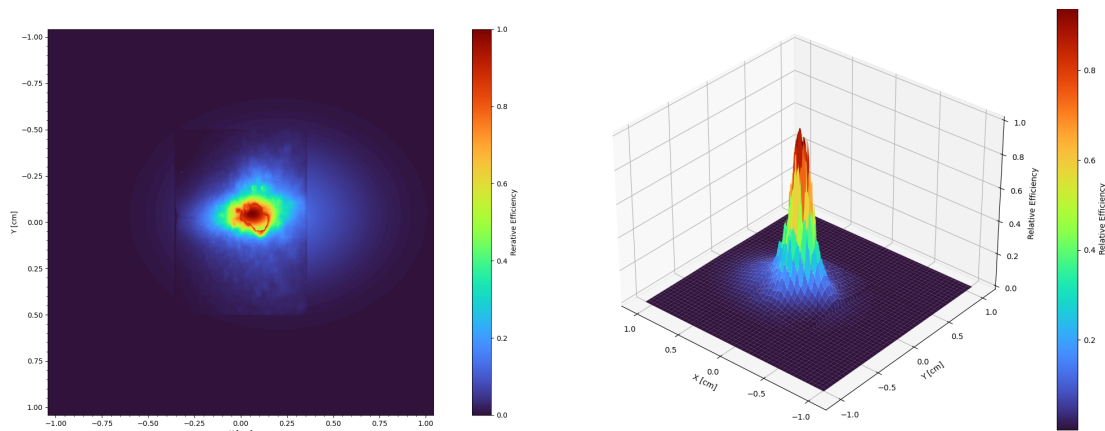


図 4.14: 3つの2次元ガウス関数でフィットしたときの結果の例。 x 軸の射影を見ると、フィット結果に不自然なピークがある。



(a) 2次元での画像表示

(b) 左図の3次元プロット

図 4.15: 図 4.10 の飽和している画素やアルミ箔外をフィット結果で補った時の画素値。

は次のように求めることにする。

$$E = \frac{V_{\text{seven}}}{7 \times V_{\text{one}}} \quad (4.2)$$

ここで、 E は照射効率、 V_{one} はビームの総画素値、 V_{seven} は V_{one} のビームを7点照射時の EMT 上の総画素値である。

このようにして、照射効率を計算すると、照射された EMT が XDA0796 の時は表 4.1 のような結果を得る。表 4.1 の index は、計算に用いた画像の通し番号である。run ごとの平均をとると、表 4.2 の結果を得る。さらに、XDA0803 の run ごとの平均照射効率は表 4.3 のようになる。多くの run では、照射効率が7割台前半である。飽和している範囲が多く、解析できなかった大強度の run もあった。

表 4.1: XDA0796 に大強度照射したときの照射効率

index	照射効率	run
0	0.71	446
1	0.71	446
2	0.71	446
3	0.70	446
4	0.70	447
5	0.70	447
6	0.70	447
7	0.70	447
8	0.70	447
9	0.70	447
10	0.77	448
11	0.76	448
12	0.71	459
13	0.72	459
14	0.73	459
15	0.73	459
16	0.73	459
17	0.73	459
18	0.73	459
19	0.73	459
20	0.73	459

表 4.2: XDA0796 に大強度照射時の run ごとの照射効率（平均）

run	照射効率
446	0.71
447	0.70
448	0.77
459	0.73

表 4.3: XDA0803 に大強度照射時の run ごとの照射効率（平均）

run	照射効率
286	0.74
290	0.73
291	0.74
295	0.74
296	0.74

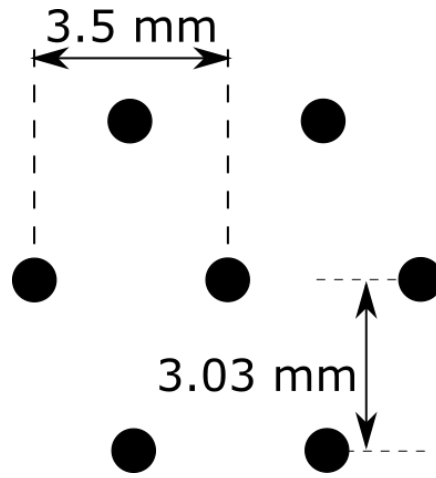
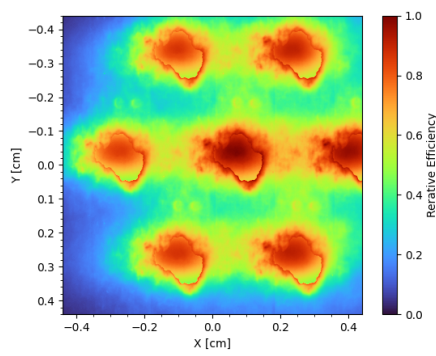
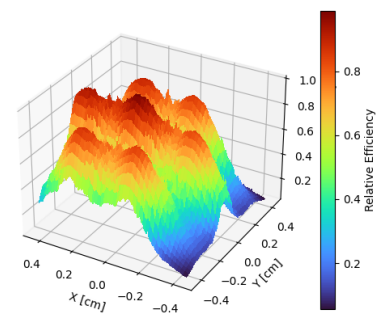


図 4.16: 7 点照射時の中心の 7 点



(a) 2 次元での画像表示



(b) 左図の 3 次元プロット

図 4.17: 図 4.15 の分布から求めた 7 点照射時の相対的な照射量

第5章

較正の方法

5.1 較正による誤差の見積り

本実験では、較正を方眼紙を写した画像を用いて行おうとした。しかし、方眼紙を較正に用いることができなかつたので、エッジ検出によって位置の決定を行った。方眼紙やエッジ検出を用いたことによる照射効率のずれを見積る。

実験後に、アルミ箔と方眼紙を実験で用いたカメラとレンズを用いて撮影を行った。その様子を図 5.1 に示す。方眼紙の赤線の交点がおおよそ画像の中心に来るようにし、ピントを合わせた。これをアルミ箔の正面から撮影すると、図 5.2 が撮影できる。図 5.2 の方眼紙のマス目と書き加えた赤線と青線の長さから、方眼紙の穴の大きさや位置を計算すると、穴は一辺が 0.2 mm 程度小さい正方形で、解析の仮定より右に 0.2 mm、下に 0.2 mm ほどずれている。図 5.2 の書き加えた赤線や青線の両端は、線の両端となる穴の頂点を 5 回きめて、その平均をとった。穴の辺や中心のずれは、EMT の有感領域の一辺 8.8 mm よりも十分小さい。実際に、この結果に対応するように画像の縮小や移動を用いて、外挿後のビームの形状を変えてから照射効率を計算すると、XDA0796 の照射効率は表 5.1 のようになる。表 4.2 から変化していない。

さらに、エッジ検出のずれを、画像の縮小、拡大を用いて見てみる。このときの補間法には、バイリニア法を用いた。エッジ検出の節 4.2.1 で、頂点の決め方の誤差は横の長さに対して、5% ほどと見積もった。エッジ検出による頂点の決め方で、横の画素の長さを 5% 小さくしたときと 5% 大きくしたときに相当するように、画像の移動、リスケールを行った。その結果をそれぞれ表 5.1 の 5% 小さい、5%

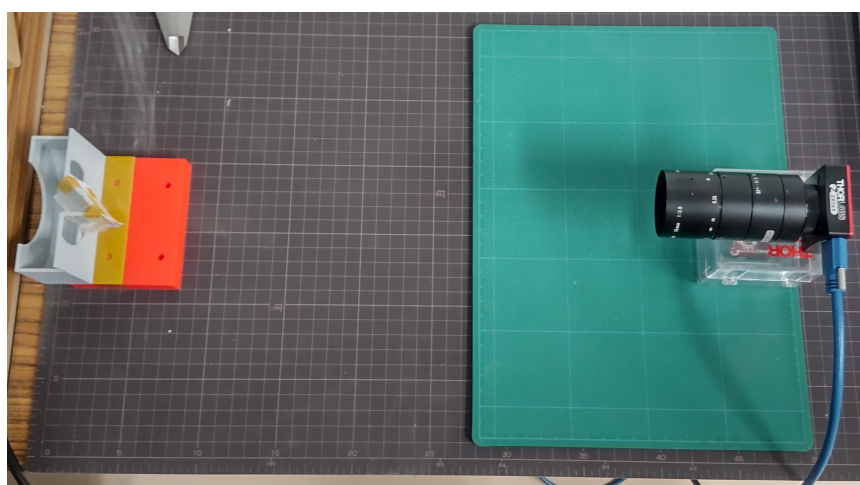


図 5.1: ビームテスト後の方眼紙とアルミ箔の撮影

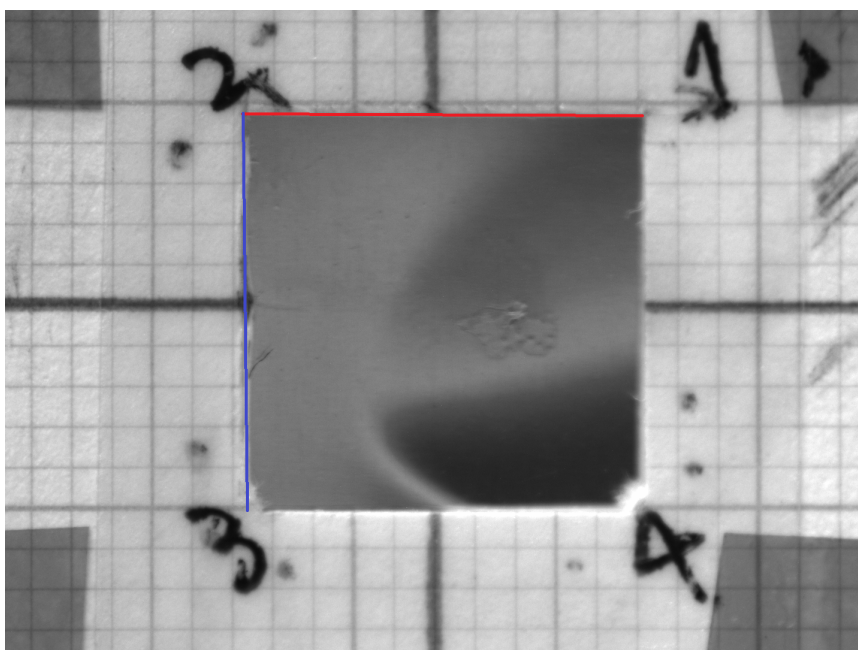


図 5.2: アルミ箔の正面から撮影した方眼紙

表 5.1: 図 5.2 の結果で修正した XDA0796 に大強度照射時の run ごとの照射効率

run	照射効率	5% 小さい	5% 大きい
446	0.71	0.70	0.72
447	0.70	0.68	0.72
448	0.77	0.75	0.79
459	0.73	0.71	0.75

大きいに示す。エッジ検出のとき、頂点の決め方を変えた時の画像を図 5.4 に示す。横の画素の長さを 5% 小さくしたときと 5% 大きくしたときは、図 5.4 の右側の辺をそれぞれ赤線、青線として、四角形の頂点を決めたことに対応している。図 5.4 で、横の画素の長さを長く決めたほうが、ビームの多くが EMT 上に照射されている。長さを長く決めたほうが、ビームの多くがアルミ箔上にあるとみなせるためである。元の照射効率からこれらの結果は、0.1 以上離れていない。照射効率の結果は、EMT の設置する期間が年単位になるということから、10% 程度の違いは認められる。したがって、方眼紙による較正やエッジ検出は、照射効率を求めるのに十分であったと考えられる。

5.2 較正の問題点

方眼紙の較正やエッジ検出には、ほかにも問題点があった。

1つ目は、方眼紙の長さを水平方向を垂直方向に大きくしなかったことである。アルミ箔と方眼紙を電子ビームに対して 45° だけ傾けていたため、較正に有効に使える水平方向の長さが $1/\sqrt{2}$ になってしまう。そのため、水平方向にアルミ箔や較正できる範囲は鉛直方向よりも、 $\sqrt{2}$ 倍ほど広くとる必要がある。

2つ目は、アルミ箔から方眼紙が浮いていたことである。実験後のアルミ箔と方眼紙を図 5.5 に示す。アルミ箔から方眼紙が浮いていることがわかる。方眼紙が浮くことで較正のときに位置がずれてしまう。これを防ぐために、アルミ箔上に方眼紙を固定する必要がある。

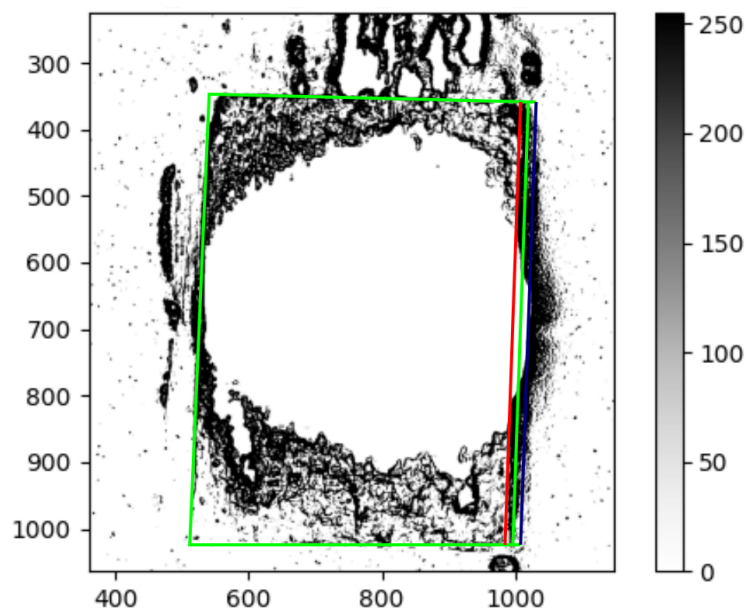
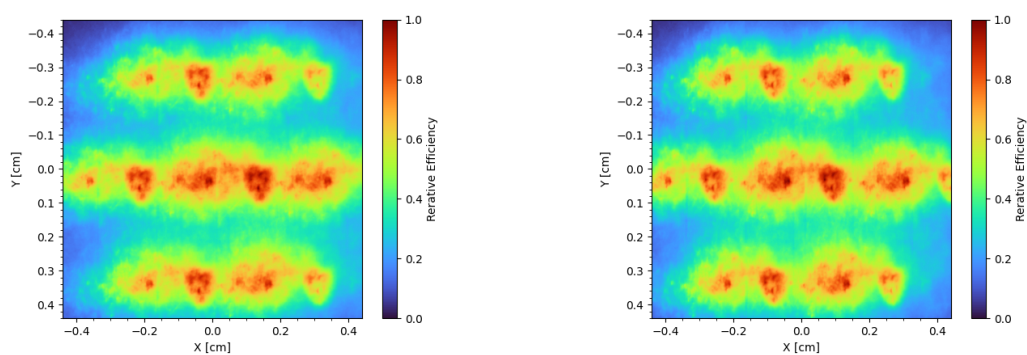


図 5.3: エッジ検出による頂点の決め方のずれを表した図。緑色の四角形を基準にして、赤色の線は横の画素の長さを 5% 小さくしたときで、青色の線は横の画素の長さを 5% 大きくしたときの頂点の決め方である。ただし、これは模式図で実際の様子を表していない。



(a) 横の画素の長さを 5% 小さく決めた時

(b) 横の画素の長さを 5% 大きく決めた時

図 5.4: 頂点の決め方で横の画素の長さを変えた時に相当する画像

また、較正に方眼紙を用いない方法も考えられる。T2K 実験での遷移放射による陽子ビームのプロファイルは Calibration Foil に穴をあけ、Foil の裏からレーザー光を照射し、その様子を撮影している [2]。



図 5.5: アルミ箔と方眼紙の浮く様子。

第6章

放射光による低強度ビームプロファイル

ビームテストの低強度ビームプロファイルは、Si array によって行われた。遷移放射による電子ビームのプロファイルが Si array によるビームプロファイルと無矛盾であるかを確かめるためには、放射光による低強度ビームプロファイルを行う必要がある。しかし、本実験では、低強度ビームを撮影することはできなかった。

本実験では、光学系の組み立てにおいて、暗幕や厚紙で放射光以外の光を遮光した。しかし、図 3.5 を見てもわかるように、あまり厳密に遮光をしなかった。画像で見られる急激なピークは、電子によるものや放射線劣化によるもの、暗電流によるもの以外に光漏れがありうる。また、遮光を厳密に行うことで、低強度のビームプロファイルが容易になる可能性がある。その上で、低強度ビームプロファイルをどのように行うか検討する。

6.1 遷移放射を用いる場合

遷移放射で低強度ビームプロファイルが可能かを考えるために、遷移放射で放出される光子数を導く。式 (2.7) を立体角について積分する。

$$\int \frac{x^3}{(x^2 + a)^2} dx = \frac{1}{2} \left(\ln(x^2 + a) - \frac{a}{x^2 + a} \right) \quad (6.1)$$

を用いると、 $\theta_{\max} \approx 1 \gg \gamma^{-1}$ のとき

$$\int_0^{\theta_{\max}} \frac{\theta^3}{(\theta^2 + \gamma^{-2})^2} = \frac{1}{2} [2\ln(\theta_{\max}\gamma) - 1] \quad (6.2)$$

である。よって、式 (2.7) は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{dI}{d\omega} &= 2\pi \times e^2 \pi^2 c \times \frac{1}{2} [2\ln(\theta_{\max}\gamma) - 1] \\ &= \frac{2e^2}{\pi c} \left[\ln(\theta_{\max}\gamma) - \frac{1}{2} \right] \end{aligned} \quad (6.3)$$

光子数を N として $dI = N\hbar d\omega$ から、光子の振動数 $[\omega_1, \omega_2]$ の間で積分すると次のようになる。

$$N = \frac{2e^2}{\pi\hbar c} \times \left[\ln(\theta_{\max}\gamma) - \frac{1}{2} \right] \ln \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (6.4)$$

文献 [1] によると、

$$N = \frac{2\alpha}{\pi} \times \left[\ln(2\gamma) - \frac{1}{2} \right] \ln \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (6.5)$$

となっている ($\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$) ので、これを用いる。

90MeV ($\gamma \approx 180$) の電子 1 個がアルミ箔を横切ったときに放出される光子の個数は、光の波長が 400 nm-750 nm の範囲で、0.016 個である。低強度のビームは 7 Hz で、1pc/pulse であった。そのため、毎秒に放射される光子の数は、

$$7 \times \frac{1 \text{ pC}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \times 0.02 \approx 875000 \text{ 個/s} \quad (6.6)$$

である。電子が横切る境界面の面積を 1 cm の正方形として、その面に電子が一様に分布しているとすると、境界面から単位面積あたり単位時間あたりに放出される光子は、

$$\frac{875000 \text{ /s}}{(10^4 \mu\text{m})^2} = 9 \times 10^{-3} \text{ 個}/\mu\text{m}^2/\text{s} \quad (6.7)$$

である。倍率が $M = 0.2$ の光学系でこれらの光子を測定することにして、カメラの画素サイズが本実験での $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ のとき、1つの画素あたりに入射する光子の個数は、

$$9 \times 10^{-3} \text{ 個}/\mu\text{m}^2/\text{s} \times \frac{1}{0.2^2} \times (3.45 \mu\text{m}/\text{px})^2 = 2.5 \text{ 個}/\text{px}/\text{s} \quad (6.8)$$

である。量子効率を 60% とすると、1つの画素あたりに蓄積される電子数は、 $1.5 e^-/\text{px}/\text{s}$ である。

飽和電荷量が $\geq 11\,000 e^-$ であったので、飽和電荷量を $11\,000 e^-$ とすると、10 bit の ADC 分解能において画素値 10 でビームが見えるようになるためには、

$$\frac{11000}{2^{10}} \times 10 \approx 100 e^- \quad (6.9)$$

の電荷の蓄積が必要と考えられる。これを露光時間に変換すると、 $100/1.5 = 66 \text{ s} = 1 \text{ 分}$ の露光時間が必要である。

長い時間の露光時間が必要になるため、低強度の電子ビームをプロファイルするためには、アルミ箔の代わりに蛍光板の設置などを検討する必要がある。また、カメラのゲインを上げることで、低強度のビームを測定しようとするとも考えられる。この場合は、露光時間が 5 秒とすると $100/(1.5 \times 5) = 13$ 倍 (22 dB) にする必要がある。

6.2 チェレンコフ放射を用いる場合

チェレンコフ放射によって、低強度ビームプロファイルが可能であるかについても述べる。

電子が厚さ d 、屈折率 n の媒質を通過するときチェレンコフ放射によって、放出される光子の数は、光の波長の範囲が $[\lambda_2, \lambda_1]$ のとき次のようになる。[1]

$$N_c = 2\pi\alpha d \left[\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right] \left[1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right] \quad (6.10)$$

$d = 1 \mu\text{m}$, $n = 1.5$, $\gamma = 180$, $\lambda_1 = 750 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 400 \text{ nm}$ を式 (6.10) に代入して、電子 1 個が媒質に入射した時に放出される波長の範囲が 400 nm-750 nm の光子の個数を求めると、その個数は 0.030 個である。これは、遷移放射によって放出される光子の個数の約 2 倍で、同じオーダーである。チェレンコフ放射は、媒質の厚さに比例して、放出する光子数が増えるため、遷移放射の光子数の考察から媒質の厚さを $10 \mu\text{m}$ ほどにすることで、露光時間をおよそ数秒にすることができる。

しかし、遷移放射とは異なり、荷電粒子が媒質を通過する間に放射し続ける、さらに、遷移放射の後方放射とは異なり、媒質の向きを傾けるなどをして放出される光の方向は変わらない。そのため、遷移放射とチェレンコフ放射の違いを考慮した光学系を作製する必要がある。

第7章

まとめ

東北大学電子光理学研究センターでの EMT の放射線耐性と初期不安定性の測定のためのビームテストにおいて、光学系を作製することで、遷移放射によってビームプロファイルが行える可能性があることが分かった。画素値が飽和したことやビーム全体の撮影ができなかったことによって、ビームの全体の形状を測定することはできなかったが、3つの2次元ガウス関数の和をビーム形状と仮定し、フィットを行い推測した。その結果、大強度時の EMT の照射効率は7割台前半程であり、7点照射をしても照射量には EMT 上の位置ごとにばらつきがある可能性を示した。

しかし、較正の方法や光学系の組み立て、低強度ビームプロファイルによる Si array との比較といった課題も多い。特に、低強度ビームプロファイルによる Si array とのビーム分布の比較は、大強度ビームプロファイルによる照射効率の結果の妥当性のためにも重要である。

また、照射効率の結果から、ビームテストの EMT の照射量を求め、MUMON での照射量と比較する必要がある。

第 8 章

補足資料

8.1 射影変換

(平面) 射影変換とは、変換前の四角形の 4 つの頂点の座標と、変換後の四角形の 4 つの頂点の座標を対応づけることにより、四角形を別の四角形に変換するものである。

変換前の座標を (x, y) 、変換後の座標を (x', y') とすると、変換は次のようにあらわされる。

$$w \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

ここで、 M は変換行列である。変換後の座標は次のようになる。[10]

$$x' = \frac{ax + by + c}{gx + hy + 1} \quad (8.2)$$

$$y' = \frac{dx + ey + f}{gx + hy + 1} \quad (8.3)$$

また、 w は次のようになる。

$$w = gx + hy + 1 \quad (8.4)$$

未知の変換行列の値 a, b, \dots, f の個数は 8 つなので、変換前の座標と変換後の座標の組が 4 つあれば、変換行列の値は求まる。変換行列の変換の様子は、図 8.1 のようになる。

本実験では、変換行列の値は、 $|a|, |e| \sim 10^0$ 、 $|b|, |d| \sim 10^{-2}$ 、 $|c|, |f| \sim 10^2$ 、 $|g|, |h| \sim 10^{-5}$ であった。よって、 $w \approx 1$ であり、本実験での変換は、アフィン変換 (平行四辺形から別の平行四辺形への変換) に近いとみなせる。そのため、画像の画素値を射影変換の後に補正する必要はない。

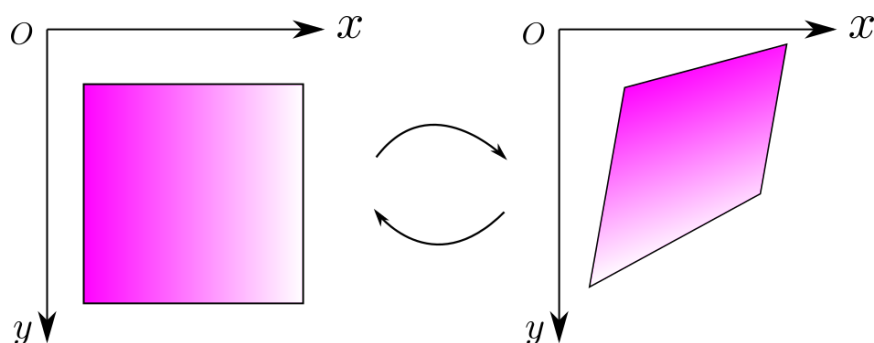


図 8.1: 平面射影変換のイメージ

8.2 バイリニア法

画像の座標変換をするとき、変換後のピクセルの位置の値は、必ずしもピクセルの中心にあるとは限らない。変換前の座標を (x, y) 、変換後の座標を (x', y') とする。このとき、変換後の座標 (x', y') の画素値は、逆変換の座標 (x, y) の画素値を周囲の座標の画素値から内挿し求めることで得る。 $p = x - [x]$ 、 $q = y - [y]$ ($[]$ はガウス記号) とする。変換前における画素値 $d(x, y)$ は、バイリニア法では次のように求める。[10]

$$d(x, y) = \begin{bmatrix} 1 - q & q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f([x], [y]) & f([x] + 1, [y]) \\ f([x], [y] + 1) & f([x] + 1, [y] + 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - p \\ p \end{bmatrix} \quad (8.5)$$

これが、変換後の座標 (x', y') における画素値になる。バイリニア法は、周囲 4 つの画素値を線形補間している。

謝辞

市川さんには、遷移放射でビームプロファイルを行うという話をいただき、多くのご指導をいただきました。佐貫先生には、セミナーで、基本的なことから丁寧にご指導いただきました。中村先生には、実験装置の回収をしていただいたり、ミーティングで多くの助言をしていただきました。

瀧藤さんには、ビームテストに関する質問に快く答えてくださいました。4年生のみなさんには、実験装置の一部を組み立ててもらいました。

研究室に配属されてから1年間という短い間でしたが、教員の方々や大学院生の方々のお世話になりながら、多くのことを学びました。ありがとうございます。

参考文献

- [1] Boris Dolgoshein, Transition radiation detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Volume 326, 1993
- [2] S. Bhadra, et al., Optical transition radiation monitor for the T2K experiment, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Volume 703, 2013
- [3] Beth Gitter, Optical transition radiation, CAA-TECH-NOTE-internal-#24
- [4] J. Bosser, et al., Optical transition radiation proton beam profile monitor, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Volume 238, 1985
- [5] スーパーカミオカンデ, <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/t2k.html>
- [6] 芦田 洋輔, T2K 実験・ミュオンモニターを用いた ビーム測定および新型検出器の開発, <http://www-kam2.icrr.u-tokyo.ac.jp/indico/event/4/contribution/4/material/slides/0.pdf>
- [7] 東北大学電子光研究センター, <https://www.lns.tohoku.ac.jp/>
- [8] ソーラボ, https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=13677#ad-image-0
- [9] ソーラボ, https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1670
- [10] 白鳥則朗 ほか, 未来へつなぐデジタルシリーズ 28 画像処理, 共立出版, 2014