

高強度レーザーとX線自由電子レーザーを用いた真空回折の
探索

修士学位論文

理学系研究科物理学専攻

坂本研究室

清野 結大

2017年1月30日

概要

素粒子物理学の標準理論の一部である量子電磁気学では、高強度電磁場下において真空の屈折率が1からずれることが予言されている。非一様な高強度電磁場によって屈折率勾配を与えられた真空中を通過する光はわずかに回折するが、その効果は未だ観測されていない。

我々はこの真空が引き起こす回折現象 ”真空回折” の実験を、世界で初めて行っている。高強度の近赤外レーザーを用いて真空に屈折率勾配を与え、X線自由電子レーザー施設 SACLA の高強度 X 線をプローブ光とすることで真空回折の観測を試みる。

2016 年 11 月に行った実験では有意なシグナルは得られなかったが、量子電磁気学の予言する理論値からのエンハンスが 1.3×10^{41} 以下というリミットを得た。これは真空回折実験による初めての制限である。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	真空の物理とポンププローブ実験	1
1.2	真空回折	1
1.3	真空回折の理論的な導出	2
1.4	理論式から予想される真空回折現象の特徴と実験デザイン	4
第 2 章	実験原理・手法	6
2.1	レーザーと XFEL を用いた真空回折実験	6
2.2	ガウシアンビーム	7
2.3	ガウシアンビームによる真空回折	8
2.4	真空回折の各パラメータ依存性	11
2.4.1	プローブ光のエネルギー依存性	11
2.4.2	プローブ光とポンプ光の時間幅依存性	11
2.4.3	Interaction Volume と角分布の関係	12
2.4.4	真空回折の簡易的なパラメータ依存性	15
2.5	実験セットアップ概略	15
2.5.1	レーザーと XFEL の集光サイズと角度発散	16
2.5.2	スリットの役割	16
2.6	SACLA の高強度レーザーシステムと信号強度	18
第 3 章	実験装置	20
3.1	X 線自由電子レーザー	21
3.1.1	光子エネルギー	21
3.1.2	XFEL のサイズ測定 (Be レンズ手前)	22
3.1.3	XFEL 診断系	23
3.2	X 線集光レンズ	26
3.2.1	Be レンズによる集光調整	26
3.3	高強度近赤外レーザー	28
3.4	レーザー光学系	29
3.4.1	穴あき軸外し放物面鏡	30
3.4.2	CCD カメラとカメラレンズ	30
3.5	4 象限スリット	31
3.6	フォトダイオード	31
3.7	GaAs 薄膜及びレーザーと XFEL のタイミング調整法	33

3.8	XFEL とレーザーのジッター測定システム	34
3.9	レーザー顕微鏡	35
3.10	スリット系の調整とバックグラウンド	36
3.11	スリット系の調整	36
3.11.1	バックグラウンド	38
第 4 章	実験結果及び解析	39
4.1	レーザーの各種パラメータ	39
4.2	XFEL のパルスエネルギー較正と安定性	42
4.2.1	XFEL パルスエネルギーの較正	42
4.2.2	XFEL の安定性	42
4.3	XFEL のサイズ測定およびスリットの設置精度	44
4.3.1	XFEL のサイズ測定	44
4.3.2	スリットの設置精度	47
4.3.3	スリット 3 の設置とバックグラウンド	48
4.3.4	角度発散と集光サイズ	49
4.4	XFEL とレーザーのタイミング精度	51
4.5	XFEL とレーザーの位置精度	55
4.5.1	XFEL 位置の決定方法	56
4.5.2	レーザー位置の決定方法	57
4.5.3	相対位置の決定精度	57
4.5.4	レーザーと XFEL の同軸性	59
4.6	予想されるシグナルの角分布と検出効率	60
4.6.1	シグナルの角分布	61
4.6.2	Interaction Volume	62
4.6.3	位相空間	63
4.6.4	波面の傾きの補正	64
4.6.5	検出効率	65
4.7	本測定	67
4.7.1	XFEL とレーザーのジッター	67
4.7.2	PD 位置と衝突点での光子数	68
4.7.3	最終的な本測定結果	69
第 5 章	議論と展望	71
5.1	議論	71
5.1.1	空間のアライメント精度	71
5.1.2	時間のアライメント精度	71
5.1.3	BG	72
5.1.4	解析方法	72
5.2	本研究の意義と他実験との比較	72
5.3	今後の展望	73

第 6 章	まとめ	75
付 録 A	Interaction Volume の導出	76
付 録 B	アライメント及び解析の詳細な手順	78
	B.1 カメラの調整	78
	B.1.1 ピント合わせ	78
	B.1.2 pixel 数と距離の較正	80
	B.2 タイミングモニタの解析方法	81
付 録 C	Spring-8 における BG 測定	83
	C.1 SPring-8	83
	C.2 実験セットアップ	83
	C.3 スリット 2 からの散乱 X 線	84
	C.4 スリット 3 の位置に対する BG の振る舞い	85
	C.5 結果および考察	86
謝辞		88

第1章 序論

素粒子物理学の標準理論の一部である量子電磁気学 (QED) によると、真空中は”無”ではなく仮想粒子が生成消滅を繰り返している。この効果により真空は様々な性質をもつ。その性質を探るために、真空を励起させそれを観察するポンププローブ実験が行われている。

本章では、真空の物理とポンププローブ実験、そして本研究の観測対象である真空回折現象について述べる。また自然単位系を用いる。

1.1 真空の物理とポンププローブ実験

QED によると真空は仮想粒子が生成消滅するゆらぎによって満たされている。真空中に高強度電磁場が存在すると、高強度電磁場が真空を励起することにより電荷をもつ仮想粒子の影響が顕著になる。この仮想粒子と光子が相互作用することが QED の非線形過程によって予言されている。真空である仮想粒子が光子と相互作用することは、真空の屈折率に変化が生じうることを意味する。この現象をマクロに考えると、仮想粒子が分極・磁化することより真空の屈折率が変化していると考えることが出来る。この効果を観測するために、真空を”ポンプ”して励起させ、プローブ光によってその変化を探るポンププローブ実験が行われている。真空をポンプして励起させるものとしては磁石や強力なレーザーが用いられており、励起された真空をみるプローブとしては可視光域のレーザーが多く用いられている。屈折率が1からずれた真空に光を入射させると、プローブ光に偏光や運動量の変化が引き起こされることが予言されている [1]。偏光の変化の観測を試みる実験は幾つかのグループによって行われており、感度は QED 理論値の 20 倍程度までに迫っているものの未だ観測には至っていない [2]。我々はプローブ光に引き起こされる運動量変化に着目した。これは真空回折現象と呼ばれており、次節でこの現象について詳しく述べる。

1.2 真空回折

非一様な高強度電磁場によって真空に屈折率勾配を与えると、その真空を通過する光に運動量変化が起きることが予言されており [1, 3]、我々はこの現象を真空回折と呼んでいる。図 1.1 に真空回折現象の模式図を示した。真空回折現象を引き起こすにはポンププローブ実験を行うことが適している。ポンプ光で真空を励起させ屈折率勾配を作り、その真空に対してプローブ光を照射する。屈折率勾配が生じた真空を通過したプローブ光は真空回折を起こす。この真空回折現象は QED で予言される未観測の物理である。本研究ではこの現象の初観測を目指している。また真空回折現象に着目した実験は未だ行われておらず、本研究は真空回折現象の観測を目指す初めての実験である。

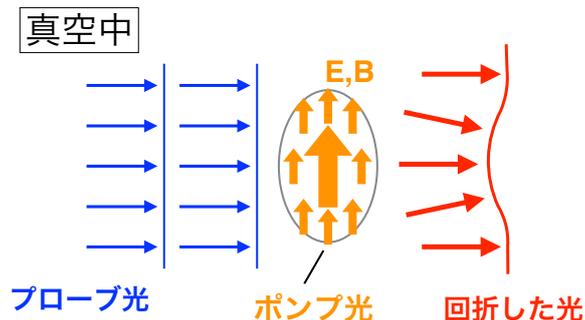


図 1.1: 真空回折現象の模式図。ポンプ光によって励起された真空に対してプローブ光が入射すると回折される。

1.3 真空回折の理論的な導出

真空を伝播する光にもたらされる運動量変化は、強い電磁場中の真空からの光子の放出として取り扱うことができる。ポンププローブ実験のような真空を励起する電磁場と、その真空に対して照射される電磁場の2つの場が相互作用する状況を考える。特に可視光域程度のレーザーによる高強度電磁場で真空をポンプし、プローブ光としてX線が伝播するような状況を考えて、真空回折現象は真空中から1光子状態への遷移として考える事ができる [1]。

$$|\gamma_{p'}(\mathbf{k}')\rangle \equiv a_{\mathbf{k}', p'}^\dagger |0\rangle \quad (1.1)$$

ここで、 \mathbf{k}' は放出される光子の運動量ベクトル、 $p' \in \{1, 2\}$ はその光子の偏光のラベルである。

時間変動する電磁場 $F^{\mu\nu}(x)$ によって引き起こされる、0光子状態から1光子状態への遷移振幅は以下のように与えられる [4]。

$$S_{(p')}(\mathbf{k}') = \langle \gamma_{p'}(\mathbf{k}') | \int d^4x f^{\mu\nu}(x) \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial F^{\mu\nu}}(x) |0\rangle \quad (1.2)$$

ここで $f^{\mu\nu}(x)$ は1光子の電磁テンソルで、 \mathcal{L} はハイゼンベルグ-オイラーラグランジアンである [4]。放出される光子数分布は、フェルミの黄金律より以下で与えられる。

$$d^3N_{(p')} = \frac{d^3k'}{(2\pi)^2} |S_{(p')}(\mathbf{k}')|^2 \quad (1.3)$$

ポンプ光とプローブ光の電磁場として、直線偏光のレーザーとX線を考える。リーディングオーダーのファインマンダイアグラムは図 1.2 となる。レーザーの偏光ベクトルを \hat{e}_E 、回転軸を光の伝播方向にとり \hat{e}_E を $\frac{\pi}{2}$ 回転させたベクトルを \hat{e}_B とする。同様にX線の偏光ベクトルと、それを $\frac{\pi}{2}$ 回転させたベクトルを \hat{e}_e, \hat{e}_b とする。すると真空中の電磁場 $F^{\mu\nu}(x)$ の電場、磁場はそれぞれ $\mathbf{E}(x) = \varepsilon(x)\hat{e}_E + g(x)\hat{e}_e$, $\mathbf{B}(x) = \varepsilon(x)\hat{e}_B + g(x)\hat{e}_b$ と表される。ここで、 $\varepsilon(x), g(x)$ はそれぞれレーザーとX線の場の強度分布である。図 1.2 のリーディングオーダーのダイアグラムのみ考慮

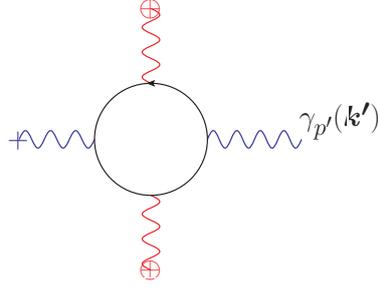


図 1.2: リーディングオーダーの Feynman diagram。偏光が p' で波数ベクトルが \mathbf{k}' の光子が励起されるダイアグラム。プローブ光の X 線 (+) とポンプ光のレーザー (\oplus) が荷電粒子を介して相互作用する。

すると、式 (1.2) は以下のようなになる。

$$S_{(p')}(\mathbf{k}') = im^2 \frac{\sqrt{\alpha}}{45} \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{k'}(1 + \cos \theta')(1 + \cos \theta)(4 \cos \gamma' \cos \gamma + 7 \sin \gamma' \sin \gamma) \frac{eg_0}{2m^2} \left(\frac{e\varepsilon_0}{2m^2}\right)^2 M \quad (1.4)$$

$$M = \int d^4x e^{ik'x} \frac{g(x)}{g_0} \left(\frac{\varepsilon(x)}{\varepsilon_0}\right)^2 \quad (1.5)$$

ここで、 α は微細構造定数、 m は電子質量、 e は素電荷である。また ε_0 と g_0 はそれぞれ、レーザーと X 線の場のピーク強度である。X 線とレーザーに関するそれぞれの角度は以下と図 1.3 のようにとっている。

$$\gamma = \varphi + \beta + \phi \quad (1.6)$$

$$\gamma' = \varphi' + \beta' + \phi \quad (1.7)$$

β = X 線の偏光の向き

β' = 励起された光の偏光の向き

これより、励起された光の角分布は以下になる。リーディングオーダーのダイアグラム図 1.2 を考えると、真空中を伝播する X 線に運動量変化が起きたとみなすことができる。これが真空回折現象である。

$$\begin{aligned} d^3N_{(p')} = & m^4 \frac{d^3k'}{(2\pi)^3} \frac{\alpha}{45^2} k'(1 + \cos \theta')^2(1 + \cos \theta)^2 \\ & \times (4 \cos \gamma' \cos \gamma + 7 \sin \gamma' \sin \gamma)^2 \left(\frac{eg_0}{2m^2}\right)^2 \left(\frac{e\varepsilon_0}{2m^2}\right)^4 \left(\frac{2}{\pi}\right)^3 |M|^2 \end{aligned} \quad (1.8)$$

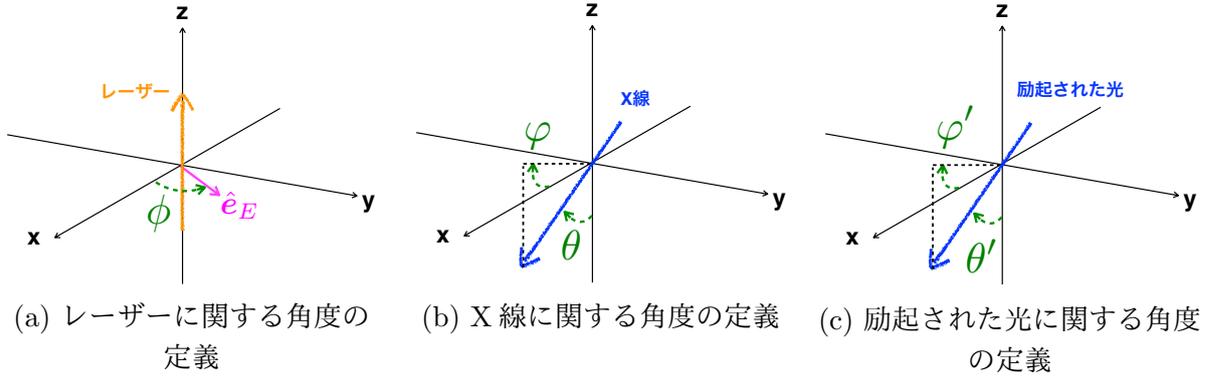


図 1.3: それぞれの角度の定義。それぞれの光は矢印の方向に伝播している。ポンプ光のレーザーとプローブ光の X 線は原点付近で空間的に重なる。

1.4 理論式から予想される真空回折現象の特徴と実験デザイン

前章で導出した (1.8) 式から、真空回折現象の特徴について考察する。またポンププローブ実験を行うにあたり、考慮すべき実験デザインについて考える。

真空回折現象はポンプ光とプローブ光の間での相互作用と考えることができる。プローブ光が短波長であると、ポンプ光によって励起された真空中での振動回数が増え相互作用の確率が上がると考えられる。実際 (1.8) 式にはプローブ光の運動量 k' がかかっており、これらのことからプローブ光は短波長、つまり高エネルギーであると反応が起こりやすく実験に適していると考えられる。

次に (1.8) 式はポンプ光の電場のピーク強度 ϵ_0 の 4 乗とプローブ光のピーク強度 g_0 の 2 乗に比例している。場同士は高強度であるほど相互作用しやすいと考えることができる。これから瞬間強度の強いポンプ光で真空を励起し、プローブ光も瞬間強度の強いものを用いると良いと予想される。

最後に、真空回折現象で記述される運動量変化の分布は (1.8) 式の M の項に依存している。これは (1.5) 式からわかるように相互作用する電磁場同士の形状から計算されるもので、真空回折された光の広がり方は相互作用する電磁場の形状に強く依存しているということがわかる。ポンプ光とプローブ光として静的な場を考えると、(1.5) 式の積分結果は 1 となりプローブ光には運動量変化が起きない。このことは静的な場は真空に屈折率勾配を生じさせないことから理解できる。そのため、ポンプ光として非一様な電磁場によって真空を励起する必要があると考えられる。

なお、(1.5) 式からわかるように真空回折によるシグナル量や回折の角度広がり大きさは相互作用する電磁場同士の形状に強く依存するため、一般的な表式を用いて定量的な議論を行うことは容易ではない。そのため 2 章で具体的なデバイスを想定した際に見積もられる真空回折のシグナル量や角度広がりについて議論を行う。

以上をまとめると、真空回折現象を観測するためには以下の点を考慮して実験をデザインすることが重要であると考えられる。

- ポンプ光とプローブ光の反応確率を増やす。
 - 高エネルギーのプローブ光を用いる。

- 瞬間強度の強いポンプ光とプローブ光を用いる。
- プローブ光の運動量変化を大きくする。
 - 非一様な電磁場を作り出すポンプ光を用いる。

私はこれらの点に着目して実験をデザインし、実際に実験を行った。2章では実験デザインと、具体的なデバイスを仮定した際の真空回折について述べ、3章では実験に用いた装置や詳細なセットアップ等について述べる。4章では実験で得られたデータの解析及び結果について述べる。

第2章 実験原理・手法

この章では真空回折を観測するポンププローブ実験として、具体的に高強度レーザーと X 線レーザーを使用した場合のデバイスを仮定した場合について議論する。またそれらのデバイスを用いた真空回折実験のコンセプトについて説明する。

2.1 レーザーと XFEL を用いた真空回折実験

真空回折現象を観測するためには真空を”励起”させ、それを”みる”必要がある。そのためポンププローブ実験が最適である。1.4 章の議論により、ポンプ光としては高強度かつ非一様な電磁場を作り出すものが望ましい。この有力な候補としてあげられるのが可視光域の高強度パルスレーザーである。近年のレーザー技術の発達は目覚ましく、1 パルスあたり数 J 以上の高強度パルスを発生させることが出来る。またレーザーは集光することで場の強度を増加させることが出来る。さらに時間幅をフェムト秒オーダーまで圧縮することで瞬間的な高強度電磁場を作り出すことが出来る。高強度レーザーの作成及び集光の研究は光学分野でなされており、現状ではアメリカのグループでは 20 J 程度のパルスエネルギーのフェムト秒レーザーを $1 \mu\text{m}$ 程度に集光することを達成している [9]。レーザーの電磁場の形状として主なものはガウシアンビームと呼ばれるガウシアン形状であり、非一様な電磁場を作り出すことが出来る。

一方、プローブ光として有力な候補としてあげられるのが X 線自由電子レーザー (以下 XFEL) である。これは X 線のレーザーであり、高エネルギーのプローブ光という要件を満たす。X 線は波長が短いので集光が容易であり、場の強度を増加させることが出来る。日本の XFEL 施設 SACLA では XFEL を集光することができ、現在 $1 \mu\text{m}$ の集光が可能である [5]。またこのレーザーはフェムト秒レーザーであるので瞬間強度が強く、同じくフェムト秒レーザーであるポンプ光の高強度レーザーとも相性が良い。このレーザーもまたガウシアンビームとみなすことが出来る。

以上の理由により、本研究では高強度レーザーと XFEL を用いた真空回折実験を行った。図 2.1 にレーザーと XFEL を用いた真空回折実験の概略図を示す。これらを用いた際の真空回折現象について次節以降で詳しく述べる。なお有限サイズの光は原理的に角度に広がりをもつ。XFEL ビームはある程度の角度発散をもち、角度広がりの少ない理想的なビームでも $10 \mu\text{rad}$ 程度の角度発散をもつ。そのため真空回折での角度の広がりとしてこれより大きい、数十 μrad 程度の広がりを持たせる必要がある。詳細な計算は次節以降で行うが、レーザーの集光サイズを $1 \mu\text{m}$ 、光子エネルギー 10 keV の XFEL の集光サイズをその倍の $2 \mu\text{m}$ とした場合、真空回折による角度発散は $30 \mu\text{rad}$ 程度となる。また XFEL ビームを $2 \mu\text{m}$ に集光した際の XFEL 自身の角度発散の大きさの最小値は $10 \mu\text{rad}$ となる。

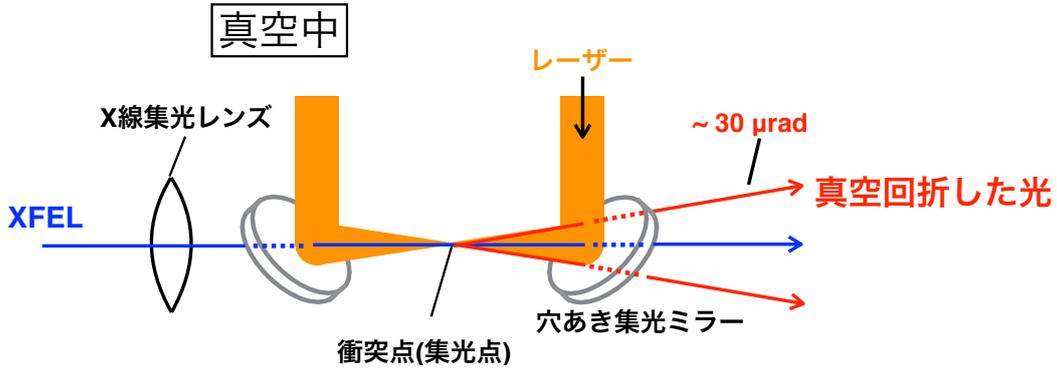


図 2.1: レーザーと XFEL による真空回折実験。集光したレーザーと集光した XFEL が集光点で衝突している。XFEL の一部が真空回折により角度発散を獲得している。レーザーの集光サイズを $1 \mu\text{m}$ 、光子エネルギー 10 keV の XFEL の集光サイズを $2 \mu\text{m}$ とした場合、真空回折による角度発散は $30 \mu\text{rad}$ 程度となる。

2.2 ガウシアンビーム

レーザーの一般的な形状はガウシアンビームと呼ばれるものである。レーザーの理解のため、ガウシアンビームについて説明する。ガウシアンビームは半径方向に対称な分布で、その電場強度 $\varepsilon(r)$ は以下で表される。

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_0 e^{-\frac{r^2}{w_0^2}} \quad (2.1)$$

ここで r はビーム中心から半径方向への距離で、 w_0 はビームウエストと呼ばれる長さである。このビームの intensity 分布 $I(r)$ もまたガウシアンであり、以下で表される。

$$I(r) = \varepsilon_0^2 e^{-\frac{2r^2}{w_0^2}} \quad (2.2)$$

この式から、ビームウエスト w_0 は Intensity 分布の 2σ 径であることがわかる。このガウシアンビームが伝播した際の 2σ 径 $w(z)$ の変化は以下の式で表される。これを図 2.2 に示す。

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (2.3)$$

ここで z はガウシアンビームの伝播方向で、 z_R はレイリー長と呼ばれる長さである。ガウシアンビームが集光点からレイリー長だけ伝播すると、その大きさは $\sqrt{2}$ 倍になる。図 2.2 で表されるように、ガウシアンビームが広がっていく角度は発散角 θ に漸近していく。発散角とビームウエストには以下の関係がある。

$$\theta = \frac{w_0}{z_R} \quad (2.4)$$

$$\theta w_0 = \frac{\pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

λ はレーザーの波長である。(2.5) 式は回折限界と呼ばれる関係で、光は有限サイズまでしか絞ることはできず、その大きさは発散角に反比例する。すなわち小さな集光サイズを得るためには大きな角度でレーザーを集光する必要がある。ガウシアンビームの空間分布はガウシアン形状であり、角度発散分布もまたガウシアン分布となる。(2.4) 式で表される発散角 θ は角度発散分布の 2σ の大きさに対応する。

図 2.2 では可視光域のレーザーを仮定した際のパラメータを使用した。XFEL もまたガウシアンビームとして扱うことができる。10 keV の XFEL の場合、ビームウエストを $2 \mu\text{m}$ とすると回折限界の角度発散は $20 \mu\text{rad}$ 、すなわち角度発散分布は 1σ で $10 \mu\text{rad}$ のガウシアン分布となる。

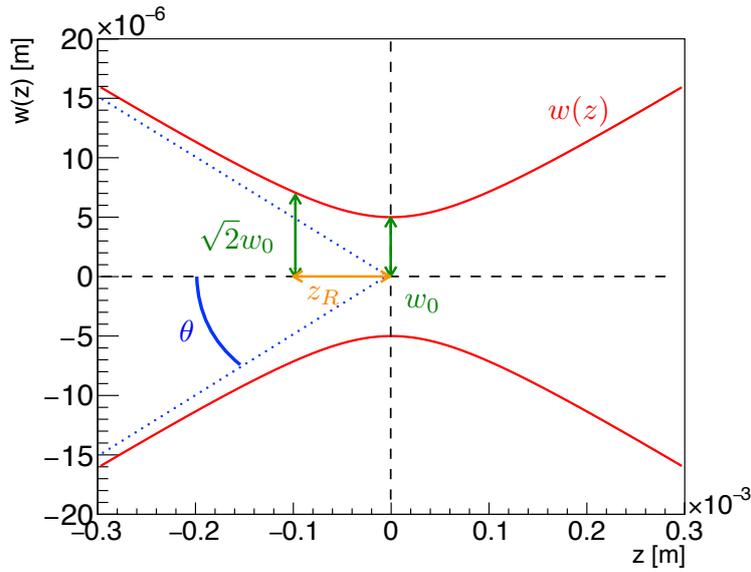


図 2.2: ガウシアンビームのサイズ変化。集光点のサイズは点にはならず、回折限界でリミットされる。集光点からレイリー長 z_R 分伝播するとレーザー径 $w(z)$ は $\sqrt{2}$ 倍になる。波長を 800 nm 、ビームウエストを $5 \mu\text{m}$ とした。

2.3 ガウシアンビームによる真空回折

本実験ではポンプ光として近赤外の高強度レーザー、プローブ光として X 線レーザーである XFEL を使用して実験を行った。高強度レーザーと XFEL は共にガウシアン形状をしている。そのため本章ではポンプ光とプローブ光をガウシアン形状として扱った場合の真空回折について説明する。

ポンプ光のレーザーをガウシアンビームとして扱うと、その電場強度分布は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \varepsilon(x) &= \varepsilon_0 e^{-\frac{(z-t)^2}{(\tau/2)^2}} \frac{w_0}{w(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{w^2(z)}} \cos(\Phi(x)) \\ \Phi(x) &= \Omega(z-t) + \frac{\Omega r^2}{2R(z)} - \arctan\left(\frac{z}{z_R}\right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで Ω はレーザーの周波数、 τ はレーザーパルスの時間幅、 w_0 はビームウエスト、 $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ はレイリー長である。また $w(z) = w_0 \sqrt{1 + (\frac{z}{z_R})^2}$ はビームの横方向サイズの関数、 $R(z) = z(1 + (\frac{z}{z_R})^2)$ は波面の曲率半径である。[1, 3] の計算によると、真空回折現象によってプローブ光に 0.1 eV 程度のエネルギー変化が生じる。プローブ光のエネルギー分布はポンプ光の2光子分のエネルギー変化に対応する位置にピークを作るが、その構造は強く抑制されておりポンプ光の周波数 Ω の依存性は十分無視することが出来る。そのため、レーザーの強度の自乗は以下のように近似できる。

$$\varepsilon^2(x) \approx \frac{1}{2} \varepsilon_0^2 e^{-2\frac{(z-t)^2}{(\tau/2)^2}} \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 e^{-2\frac{x^2+y^2}{w^2(z)}} \quad (2.7)$$

次にプローブ光の X 線について考える。X 線もレーザー同様にガウシアンビームとして扱うことが出来る。X 線とレーザーが共に集光点で重なる場合、X 線のレイリー長はレーザーのレイリー長に比べて十分に長いいため波面の曲率が伝播中に変化する効果は無視して考えることが出来る。波面の曲率がない状況を考えて、プローブ光の強度分布は以下のように表すことが出来る。

$$g(x) = g_0 e^{-\frac{[\hat{k} \cdot (x-x_0)]^2}{(T/2)^2}} e^{-\frac{[\hat{a} \cdot (x-x_0)]^2}{w_1^2}} e^{-\frac{[\hat{b} \cdot (x-x_0)]^2}{w_2^2}} \cos(\omega \hat{k} \cdot (x-x_0) + \psi_0) \quad (2.8)$$

ここで \mathbf{x}_0 はプローブ光の集光点の原点（レーザーの集光点）からのずれ、 $\hat{\mathbf{a}}$ と $\hat{\mathbf{b}}$ は X 線の進行方向に垂直な単位ベクトルで、 w_1, w_2 はそれぞれ $\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{b}}$ 方向のビームウエストである。

シグナルの量が最大になる状況を考える。(1.8) 式より $(1 + \cos \theta)$ の項が最大になるのはレーザーと X 線が正面衝突する状況である。またこのとき、 $(4 \cos \gamma' \cos \gamma + 7 \sin \gamma' \sin \gamma)$ の項はレーザーと X 線の偏光が $\pi/2$ ずれているときに最大値を取る。よってこの状況のときの (1.8) 式で表されるシグナルの角分布について考える。解は [1] によって計算されており、その結果は [1] の (20) 式で表されており以下になる。

$$\begin{aligned}
 d^3N &\approx m^4 \frac{d^3k'}{(2\pi)^3} \alpha \frac{14^2}{45^2} k' (1 + \cos \theta')^2 \left(\frac{eg_0}{2m^2} \right)^2 \left(\frac{e\epsilon_0}{2m^2} \right)^4 \left(\frac{2}{\pi} \right)^3 |M_0|^2 \\
 M_0 &= \left(\frac{\pi}{4} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{\tau}{\sqrt{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau}{T} \right)^2}} \sum_{q=\pm 1} e^{-\frac{2}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau}{T} \right)^2} \left[\tau^2 \left(\frac{qw - k'}{8} \right)^2 + 2 \left(\frac{z_0 + t_0}{T} \right)^2 \right]} \\
 &\times \int dz \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{f_0}} \\
 &\times e^{-\frac{4}{w^2(z)f_0} \left[\left(\frac{1}{w_2^2} + \frac{2}{w^2(z)} \right) \left(\frac{\hat{a} \cdot \mathbf{x}_0}{w_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{w_1^2} + \frac{2}{w^2(z)} \right) \left(\frac{\hat{b} \cdot \mathbf{x}_0}{w_2} \right)^2 \right] - \frac{(k' \sin \theta')^2}{2f_0} \left[\left(\frac{w(\varphi')}{w_1 w_2} \right)^2 + \frac{2}{w^2(z)} \right]} \\
 &\times e^{-\frac{4}{T^2} \frac{z^2 - (z_0 + t_0)z}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau}{T} \right)^2}} e^{i \left[\frac{2(qw - k')}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau}{T} \right)^2} + k'(1 - \cos \theta') \right] z} \\
 &\times e^{-i \left\{ \frac{(qw - k')(z_0 + t_0)}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau}{T} \right)^2} + \frac{2k' \sin \theta'}{f_0} \left[\frac{\cos(\varphi' - \delta_0)}{w_1} \left(\frac{1}{w_2^2} + \frac{2}{w^2(z)} \right) \frac{\hat{a} \cdot \mathbf{x}_0}{w_1} + \frac{\sin(\varphi' - \delta_0)}{w_2} \left(\frac{1}{w_1^2} + \frac{2}{w^2(z)} \right) \frac{\hat{b} \cdot \mathbf{x}_0}{w_2} \right] + k'(z_0 + t_0) + q\psi_0 \right\}}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

$$w(\varphi') = \sqrt{w_1^2 \cos^2 \varphi' + w_2^2 \sin^2 \varphi'} \tag{2.10}$$

$$f_0 = \frac{2}{(w_1 w_2)^2} + \frac{4}{w^2(z)} \left(\frac{1}{w_1^2} + \frac{1}{w_2^2} + \frac{2}{w^2(z)} \right) \tag{2.11}$$

X線をビームウエスト $5 \mu\text{m}$ (2σ) としたときの規格化されたシグナルの角分布を図 2.3 と図 2.4 に表す。X線の光子エネルギーは 9.8 keV 、パルス時間幅は 10 fs (2σ)、レーザーの波長は 800 nm 、パルス時間幅は 15 fs (2σ) を仮定している。シグナル量は X 線、レーザーのパルスエネルギーの大きさに依存するが、角度分布はパルスエネルギーに依存しない。角度発散の大きさは数十 μrad でガウシアンでよく近似することが出来る。図 2.4 の赤線はガウシアンで Fit した結果である。

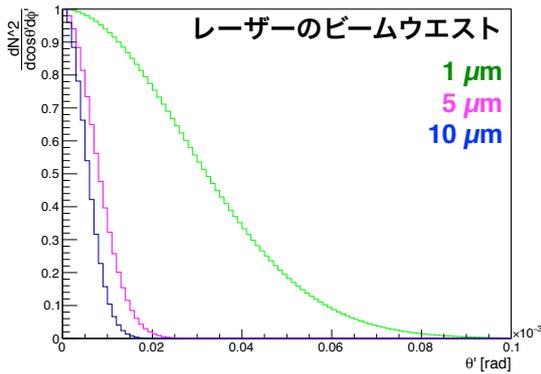


図 2.3: シグナルの角分布。X線のビームウエストは $5 \mu\text{m}$ で、レーザーと X 線が正面衝突した際の角分布である。

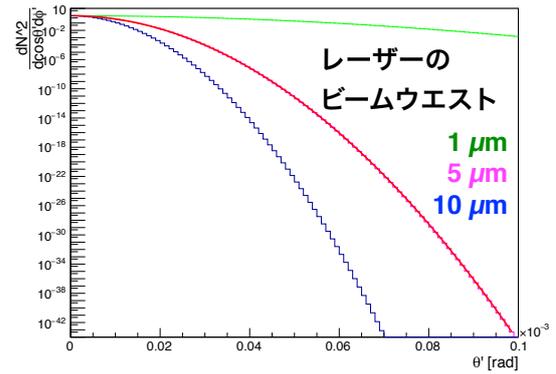


図 2.4: シグナルの角分布 (log)。X線のビームウエストは $5 \mu\text{m}$ で、レーザーと X 線が正面衝突した際の角分布である。

2.4 真空回折の各パラメータ依存性

真空回折現象は相互作用する場の大きさや形状に敏感であり、(2.9) 式からわかるように明瞭な表式で表すことは容易ではない。そのためこの章では (2.9) 式を数値的に計算した結果から真空回折現象のパラメータ依存性を考察する。ポンプ光とプローブ光は時間と空間ともにずれはなく、集光点で正面衝突している状況を考える。ポンプ光とプローブ光としてはビームウエスト $5 \mu\text{m}$ のパルスレーザーと XFEL を仮定する。

2.4.1 プローブ光のエネルギー依存性

シグナルの量はプローブ光の光子エネルギーの 2 乗に比例する。図 2.5 に、横軸にプローブ光の光子エネルギー、縦軸に 1 光子分のプローブ光が真空回折を起こす確率をとったプロットを示した。これは 2 次関数でよく Fit 出来る。これより真空回折で得られるシグナルの光子数はプローブ光の光子エネルギーの 2 乗に比例することがわかる。

微細な構造への感度は、簡単にはその構造の大きさがプローブ光の電磁場の波長何個分かで決まると考えられる。つまり微細な構造によるプローブ光の電磁場への影響は、プローブ光の波長に反比例する。真空回折を起こす確率は、影響を受けた光子数をカウントしているに等しい。光の光子数は電磁場を 2 乗した大きさに比例するためプローブ光の波長の、真空回折を起こす確率への影響は 2 乗に反比例することになる。このような描像からも、真空回折の確率がプローブ光の光子エネルギーの 2 乗に比例することを理解できる。

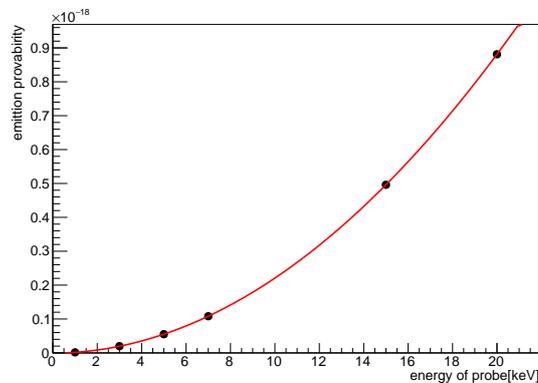


図 2.5: 散乱確率のプローブ光の光子エネルギー依存性。赤線は 2 次関数での Fit 結果である。

2.4.2 プローブ光とポンプ光の時間幅依存性

プローブ光とポンプ光が共にパルスレーザーで、その時間幅のオーダーが同程度のときは真空回折のシグナル量や角分布の大きさはプローブ光とポンプ光の時間幅に大きな依存関係はない。角分布に依存するパラメータに関しては 2.4.3 章で詳しく述べる。ここではシグナルの量が変わらないことを図 2.6 と図 2.7 に示す。

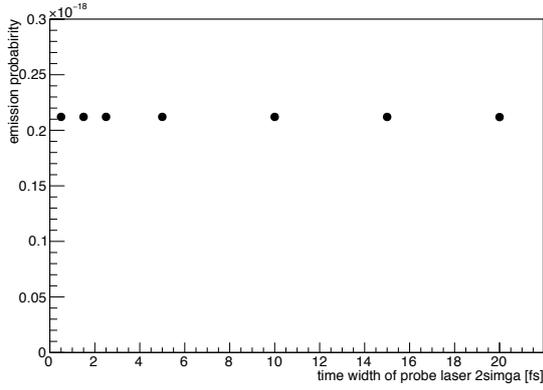


図 2.6: プロブ光の時間幅変化に対するシグナル量。ポンプ光の時間幅は 10 fs(2σ) とした。

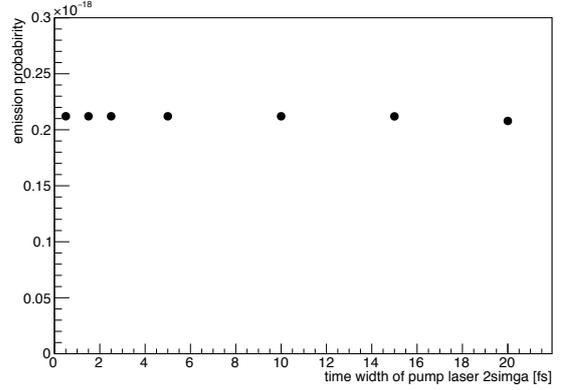


図 2.7: ポンプ光の時間幅変化に対するシグナル量。プロブ光の時間幅は 10 fs(2σ) とした。

2.4.3 Interaction Volume と角分布の関係

真空回折現象でもたらされる運動量変化の性質について考察していく。運動量と空間には不確定性関係があるため、ポンプ光とプロブ光の空間分布に着目することにする。まず (1.8) 式と (1.5) 式から、シグナル量を近似的に以下のように置き換えることが可能であることが予想出来る。

$$d^2 N_{(p')} = dx dy C I_{\text{laser}}^2(x, y) I_{\text{XFEL}}(x, y) \quad (2.12)$$

C は定数、 $I_{\text{laser}}(x, y)$ と $I_{\text{XFEL}}(x, y)$ はそれぞれレーザーと X 線の規格化された Intensity 分布である。この仮定を検証する詳細な計算は A 章に譲ることとして、ここでは導出の簡単な流れを示す。まずシグナルの角分布である (1.8) 式の M の部分に着目し、(1.8) 式を以下のように近似する。

$$d^3 N_{(p')} \approx d^3 k' C \left| \int d^4 x e^{ik'x} g(x) \varepsilon(x)^2 \right|^2 \quad (2.13)$$

ここで $g(x) \varepsilon(x)^2$ が変数分離可能と仮定すると、以下のように変形することが出来る。

$$d^3 N_{(p')} \approx d^3 k' C \left| \int d^4 x e^{ik'x} \psi_x(x) \psi_y(y) \psi_z(z) \psi_t(t) \right|^2 \quad (2.14)$$

$$= d^3 k' C \left| \tilde{\psi}_x(k'_x) \tilde{\psi}_y(k'_y) \tilde{\psi}_z(k'_z) \tilde{\psi}_t(k'_t) \right|^2 \quad (2.15)$$

$$d^3 N_{(p')} \approx C' dk'_x dk'_y \tilde{\psi}_x^2(k'_x) \tilde{\psi}_y^2(k'_y) \quad (2.16)$$

ここで ψ と $\tilde{\psi}$ はフーリエ変換の関係にあり、X 線を用いた真空回折現象は微小角の散乱のため $k' \approx k'_z$ という近似を用いた。(2.16) 式は、シグナルの量は運動量空間の積分で求められることを表しており、 $\tilde{\psi}_x^2(k'_x) \tilde{\psi}_y^2(k'_y)$ は運動量空間の確率密度分布を表している。つまりこのことから $\tilde{\psi}_x(k'_x) \tilde{\psi}_y(k'_y)$ のフーリエ変換である $\psi_x(x) \psi_y(y)$ は xy 空間の波動関数であるとみなせる。 $\psi_x(x) \psi_y(y)$ はレーザーと X 線の電場強度分布の積であるので、その 2 乗である Intensity 分布 $I_{\text{laser}}^2(x, y) I_{\text{XFEL}}(x, y)$ は xy 空間での確率密度分布と考えることが出来る。以上より (2.12) 式が

導かれた。真空回折の角度分布、すなわち運動量分布はレーザーとXFELの空間分布に対応したものである。空間分布と運動量分布は不確定性原理で結ばれており、Interactionする空間の大きさに対応した運動量変化がXFELに生じると考えることが出来る。

以下ではレーザーとX線はガウシアンビームとして、 $I_{\text{laser}}(x, y)$ と $I_{\text{XFEL}}(x, y)$ をガウシアンとして以下の表式で表す。

$$I_{\text{laser}}(x, y) = \frac{1}{2\pi w_0^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{w_0^2}} \quad (2.17)$$

$$I_{\text{XFEL}}(x, y) = \frac{1}{2\pi w_{12}^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{w_{12}^2}} \quad (2.18)$$

$$I_{\text{laser}}^2(x, y) I_{\text{XFEL}}(x, y) = \left(\frac{1}{2\pi w_0^2} \right)^2 \frac{1}{2\pi w_{12}^2} e^{-2\frac{x^2+y^2}{w^2}} \quad (2.19)$$

$$w^2 = \frac{w_0^2 w_{12}^2}{w_0^2 + 2w_{12}^2} \quad (2.20)$$

簡単のため、レーザー及びX線の集光点のずれはなく、 z 方向への伝播によるビームサイズの変化を無視する。また、X線のビームウエストを w_{12} として縦横のビームサイズを一致させる。以後 $I_{\text{laser}}^2(x, y) I_{\text{XFEL}}(x, y)$ を Interaction Volume と呼ぶことにする。この Intensity 分布に対応した運動量分布は以下のように表すことが出来る。

$$\frac{dN}{d \cos \theta'} = C \frac{w^4}{w_0^4 w_{12}^2} e^{-\frac{1}{2}(kw\theta')^2} \quad (2.21)$$

Interaction Volume が小さくなると、フーリエ変換の関係から角度発散の大きさは大きくなることが予想される。図 2.8 と図 2.9 にレーザーとX線の大きさに対する、角度発散の大きさを示す。それぞれレーザーとXFELのウエストは $5\mu\text{m}$ に固定した。角度発散の大きさはガウシアンで Fit したものの 1σ を表示した。Interaction Volume の大きさが小さくなるにつれ角度発散が増加することがわかる。

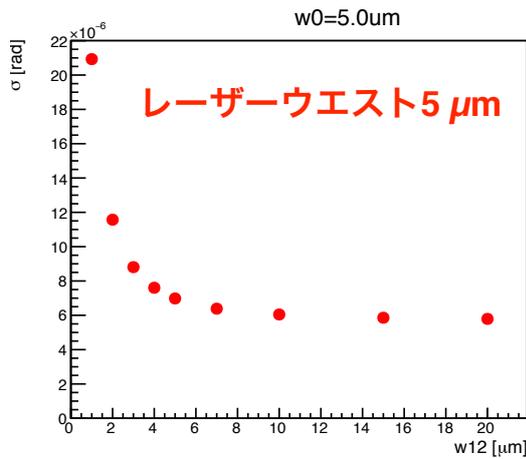


図 2.8: XFEL の大きさに対する角度発散。レーザーのビームウエストは $5\mu\text{m}$ に固定した。

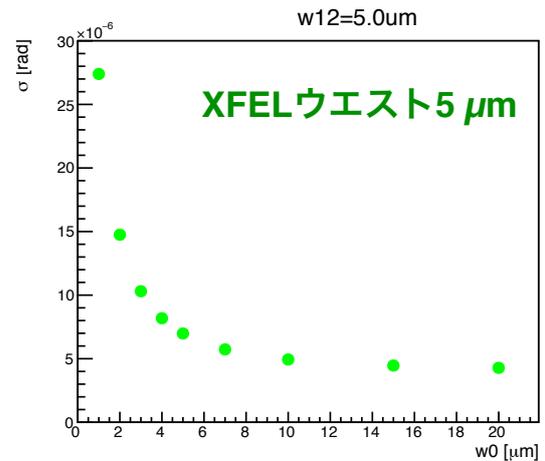


図 2.9: レーザーの大きさに対する角度発散。XFEL のビームウエストは $5\mu\text{m}$ に固定した。

次に、この Interaction Volume の大きさを Δx としたとき、不確定性原理から計算される Δp の大きさと理論計算から得られる Δp (角度発散) を比較する。図 2.10 の結果からわかるように、真空回折として得られる角度発散の大きさは Interaction Volume の大きさで決まるといえる。Interaction Volume でゆらぎが起き、そのゆらぎの空間的な大きさに対応した運動量変化が X 線に起きるとみなすことができる。

最後に反応確率と Interaction Volume の関係性について述べる。反応確率として、XFEL の強度が 1 光子分のときの (1.8) 式の全空間積分を取る。これに対し、Interaction Volume の x,y 空間積分をとったものを比べたのが図 2.11 である。反応確率が Interaction Volume の積分値に比例していることがわかる。ここから、Interaction Volume はシグナルの量の重み、すなわち確率密度分布と考えることができる。

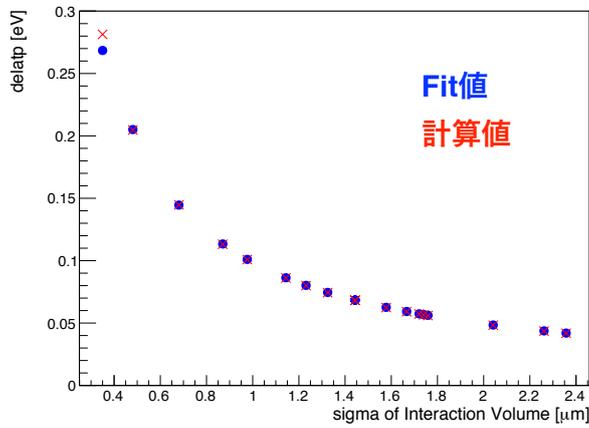


図 2.10: Interaction Volume に対する角度発散

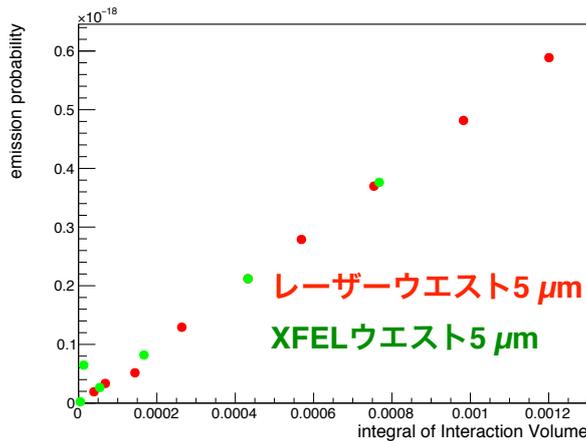


図 2.11: Interaction Volume の積分に対する反応確率。横軸は Interaction Volume の積分値、縦軸は反応確率を表す。赤点はレーザーのビームウエストを $5 \mu\text{m}$ に固定し、緑点は XFEL のビームウエストを $5 \mu\text{m}$ に固定した。

2.4.4 真空回折の簡易的なパラメータ依存性

最後に (1.8) 式からシグナル量はプローブ光のパルスエネルギーと、ポンプ光のエネルギーの2乗に比例することがわかる。最終的に真空回折現象のパラメータ依存性は以下ようになる。

$$\frac{dN}{d \cos \theta} \approx k^2 J W^2 \frac{1}{w_0^2 (w_0^2 + 2w_{12}^2)} \times k^2 w^2 e^{-\frac{1}{2}(kw\theta)^2} \quad (2.22)$$

$$w^2 = \frac{w_0^2 w_{12}^2}{w_0^2 + 2w_{12}^2} \quad (2.23)$$

ここで W と J はそれぞれポンプ光のレーザー、プローブ光の XFEL のパルスエネルギーである。真空回折の角度分布は定数項 \times 規格化されたガウシアンで表すことが出来る。シグナル量はプローブ光のエネルギーの2乗に比例する。これは 2.4.1 章で述べたように微細な構造の影響の受けやすさがプローブ光の波長に依存するためである。またシグナル量はプローブ光のパルスエネルギー、ポンプ光のパルスエネルギーの2乗に比例する。これはダイアグラムとしてプローブ光1光子とポンプ光2光子の相互作用を考えているためである。ポンプ光とプローブ光のサイズが小さくなるとシグナル量は増加する。ただしプローブ光の大きさはポンプ光の半分程度になると、それ以上小さくなくてもシグナル量はあまり増加しない。シグナルの運動量変化、すなわち角度発散の大きさはプローブ光のエネルギー及びプローブ光とポンプ光のサイズが小さくなると増大する。ポンプ光に比べプローブ光の大きさが大きい場合、角度発散の大きさは大まかにポンプ光サイズに反比例する。これは 2.4.3 章で述べたように、電磁場同士が相互作用する空間の大きさに反比例して角度発散の大きさが決まることに対応する。

2.5 実験セットアップ概略

2.4.4 章の議論から、大きな角度発散のシグナルを得るには特にポンプ光のレーザーを小さく集光することが重要であることがわかった。そのため本実験ではレーザーを小さく集光する。プローブ光もまた小さく集光することでシグナルの角度発散が大きくなるが、その依存性はポンプ光より小さい。さらにプローブ光を小さく絞るとプローブ光自身の角度発散も大きくなり、シグナルとの分離が難しくなる。その上ポンプ光とプローブ光が双方とも小さいと、それらを衝突させる精度の要求が非常に厳しくなる。そのためプローブ光の XFEL はレーザーサイズより大きくなるようにする。図 2.12 に実験セットアップの概略図を示す。レーザーを集光し、集光点で XFEL と衝突させる。XFEL はレーザーより大きいサイズに集光する。レーザーを集光するミラーには数ミリの穴が開いているものを使用する。XFEL はこの穴を通過する。真空回折した光も微小角しか回折しないため、この穴を通過することが出来る。回折した光は下流に設置したスリットによって反応しなかった XFEL と切り分ける。このとき $30 \mu\text{rad}$ 程度広がって出てきた回折光を切り出す。切り出す角度は真空回折した光の角度発散の大きさ、スリットの設置精度、BG の抑制の大きさ等から決定する。最終的にシグナルの回折光は光検出器で検出する。

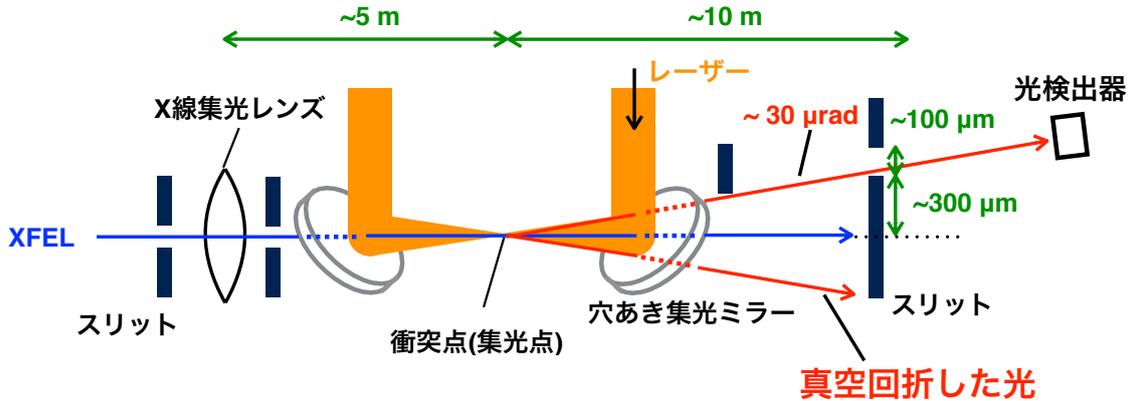


図 2.12: セットアップの概略図

2.5.1 レーザーと XFEL の集光サイズと角度発散

レーザーと XFEL の集光サイズの目標値と角度発散の大きさについて表 2.1 にまとめる。本実験では SACLA の XFEL を使用しているが、SACLA では XFEL のビームウエストを $1 \mu\text{m}$ まで容易に集光することができるため、XFEL の集光サイズに関する技術的な問題点はない。高強度レーザーの開発、集光はそれ自体が研究対象となっている。あるアメリカのグループが開発を行ったレーザーは 300 TW という高強度レーザーであり、さらにそのレーザーのビームウエスト $1 \mu\text{m}$ 集光を達成した [9]。そのためこの大きさをレーザーの集光サイズの目標値とした。SACLA に導入されている高強度レーザーを集光する study はあまり行われていないが、市販の集光ミラーのみを用いて $10 \mu\text{m}$ 程度まで集光できることが確認されている。そのため実験の初段階として集光サイズの目標値を $10 \mu\text{m}$ とする。

これらの大きさは集光をすること自体の目標であるとともに、このような小さなサイズのパルス同士を衝突させるアライメント技術の目標でもある。

表 2.1: レーザーと XFEL の集光サイズの目標値と角度発散

	レーザーのビームウエスト	XFEL のビームウエスト	角度発散 (1σ)
将来	$1 \mu\text{m}$	$2 \mu\text{m}$	$30 \mu\text{rad}$
現在	$10 \mu\text{m}$	$20 \mu\text{m}$	$3 \mu\text{rad}$

2.5.2 スリットの役割

本実験ではレーザーを集光してシグナルに大きな角度発散を持たせるほかに、このシグナル光をもとのプローブ光の XFEL と分離することが重要になる。プローブ光の角度発散は大きく、下流のスリットで開口を作るだけでは BG となるプローブ光とシグナル光を分離することは難しい。そ

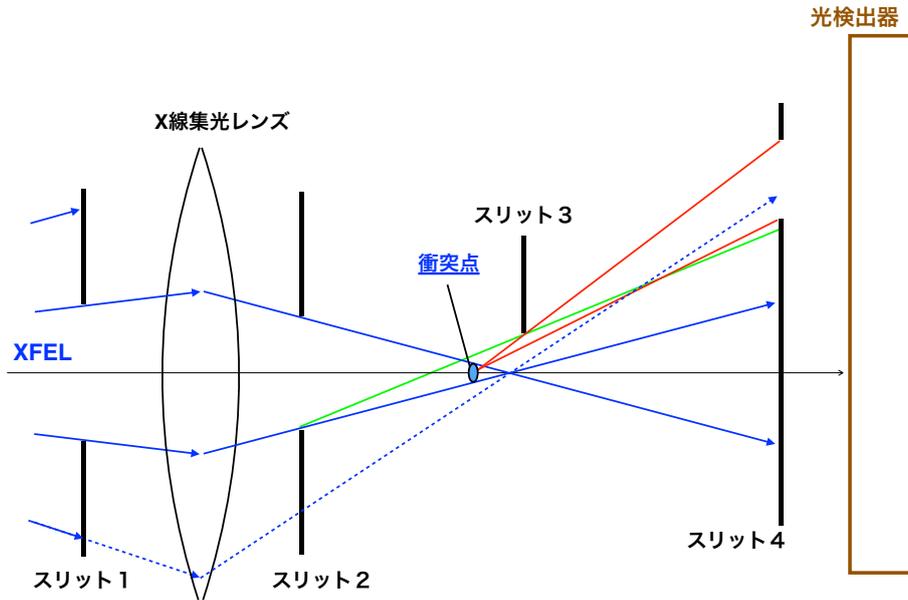


図 2.13: スリットによる XFEL ビームの角度発散の抑制と BG のカット。破線で表される、衝突点で大角度を持ちうる X 線は上流のスリットでカットされる。スリット 3 は緑の補助線で示されるようにスリット 2 の先端からの散乱光等を遮断する。

のため衝突点上流のスリットを調整してプローブ光を成形し角度発散を抑える。図 2.13 に XFEL ビームを成形するスリット系を示す。スリット 4 による開口は光軸を中心とした円形ではなくある方向に四角い開口を作っているもので、図 2.13 では縦方向に開口を作っている。そのため XFEL ビームの縦方向の角度発散を抑える必要がある。衝突点の上流側にスリットを設置し、破線で表されるような衝突点で大角度を持ちうる XFEL ビームを予めカットする。今回の実験で組んだスリット系の実際の寸法は図 3.25 で示す。

図 2.14 に衝突点でのシグナルと XFEL の角度発散の分布を示した。赤がシグナルの角度発散分布で、レーザーのビームウエスト $1 \mu\text{m}$ 、XFEL のビームウエスト $2 \mu\text{m}$ を仮定した際の角度発散の大きさである。青が XFEL の角度発散分布の計算値で、角度発散の大きさとして本実験時の値を使用した。破線はスリット未設置時の XFEL の角度発散である。スリットの設置により XFEL の角度発散を抑えることが出来る。実際にはシグナルの量は非常に少なく、本実験では 0BG での測定が必要となる。XFEL 1 pulse あたりの光子数は $\sim 10^{11}$ photon 程度であるため、スリットによる角度発散の抑制の効果は 10 桁以上必要となる。スリットによる角度発散の抑制を十分行うことが出来れば、スリットの開口を通過するのはシグナルの回折光のみとなる。

スリットにはプローブ光の角度発散を抑える他に BG を抑制する役割がある。図 2.13 のスリット 3 は散乱光等がスリット 4 の開口を通過しないようにする。緑線の補助線で表されるように、スリット 2 下の刃の先端での散乱光や X 線集光レンズからの散乱光等はスリット 3 に阻まれてスリット 4 を通過することはできない。

以上のように本実験においてスリットの役割は様々なものがある。そのためスリット幅の調整は実験に重要な要素となる。最後にスリットの役割を以下にまとめる。

1. シグナル光の切り出し
2. XFEL の角度発散を抑えることによる BG の抑制
3. 散乱光などの BG の抑制
4. XFEL ビームサイズの調整

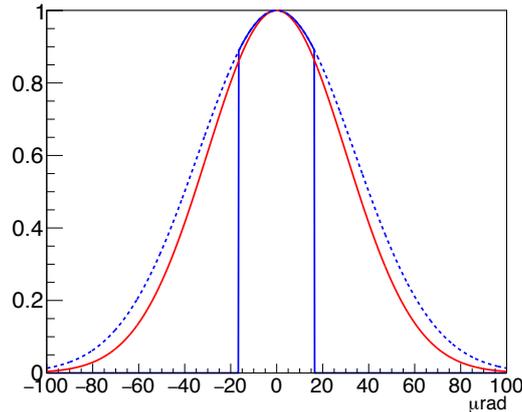


図 2.14: 衝突点でのシグナルと XFEL の角度発散の計算値。赤がシグナルの角度発散分布で、レーザーのビームウエスト $1 \mu\text{m}$ 、XFEL のビームウエスト $2 \mu\text{m}$ を仮定した。青が XFEL の角度発散分布の計算値で、角度発散の大きさは本実験時のものとした。破線はスリット未設置時の XFEL の角度発散である。スリットの効果で角度発散が抑えられる。

2.6 SACLA の高強度レーザーシステムと信号強度

SACLA は兵庫県播磨にある XFEL 施設であり、XFEL に同期した高強度レーザーシステムを有する。これを用いて高強度レーザーと XFEL を組み合わせたポンププローブ実験を行うことが出来る。現在は 2.5 TW のパルスレーザーが利用可能で、本実験ではこのレーザーを使用した。真空回折現象の観測にはさらに強いパワーのレーザーが必要である。SACLA では現在 500 TW のレーザーをインストール中であり、パルスエネルギーは 2.5 TW レーザーのおよそ 150 倍である。真空回折のシグナル量はポンプ光のパルスエネルギーの 2 乗に比例するため、 2.5 TW よりも 4 桁以上のゲインが見込まれる。

表 2.2 に予想される信号強度の概算値をまとめる。XFEL は 10 keV 、レーザーと XFEL は中心がずれることなく正面衝突したとし、光検出器の前のスリット 4 の開口は XFEL 光軸に対して衝突点からみて $30 \sim 50 \mu\text{rad}$ の位置を仮定した。ビームタイムはおよそ 3 日程度で半分の時間でアライメントを行うとする。 $1.5 \text{ 日} \times 1 \text{ Hz} = 1.3 \times 10^5 \text{ pulse}$ であるため、 500 TW レーザーを用いると有意なシグナル量を期待出来る。将来計画ではこのレーザーを用いて真空回折現象の観測を行う予定である。将来計画の詳細は 5.3 章で詳しく述べる。 2.5 TW レーザーは 500 TW レーザーと同じフェムト秒レーザーであり、今回の実験では観測に必要な様々な技術、手法の確立のため 2.5 TW レーザーを用いて実験を行った。

表 2.2: 信号強度の概算値

レーザー	繰り返しレート	レーザーサイズ (2σ)	XFEL サイズ (2σ)	信号強度
2.5 TW	10 Hz	10 μm	20 μm	10^{-27} photons/pulse
2.5 TW	10 Hz	1 μm	2 μm	10^{-8} photons/pulse
500 TW	1 Hz	1 μm	2 μm	10^{-4} photons/pulse

第3章 実験装置

2016年11月に兵庫県播磨にあるX線自由電子レーザー施設SACLAにて真空回折実験を行った。図3.1に実験セットアップの全体図を示す。XFEL上流側から、光学ハッチ(OH)、実験ハッチ1,2,3,4c(EH1,2,3,4c)とハッチが並んでいる。OHではXFELビームのショットごとの強度やポインティングを計測している。EH1ではXFELとレーザーとのジッターをショットごとに計測している。EH2ではX線集光レンズ(ベリリウムレンズ)によってX線を集光し、真空チャンバの中でレーザーとXFELを衝突させている。回折して広がって出てきたシグナルのX線はスリット3,4によって切り出され、EH4cに設置したPDで検出する。スリット2からスリット4の間は真空接続しているため、物質によるX線の散乱の影響をなくしている。

SACLAには実験ハッチとは独立してレーザーハッチ(LH)があり、XFELに同期した高強度レーザーシステムがインストールされている。本実験では現在利用可能な2.5 TWレーザーを使用した。真空回折現象の観測にはさらに強いパワーのレーザーが必要である。2.5 TWレーザーは現在インストール中の500 TWレーザーと同じフェムト秒レーザーであり、今回の実験では観測に必要な様々な技術、手法の確立のため2.5 TWレーザーを用いて実験を行った。

この章では個々の実験装置及び測定システムについて説明し、最後にスリット系の調整と予想されるバックグラウンドについて述べる。

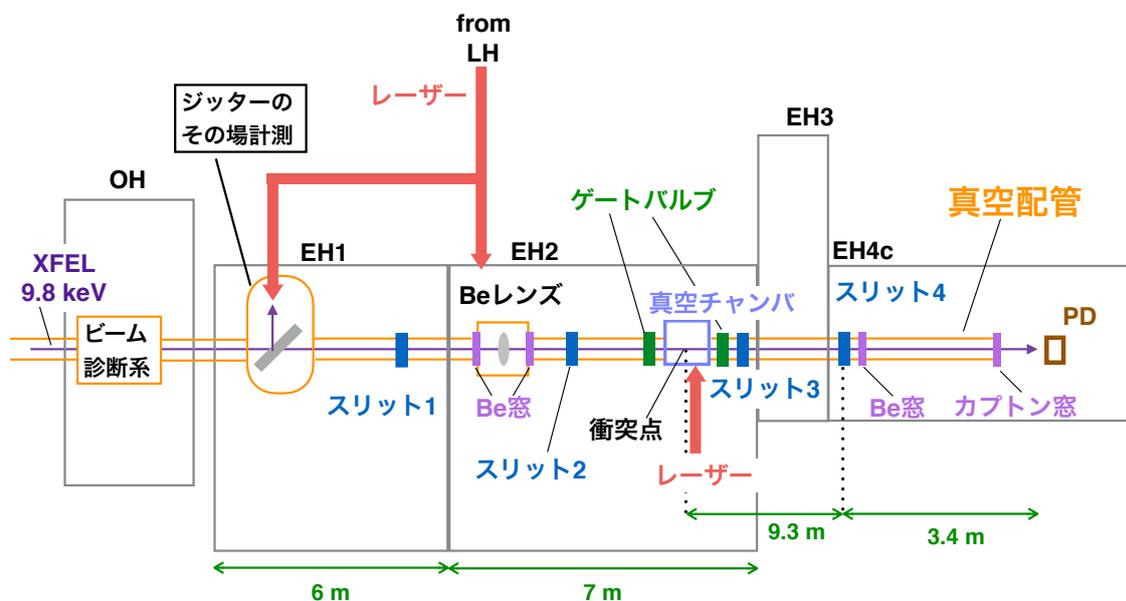


図 3.1: 実験セットアップ: 全体図

3.1 X線自由電子レーザー

X線自由電子レーザー (X-ray Free Electron Laser、以下 XFEL) は X 線領域の高輝度な光を発振するための装置である。その構成は主に電子ビームと、それを入射させるアンジュレータ部に分かれる。アンジュレータは図 3.2 のように磁石を並べることで周期磁場を作っており、これに入射した電子ビームは蛇行運動をする。この際電子は各周期ごとに光を放出し、アンジュレータではこの光の電場の振幅が積算されていくためコヒーレントな高強度の光を得ることが出来る。

SACLA は理化学研究所と高輝度光科学研究センターによって共同で建設された、兵庫県にある XFEL 施設であり現在 3 本のビームラインが稼働している。そのうち bl3 は硬 X 線 FEL であり、本実験ではこのビームラインを使用した。表 3.1 に SACLA の XFEL(bl3) のパラメータをまとめる [5]。

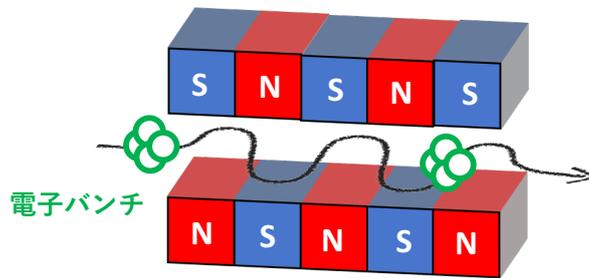


図 3.2: アンジュレータの概略図

表 3.1: SACLA の XFEL パラメータ (bl3)

電子ビームパラメータ	電子ビームエネルギー	5.1-8.5 GeV
	繰り返しレート	30Hz
X 線ビームパラメータ	光子エネルギー	4.0-29 keV
	パルスエネルギー	~0.5 mJ at 10 keV
	パルス幅	2-10 fs
	角度発散	0.8 μ rad

3.1.1 光子エネルギー

XFEL のエネルギー分布を測定するため、OH 内の二結晶分光器 (Double-Crystal Monochromator、以下 DCM) でスキャンを行った。DCM は鏡面研磨加工されたシリコン (111) 結晶であり、ブランク反射を利用して X 線を分光する。DCM を通過する光のエネルギー幅は $\Delta E/E = 10^{-4}$ 程度なので、本実験でのエネルギー $E = 9.8$ keV では 1 eV 程度の分解能で XFEL 中の特定の波長の X 線を切り出すことが出来る。

これにより得られた XFEL のエネルギー分布が図 3.3 である。縦軸は測定に用いた PD の電圧である。中心エネルギーは 9805 eV で、これをガウシアンで Fit することで得たエネルギー幅は 42 eV(FWHM) である。

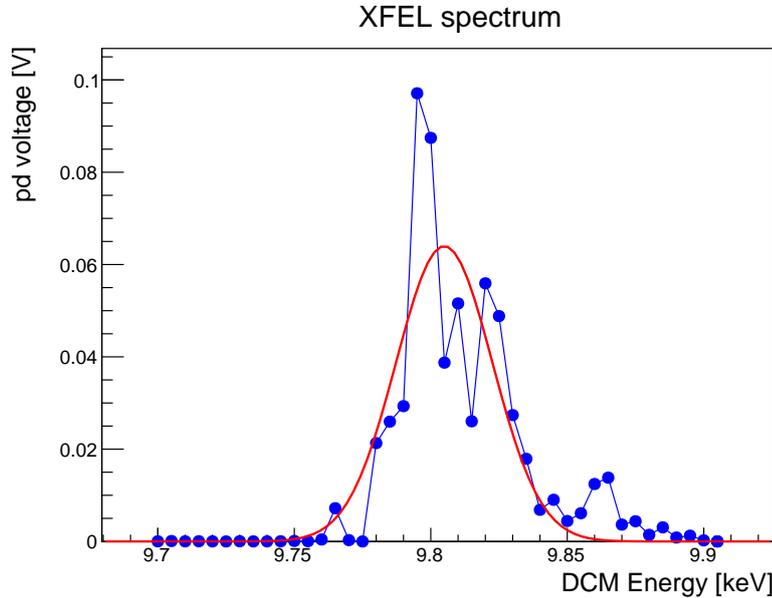


図 3.3: XFEL のエネルギー分布。中心エネルギーは 9805 eV で、エネルギー幅は 42 eV(FWHM) である。

3.1.2 XFEL のサイズ測定 (Be レンズ手前)

XFEL のサイズは発振エネルギーによって異なるため、Be レンズの 1.4 m 上流側に設置されたスリット 1 でナイフエッジスキャンを行った。ナイフエッジスキャンとはビームの強度変化をモニターしながら少しずつスリットを動かしていくスキャンのことである。ビームがガウシアンビームの場合、横軸をスリットの変化量、縦軸をビーム強度にとるとグラフはエラー関数となる。この測定では EH2 の真空チャンバの 1 m 程度下流に PD を設置してビーム強度をモニターした。測定結果のグラフを図 3.4 と図 3.5 に示す。XFEL のパルスエネルギーはショットごとに 30% 程度のふらつきがあるため、PD の出力は各ショットごとに OH のビームモニターの値で割ることで強度を補正してある。またパルスエネルギーの低いショットは空間分布が不安定であるため、3.1.3 章で述べるビームモニタの電荷量 < 6.8 nC のカットをかけエネルギーの低いショットは解析には用いない。本実験で行ったスキャンでは各点 30pulse データ取得を行い、その平均値のエラーを各点のエラーとした。

得られたグラフをエラー関数 + 定数で Fit した結果を表 3.2 にまとめる。各測定間の差は、XFEL のショットごとのポインティングのゆらぎや大きさのゆらぎに起因する。これらのゆらぎは本測定時に計測を行った。詳しくは 4.2.2 章で述べる。Fit 結果のパラメータを平均すると、XFEL ビー

μのサイズの測定結果は以下になった。エラーは各測定結果のばらつきの不偏分散を評価した。

$$\text{XFEL ビームサイズ (FWHM) 縦 } 354.8 \pm 7.1 \mu\text{m} \quad (3.1)$$

$$\text{横 } 415 \pm 20 \mu\text{m} \quad (3.2)$$

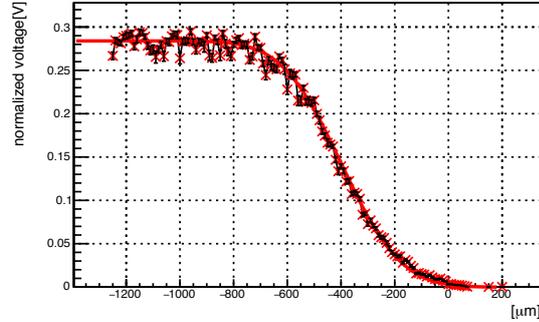
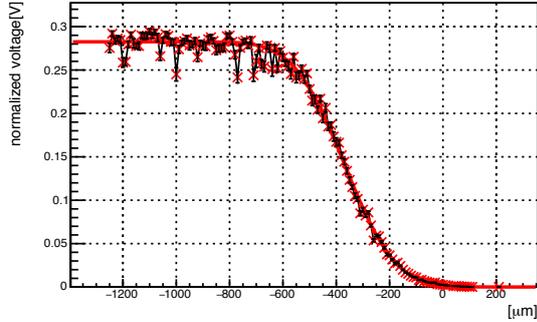


図 3.4: スリット 1 上の刃での縦方向のナイフ エッジスキャン
 図 3.5: スリット 1 右の刃での横方向のナイフ エッジスキャン

表 3.2: スリット 1 のナイフエッジスキャン結果

刃	FWHM [μm]	平均ショット数 [pls]	測定ステップ [μm]
上	351.6 ± 1.4	30	10
上	354.6 ± 1.4	30	10
下	364.5 ± 3.2	30	50
下	348.3 ± 1.4	30	10
右	436.8 ± 5.3	30	50
右	410.4 ± 1.3	30	10
左	397.3 ± 4.7	30	50

3.1.3 XFEL 診断系

先にも述べたように、SACLA の OH 内では XFEL のショットごとのパラメータを計測している [6]。図 3.6 に XFEL 診断系のそれぞれの検出システムの配置を示す。強度や中心波長など様々なパラメータを計測してるが、その中の本実験で重要な以下の 2 つについて詳しく述べる。

- ビームモニター
XFEL の強度、位置のモニターを行う。
- スクリーンモニター
XFEL の強度、空間強度分布をモニターする。

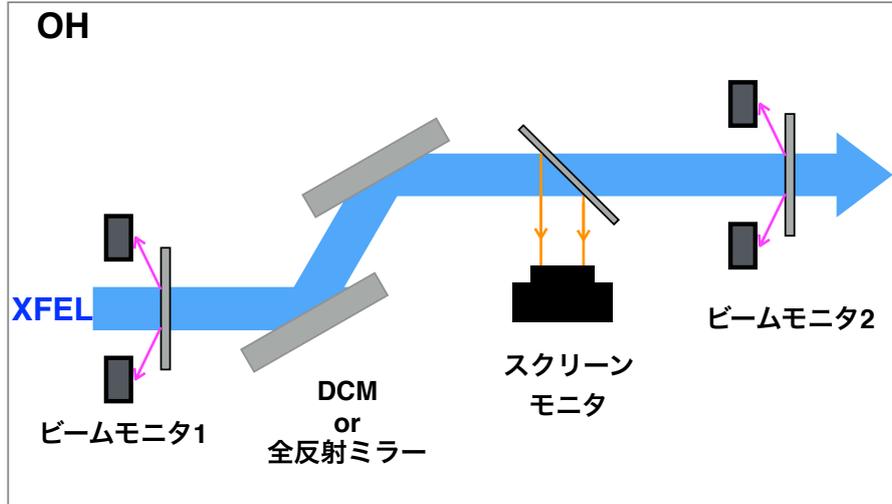


図 3.6: XFEL 診断系の各検出システムの配置。本測定時には全反射ミラーを使用する。

ビームモニタ

図 3.7 に示すように、ビームモニタは XFEL 光軸を中心として上下左右に配置された 4 つの PD のによって構成される。光軸上には厚さ $15 \mu\text{m}$ 程度のダイヤモンド薄膜が置かれ、これからの後方散乱 X 線を 4 つの PD によって検出することで XFEL の強度を測定する [7]。上下左右の PD からの出力を I_U, I_D, I_L, I_R とすると、ビーム強度 I_0 はこれらの合計に比例する。ビームモニタは光軸上に 2 つ設置されており、この 2 つの出力の比のばらつきは 2% 程度である。そのためこの程度の精度で XFEL 強度をモニターすることが出来る。

$$I_0 \propto I_U + I_D + I_L + I_R \quad (3.3)$$

また水平方向と鉛直方向の X 線の重心位置の変化は以下のような関係が成り立ち、これによりビームモニタで XFEL のポインティングのゆらぎを計測することが出来る。

$$\Delta x \propto \frac{I_L - I_R}{I_L + I_R} \quad (3.4)$$

$$\Delta y \propto \frac{I_U - I_D}{I_U + I_D} \quad (3.5)$$

実際の変動量へ焼き直すためには、次に述べるスクリーンモニター等での較正が必要である。ビームモニタの出力データは常時保存しているため、ビームタイム中の全てのショットの強度・位置のモニターが可能である。XFEL の減衰率は 1% 程度である。なお本実験ではビームモニタは XFEL の強度のモニターに使用した。

図 3.8 にビームモニタ 2 で検出された電荷量の 10 万イベント分を示す。XFEL はパルスエネルギーが低いときの空間プロファイルが不安定なため、本実験を通してこれを除くカットをかけた。図 3.8 の緑線の右側の領域の、ビームモニタ 2 の電荷量が 6.8 nC 以上のイベントのみ使用した。このカットで 2% 弱のイベントをカットしている。

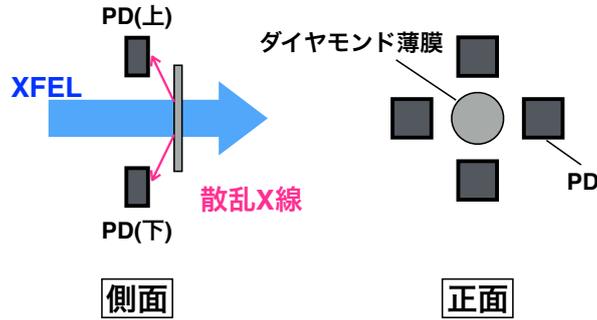


図 3.7: ビームモニタの模式図

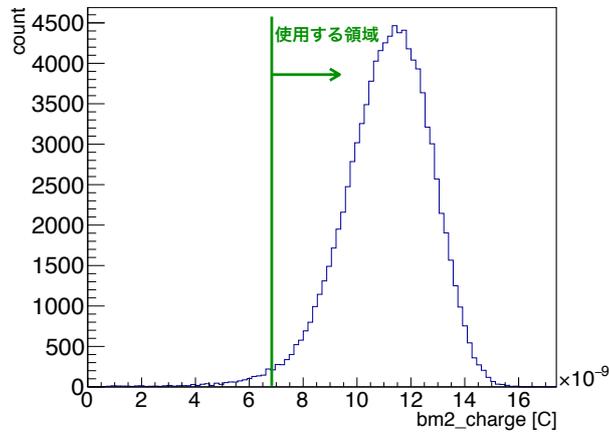


図 3.8: ビームモニタ 2 の電荷量。6.8 nC 以上のイベントのみ使用した。

スクリーンモニタ

図 3.9 にスクリーンモニタの模式図を示す。ホウ素ドープダイヤモンド薄膜を XFEL に対して傾けて挿入させ、蛍光 X 線を CCD カメラでモニターする。図 3.10 に実際に CCD カメラで測定された XFEL の空間強度分布を示す。これにより、XFEL パルスの空間強度分布と位置のふらつきをショットごとに計測することが出来る。XFEL の減衰率は 5% 程度以下である。なお、本実験では CCD カメラの pixel 数と実際の長さの較正を 4.2.2 章で述べる方法で較正している。

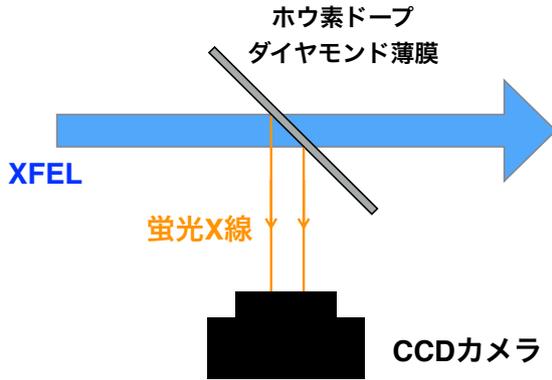


図 3.9: スクリーンモニタの模式図

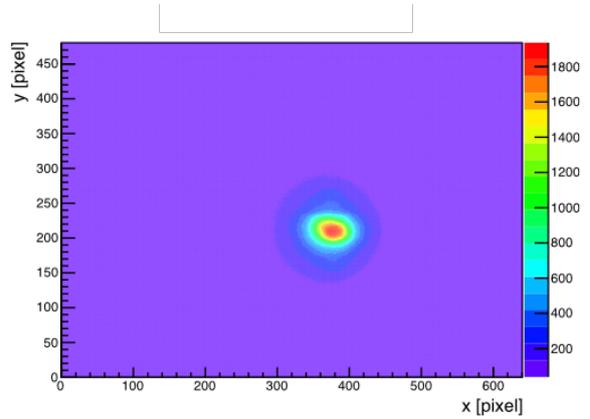


図 3.10: スクリーンモニタで観測した XFEL の空間強度分布

3.2 X線集光レンズ

EH2にはX線集光レンズとしてベリリウム製のレンズが導入されている。図 3.11 に Be レンズの模式図を示した。曲率半径が $200\mu\text{m}$ と $500\mu\text{m}$ の 2 種類のレンズがあり、数枚ごとのユニットになっている。このユニットを組み合わせることで任意の枚数のレンズを挿入することが出来る。レンズ 1 枚の厚さは $400\mu\text{m}$ 程度である。なお X 線の屈折率は 1 より小さいため、レンズは凹レンズである。

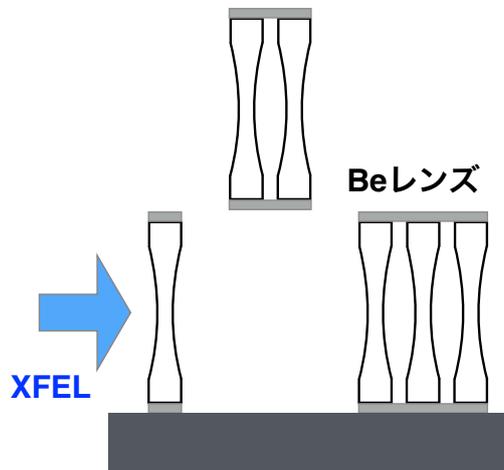


図 3.11: Be レンズの模式図

3.2.1 Be レンズによる集光調整

衝突点での XFEL サイズを調整するために、Be レンズの枚数毎の衝突点での XFEL サイズを測定した。測定は衝突点で縦方向のワイヤースキャンを行った。ワイヤースキャンはナイフエツ

ジスキャンと同様の測定で、スリットの代わりにワイヤーを用いる。今回の測定では直径 $200\ \mu\text{m}$ の金ワイヤーを使用した。金ワイヤーに熱損傷が起きないようにするため、XFEL ビームはシリコン $0.1\ \text{mm}$ でアテネーションした (透過率 45%)。

Be レンズの枚数 n に対する集光サイズの結果が図 3.13 である。 n は曲率半径 $200\ \mu\text{m}$ の Be レンズの枚数である。Be レンズは曲率半径が $200\ \mu\text{m}$ と $500\ \mu\text{m}$ のものがあるが、 $500\ \mu\text{m}$ のレンズは $200\ \mu\text{m}$ のレンズ $2/5$ 枚分として計算した。結果を以下の関数で Fit した。

$$w(n) = \sqrt{w_0^2 + \left(\frac{z}{q}\right)^2 (w'^2 - w_0^2)^2} \quad (3.6)$$

$$w_0 = w_{0\text{at}2.5\text{m}} \times \frac{q}{2.5} \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{f_{\text{unit}}/n} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (3.8)$$

主な各パラメータは図 3.12 に図示した。 $w(n)$ は衝突点での gaussian ビームのビーム径の FWHM、 w_0 は集光時の FWHM とした。 z は集光点から衝突点までの距離である。 q は Be レンズから集光点までの距離であり、Be レンズから衝突点までの距離が $4.36\ \text{m}$ であったので $z = q - 4.36\ \text{m}$ となる。 $w_{0\text{at}2.5\text{m}}$ は $q = 2.5\ \text{m}$ のときのビームウエストであり、SACLA で過去に計測された結果はおおよそ $1\ \mu\text{m}$ 程度である。集光サイズ w_0 は絞る角度に反比例するため、(3.7) 式で q に比例して大きくなるとした。 w' は Be レンズ位置での XFEL の 2σ サイズである。(3.8) 式は薄レンズの公式で、レンズから p だけ離れた点光源からの光が焦点距離 f_{unit}/n のレンズで集光されると距離 q 離れた位置で集光されることを表す。つまり、 p は XFEL の実行的な発光点から Be レンズまでの距離を表す。

Fit 結果から求めた値を表 3.3 にまとめる。 $w_{0\text{at}2.5\text{m}}$ は過去の $1\ \mu\text{m}$ 程度の測定結果と同程度で、 w' も (3.1) 式で得られた結果 2σ 径 = $301 \pm 6\ \mu\text{m}$ とエラーの範囲内で一致する。今実験の Be レンズの枚数は、曲率半径 $200\ \mu\text{m}$ が 5 枚、 $500\ \mu\text{m}$ が 3 枚とした。これは Be レンズ 6.2 枚分に相当する。スリット 1 を設置した際に衝突点でのサイズは縦方向のみ小さくなる。この時の縦方向の XFEL サイズを $20\ \mu\text{m}$ に調整できるように、Be レンズ枚数を決定した。

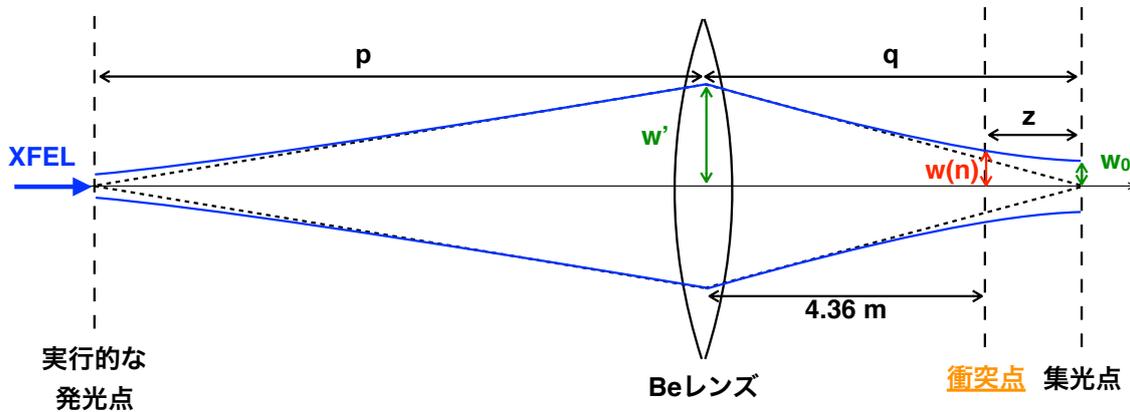


図 3.12: Be レンズの集光調整の各パラメータ

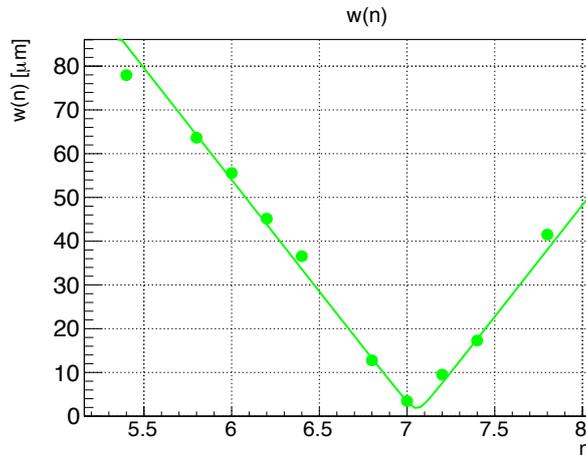


図 3.13: Be レンズの枚数 n に対する衝突点での縦方向の集光サイズ $w(n)$ 。横軸の n は曲率半径 $200 \mu\text{m}$ の Be レンズの枚数、縦軸は FWHM サイズを表す。線は Fit 結果である。

表 3.3: 集光サイズの測定結果から得られた値

項目	値
f_{unit}	29.7 m
$f_{\text{unit}}/6.2$	4.79 m
p	183 m
$w_{0\text{at}2.5\text{m}}$	$0.90 \mu\text{m}$
w'	$299 \mu\text{m}$

3.3 高強度近赤外レーザー

SACLA には XFEL に同期したレーザーシステムが LH 内に導入されており、実験ハッチまで輸送されたレーザーを用いることでポンプ・プローブ実験が可能である。レーザーシステムはチタンサファイヤベースのモード同期オシレータ、チャープパルス増幅器から構成される。チャープパルス増幅器では一度パルス時間幅をのぼしてレーザー増幅を行う。コンプレッサーのみ実験ハッチに設置し、実際にレーザーを使用する手前の位置でコンプレッサーでパルス時間幅をフェムト秒まで圧縮する。これは瞬間強度の強いレーザー光が空气中を長距離伝播することでビームプロファイルが乱れるのを防ぐためである。チャープパルス増幅器での増幅を行うアンプは増幅強度の調整が可能であり、これによりレーザー強度を調整することが出来る。

表 3.4 に同期レーザーの基本パラメータを示す [10]。このレーザーは現在利用可能な 2.5 TW レーザーである。

3.4.1 穴あき軸外し放物面鏡

図 3.15 と図 3.16 に実験で使用した軸外し放物面鏡 (Off Axis Parabola、以下 OAP) の写真を示す。本実験では入射光と反射光の角度が 90° となる OAP (THORLABS 社製 MPD369H-M01) を使用した。理想的な放物面鏡は球面収差がないため、レーザーを小さく集光するのに適している。本実験では XFEL とレーザーを正面衝突させるため XFEL の通り道を確保する必要があり、使用した OAP には中心に直径 3 mm の穴が開いている。ミラー表面には金コーティングがなされている。OAP には角度・位置調整のため 3 並進 3 回転の調整が行える自動ステージ上に設置している。

レーザーの集光前の大きさは FWHM で 35 mm である。レーザーの 2σ の集光サイズ w_0 は、回折限界の場合大まかに以下の式で見積もることが出来る。

$$w_0 = C\lambda \frac{f}{r} \quad (3.9)$$

ここで λ はレーザーの波長、 r は集光素子の直径、 f は集光素子の焦点距離、 C は集光素子の形状で決まる定数で円形開口の場合は 0.61 となる。使用する OAP は焦点距離 15.2 cm、直径 58 mm である。レーザーに比べ OAP は十分大きいので r としてレーザーのサイズを使用すると、集光サイズは $w_0 = 2.5 \mu\text{m}$ となる。しかし実際にはレーザーの波面が乱れていたり、各素子による収差の影響などで回折限界までは集光することが出来ない。これら収差の影響をキャンセルするためには形状可変ミラー等で波面を成形する必要があるが今回は使用しなかった。そのため実際の集光サイズは回折限界よりも大きくなると考えられる。

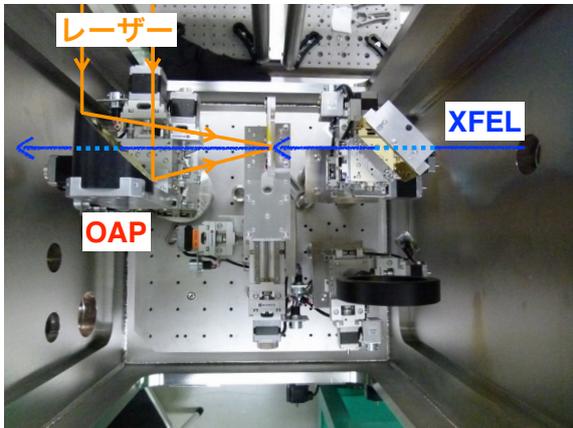


図 3.15: OAP による集光

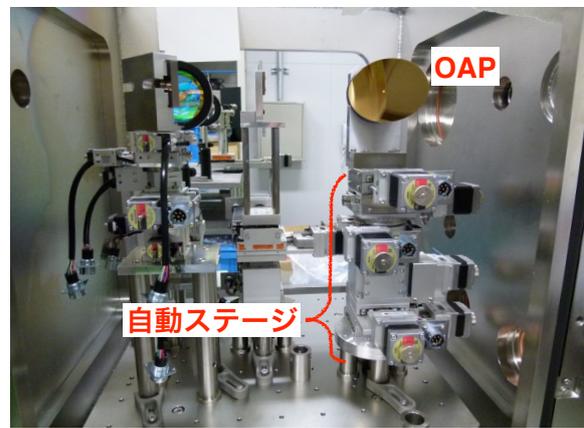


図 3.16: OAP と自動ステージ

3.4.2 CCD カメラとカメラレンズ

レーザーのモニターにはモノクロ画像を取得する CCD カメラ (IMPERX 社製、IPX-VGA-120-LMCN) を使用した。表 3.5 に CCD カメラのスペックをまとめる。図 3.14 に示されているカメラ 1, 2 にはそれぞれレンズが装着されており、カメラ 1 の対物レンズにはシグマ光機社製、ULWZ-200、カメラ 2 の対物レンズには Union 社製、UWZ200 を使用した。最大倍率はそれぞれ 7 倍と

9.8倍である。なおこれらのカメラはレーザーの集光像をモニターするため、レーザーの集光位置にピントを合わせている。ピント合わせの方法は付録 B.1.1 で述べる。

表 3.5: CCD カメラのスペック

ピクセル数	640(縦) × 480(横)
ピクセルサイズ	7.4 μ m
出力	デジタル 12bit

3.5 4象限スリット

4象限スリットは上下左右にタングステン等の数 mm 厚の刃がついており、それぞれ独立に動かすことが出来る。図 3.17 に 4象限スリットの写真を示す。これは ADC 社製 SLT-100 で、スリット 2,3 はこのスリットを使用した。XFEL ビームパイプの途中に接続して使用する。スリット 1 は ADC 社製 SLT-P を使用し、スリット 4 は SACLA のビームラインに常設されているものを使用した。

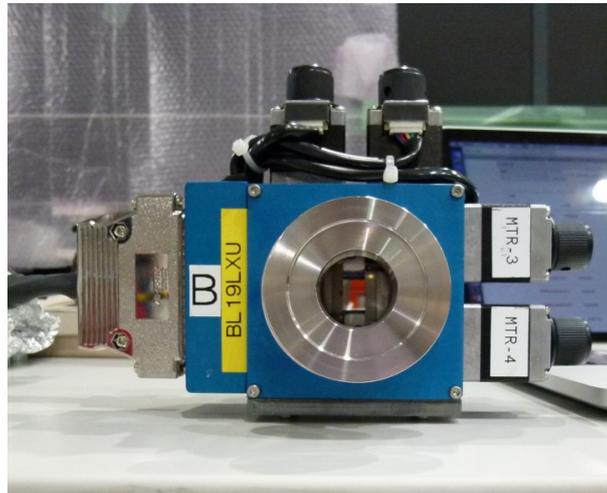


図 3.17: 4象限スリット

3.6 フォトダイオード

X線の測定にはシリコン PIN フォトダイオード (浜松ホトニクス社製、S3590-09) を使用した。9.8 keV の検出効率は 0.90 である。図 3.18 が PD の写真である。PD の受光面の前には厚さ 200 μ m のベリリウム窓があり、実際の検出効率はこれを考慮する必要がある。SACLA の DAQ システムでは PD の出力をショットごとにデータベースに保存する。PD で検出されたチャージはプリアン

プ、メインアンプで処理されたのち 16bitAD コンバーターによってピーク電圧値が記録される。PD で検出された光子数は以下の式で計算を行った。

$$\text{光子数} = V_{\text{peak}} G \frac{e}{W_{\text{Si}} E} \times (\text{検出効率}) \quad (3.10)$$

ここで $V_{\text{peak}}[\text{V}]$ はピーク電圧値、 $G[\text{C/V}]$ はプリアンプ、メインアンプのゲイン、 e は素電荷、 $W_{\text{Si}} = 3.66 \text{ eV}$ は Si が電子正孔対を作るのに必要な平均エネルギー、 $E = 9800 \text{ eV}$ は X 線のエネルギーである。

PD で検出される光子数は、測定したい場所より下流にある物質の影響で実際より少なく見積もられる。表 3.6 に本測定時に衝突点より下流にある物質とその透過率として使用した値をまとめる。これらの透過率で補正した値を実際の光子数として計算を行う。なお透過率の計算には 9.8 keV での光電吸収断面積を使用した。

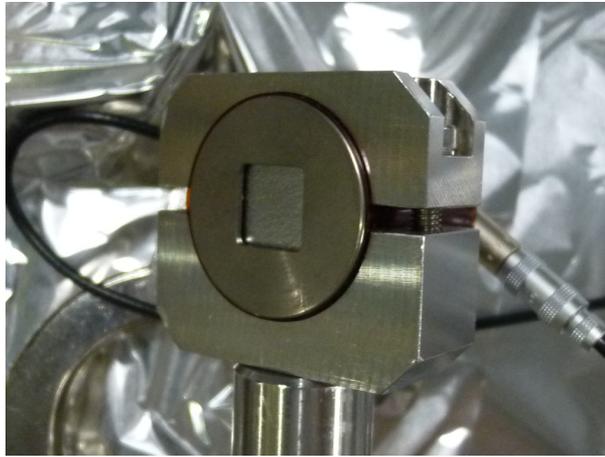


図 3.18: フォトダイオード (Be 窓あり)。受光面の前に 200 μm 厚の Be 製の窓が付いている。

表 3.6: 衝突点下流の物質と透過率

名目	物質	厚み	透過率
ベリリウム窓	ベリリウム	計 800 μm	0.935
カプトン窓	$\text{C}_{22}\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_5$	50 μm	0.978
大気	N1.562 O0.42 C0.0003 Ar0.0094	7.5 cm	0.955
PD のベリリウム窓	ベリリウム	200 μm	0.983

3.7 GaAs 薄膜及びレーザーと XFEL のタイミング調整法

XFEL とレーザーは、レーザーの集光点で衝突させる。このため XFEL とレーザーの時間的なアライメントを行う必要があり、これに GaAs 薄膜を用いる。GaAs 薄膜に入射したレーザーの透過光量をモニターすることでタイミングを合わせることが出来る。図 3.19 にタイミング合わせの模式図を示す。GaAs 薄膜に対して XFEL を入射させると、GaAs の原子の一部の電子が励起されフリーキャリアが生成される。その結果 GaAs の誘電率が変化する。誘電率の変化は GaAs 薄膜の透明度に影響を与える。フリーキャリアが生成されている状態はプラズマに近い状態である。光はプラズマを透過することは出来ないので、XFEL が照射された瞬間は GaAs 薄膜の透明度が減少することになる。フリーキャリアの生成は数百 fs の時間スケールで起きるため、その程度の時間以内にレーザーと XFEL が GaAs 薄膜に同時入射すると、レーザーが GaAs 薄膜を透過する光量が通常時より減少する。GaAs 薄膜を衝突点に設置して XFEL とレーザーを照射し、レーザーの透過光を CCD カメラでモニターする。そしてレーザーに光学遅延をかけていくことでレーザーの透過率が減少したタイミング、すなわち XFEL とレーザーが同時入射したタイミングを探し当てることが出来る。透過率の減少量は最大で半分程度で、これは XFEL の強度に依存する。実際に測定された CCD カメラ画像や測定結果については 4.4 章にて示す。

図 3.20 に GaAs 薄膜の写真を示す。GaAs 薄膜は $5\ \mu\text{m}$ 厚で、 $500\ \mu\text{m}$ の石英基板上に薄膜が形成されている。XFEL を照射する側が GaAs 薄膜となるように使用する。レーザーは石英基板を透過してから GaAs 面に入射するため、合わせたタイミングは石英基板による遅延を補正する必要がある。

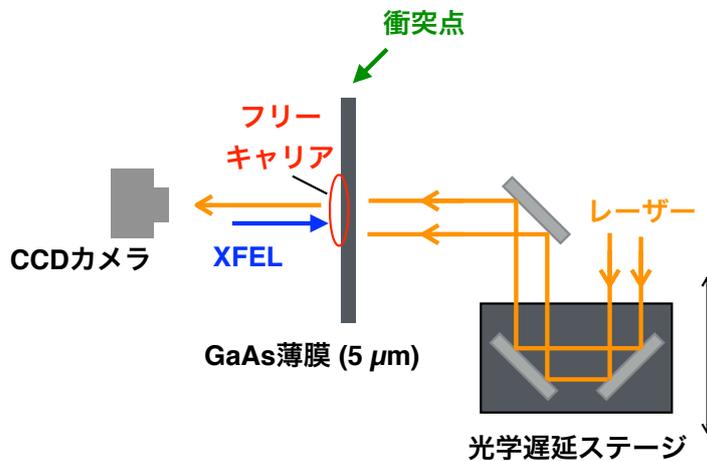


図 3.19: タイミング合わせの模式図

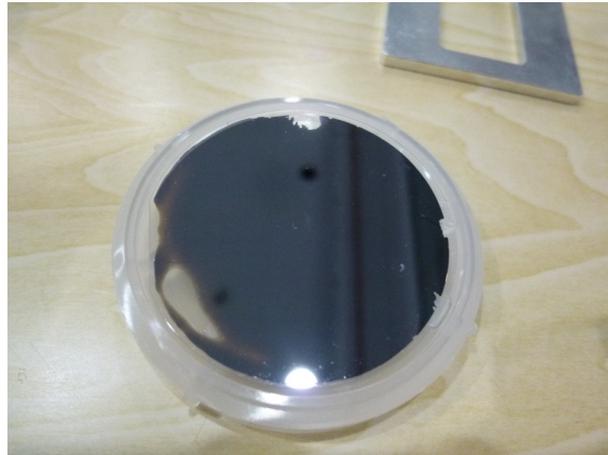


図 3.20: GaAs 薄膜

3.8 XFEL とレーザーのジッター測定システム

EH1 には XFEL とレーザーのジッター測定システムが導入されていて、ショットごとの XFEL とレーザーの時間差を計測することが出来る [8]。用いる物理過程は 3.7 章で述べたものである。

図 3.21 にジッター計測システムの模式図を示す。サファイヤ 500 μm 厚の基板に 5 μm の GaAs 薄膜が形成されている。レーザーは GaAs 薄膜に対して垂直に入射し、その透過率が CCD カメラによりモニターされている。SACLA のビームモニターのパラメータでは XFEL とレーザーが同時入射したタイミングで、レーザーの透過率が半分程度減少する。XFEL は GaAs 薄膜に対して斜めに入射しているため、GaAs 薄膜の場所により照射タイミングが変わる。

レーザーの透過率の変化はタイミングモニタ画像図 3.22 によって観測される。画像の左側から先に XFEL が照射される。レーザーと XFEL は共に横長に集光した後に GaAs 薄膜に照射されており、右半分の一部でレーザーの透過量が減少している。XFEL 非照射時のレーザー光量で規格化を行い、透過率の変化を表したのが図 3.23 である。透過率が減少してエッジが出来ていることがわかる。XFEL とレーザーのタイミングがジッターにより変化すると、このタイミングエッジの位置が変化する。タイミングエッジの位置をみることで、XFEL とレーザーのジッターをショットごとにモニターすることが可能となる。XFEL とレーザーの典型的なジッターの大きさは 300 fs 程度である。CCD カメラの横方向は 1920 pixel で、較正は 2.6 fs/pixel で設計され運用されている。なお本実験時はレーザーの発振系の不調によりレーザーの照射タイミングのドリフトが大きく、XFEL との相対的な時間差が大きく揺らいでいた。この影響で CCD カメラの正確な較正をすることが出来なかったため、較正係数を設計値の 2.6 fs/pixel とした。タイミングモニタの解析方法については付録 B.2 で詳しく述べる。

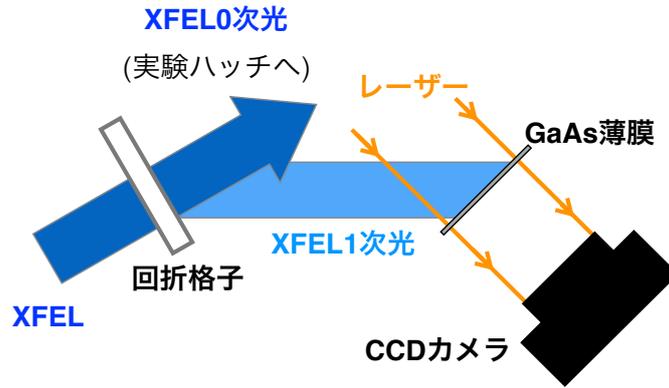


図 3.21: ジッター計測システムの模式図

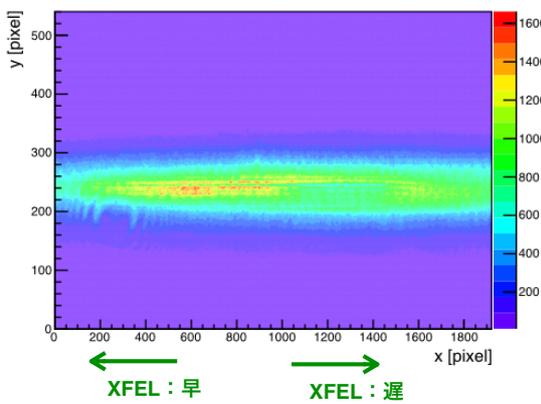


図 3.22: タイミングモニタ画像

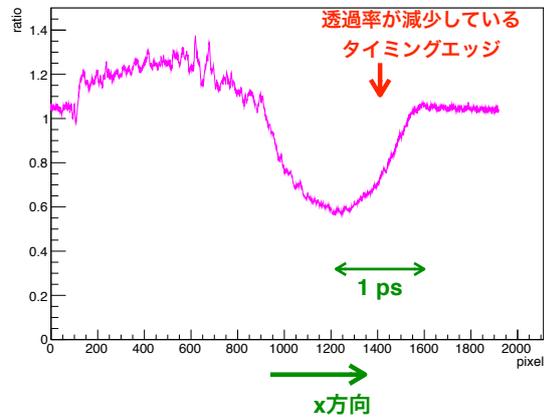


図 3.23: タイミングモニタのレーザー透過率

3.9 レーザー顕微鏡

XFEL とレーザーの位置合わせは、衝突点に設置した金属薄膜にレーザーでくぼみをつくり、直後に XFEL で穴を開け、両者の位置を比較することで行った。両者の位置を比較するにはレーザーのくぼみの中心を決定する必要がある、これにはくぼみを 3D で観察する必要がある。そのためレーザー顕微鏡 (KEYENCE 社製 VK-X200/210) を使用して金属薄膜の表面形状を観察した。これは東京大学物理学専攻の共通機器のレーザー顕微鏡である。レーザー顕微鏡の模式図を図 3.24 に示す。レーザー顕微鏡は照明としてレーザー光を用いており、内部では共焦点光学系が組まれている。平行光であるレーザー光はサンプルに照射される際に強く集光される。サンプルからの反射光はハーフミラーを通過し光検出器に入射する。光検出器の手前にはピンホールが置かれており、サンプルから反射されたレーザー光は照射時と同じ経路を戻ったときのみピンホール位置 (共焦点) に集光される。つまりこの光学系では、サンプルに照射されたレーザー光の集光点以外からの光はピンホールでカットされるため焦点位置のみの情報が得られる。そのため共焦点光学系は光軸方向に分解能をもち、サンプル位置を上下させながら光量変化をみるスキャンを行うことでサンプル上のある 1 点の高さ情報を知ることが出来る。これを水平面方向の各点で行

うことで、最終的にサンプル表面の3次元情報を取得することが出来る。

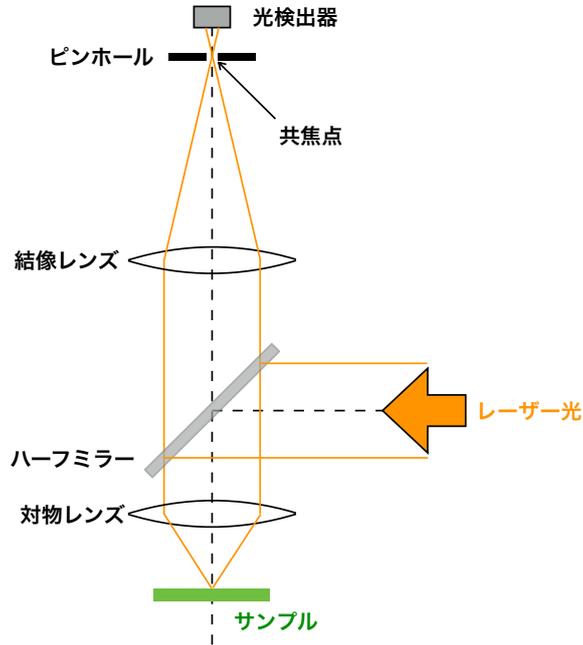


図 3.24: レーザー顕微鏡の模式図

3.10 スリット系の調整とバックグラウンド

真空回折現象の運動量分布はレーザーサイズに強く依存し、小さな集光サイズは大きな角度発散を作る。プローブ光のXFELも小さいサイズであるとシグナルの角度発散は大きくなるが、その依存性はレーザーに比べ小さい。また衝突の困難さも増す。そのため本実験ではレーザーを出来るだけ集光し、プローブ光はその集光サイズの倍程度の大きさにすることとした。またスリットによるシグナルの切り出しは縦方向1次元のみとした。そのため、プローブ光の縦幅がレーザーサイズの2倍程度になるようにした。

3.11 スリット系の調整

図 3.25 に各スリットの位置関係を示す。スリットの役割は以下の4つであった。

1. シグナル光の切り出し
2. XFEL の角度発散を抑えることによる BG の抑制
3. 散乱光などの BG の抑制
4. XFEL ビームサイズの調整

あるシグナルのパスを全て切ってしまう可能性がある。スリット3の設置精度でも十分シグナルのパスを確保できるようにするためには、スリット4の開口位置を外側にセットすれば良い。これによってスリット4の下の刃の角度は衝突点から $28 \mu\text{rad}$ 程度と決定した。スリット3の位置は黄緑線から自動的に決まるが、この位置で確かにBGが抑えられていることを確認した。これについて詳しくは4.3.3章で述べる。

XFELの横方向サイズはスリットの影響を受けないため、Beレンズの枚数からFWHMで $50 \mu\text{m}$ 程度と予想される。

3.11.1 バックグラウンド

複数スリット系は、レイリー散乱やコンプトン散乱等の散乱過程によるBGをカットするよう設計を行った。X線を用いて真空回折実験を行うと、回折角が小さい分アクセプタンスの大きさも小さくなる。そのため、BGとなる複数回散乱したX線に対して強い抑制率をもつジオメトリを組むことが出来る。バックグラウンドの抑制率について表3.7にまとめる。抑制率が非常に強い場合シミュレーションでの算出が難しいため、結果は手計算によるものである。XFELのコンプトン散乱とレイリー散乱による多重散乱の影響について見積もった。SPring-8で同様のスリット系を組みBGに関する予備実験を行った結果、このような抑制率は得られずBGの抑制率は 10^{-5} 程度であった。スリット2下の刃からの散乱はスリット3上の刃によってカット出来ていることは確認できたため、表3.7のBeレンズなどで1回散乱したX線の検出器までのパスを切ることは出来ている。予備実験ではスリット3付近に一定数の光子数があり、それらの光子がスリット3でフレネル回折を起こしているのではないかと考えられたが、それを明確に裏付けるデータは取得できていない。現在この仮定が正しいかどうかは判断できないが、スリット系は予備実験と同様なためBGの抑制率は同じく 10^{-5} 程度になると予想される。

表 3.7: バックグラウンドの候補と抑制率

起源	抑制率
Beレンズなどで1回散乱したX線	0
残留気体による散乱	10^{-15}
2回散乱したX線	10^{-21}

第4章 実験結果及び解析

この章では、2016年11月に SACLA で行った実験の結果について述べる。ビームタイムは11/6 22:00 から11/9 10:00 の2.5日間であった。このビームタイム中に10分間の本測定を行った。本測定では最下流のスリットの後ろに設置したPDで光子数を計測し、レーザーを照射時、非照射時の2パターンのデータを取得した。この2つのデータを比較することでシグナル量を求める。得られた結果を limit 値に焼き直すには、シグナルの期待値を算出する必要があり、以下のパラメータを測定する必要がある。

- レーザーの空間プロファイル
- XFEL ビームの空間及び角度発散プロファイル
- XFEL とレーザーの空間的衝突の精度
- XFEL とレーザーの時間的衝突の精度

この章ではこれらのパラメータの測定結果について述べ、そのパラメータから推定されるシグナルの角分布及び検出効率を計算してシグナルの期待値を算出する。最後に本測定結果からシグナル量を求め、真空回折現象の反応確率に対する limit を計算する。

4.1 レーザーの各種パラメータ

レーザーの各種パラメータは出力の弱いときとフルパワーのときの2パターンで測定を行った。出力の違いは、レーザーチャープパルス増幅器での増幅強度の違いによる。レーザーの出力が弱いときと比べて、フルパワーのときは集光像が乱れた。原因として以下の3つが考えられる。

- レーザーをアンプした際の空間プロファイルの乱れ
- レーザーの高出力が原因の、光学素子による空間プロファイルの乱れ
- モニターカメラ直前の減光フィルタによる空間プロファイルの乱れ

1つ目が原因である場合、集光点でのレーザーの像は実際に乱れている。2つ目が原因である場合、集光点でのレーザーの像が実際に乱れていたかどうかは原因となった素子が集光点の前後どの位置のものかによる。3つ目が原因である場合、集光点でのレーザーの像は実際には乱れておらずモニタがきちんと出来ていなかったことになる。減光フィルタは吸収型のフィルタであり、フィルター内の光を吸収する物質の濃度によって吸収量が決まる。そのため吸収物質の濃度ゆらぎが

空間プロファイルを乱す原因となる。レーザーの出力が弱い際は減光フィルタは使用していないが、レーザーの出力が最大のときは8桁程度減光している。

レーザーの集光像を乱した原因として、3つ目の要因が有力である。本実験では2種類の減光フィルタの使用を検討した。レーザーをフルパワーにすると同時に減光フィルタを設置したが、そのうち1つの減光フィルタは像の乱れが大きく使用不可能であったため、像の乱れが比較的小さかった減光フィルタを採用した。通常は減光フィルタで8桁も減光するという事は行わず、本実験でもフルパワーのときのモニタの主目的はポインティングのゆらぎの計測のために行った。しかしながら像を乱した実際の原因は特定できないため、2パターンでのパラメータを示す。なおレーザーは真空チャンバ手前までSACLAのレーザーチームによって導入された状態でユーザーに提供される。今回は出力が最大のときに84 mJで提供された。衝突点の手前には真空チャンバの1cm厚の石英ガラス窓がある。レーザーの減衰率は4%程度であるので、衝突点でのエネルギーは $84 \text{ mJ} \times 0.96 = 81 \text{ mJ}$ となる。

図3.14のカメラ1でモニターしたレーザーの集光像は図4.1と図4.2のようになった。出力が強いときの像図4.2は本測定時のものである。

集光サイズとエネルギーの評価を行うため、それぞれ縦横0から200 pixelの範囲のアベレージをとりoffsetとして集光像から差し引く。次にx,y軸にそれぞれ射影を行い、頂点を $\pm 0.75\sigma$ 幅のガウシアンでFitする(図4.3, 図4.4, 図4.5, 図4.6)。この結果から、レーザーのポインティングのゆらぎも評価することが出来る。カメラのpixelと実際の距離の較正は以下の値で行った。較正方法については詳しくは付録B.1.2で述べる。

$$\text{縦 } 4.06 \pm 0.03 \text{ [pixel}/\mu\text{m}] \quad (4.1)$$

$$\text{横 } 4.02 \pm 0.03 \text{ [pixel}/\mu\text{m}] \quad (4.2)$$

次にFitした、集光像で一番強いピークのもつエネルギーの割合を求めるために、ピークを中心からx,y軸方向に $\pm 1\sigma$ の範囲を積分する。この量は理想的なガウシアンビームの場合は全エネルギーに対して $0.683 \times 0.683 = 0.466$ となる。

それぞれの結果と、その安定性について表4.1にまとめる。ふらつきの値として各パラメータの標本分散も共に示す。数nJのときのイベント数は100、81 mJのときのイベント数は6000で

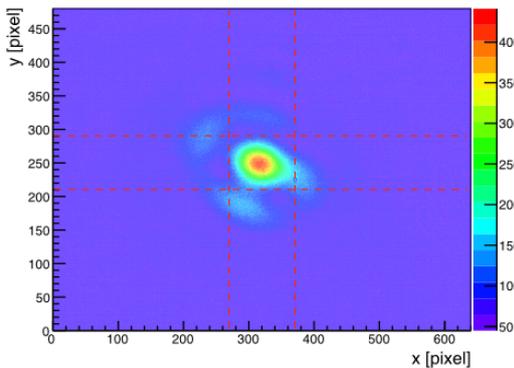


図4.1: レーザーの集光像(数 nJ)。赤色の破線は射影を行う際に使用した領域を表す。

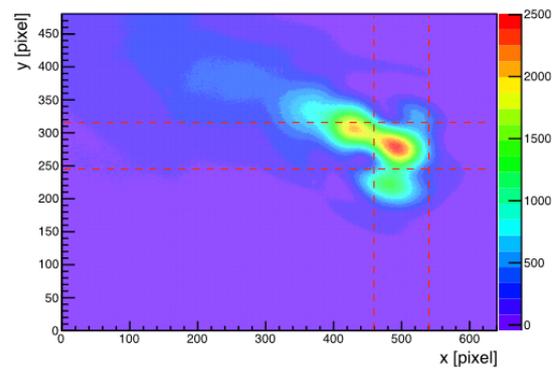


図4.2: レーザーの集光像(81 mJ)。赤色の破線は射影を行う際に使用した領域を表す。

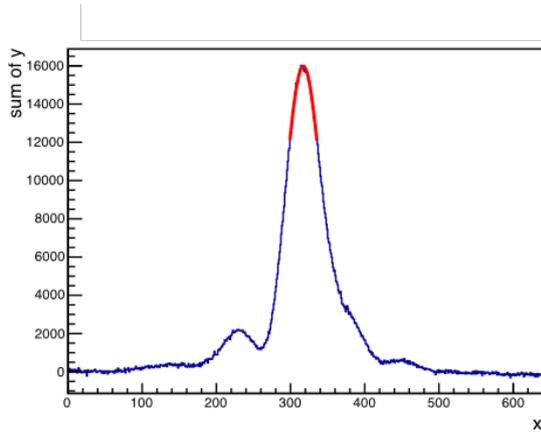


図 4.3: レーザーの集光像の X 軸への射影 (数 nJ)。y 軸の (210,290)pixel の領域を切り出している。

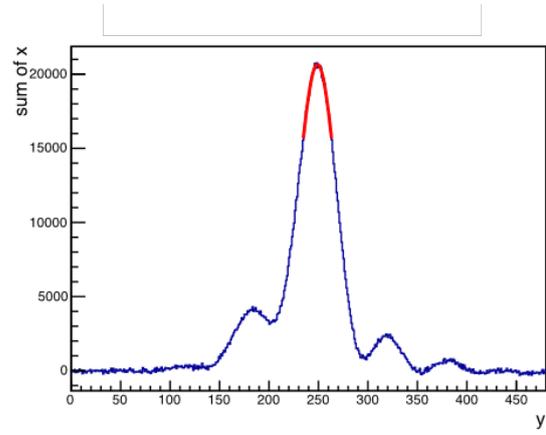


図 4.4: レーザーの集光像の Y 軸への射影 (数 nJ)。x 軸の (270,370)pixel の領域を切り出している。

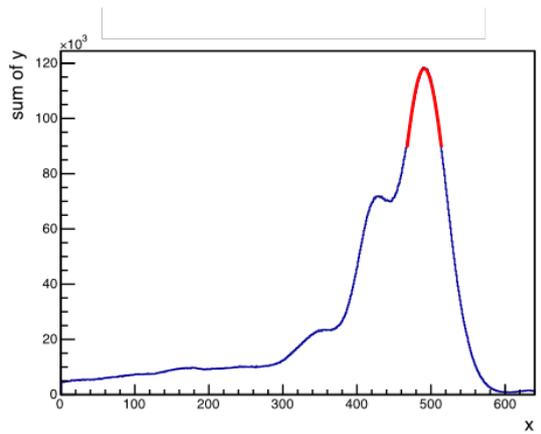


図 4.5: レーザーの集光像の X 軸への射影 (81 mJ)。y 軸の (245,315)pixel の領域を切り出している。

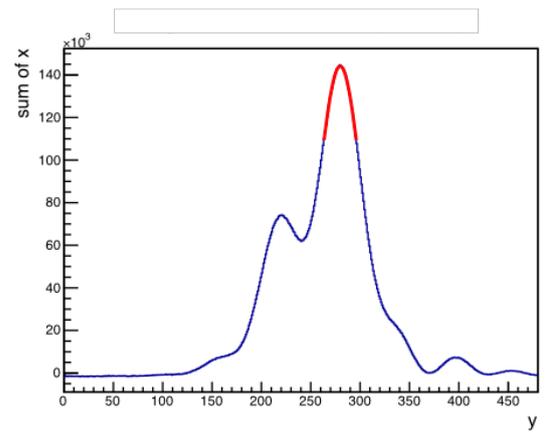


図 4.6: レーザーの集光像の Y 軸への射影 (81 mJ)。x 軸の (460,540)pixel の領域を切り出している。

ある。集光サイズは目標の $2\sigma 10 \mu\text{m}$ と同程度に集光することが出来ている。 $\pm 1\sigma$ にあるエネルギーは 28%であったので、 $0.28/0.466 \times 81 \text{ mJ} = 49 \text{ mJ}$ のパルスエネルギーのガウシアンビームを使用したとして感度計算を行う。

表 4.1: 各種パラメータとその安定性

項目	数 nJ	$\sqrt{\text{分散}}$	81 mJ	$\sqrt{\text{分散}}$
縦方向の集光径 (1σ)	4.79 μm	0.06 μm	5.21 μm	0.08 μm
横方向の集光径 (1σ)	6.06 μm	0.08 μm	7.46 μm	0.24 μm
縦方向の中心のふらつき		0.48 μm		0.33 μm
横方向の中心のふらつき		0.53 μm		0.64 μm
エネルギー	数 nJ	29%	81 mJ	3.5%
$\pm 1\sigma$ にあるエネルギーの割合	28%	0.70%	12%	0.2%

4.2 XFEL のパルスエネルギー較正と安定性

4.2.1 XFEL パルスエネルギーの較正

シグナルの量は衝突点での XFEL の光子数に比例するため計測が必要である。しかし本測定時にはスリットを設置するため、衝突点での光子数を直接計測することは出来ない。そのため OH 設置されているビームモニタを用いてこれを求める。図 3.6 の OH に設置された XFEL ビーム診断系の最下流にあるビームモニタ 2 を使用した。較正のため本測定終了後に衝突点より下流のスリットを取り外し、衝突点での光子数を計測した。なお XFEL ビームを直接 PD で検出するには強度が強すぎるため、300 μm のアルミニウムでアテネーションを行った。そのため、アルミニウムの光電吸収断面積を使用して、これによる光子数の減少の補正を行った。各ショット毎のビームモニタ 2 の値と衝突点での光子数の対応を図 4.7 に示す。これを 1 次関数で Fit することで換算係数を求めた。なおパルスエネルギーの小さいショットはビームプロファイルなどが安定していないため、ビームモニター 2 の電荷量 $> 6.8 \text{ nC}$ のカットをかけている。

$$\text{衝突点での光子数} = (\text{ビームモニター 2 の電荷量 [C]}) \times 4.46 \times 10^{18} - 1.08 \times 10^{10} \quad (4.3)$$

ビームモニタの値から計算された光子数と、実際に PD で計測された値の比は 8.7% の分散をもつ。これがビームモニターを使用した光子数の換算による系統誤差となる。

4.2.2 XFEL の安定性

XFEL のポインティング及びサイズのふらつきを測るために OH のスクリーンモニタを使用した。スクリーンモニタで実際に得られる画像は図 3.10 に既に示した。まず初めにスクリーンモニタの pixel 数と実際の長さの較正を以下のように行った。

1. スクリーンモニタの画像を x,y 軸に射影し、 $\pm 0.5\sigma$ をガウシアンで Fit することで XFEL サイズ (pixel 数) を求める。
2. 3.1.2 章で求めた XFEL サイズと 3.2.1 章の Fit で求めた XFEL の発光点までの距離を用いて XFEL の発光点からの角度発散を計算する。

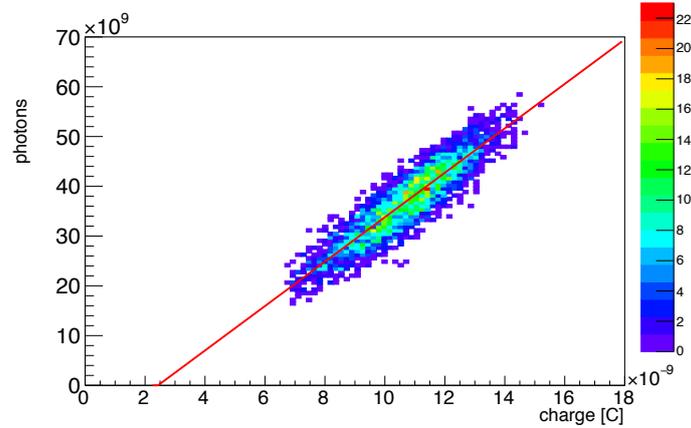


図 4.7: ビームモニタ値と衝突点での光子数の対応付。縦軸が衝突点での光子数、横軸がビームモニタ 2 の光子数である。赤線は一次関数での Fit 結果である。

3. 2. の結果を用いてスクリーンモニタ位置での XFEL サイズを計算する。
4. 1. と 3. の結果を比較して pixel 数と実際の長さの較正を行う。

較正結果は以下になった。

$$\text{縦 } 0.138 \pm 0.003 \text{ [pixel}/\mu\text{m}] \quad (4.4)$$

$$\text{横 } 0.156 \pm 0.008 \text{ [pixel}/\mu\text{m}] \quad (4.5)$$

スクリーンモニタ画像の縦横軸への射影をガウシアンで Fit することによって、XFEL のサイズ及びポジションのふらつきを同時に評価することができる。結果を表 4.2 にまとめる。データは本測定時の 6000 発を使用し、(ビームモニターの電荷量) >6.8 nC のカットをかけた。スクリーンモニタは Be レンズの 10 m 程度上流に設置されているため、XFEL サイズは 3.1.2 章での XFEL サイズ結果より少し小さくなっている。

表 4.2: スクリーンモニタ位置での XFEL サイズ及びポジションのふらつき

項目	大きさ [μm]	$\sqrt{\text{分散}}$ [μm]
縦方向の XFEL のサイズ (FWHM)	341	24
横方向の XFEL のサイズ (FWHM)	398	50
縦方向の XFEL のポジション		9.7
横方向の XFEL のポジション		22

4.3 XFEL のサイズ測定およびスリットの設置精度

XFEL のサイズ計測を、スリット 2,3,4 と衝突点の各位置で行った。スリットではナイフエッジスキャン、衝突点では Be レンズの集光調整時と同様に直径 200 μm の金ワイヤーでワイヤースキャンを行った。この測定結果を利用し、XFEL の光軸位置を各スリット位置で決定しスリットを図 3.25 のように設置した。また XFEL のもつ角度発散についても算出した。

スリット 3 を除き、スリットの設置はサイズ計測と合わせて行った。そのため下流のスリットの計測時には上流のスリットは設置されている。スリット 3 のみ全ての計測終了後に設置を行った。

なお以降の測定でも (ビームモニタ 2 の電荷量) > 6.8 nC のカットをかけている。

4.3.1 XFEL のサイズ測定

図 4.8 は衝突点での横方向のワイヤースキャン結果である。縦軸は図 3.6 ビームモニタ 2 の値で規格化された PD の電圧値で、横軸はワイヤーの位置を表す。スキャン結果は以下の関数で Fit を行い、XFEL サイズを求めた。

$$F(x) = a \times \operatorname{erf}\left(\frac{x - x_0}{\sqrt{2}\sigma}\right) + b \quad (4.6)$$

$\operatorname{erf}(x)$ はエラー関数である。横方向の各スキャンの Fit 結果を表 4.3 にまとめる。Fit 結果のエラー関数から得られるガウシアン の FWHM の値を記した。ワイヤースキャン測定のプロットにくぼみが見られる理由は 2 つ考えられる。一つはスリットの pulse motor 値に対する線形性が悪く、スリットを動かしたときに仕様と逆方向に動いてしまう場合があるためである。もう一つは XFEL のビーム強度やプロファイルに時間に依存したふらつきがあるためである。測定では 30 Hz 運転の XFEL の 30 ショット平均を各点で所得しており、1 箇所数秒程度の時間を要している。数秒ほど XFEL のプロファイル等が乱れると、ビームモニター値を使用したビーム強度の規格化がうまくいかず特定の点の強度がふらつく原因となっている。ビームモニター の値にカットをかけることで平均付近のエネルギーのショットのみを使用するとふらつきの大きさは減少することを確認している。しかし規格化された PD 強度のふらつきを作る原因を解析で明確に特定できていないため、今回はそのようなカットをかけずに解析を行った。

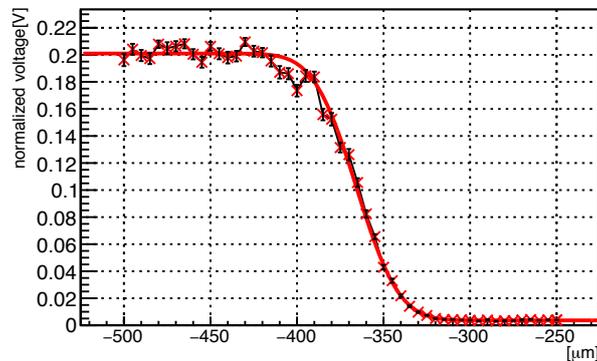


図 4.8: 衝突点での横方向のワイヤースキャン結果。赤線は (4.6) 式での Fit 結果である。

表 4.3: 横方向の各スキャン結果

スリット	FWHM [μm]	測定ステップ [μm]
スリット 2 右	280.0 ± 3.4	20
スリット 2 左	237.1 ± 3.4	20
衝突点	45.6 ± 0.5	5
衝突点	44.6 ± 1.7	5
スリット 3 右	16.3 ± 0.2	2
スリット 3 左	24.3 ± 0.2	2
スリット 4 右	677.2 ± 4.7	20
スリット 4 左	769.6 ± 4.9	50

図 4.9 は衝突点での縦方向のワイヤースキャン結果である。上流のスリットの影響で縦方向の XFEL ビームはガウシアン形状ではないため、エラー関数で Fit することが出来ない。そのためワイヤースキャン結果の微分を行った。スリット 1 は XFEL ビーム光軸から上下に $\sigma/2$ 程度の位置にセットしているため、外側の X 線はスリットでカットされている。X 線を光線として扱った場合、ビーム形状はガウシアン 1σ 程度の幅をガウシアン中心から切り出したような形状となる。微分をとったものが図 4.10 である。微分は隣接した 10 点の傾きを取得した。傾きを求めるためにこの 10 点をおよそ一次関数の点とみなし、1 次関数を最小二乗法から求めた。その 1 次関数の傾きを持つ場所は 10 点の中心の位置とした。この微分結果の FWHM を取得し、これをビーム幅とした。

各スキャンの結果を表 4.4 にまとめる。各測定結果の値のふらつきは、XFEL のショットごとの大きさやポジションのふらつき、スリットの精度、解析方法による誤差を反映している。特にスリット 3 の結果がふらついている。スリット 3 として使用したスリットは SPring-8 で予備実験を行った際にも使用した。このスリットは pulse motor 値に対するスリット位置の線形性が非常

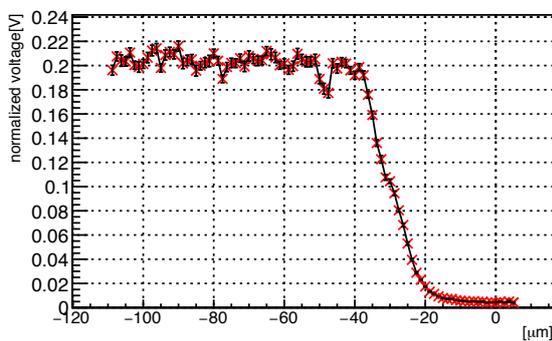


図 4.9: 衝突点での縦方向のワイヤースキャン結果

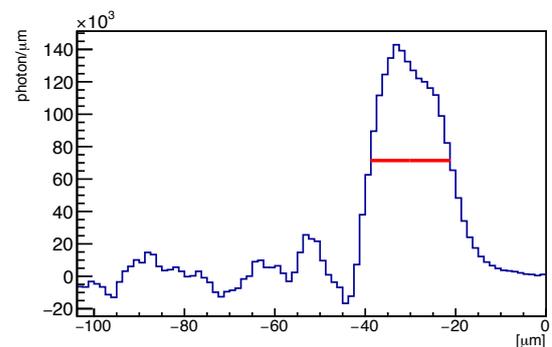


図 4.10: 衝突点での縦方向のワイヤースキャン結果 (微分)。測定ステップは $1.25 \mu\text{m}$ 。

が悪かった。これはスリットの刃がまっすぐ進むようにガイドするリニアガイドの取り付け精度が悪かったためである。スリット3の結果が大きくふらついているのはこのためであると考えられる。SPring-8での測定ではビームサイズが数百 μm のビームでナイフエッジスキャンを行っていた。この結果からスリットの再現性の精度は100 μm 程度はあることがわかっていたが、今回の測定結果から10 μm 程度の精度の再現性はないと考えられる。

最後に各測定結果のばらつきを正味のエラーとして見積もり、各スリット位置でのXFELサイズを求めた。結果を図4.5にまとめる。スリット1はXFELを光線として扱った計算結果から、衝突点でのXFELの縦方向サイズが20 μm となる位置に設置した。これはXFELをレーザーのビームウエストの倍程度の大きさにするためである。結果は想定通り衝突点でのXFEL縦方向サイズが20 μm となっている。

表 4.4: 縦方向の各スキャン結果

スリット	FWHM [μm]	測定ステップ [μm]
スリット2上	101.4	8
スリット2上	98.8	4
スリット2上	116.7	4
スリット2下	105.7	8
スリット2下	101.5	4
衝突点	21.7	2.5
衝突点	17.9	1.25
スリット3上	22.9	2
スリット3上	30.0	1.6
スリット3下	29.2	4
スリット3下	20.2	2
スリット4上	300.1	10
スリット4下	302.9	20

表 4.5: XFEL サイズの各スキャン結果

スリット	縦 FWHM [μm]	横 FWHM [μm]
スリット2	104.9 \pm 7.2	259 \pm 30
衝突点	19.8 \pm 2.7	45.1 \pm 0.7
スリット3	25.6 \pm 4.8	20.3 \pm 5.6
スリット4	301.5 \pm 2.0	723 \pm 65

4.3.2 スリットの設置精度

スリットの設置位置は、XFEL 光軸に対する相対距離から決定する。XFEL 光軸位置の決定方法はスリットの縦の刃、横の刃によって異なる。横の刃の光軸は、4.3.1 章でナイフエッジスキャン結果をエラー関数で Fit を行った際の中心 x_0 を光軸とした。縦の刃の光軸は、XFEL の光量の透過率が半分になる刃の位置を光軸とした。具体的には以下の方法で決定した。

1. ナイフエッジスキャン結果の、光量がほぼ 100%透過している平らな領域を定数で Fit し、その値を光量 100%とする。Fit 結果は図 4.11 の青線である。
2. 光量の透過率が 40%から 60%の領域を 1 次関数で Fit し、光量が 50%の高さの位置を光軸とする。Fit 結果は図 4.11 の赤線である。

この方法で決定された光軸の結果を表 4.6 にまとめる。各測定の平均値を光軸とした。0 μm の位置を決定された光軸とし、測定毎の光軸値はこの位置からのずれで表した。スリットの開く方向を正とした。光軸の値の測定毎のふらつきを光軸決定方法による誤差とし、ふらつきの不偏分散を各スリットの設置精度とする。本解析ではナイフエッジスキャンの測定ステップが小さいデータのみ使用し、(ビームモニタ 2 の電荷量) > 6.8 nC のカットをかけている。スリット 1,2 の縦方向の設置位置は、実験時に決定した光軸位置から同じ距離だけ開いた。実験時の解析ではビームモニタの電荷量でカットをかけず、全データを使用しなかったため、光軸位置が本解析結果と異なる。そのため実際の光軸からスリットの刃間の距離は等間隔ではない。

スリット 2,3 の設置位置での XFEL 光量は光軸位置と比べ 2 桁以上少なく、これらのスリットの設置によって XFEL ビームの空間プロファイル変化は無視できると考えられる。スリット 4 に関してはナイフエッジスキャンの測定を各刃で一度ずつしか行わなかった。そのため光軸決定の不定性が評価出来ない。しかしスリット 4 は SACLA のビームラインに常設の装置であるため、2016 年 6 月に行った真空回折実験時のデータを使用して光軸決定精度の評価を行った。6 月の実験時のセットアップは今回の実験時と同様であり、スリット 4 位置での XFEL サイズも同程度で

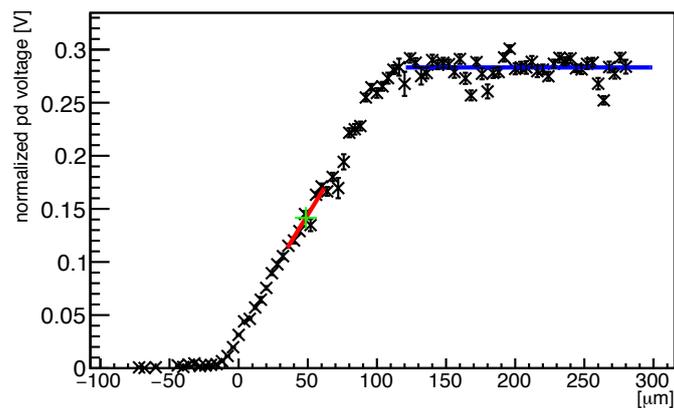


図 4.11: スリット 2 上の刃のナイフエッジスキャン結果を使用した光軸決定の Fit 結果。青線はスリット未設置時の光量を決定するための 1 次関数での Fit、赤線は透過光量 40%から 60%の間の領域の 1 次関数での Fit、緑の十字位置が決定された光軸位置である。

表 4.6: 光軸の決定結果 (縦)

スリット	光軸 [μm]	測定ステップ [μm]	光軸とスリットの刃間の距離 [μm]
スリット 1 上	-0.47	10	88.8
スリット 1 上	0.47	10	88.8
スリット 1 下	0	10	88.7
スリット 2 上	-2.58	4	68.3
スリット 2 上	2.58	4	68.3
スリット 2 下	0	4	69.0
スリット 3 上	2.34	2	32.0
スリット 3 上	-2.34	1.6	32.0
スリット 4 上	0	10	477.7
スリット 4 下	0	20	-257.6

ある。6月の実験では、スリット 4 上の刃でのナイフエッジスキャン測定を2回行った。このデータに対して他のスリットと同様の解析を行った結果、2回の測定の光軸の差は $7.6 \mu\text{m}$ であった。この値をスリット 4 の光軸決定精度の評価に使用する。不偏分散をとり、スリット 4 の設置精度は $\pm 5.4 \mu\text{m}$ とする。

4.3.3 スリット 3 の設置とバックグラウンド

スリット 3 は、スリット 2 下の刃からの散乱光などのバックグラウンドが検出器に入らないために設置する。スリット 3 の設置位置は幾何的な計算から求められるが、これが確かにバックグラウンドを最小にする位置であることの確認を行った。スリット 3 以外のスリット 1,2,4 を設置し、スリット 3 の上の刃でナイフエッジスキャンを行った。スリットの設置位置は図 3.25 に従っている。

結果を図 4.12 に示す。縦軸はスリット 4 下流に置かれた PD の出力、横軸はスリット 3 上の刃の位置で正方向がスリットの開く向き、 $0 \mu\text{m}$ の位置が XFEL 光軸である。スリット 3 の上の刃の設置位置である $32 \mu\text{m}$ のときに光子数が最小値をとっていることがわかる。これはこの位置にスリット 3 を設置すると、スリット 2 の下の刃が幾何的にスリット 4 の開口から見えなくなるためだと考えられる。実際各スリットの設置位置から、そのような位置関係になっていると計算される。

スリット 3 の刃が XFEL 光軸付近にある際に光子数が増加しているのはスリット 3 の刃での散乱がスリット 4 の開口を通過しているためだと考えられる。この場合、光量が増加している位置の幅はスリット 3 位置での XFEL 幅と一致すると予想される。表 4.5 から XFEL の FWHM サイズは $25.6 \pm 4.8 \mu\text{m}$ であり、図 4.12 の結果とエラーの範囲内で一致する。このことから光軸付近の光子数の増加はスリット 3 の先端からの散乱光だと考えられる。

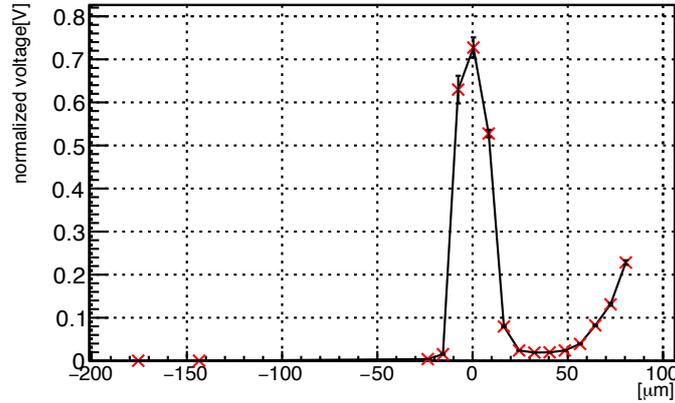


図 4.12: スリット 3 上の刃のナイフエッジスキャン

4.3.4 角度発散と集光サイズ

ガウシアンビームは集光点では波面の傾きは進行方向に垂直であるが、集光点以外では曲率をもつ。シグナルの放射方向の計算には波面の傾きの効果を補正する必要がある。曲率半径は XFEL の集光サイズと角度発散によって計算される。そのためこの 2 つのパラメータを計算する。4.3.1 章で求めた各スリット位置での XFEL サイズをプロットしたものが図 4.14 と図 4.13 である。横軸は Be レンズからの距離、縦軸は XFEL サイズを表す。各測定位置での平均値をプロットし、その不偏分散の値をエラーとした。結果は以下の関数で Fit した。

$$w(z) = \sqrt{w_0^2 + (z\theta)^2} \quad (4.7)$$

$$\theta = \frac{\sqrt{(w(0)^2 - w_0^2)}}{q} \quad (4.8)$$

$w(z)$ として、横方向はエラー関数で Fit した結果から求めたガウシアン FWHM の半分の値、縦方向は FWHM の半分の値を用いた。 z は Be レンズから測定位置までの距離、 q は XFEL ビームの集光位置から Be レンズまでの距離である。Fit 結果を表 4.7 にまとめる。

横方向の集光位置 q は、3.2.1 章の Fit 結果から得られる値 $q = 4.92 \text{ m}$ と一致した。Be レンズ位置での集光サイズは $208 \mu\text{m}$ (FWHM/2) である。これは 3.1.2 章での XFEL サイズ測定結果と 3.2.1 章での結果から得られる実行的な XFEL 発光点からの角度発散の大きさを使用して求めた。角度発散の大きさは、これより大まかに見積もられる $208 \mu\text{m}/4.92 \text{ m} = 42.3 \mu\text{rad}$ とエラー程度の範囲で一致する。

表 4.7: XFEL の角度発散

	角度発散 (FWHM/2) [μrad]	w_0 (FWHM/2) [μm]	q [m]
縦	16.5 ± 0.2	9.1 ± 1.4	4.56 ± 0.12
横	39.2 ± 2.9	3.4 ± 7.1	4.92 ± 0.03

縦方向の角度発散はスリットの設置により小さく抑えられている。縦方向の集光位置 q が減少したのは、Be レンズに入射する光の角度発散が減少したためだと考えられる。X 線を光線として扱った場合、スリットでビームを切る分縦方向の角度発散は減少するが集光に要する距離は変わらない。すなわちスリットが XFEL に幾何的な回折効果を及ぼし、スリットでビームを切る効果以上の角度発散の減少をもたらしていると考えられる。スリット 1 によるフレネル回折などの幾何的な回折の影響で XFEL の光子同士の位相が不揃いになって空間コヒーレンスが悪化し、その結果が Be レンズに入射する前の角度発散の減少として現れていると予想される。

集光サイズは FWHM で $18.2 \mu\text{m}$ であった。SACLA の過去の測定では、Be レンズから 2.5 m の位置で $1.3 \mu\text{m}$ (FWHM) の集光サイズが得られている。集光の角度と集光サイズは反比例にあるため、これから予想される値はスリット未設置時で $(1.3/2) \times (4.56\text{m}/2.5\text{m}) = 1.2 \mu\text{m}$ (FWHM/2) である。今回の $w_0 = 9.1 \mu\text{m}$ との 7.6 倍の差はスリット 1 の影響であると考えられ、この影響について考察する。光の位置の広がりや角度の広がりやの大きさの積をエミッタンスと呼ぶ。位置の広がりやが光が最小の時を考えればよい。ガウシアンビームのエミッタンスは 2.2 章で述べた回折限界の関係に対応する。つまりエミッタンスの最小値は回折限界の関係から決まる。光の空間コヒーレンスが乱れることはエミッタンスが悪化することに対応する。つまり光子同士の位相が不揃いになると、位置や角度の広がりやが大きくなる。原理的にエミッタンスが減少することはない。これらをふまえ、集光サイズについて考える。光の集光サイズは大まかに集光素子に入射した光の大きさに反比例する。これは次のように解釈することが出来る。集光素子で集光される角度は入射した光の大きさに比例する。エミッタンスが減少することはないため、エミッタンスが一定に保たれるとすると集光サイズは入射した光の大きさに反比例することになる。スリットがない場合は Be レンズの有効径 $900 \mu\text{m}$ が入射した光の大きさに対応し、スリット 1 がある場合はスリット開口 $176 \mu\text{m}$ を光の大きさと考え、これより集光サイズは $900/176 = 5.1$ 倍程度大きくなると考えられるが今回の実験時はさらに大きな集光サイズとなっている。これはエミッタンスの悪化を意味し、スリット 1 により空間コヒーレンスが悪化していると考えられる。

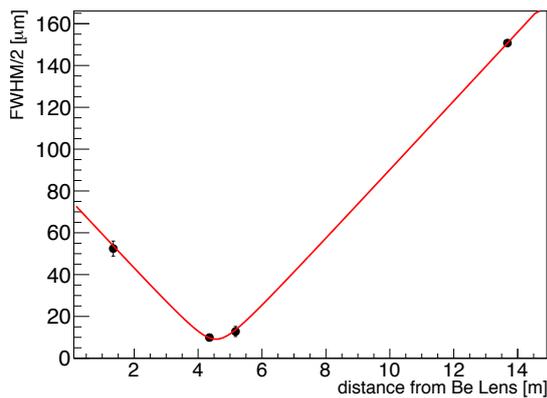


図 4.13: XFEL の角度発散 (縦)

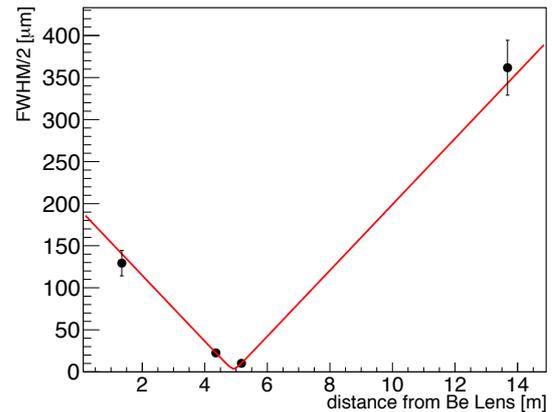


図 4.14: XFEL の角度発散 (横)

4.4 XFEL とレーザーのタイミング精度

まずはじめに XFEL とレーザーのタイミングの要求精度について議論する。レーザーと XFEL の衝突のタイミングのずれを許容出来る範囲として、レーザーのレイリー長を考える。レーザーがレイリー長の分だけ衝突点から移動すると、レーザーの径は $\sqrt{2}$ 倍になる。レーザーの縦横 1σ 径の平均値 $5.4 \mu\text{m}$ からレイリー長を計算すると $460 \mu\text{m}$ となる。この距離の間にレーザーと XFEL が衝突する場合、タイミングの精度は $\pm 3.1 \text{ ps}$ 以内となる。タイミング合わせはこの程度の精度が必要となる。

以下で述べる方法で XFEL とレーザーのタイミング合わせを行い、XFEL とレーザーのタイミングの 0 点を決定した。各ショットごとでジッターによって衝突タイミングは変わるが、これは 3.8 章で述べたジッター計測システムでモニターを行った。

XFEL とレーザーのタイミング合わせには GaAs 薄膜を使用した。GaAs 薄膜を衝突点に設置し、レーザーと XFEL を同時入射させる。レーザーに光学遅延をかけていくとレーザーと XFEL のタイミングが一致するときレーザーの透過率が減少するため、これを CCD カメラでモニターした。

図 4.15 と図 4.16 にレーザーの透過率に変化がないときとレーザーの透過率が減少しているときのカメラ画像を示す。レーザーは 100 nJ/pulse 程度のエネルギーである。タイミングを変えずにレーザーの集光サイズを大きくするためにアイリスを使用した。これは XFEL とレーザーの重なる領域を広くするためである。集光前のレーザーは直径 35 mm 程度だが、OAP の手前にアイリスを設置してこの開口を直径 5 mm 程度にすることでレーザーを絞った。これによりレーザーの集光像はぼやけて大きくなっている。XFEL はレーザーの像の 200 pixel 程度上方あたりに照射されている。図 4.16 の $(x, y) = (340\text{pixel}, 250\text{pixel})$ 付近ではレーザー光量の増加が見られる。GaAs は半導体のため、XFEL の照射によってフリーキャリアとなった電子がエネルギーを失っていく際、ホールと再結合する前に反転分布を形成しうる。このときレーザーの光によって誘導放出が起きると、逆にレーザー光量が増加する。レーザーの照射光量が少ない領域ではレーザー光量の減少の影響より反転分布を形成した GaAs 原子の誘導放出過程の影響が強くて、その結果レーザーの透過率が増加しているように見える。

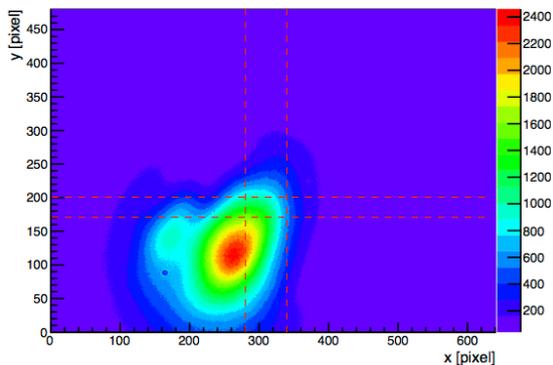


図 4.15: レーザーの透過率に変化がないときのカメラ画像。赤の破線で囲まれた領域は解析で使用した ROI の範囲である。

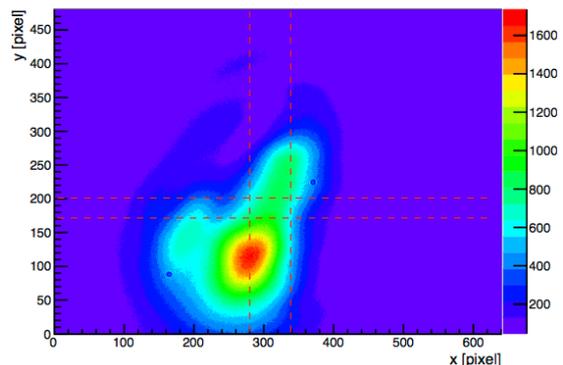


図 4.16: レーザーの透過率が減少しているときのカメラ画像。赤の破線で囲まれた領域は解析で使用した ROI の範囲である。

以下に、レーザーの透過率の解析方法をまとめる。

1. カメラ画像の x 軸の 280 pixel から 340 pix、y 軸の 170 pixel から 200 pixel を Region Of Interesting(以下 ROI) としてとり、この ROI 領域の光量の平均値をだす。
2. レーザーエネルギーのショットごとのふらつきを補正するため、1. で求めた平均値を各ショットごとに光量の最大値をとる pixel の値で割る。
3. 2. で求めた値を、レーザーの透過率に変化がないときの測定値で規格化する。

以上の解析によって得られたレーザーの透過率の測定結果が図 4.17 である。横軸はレーザーの光学遅延の大きさを表し、正方向がレーザーの照射タイミングが遅くなる方向を表す。レーザーの透過率が横軸 -15 ps 付近で減少していることがわかる。この位置が XFEL とレーザーが同時に照射されたタイミングである。XFEL が 20ps 程度早く照射されたときは殆どのフリーキャリアは消滅または反転分布の形成をしており、レーザー光量を増加させている。レーザーの透過率の減少は 300 fs 程度で立ち下がるが [8]、今回の測定では数 ps の時間で立ち下がっている。これは反転分布による増幅過程や、GaAs 薄膜の貼られている $500 \mu\text{m}$ 厚の石英基板、レーザーのドリフトなどが影響しているものと考えられる。この透過率の立ち下がり時間がタイミング決定の不定性となる。

タイミングの 0 点の決定とその不定性の推定のため、レーザーの透過率を以下の関数で Fit した。

$$T(t) = 1 - C \times e^{-\frac{(t-t'_0)^2}{2\sigma}} \quad (4.9)$$

Fit は 5 回繰り返し行い、Fit 範囲を一つ前の Fit 結果の -3σ から $+1\sigma$ にとった。Fit 結果は図 4.17 に赤い線で書かれている。この Fit 結果のガウシアンの高さの位置をタイミングの 0 点とした。すなわち、レーザーと XFEL のタイミングの一致した 0 点 t_0 は以下の式で決定した。

$$t_0 = t'_0 - \sqrt{2 \log 2} \sigma \quad (4.10)$$

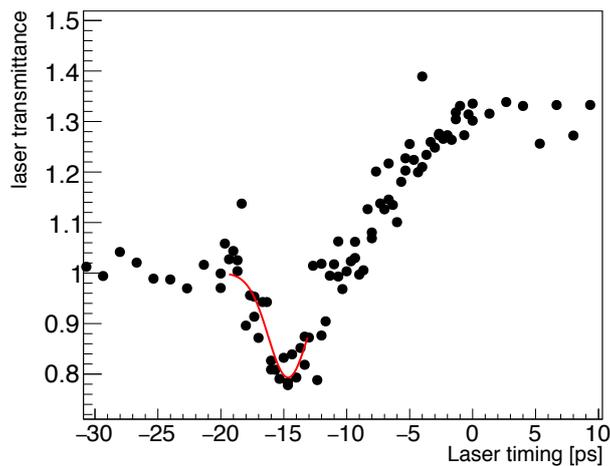


図 4.17: レーザーの GaAs 薄膜透過率測定結果。縦軸はレーザー透過率、横軸はレーザーの光学遅延の大きさを表す。赤線は (4.9) 式での Fit 結果である。

また、 σ の値をタイミングの不定性を表す値とした。Fit 結果は $\sigma = 1.57$ ps である。この結果をタイミングの 0 点決定の系統誤差として見積もる。これはタイミングの要求精度 ± 3.1 ps を十分満たしている。

ビームタイムは 2.5 日と非常に短く、実験中には上記のような詳細な解析を行うことが出来なかった。上記の解析に使用したデータは実験終了後の解析用に取得したデータで、実験中にタイミングの 0 点を決定するために取得したデータとは異なる。実験中に行う解析に使用するデータは、特定の ROI の平均値と最大値のみしか取得することが出来ない。実験中はこのデータを用いて簡易的な解析を行い 0 点位置を予想してタイミングの 0 点を決めため、この位置は本章の解析結果とずれがあり、その大きさは 0.43 ps であった。すなわち実験中に決定した 0 点のタイミングでは XFEL とレーザーが GaAs 薄膜に同時に入射しておらず、その照射タイミングには 0.43 ps のずれがあったということになる。しかしながらタイミングの要求精度は ± 3.1 ps であるので、これは十分許容することが出来る。

実験中の解析に使用するデータの取得直後にタイミングモニターの調整を行い、実験中の解析から決定したタイミングの 0 点ときに、タイミングモニタに XFEL とレーザーが同時に入射するようにした。これはタイミングモニタに入射するレーザーに光学遅延をかけることで調整し、タイミングエッジがタイミングモニタの中心に来るようにした。調整後に取得したタイミングモニタデータのタイミングエッジの位置が、タイミングモニタの 0 点となる。この結果を図 4.18 に示す。100 イベントの平均値は 1168 pixel であったので、この位置をタイミングモニタの 0 点とする。実験中に取得したデータはこの位置からのずれをみることでタイミングを知ることが出来る。

本章で解析に使用したデータはタイミングモニタの調整後に取得した。本実験中にはレーザーのタイミング系に不具合があり、レーザーの照射タイミングにドリフトがあった。これはタイミングの 0 点の決定精度に大きく影響する。SACLA でレーザーを提供しているチームによると、突発的に数分で 10 ps 程度のドリフトがあった可能性がある。実験中の解析に使用したデータの取得からタイミングモニタの調整を行うまでにおよそ 20 分の時間がかかっている。この間にレーザーの照射タイミングにドリフトがあった可能性がある。実験中の解析に使用したデータと本章

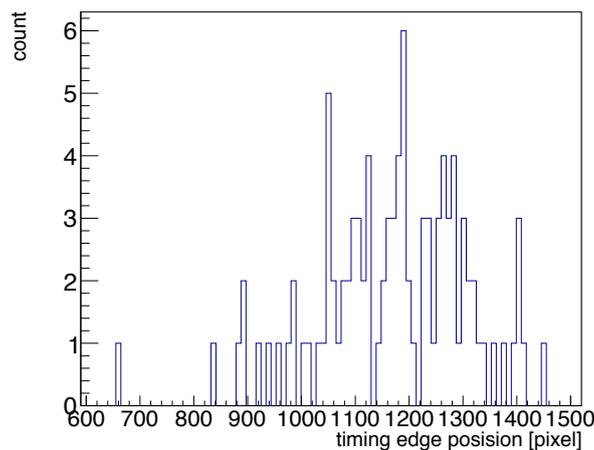


図 4.18: タイミングエッジの 0 点位置。横軸にタイミングモニタの解析から得られたタイミングエッジの 0 点位置をカメラの pixel 数で示した。

で使用したデータ間には5.27 psの時間差があった。そのためタイミングの0点決定の誤差はドリフトによる誤差を5 psとして、解析結果の0点決定の誤差1.57 psとのコンボリューションを取ったものとする。よって最終的に、以下が実験中に決定したタイミングの0点位置とその誤差となる。なお先で述べた、実験時と本解析でのタイミングの0点決定による差0.43 psは、5.27 psの時間差を補正して求めている。

$$\text{レーザー集光点での XFEL とレーザーの照射タイミング差 } 0.43 \pm 5.24 \text{ ps} \quad (4.11)$$

最終的にレーザーがXFELより0.43 ps早く照射されているときをタイミングの0点として決定していたことになる。エラー程度照射タイミングがずれていた場合、レーザーの集光サイズはおよそ2倍になる。レーザーの大きさはFWHMで25 μm となり、XFELの縦方向のサイズ20 μm よりも大きくなる。そのため、角度発散の大きさへの寄与はXFELサイズが支配的になる。結果的に角度発散の大きさは、(2.23)式から時間のずれがないときの60%程度の大きさになると見積もられる。

シグナルの期待値への影響を見積もるため、角度発散のみを考慮して議論を行う。時間のずれが無いときの角度発散の大きさはおよそ3 μrad 、スリット4の下の刃を通過するために獲得する必要のある角度発散はおよそ30 μrad で 10σ 分である。角度発散の大きさが60%になると $30/(3 \times 0.6) = 17\sigma$ 程度の角度発散の獲得が必要となる。これによりシグナルの検出効率は大幅に低下するが、実際の検出効率はシグナルの角度発散の大きさの他にXFELとレーザーの重なり具合やXFELの波面の曲率に強く依存する。そのためXFELのどの位置にレーザーが重なっているのかが感度計算に重要となる。

XFELとレーザーの光軸が一致していない場合、XFELとレーザーの重なりは時間のずれと共に変化する。5.24 psの時間のずれは、衝突位置がレーザーの集光点から790 μm ずれたことに相当する。相対位置のずれがXFELの縦方向サイズの半分10 μm 以内であることを要求すると、光軸のずれは13 mrad以内であることが求められる。4.5.4章で述べる同軸性の精度はこれを満たしている。時間のずれと同軸性のずれによる相対位置のずれは、衝突が保証出来る範囲内に収まっている。なお、先でも述べたように実験感度はXFELとレーザーの光軸の傾き、時間のずれ、相対位置のずれを総合的に評価する必要がある。検出効率のこれらのパラメータ依存性の評価は4.6章で行う。

4.5.1 XFEL 位置の決定方法

図 4.20 にレーザー顕微鏡画像を示す。xy 方向の各点でレーザー光量が最大になった際の光量が z 軸としてモノクロで表されている。黒く四角い穴が XFEL によって開けられた穴である。この穴の中心位置が XFEL のポジションとなる。この穴の中心位置の決定には、以下のように 2 値解析を行った。

1. レーザー光量の最大値の 10% をスレッシュホールドとする。レーザー光量がスレッシュホールド以下の pixel を 1、それ以外は 0 として 2 次元ヒストグラムを作る (図 4.21)。なおこのときに XFEL の穴とつながっていない pixel はスレッシュホールド以下であっても 0 とみなす。
2. 2 次元ヒストグラムを x,y の各軸に射影する。
3. 射影したヒストグラムの FWHM を取得し、この幅の中心位置をその軸方向の XFEL の中心とする (図 4.22)。

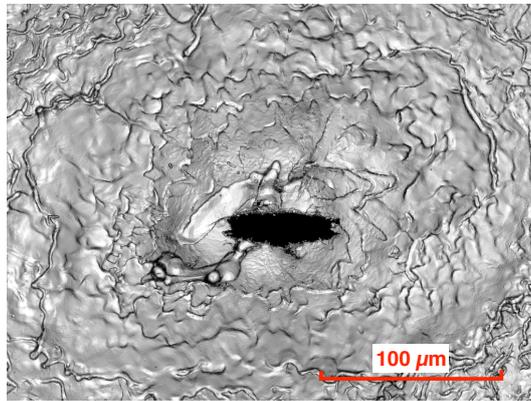


図 4.20: Zn 薄膜に開いた穴のレーザー顕微鏡画像

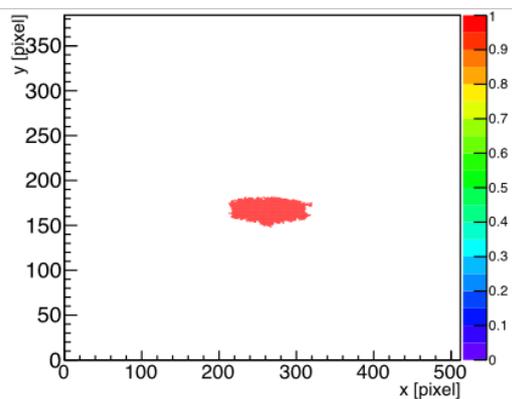


図 4.21: 2 値解析の 2 次元ヒストグラム。レーザー光量がスレッシュホールド以下であった pixel を 1、それ以外を 0 としている。

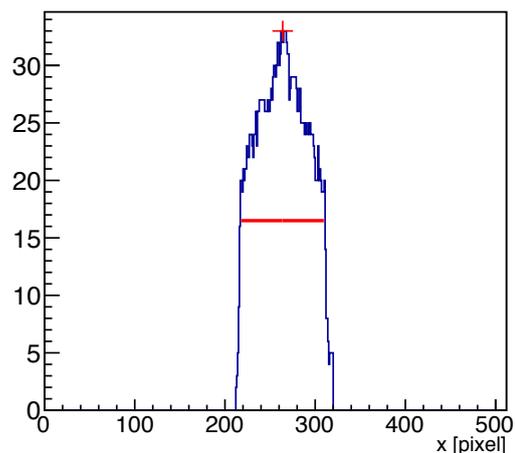


図 4.22: 2 次元ヒストグラムの x 軸への射影

4.5.2 レーザー位置の決定方法

図 4.20 と同じレーザー顕微鏡画像の、z 軸を高さ情報にした画像を図 4.23 と図 4.24 に示す。レーザーが Zn 薄膜にくぼみを作っていることがわかる。レーザー顕微鏡は水平方向の各点の光量の最大値と高さ情報を記録する。3.9 章でも述べたように、レーザー顕微鏡は集光したレーザー光をサンプルに照射している。サンプル位置を z 方向にスキャンしながらサンプルからの反射光量をモニターし、光量が最大となったときを高さとして計測している。光量が最大になるときは、サンプル位置でレーザーが集光されている状況に対応する。このためサンプルに穴が開いているとレーザー顕微鏡は高さ情報を取得することは出来ない。図 4.23 の x:(200,320)、y:(150,180)pixel の位置には XFEL の作った穴が開いている。これらの位置でも高さの計測は行われているが、周囲からの散乱光などの影響で光量が最大になった位置が (誤った) 高さとして記録されている。

レーザーのくぼみを 2 次元ガウシアンで Fit し、その mean の位置をレーザーの位置とした。XFEL の作った穴の位置はレーザーの作ったくぼみを形成していないため穴の領域は Fit の際に除くのが最良であると考えられるが、穴の位置の高さとされた値が周囲の高さと大きな違いがなかったため、今回はこの領域を除くことなく Fit を行った。

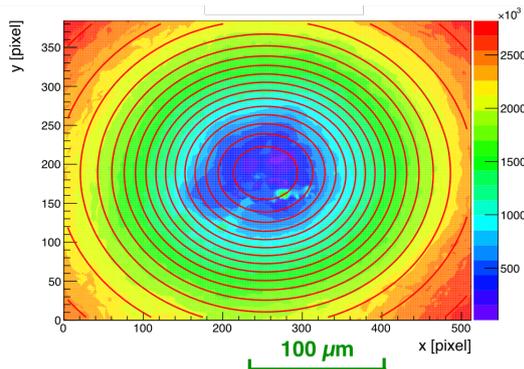


図 4.23: レーザーが Zn 薄膜につくる窪みの Fit。x:(200,320)、y:(150,180)pixel の位置には XFEL の作った穴が開いている。

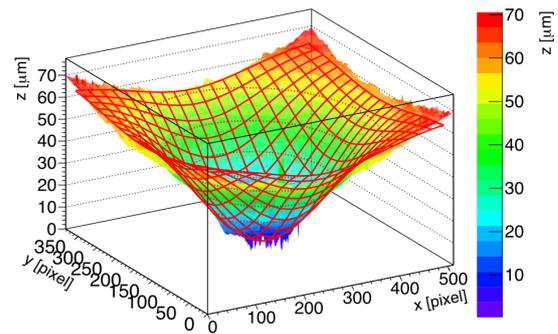


図 4.24: レーザーが Zn 薄膜につくる窪みの Fit(3D)

4.5.3 相対位置の決定精度

以上より XFEL の位置とレーザーの位置が決定されたので、その相対距離を計算することが出来る。XFEL の FWHM サイズは $20 \times 45 \mu\text{m}$ (縦 \times 横) で、レーザーの FWHM サイズは $11 \times 14 \mu\text{m}$ であった。XFEL とレーザーの FWHM 幅の領域が重なっていることを要求すると、縦方向の相対位置のずれは $20/2 + 11/2 = 15.5 \mu\text{m}$ 以内である必要がある。

XFEL とレーザーの相対位置の測定結果を表 4.8 にまとめる。レーザーのくぼみと XFEL の穴のペアは全部で 3 イベントである。XFEL の位置を原点としたときのレーザーの位置を示した。横方向は、XFEL 上流からみたときの右側が正方向である。横方向のずれは $4.4 \mu\text{m}$ と、エラー

を含めてもパルス同士が十分重なっていると考えられる。縦方向のずれは $12.2 \mu\text{m}$ で、エラー 1σ 分を含めると $16.6 \mu\text{m}$ となる。中心値を使用するとレーザーとXFELはFWHM幅で重なっているが、エラーの 1σ 分以上ずれが大きくなるとテール部分は同士は重なってはいるが、FWHM幅での重なりはなくなる。

4.6章ではレーザーの空間プロファイルがガウシアンとして扱ってシグナルの角分布を計算している。縦方向のずれが大きくなった状況では、レーザーの空間プロファイルのテール部分の評価を行う必要がある。レーザーの空間プロファイルがどの程度の幅までガウシアンとして扱えるか、また空間プロファイルのテール部分を異なる分散のガウシアンとして扱うべきかどうかなどの評価を行う必要があると考えられるが、現段階ではそのような評価は行っていない。このような解析による不定性を回避するためにはXFELとレーザーのFWHM幅程度の領域の重なりをエラーを含めた大きさでも保証する必要があるが、今回の結果はこれを満たしておらず、レーザーの空間プロファイルのさらなる評価が必要である。今回の実験中には本章のようなレーザー顕微鏡を用いた相対位置の解析を行っていなかったが、次回以降の実験ではビームタイム中にレーザー顕微鏡を用いた解析を行う予定である。レーザーの集光位置は $1 \mu\text{m}$ 以下の精度で調整が可能であるため、ビームタイム中の解析結果を用いて調整を行うことで、XFELとレーザーの中心位置を $1 \mu\text{m}$ 以下の精度で合わせることが可能であると考えられる。この場合、相対位置のずれはふらつきの大さき程度となり、レーザーとXFELのFWHM幅の重なりを十分保証することが出来る。

XFELとレーザーのポインティングのゆらぎはレーザーに比べXFELのゆらぎが大きく、表4.2より 1σ の10%程度であるので衝突点では $2 \mu\text{m}$ 程度と予想できる。レーザーとXFELの横方向の相対位置のゆらぎはこれと同程度であるが、縦方向は2倍程度大きい。この理由として2つの原因が考えられる。一つはレーザー顕微鏡で画像を取得する際の有効視野の問題である。レーザー顕微鏡で3D画像を取得する際、サンプルの傾きを補正する必要がある。そのためくぼみの画像を取得する際に同時に平らな領域も視野に含める必要があるが、くぼみの大きさがレーザー顕微鏡の有効視野よりも大きいためこれを行うことが出来ない。くぼみの深さは $100 \mu\text{m}$ 程度で、サンプルが 1° 傾くと仮定すると $100\mu\text{m} \times \tan 1^\circ = 1.7\mu\text{m}$ の中心位置のずれが予想される。もう一つはZnサンプルの平らさの問題である。Znサンプルの表面には $5 \mu\text{m}$ 程度の凹凸があり、この凹凸がレーザーの中心位置の決定に影響を与えている可能性が考えられる。

いずれの場合もZn薄膜に穴を開けて相対位置を決定する方法に依存するゆらぎであると考えられる。このゆらぎの大きさをレーザーとXFELの相対位置のゆらぎ及び正味の不定性とみなし

表 4.8: XFEL とレーザーの相対位置の測定結果

	レーザーの位置 (縦方向) [μm]	レーザーの位置 (縦方向) [μm]
イベント 1	5.7	12.0
イベント 2	2.5	16.7
イベント 3	4.9	7.8
平均値	4.4	12.2
$\sqrt{\text{不偏分散}}$	1.7	4.4

系統誤差として見積もる。最終的な XFEL とレーザーの重なりへの感度への寄与は、衝突タイミングのずれによるレーザーサイズの増加、レーザーと XFEL の光軸のずれと衝突タイミングのずれによる相対位置の変化などを考慮して計算する必要がある。時間がずれるとレーザーサイズが増加するため XFEL との重なりが大きくなるが、光軸同士がずれていると正負どちらかの時間方向では相対距離が大きくなっていく。この効果についての議論は次節で行う。

4.5.4 レーザーと XFEL の同軸性

レーザーと XFEL の同軸性をチェックするために Zn 薄膜に穴を開ける方法を用いた。Zn 薄膜を光軸方向にずらして穴あけを行うことで、X 線とレーザーの相対位置の変化を見た。結果を表 4.9 にまとめる。Zn 薄膜の位置は XFEL 下流を正方向とした。また横方向は XFEL 上流から見たときの右側を正方向にとった。穴開けは 2 回ずつ行ったが、衝突点に Zn 薄膜があるときの 1 イベントではレーザーで Zn 薄膜に穴が開いてしまっていたため使用しなかった。レーザーと XFEL の相対位置は平均値を使用した。

これより傾きは以下になった。レーザーと XFEL の相対位置は XFEL 下流に進むにつれ、縦方向ではレーザーが相対的に上にずれる。横方向では、XFEL 進行方向から見て左側にレーザーがずれていく。

$$\text{縦 } 10.3 \pm 1.1 \text{ mrad} \quad (4.12)$$

$$\text{横 } -36.5 \pm 0.5 \text{ mrad} \quad (4.13)$$

4.7.1 章で詳しく評価するが、本測定中の衝突タイミングは -0.20 ps で精度は $\pm 5.24 \text{ ps}$ であった。レーザーが XFEL より 0.20 ps 遅く照射されていた。このずれの分衝突タイミングがずれたときの XFEL とレーザーの重なり具合について考える。レーザーの照射タイミング時間が早くなると衝突点は XFEL 上流側に移る。レーザーサイズを縦横の平均値とし、この大きさからレイリー長を計算する。表 4.10 にそれぞれの衝突タイミングのときの相対位置とレーザーサイズについてまとめる。レーザーと XFEL の FWHM 幅に重なりが生じるときの相対位置の最大値を、中心間距離の許容範囲とした。相対位置決定精度の誤差は考慮していない。XFEL 中心を原点に取り、XFEL 上流側から見てレーザーが右、上方向にあるときを正方向にとった。時間のずれが大きくなるとレーザーサイズが大きくなるため、相対位置がずれても縦横ともに XFEL とレーザーは重なりをもっていることがわかる。今回は横方向の同軸性の精度が悪かったが、XFEL の横方向サイズもまた大きかったため両者の重なりは確保されている。これより今回の同軸性のずれは許容

表 4.9: XFEL に対するレーザーの相対位置

	Zn 薄膜の位置	レーザーの位置 (縦方向)	レーザーの位置 (横方向)
イベント 1	0 mm	24 μm	31 μm
イベント 2	5 mm	80 μm	-153 μm
イベント 3	5 mm	72 μm	-149 μm

できる程度であると言える。しかし相対距離はFWHM幅が重なるための許容範囲とほぼ同程度であり、4.5.3章で議論したようにレーザーの空間プロファイルのテール部分の評価が必要になると考えられる。今回はこの評価を行わなかったが今後行っていく予定である。

同軸性の結果は許容できる程度であった。しかしながら相対位置のずれは集光サイズに比べて十分小さくあるのが理想である。今回のビームタイム中には亜鉛薄膜への穴あけの結果を用いた同軸性の計算及び調整を行っておらず、調整を行えば同軸性はエラーの大きさ程度に調整可能である。光軸の決定精度は縦方向の誤差が大きく $\pm 1.1 \mu\text{m}$ であった。同軸性がこの程度の場合、衝突タイミングのずれによる中心間距離の変化は $0.9 \mu\text{m}$ となる。これはXFELとレーザーサイズの10%以下の値であり、十分な同軸性の確保が出来ると考えられる。なお将来的にレーザーを $1 \mu\text{m}$ 、XFELを $2 \mu\text{m}$ に集光した場合、相対位置のずれを10%以内に抑えるにはもう一桁同軸性を改善する必要がある。現在同軸性のエラーの原因となっているのは相対位置決定の精度が $3 \mu\text{m}$ 程度であるためであり、同軸性の確保の前にこれの改善を行う必要がある。レーザーの光軸の角度はOAPを取り付けた自動ステージによって調整することが出来る。これは $10 \mu\text{rad}$ 程度のステップでの調整が可能であり、相対位置の決定精度が上げれば将来的に要求される同軸性の精度は十分確保できると考えられる。

表 4.10: 衝突タイミングがずれたときのXFELに対するレーザーの相対位置

時間のずれ	相対位置 (横, 縦)	レーザーサイズ (FWHM)	中心間距離の許容範囲 (横, 縦)
-0.20 ps	(3.3, 12.5) μm	12.8 μm	(30.0, 16.3) μm
-0.20 + 5.24 ps	(31.9, 4.4) μm	24.5 μm	(34.8, 22.2) μm
-0.20 - 5.24 ps	(-25.4, 20.6) μm	25.9 μm	(35.5, 22.9) μm

4.6 予想されるシグナルの角分布と検出効率

表 4.11 に角分布と検出効率を計算する際に使用した各パラメータをまとめる。レーザーのビームウエストとして縦横のサイズの平均値を用いる。XFELの縦方向サイズとしてはFWHMサイズの平均値、横方向サイズはFit結果の平均値を使用した。XFELとレーザーのタイミングのずれは、本測定時の平均値の値を使用した。

表 4.11: シグナルの角分布と感度計算に用いるパラメータ

レーザーのビームウエスト 縦	9.58 ± 0.12 μm
レーザーのビームウエスト 横	12.1 ± 0.15 μm
レーザーの時間幅 (2σ)	25.5 fs
レーザーエネルギー	49 mJ
XFEL の縦方向サイズ (FWHM)	19.8 ± 2.7 μm
XFEL の横方向サイズ (FWHM)	45.1 ± 0.7 μm
XFEL の時間幅 (2σ)	10 fs
XFEL の縦方向の角度発散 (FWHM/2)	16.5 ± 0.2 μrad
XFEL の横方向の角度発散 (FWHM/2)	39.2 ± 2.9 μrad
XFEL に対するレーザーの位置のずれ 縦	12.2 ± 4.4 μm
XFEL に対するレーザーの位置のずれ 横	4.4 ± 1.7 μm
XFEL とレーザーの光軸の傾き 縦	10.3 ± 1.1 mrad
XFEL とレーザーの光軸の傾き 横	-36.5 ± 0.5 mrad
XFEL に対するレーザーの照射タイミング	-0.20 ± 5.24 ps
スリット 4 上の刃の光軸からの距離	477.7 ± 5.4 μm
スリット 4 下の刃の光軸からの距離	257.6 ± 5.4 μm

4.6.1 シグナルの角分布

シグナルの角分布の算出には (2.9) 式を用いた。この計算はレーザーをビームウエスト w_0 のガウシアンビーム、XFEL を縦 w_1 、横 w_2 の 2σ 径のガウシアンビームと仮定し、それらが正面衝突した際の角度発散を計算したものである。レーザーのウエスト w_0 は表 4.11 の縦横の平均値を用いた。XFEL の横方向サイズ w_2 には表 4.11 の値を用いた。縦方向サイズには、表 4.11 の FWHM サイズと同じ大きさの FWHM をもつガウシアンを仮定した。XFEL とレーザーの衝突タイミングにはずれがあり、そのためレーザーの集光サイズは変化する。集光サイズ $w(z)$ の見積もりとして理想的なガウシアンビームの式 $w(z) = \sqrt{w_0^2 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$ を用いた。レイリー長 z_R は理想的なガウシアンビームのときの大きさを使用し、 $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = 460 \mu\text{m}$ とした。 λ はレーザーの波長 800 nm である。XFEL のレイリー長は十分長いため、XFEL のサイズ変化は無視することが出来る。衝突タイミングのずれにより衝突時の XFEL とレーザーの相対位置にずれが生じる。表 4.12 に衝突時の各サイズと相対位置のずれをまとめる。

シグナルの角分布は図 4.25 となる。レーザーと XFEL の時間のずれはないとして、レーザーサイズとレーザーと XFEL の相対位置のずれは表 4.12 の値を用いて計算を行った。 $\varphi' = \frac{2}{\pi}$ の方向が上側の方向である。上下方向の角度発散が大きく、これは 2.4.3 章の議論から縦方向の Interaction Volume が横方向より小さいことを意味する。これは次節で計算された Interaction Volume の結果と一致する。

表 4.12: 衝突時の各サイズと相対位置

レーザーサイズ (2σ)	10.9 μm
XFEL の縦方向サイズ (2σ)	16.8 μm
XFEL の横方向サイズ (2σ)	19.2 μm
レーザーと XFEL の位置のずれ 縦	-12.5 μm
レーザーと XFEL の位置のずれ 横	-3.3 μm

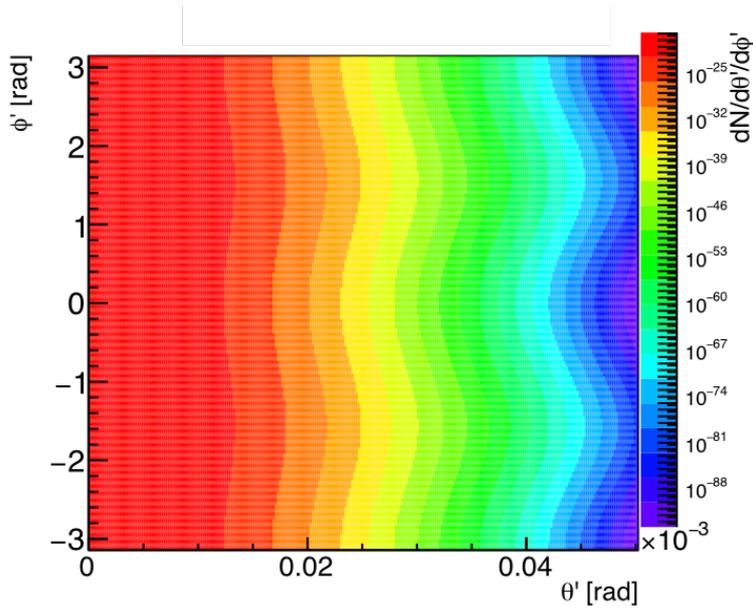


図 4.25: シグナルの角分布の理論値

4.6.2 Interaction Volume

シグナルの検出効率を計算するためには、シグナルの発射点の分布を見積もる必要がある。これは Interaction Volume とすればよく、以下のように Interaction Volume の計算を行った。

図 4.26 は衝突点での XFEL の空間分布である。XFEL の空間分布の横方向はガウシアンを仮定した。縦方向は衝突点でのワイヤースキャンの結果のうち、測定ステップが小さいスキャン結果の微分の分布を使用した。これは図 4.10 に対応する。図 4.10 で $-43 \mu\text{m}$ の位置はマイナスをとっているため、これより左側の位置の光子数は 0 とした。分布の中心位置は 4.3.2 章で行った解析方法を用いて計算し、図 4.26 の $y = 0 \mu\text{m}$ の位置とした。また分布の FWHM 幅が表 4.11 と一致するように横軸をスケールした。図 4.26 で $y > 14 \mu\text{m}$ の位置に光子数がないのは図 4.10 の分布でマイナスをとっている位置に対応するため、 $y < -34 \mu\text{m}$ の位置に光子数がないのは図 4.10 の測定の範囲外であるからである。

レーザーサイズとして表 4.11 の縦横それぞれの値を用い、4.6.1 章と同様に縦横それぞれのレイリー長を求めた。その結果レーザーの 2σ サイズは縦 $23.8 \mu\text{m}$ 、横 $21.1 \mu\text{m}$ となり、この大きさ

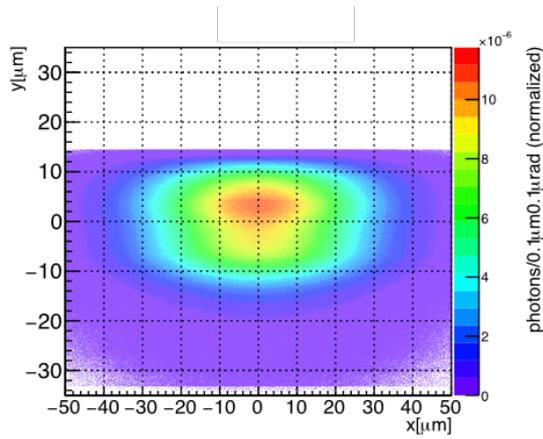


図 4.26: XFEL の空間分布

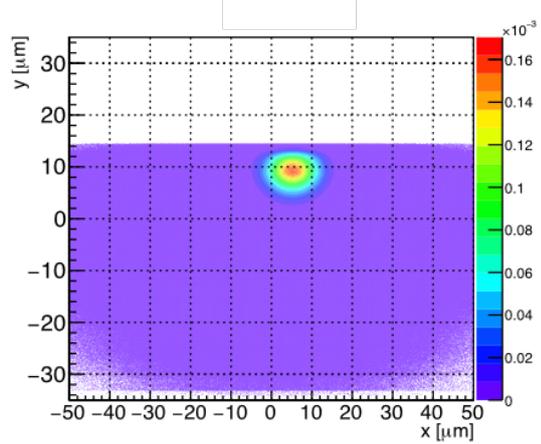


図 4.27: Interaction Volume(xy 空間)

に対応する 2 次元ガウシアンをレーザーの分布として使用した。

以上を用いて計算した Interaction Volume が図 4.27 である。Interaction Volume の計算には表 4.12 のレーザーと XFEL のサイズと相対位置のずれの値を使用した。Interaction Volume はレーザーの強度の 2 乗の分布と図 4.26 の分布を掛け合わせたものである。

4.6.3 位相空間

シグナルの検出効率を計算するために衝突点でのシグナルの位相空間を考える。位相空間はある一次元での光子の位置と進行方向の分布で、縦軸に角度、横軸に位置をとったものである。図 4.28 が衝突点でのシグナルの y 方向の位相空間である。Interaction Volume がシグナルの発射点の重みとなる。Interaction Volume は y の正方向が大きいため、正方向でのシグナルの量が多くなっている。

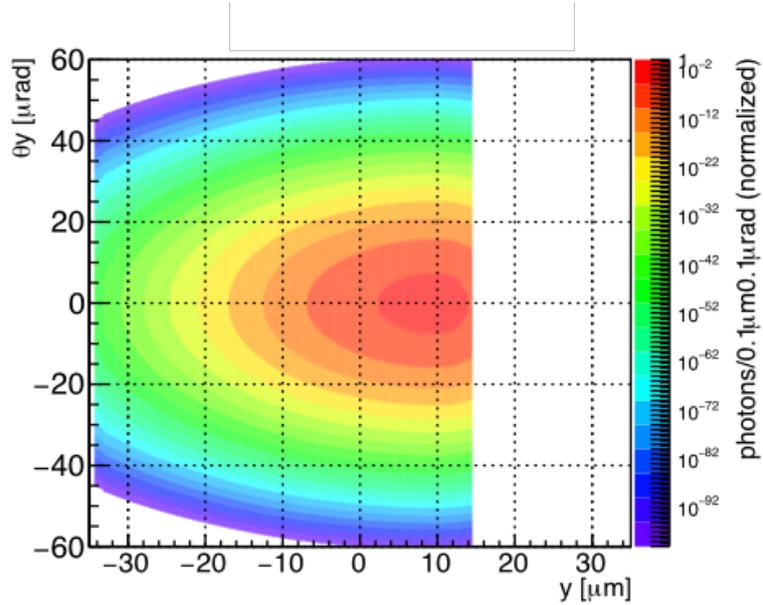


図 4.28: 衝突点でのシグナルの y 方向の位相空間

4.6.4 波面の傾きの補正

最後に XFEL の波面の傾きを補正する必要がある。(2.8) 式の表式では、XFEL の波面は進行方向に対して垂直な平面となっている。真空回折のシグナルの角度発散は、波面の進行方向に対して垂直な方向への運動量変化として計算される。実際の XFEL ビームは衝突点からずれがあり、波面が湾曲しているが(2.8) 式の表式では XFEL の波面の湾曲が考慮されていない。そのためシグナルの角分布の計算の際にはこれを考慮する必要があり、波面の傾き $\Theta(r)$ を以下の表式で補正した。

$$\Theta(r) = \frac{r}{R(z)} \quad (4.14)$$

$$R(z) = z \left(1 + \left(\frac{w_0}{\theta z} \right)^2 \right) \quad (4.15)$$

r は光軸から垂直方向の距離、 $R(z)$ はガウシアンビームの波面の曲率半径で、 z は集光点から衝突点までの距離である。 w_0, θ, z の値として表 4.7 でまとめた値を使用した。なお Be レンズから衝突点までの距離は 4.36 m であるので、 $z = 4.36 \text{ m} - q$ となる。これにより補正をかけた y 方向の位相空間が図 4.29 となる。

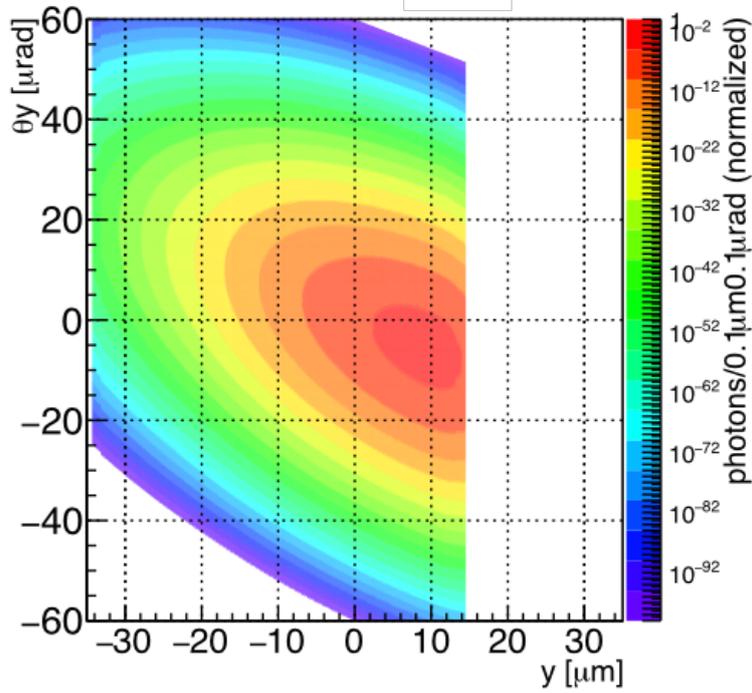


図 4.29: 波面の傾きを補正した衝突点での y 方向の位相空間

4.6.5 検出効率

以上の議論によりシグナルがスリット 4 を通過する検出効率を計算することができる。図 4.29 のうち、スリット 4 の開口を通過する光子は図 4.30 となる。スリット 4 下の刃で遮られるシグナルが縦軸 $30 \mu\text{rad}$ 程度以下の位置に相当し、これより上向きに放出されたシグナル光子がスリット 4 の開口を通過することが出来る。50 μrad 程度以上上向きに放出されたシグナル光子はスリット 4 上の刃によって遮られる。シグナルの放出される位置がマイナス側であるほどより大きな角度を持たなければスリット 4 の開口を通過することが出来ないため、図 4.29 の四角形の領域は左上がりになっている。

結果を表 4.13 にまとめる。XFEL 光子数は 4.7 章で述べる本測定の結果を表記している。

表 4.13: 反応確率と検出効率

反応確率	1.0×10^{-22} photons/1Xray
検出効率	2.0×10^{-23} photons/1Signal photon
XFEL 光子数	3.94×10^{10} photons/pulse

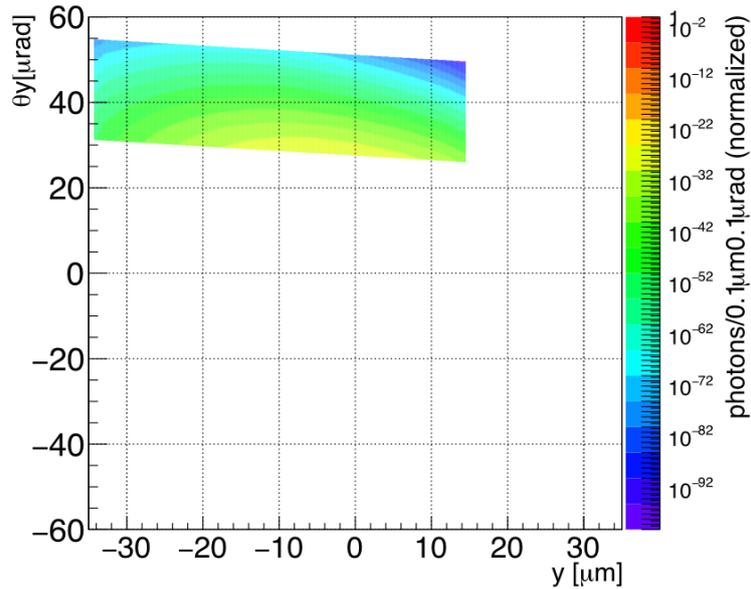


図 4.30: スリット 4 を通過する光子の衝突点での y 方向の位相空間

以上より、XFEL1pulse あたりのシグナル量の期待値は以下となる。

$$\text{シグナル量の期待値} = \text{反応確率} \times \text{検出効率} \times \text{XFEL 光子数} \quad (4.16)$$

$$= 8.1 \times 10^{-35} \text{ photons/pulse} \quad (4.17)$$

最後に系統誤差を見積もる。表 4.11 のエラーの値を変化させた際にシグナルの期待値がどの程度変化するかを見積もる。レーザーサイズのみ、縦横のそれぞれのサイズを使用した際の角分布を評価した。これによるとレーザーサイズを変化させた際と、縦方向の相対位置が変化した際のシグナル期待値の変化が大きい。レーザーサイズを大きく見積もると角度発散が小さくなり、検出効率が低下する。また相対位置が縦方向に離れると、シグナルの発射位置の重みが XFEL 分布の上方向にずれる。XFEL ビーム波面の曲率の効果によりスリット 4 を通過しやすいのは XFEL ビーム下側の光子であり、この影響により相対位置が縦方向に離れた際のシグナルの減少量が大きい。最終的にシグナルの期待値は、系統誤差を見積もったうちの最小の値を使用する。以上より最終的なシグナルの期待値は以下とする。

$$\text{シグナル量の期待値} \quad 5.5 \times 10^{-38} \text{ photons/pulse} \quad (4.18)$$

誤差として値をずらした各パラメータはそれぞれに相関があり、独立に誤差を評価することは適当ではない。それぞれのパラメータの分布をガウシアンで近似し、全てのパラメータを同時にランダムに変化させるモンテカルロ計算を行いシグナル量の期待値の確率密度分布を計算することが適当であると考えられるが、今回の計算ではこれを行っていない。しかしながら今回はレーザーサイズによる影響がその他の項目に比べオーダーが違ふほど大きかったため、この影響のみを系統誤差として考慮した。今後先に述べたモンテカルロ計算による評価を行う予定である。

表 4.14: 反応確率と検出効率、シグナルの期待値の系統誤差

変動量	反応確率		検出効率	シグナル期待値
		[photons/1Xray]	[photons/1Signal photon]	[photons/pulse]
ずれがないとき		1.0×10^{-22}	2.0×10^{-23}	8.1×10^{-35}
時間のずれ	-5.24 ps	6.4×10^{-24}	8.2×10^{-19}	2.0×10^{-31}
	+5.24 ps	2.2×10^{-23}	5.7×10^{-25}	5.0×10^{-37}
相対位置のずれ (縦)	+4.4 μm	4.7×10^{-23}	1.5×10^{-25}	2.8×10^{-37}
	-4.4 μm	1.7×10^{-22}	3.8×10^{-21}	2.5×10^{-32}
相対位置のずれ (横)	+1.7 μm	9.9×10^{-23}	2.0×10^{-23}	8.0×10^{-35}
	-1.7 μm	1.0×10^{-22}	2.0×10^{-23}	8.2×10^{-35}
XFEL のサイズ (縦)	+2.7 μm	1.1×10^{-22}	3.2×10^{-24}	1.4×10^{-35}
	-2.7 μm	8.7×10^{-23}	2.7×10^{-22}	9.3×10^{-34}
XFEL のサイズ (横)	+0.7 μm	1.0×10^{-22}	2.0×10^{-23}	8.0×10^{-35}
	-0.7 μm	1.0×10^{-22}	2.0×10^{-23}	8.2×10^{-35}
レーザーサイズ	12.1 μm	9.3×10^{-23}	1.5×10^{-26}	5.5×10^{-38}
	9.58 μm	1.1×10^{-22}	3.9×10^{-20}	1.7×10^{-31}
レーザーと XFEL の 角度 (縦)	+1.1mrad	1.0×10^{-22}	2.1×10^{-23}	8.4×10^{-35}
	-1.1mrad	1.0×10^{-22}	2.0×10^{-23}	7.9×10^{-35}
XFEL の角度発散 (縦)	+0.2 μrad	-	2.4×10^{-23}	9.7×10^{-35}
	-0.2 μrad	-	1.7×10^{-23}	6.8×10^{-35}
スリット 4 の位置	+5.4 μm	-	3.4×10^{-24}	1.4×10^{-35}
	-5.4 μm	-	1.2×10^{-22}	4.7×10^{-34}

4.7 本測定

本測定は 10 分間行った。XFEL は 30 Hz 運転、レーザーは 10 Hz 運転であり、レーザーの照射時と非照射時の 2 パターンで計測を行った。レーザー照射時の 6000 発と、レーザー非照射時の 12000 発の測定結果を比較することでシグナルを抽出する。

4.7.1 XFEL とレーザーのジッター

タイミングモニタによって XFEL とレーザーのジッターのその場計測を行った。図 4.31 に、レーザーと XFEL のタイミングを示す。データには (ビームモニタ 2 の電荷量) > 6.8 nC のカット

をかけている。1640 pixel 付近にピークがあるのは、レーザーのドリフトの影響である。タイミングモニタの測定可能領域は 1640 pixel 程度までであるのだが、レーザーが大きくドリフトしてしまったため測定可能領域を超えてしまった。それらのイベントのタイミングエッジが 1640 pixel 付近にピークを作っている。そのため(タイミングエッジ) $<$ 1600 pixel のカットをかける。 $t = 0$ の位置がレーザーの集光点で XFEL とレーザーが衝突しているタイミングで、正の方向にずれるにつれレーザーの照射タイミングが早くなる。カット位置は緑線で示した。緑線の左側のイベントが最終的に使用した領域で、イベント数は 1838 だった。照射タイミングの平均は -0.20 ps で、XFEL がレーザーより 0.20 ps 早く照射されたことになる。

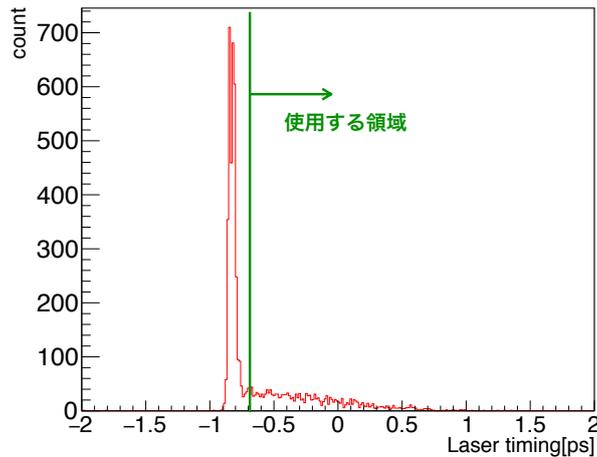


図 4.31: レーザーと XFEL のタイミング。緑線よりレーザーの照射タイミングが早い右側の領域を使用した。

4.7.2 PD 位置と衝突点での光子数

本測定中に PD で検出された光子数を図 4.32 に示す。赤がレーザー照射時の光子数である。青がレーザー非照射時の光子数であり、このデータから BG を評価する。レーザー非照射時には(ビームモニタ 2 の電荷量) $>$ 6.8 nC のカットを、レーザー照射時にはビームモニタのカットと 4.7.1 章で行った(タイミングエッジ) $<$ 1600 pixel のカットをかけている。

図 4.33 に、ビームモニタ 2 の値から換算した衝突点での光子数を示す。赤がレーザー照射時の光子数、青がレーザー非照射時の光子数である。

レーザー非照射時に計測された光子は全て BG であったと考えられる。これより、BG の抑制率は 10^{-4} であった。BG についての詳細な議論は付録 C で行うとして、ここでは簡単に考えられる BG の候補と、その推定される光子数を表 4.15 にまとめる。本測定時の真空チャンバの真空度は 2 Pa であった。散乱過程としては、コンプトン散乱とレイリー散乱のみを考えている。これらはすべて BG の原因ではないと考えられる。

付録 C では SPring-8 で本実験と同様なスリット配置を組み BG の study を行った結果について議論している。SPring-8 での BG study の際のスリット配置は本実験時と同様であるため、本測定時にも同じ物理過程が起こっていたと推測される。XFEL が理想的なガウシアンビームの場合

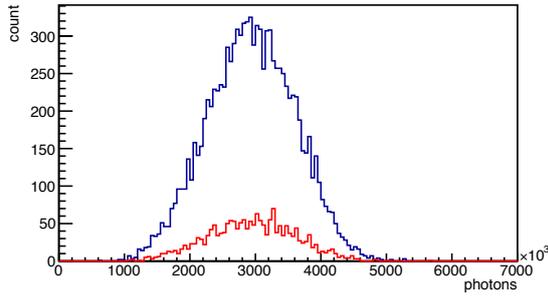


図 4.32: PD で検出された光子数。赤がレーザー照射時、青がレーザー非照射時の光子数でビームモニターとタイミングエッジのカットをかけている。

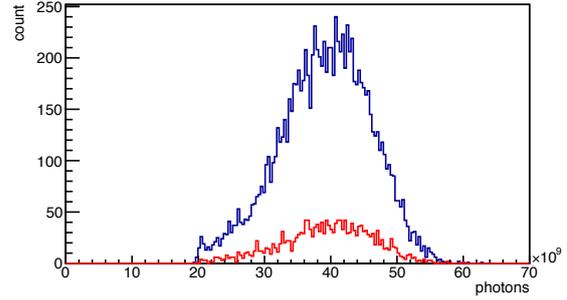


図 4.33: 衝突点での光子数。赤がレーザー照射時、青がレーザー非照射時の光子数でビームモニターとタイミングエッジのカットをかけている。

スリット 3 付近に伝播する光子は殆どないが、SPring-8 での BG 測定の結果によるとある一定数の光子がスリット 3 付近を伝播している。この光子を如何に除くかが本実験の BG 抑制のカギであり、今後 BG となるこの光子の発生起源の study を行う予定である。

表 4.15: バックグラウンドの候補と推定量

起源	推定量 [photons/pulse]
Be レンズなどで 1 回散乱した X 線	0
残留気体による散乱	10^{-4}
2 回散乱した X 線	10^{-9}

4.7.3 最終的な本測定結果

最終的な測定結果を表 4.16 にまとめる。レーザー照射時のデータには (ビームモニター 2 の電荷量) > 6.8 nC のカットと (タイミングエッジ) < 1600 pixel のカットを、レーザー非照射時のデータには (ビームモニター 2 の電荷量) > 6.8 nC のカットをかけている。BG の量を差し引いた結果、レーザー照射時のシグナル数は以下になった。ただし BG の量は本測定時の衝突点での光子数で規格化した。

$$\text{LaserOn} - \text{LaserOff} = -1.25 \times 10^4 \pm 43(\text{stat}) \pm 0.64 \times 10^4(\text{sys}) \quad [\text{photons/pulse}] \quad (4.19)$$

システムエラーは 4.2.1 章で議論した、ビームモニター 2 から衝突点での光子数を換算する際の 8.7% のエラーによるものである。BG を差し引いた結果の光子数はマイナスであり、シグナルは見えていないことがわかる。 -1.25×10^4 photons/pulse はシステムエラーの 2σ 以内で 0 photon であり、測定結果は 0 consistent であったと言える。中心値が -1.25×10^4 photon、 1σ が 0.64×10^4 photon

のガウシアンを光子数の確率密度分布として考える。ただし光子数が0以下になる確率は0とする。この分布の95% C.L. を取ることにより、光子数の上限値は以下となった。

$$6.9 \times 10^3 \text{ [photons/pulse]} \quad 95\% \text{ C.L.} \quad (4.20)$$

この結果とシグナルの期待値を比較することで本実験では真空回折現象の上限値として、真空回折の反応確率に対して95% C.L. で以下の limit をつけた。

$$\text{反応確率の QED 理論値からのエンハンス} < 1.3 \times 10^{41} \text{ 倍} \quad 95\% \text{ C.L.} \quad (4.21)$$

表 4.16: 本測定結果

	イベント数	平均光子数	衝突点での平均光子数
レーザー照射時	1838	2.9423×10^6	3.94×10^{10}
レーザー非照射時	10659	2.9370×10^6	3.91×10^{10}

第5章 議論と展望

5.1 議論

本実験のカギは、レーザーと XFEL を衝突させ、時間的空間的にその衝突を保証することである。今回の実験結果から、現状のアライメント方法で空間の精度は $\pm 1 \mu\text{m}$ 程度、時間の精度は $\pm 1.6\text{ps}$ で保証出来ることがわかった。またもう一つのカギである BG の抑制率は 10^{-4} となった。

5.1.1 空間のアライメント精度

空間の精度は金属薄膜の傾きや、XFEL が金属薄膜に作る穴の大きさ、レーザーが金属薄膜に作る窪みの大きさに依存すると考えられる。薄膜を設置しているサンプルステージは現状では目測で設置しており、これの設置精度を上げることは容易である。XFEL がより小さな穴を作れば XFEL 中心の決定精度は向上すると予想できる。またレーザーの集光サイズを小さくすると強度が中心に集中するため、窪みの大きさは小さく深くなることが予想されレーザー中心の決定精度が向上すると考えられる。そのためレーザーと XFEL のサイズを小さくすると相対的に空間の精度も向上すると考えられ、より小さなサイズのレーザーと XFEL でも空間的な衝突の保証が行えると考えられる。具体的にどの程度の小ささまで衝突の保証が行えるかは今後の実験で検証していく。

5.1.2 時間のアライメント精度

レーザーと XFEL には典型的に 250 fs(rms) 程度のジッターがある。これは XFEL の元となる電子ビームの電子が熱的な過程から生成されるためである。そのため時間的なアライメント精度はジッター幅程度でリミットされる。時間的な衝突のアライメント方法としてはこの値が目標値となる。タイミングモニターではショットごとに GaAs 薄膜に入射したレーザーの透過率の立ち下がり時間を測ることが出来る。GaAs 薄膜に対して同方向からレーザーと XFEL を照射しており、これによるレーザー透過率の立ち下がり時間はモニターの調整で 100 fs 程度に抑えることが出来る。すなわち理想的には現在のタイミング合わせの方法で、ジッター程度の精度でタイミング合わせが可能である。現在の精度を悪くしている要因として GaAs 薄膜 ($5 \mu\text{m}$ 厚) の石英基板 ($500 \mu\text{m}$ 厚) が考えられる。レーザーは石英基板側から照射しており、石英基板の透過に 2 ps 以上の時間を要する。タイミングの不定性はこれに起因すると予想しており、基板の必要のない Si_3N_4 薄膜などを使用すればタイミング決定精度を向上させられる可能性がある。

5.1.3 BG

衝突の保証と対になる本実験のカギはBGの抑制である。実験結果のBGの抑制率は 10^{-4} であり、最終的にQED理論値に到達するためには0BGでの測定が必要であるためBGはあと10桁程度の抑制が求められる。現在BG源の特定は出来ておらず、この特定および抑制が必要不可欠な課題である。SACLAのビームタイムは最大でも半年に1回で3日程度であるため、SACLAでBG studyを行うことは難しい。放射光施設であるSPring-8ではDCのX線ビームが利用可能であり、比較的ビームタイムの頻度、期間を確保することが出来るため、SPring-8を利用したBG studyを予定している。

5.1.4 解析方法

この論文中の解析にはより深く考慮すべき点は何点かある。1つ目はレーザーの集光プロファイルの問題である。4.6章でシグナルの角度発散の大きさを計算する際、[1]の理論計算結果を使用するためにXFELとレーザーのプロファイルをガウシアンとして扱っている。今回の実験ではXFELサイズに比べレーザーサイズが小さく、(2.23)式からわかるように角度発散の大きさにはレーザーサイズに強く依存していると考えられる。今回の実験結果はXFELとレーザーの中心位置にずれがあった。相対位置が相対位置決定精度のエラー分さらに縦方向に離れた場合、レーザーの 2σ 程度のテールの位置がXFELに重なっていたことになる。図4.4のレーザー集光像からわかるように、レーザーのテール部分をピーク付近と同じガウシアンであると扱うことは出来ない。テール付近は異なる分散のガウシアンとして扱うなどの補正を掛ける必要があると思われるが本解析中ではこれを行っておらず、今後さらなる解析が必要と考えられる。

2つ目はXFELの曲率半径の効果についてである。XFELの波面には場所に依存した曲率を持っており、4.6.4章ではその曲率にガウシアンビームの曲率を適用した。まずガウシアンビームの曲率を適用することの妥当性を議論する必要がある。XFELはスリットがない場合ガウシアンビームとして取り扱うことが出来る。スリットの効果によって波面の曲率がガウシアンビームの曲率から変化した可能性があり、この効果をなんらかの方法によって見積もる必要があると考えられる。また現在の解析ではXFELのテールも曲率を持っていると仮定している。曲率の効果はビーム外側の方が影響が大きく、衝突点ではXFELの下側の光子ほど上向きに伝播していることになっている。XFELのテール部分はスリットの効果によって作られていると予想しており、このテール部分の波面の傾きは異なる方法で推定する必要があると考えている。

3つ目はシグナルの期待値に対する系統誤差の見積もり方法である。4.6.5章ではシグナルの期待値の系統誤差の見積もりの際、各パラメータを独立に動かした際の期待値の変化量を計算している。各パラメータを動かした際のシグナルの変化量には相関があるため、これらを独立に取り扱うことは適切ではない。シグナルの期待値の取る確率密度分布を、全てのパラメータを同時に変化させるモンテカルロ計算を行うことで求める必要があると考えられる。

5.2 本研究の意義と他実験との比較

QEDで予言される1-loopの効果である真空の非線形効果のうち、真空中を伝播する光の偏光変化を観測する真空複屈折実験は世界の幾つかのグループによって行われている。本実験は真空

が光にもたらす運動量変化に着目して行われた世界で初めての実験である。実験ではレーザーとXFELの衝突を保証することができ、シグナル量の期待値も有限であり、光子数の測定結果も0 consistentであった。これによって真空回折実験は実現可能であることを示すことができ、運動量変化の観測によるQEDの検証の実現可能性を示した意義ある結果を得ることができた。また励起させた真空に対するプローブ光として、X線を用いた世界で初めての実験となった。近年のXFEL技術の確立により、X線をプローブ光として使用することが可能になった。しかしながらレーザーで励起した μm オーダーの真空とXFELを空間的に衝突させること、またフェムト秒のレーザー同士の時間的な衝突の技術的な困難さが指摘されていたが、これが実現可能であると本研究で示すことが出来た。

真空複屈折実験の感度は、QED理論値のおよそ20倍まで到達している[2]。しかし真空複屈折実験は可視光をプローブ光としているためにS/Nが悪い。これらの実験の基本方針は、プローブ光を可視光として長時間測定することで光子数と時間によって統計数を稼ぐというものである。可視光をプローブ光とした場合、非線形効果はプローブ光のエネルギーの2乗に比例するため反応確率が低く、残留ガスによる複屈折の効果も大きくノイズの原因となる。さらにプローブ光の反応回数を増やすために共振器を組んでいるため振動などの影響を強く受け、さらにノイズに敏感となる。真空複屈折実験の感度は理論値の20倍程度に迫っているものの、原因の分からないノイズが感度をlimitしていて、感度向上のためにノイズの原因特定が課題となっている。

真空回折実験はプローブ光としてX線を用いているため、可視光と比べ反応確率に 10^8 のゲインがある。BGの抑制を行うことが出来れば、非常にS/Nのよい実験となる。BGの原因はプローブ光の成形方法である可能性が大きいと考えられる。詳しくは次節で述べるが、SPRing-8でBG studyを行いBGの抑制方法を検証する予定である。

5.3 今後の展望

QED理論値まで実験感度を向上させるために必要なパラメータを以下にまとめる。このパラメータで実験を行うと、0BGでQED理論値で30 photonのシグナルが検出され 5σ での検証が可能となる。各パラメータの変更による感度向上率の概算値もともに示す。

レーザーはSACLAで現在インストール中の500 TWレーザーを使用する。感度はレーザーのパルスエネルギーの2乗に比例するため、 $\times 10^5$ の感度向上が見込まれる。レーザーとXFELを絞ることにより、角度発散の大きさが10倍になりアクセプタンスが $\times 10^{22}$ になる。現在のスリット開口位置はシグナルの角度発散に対して 10σ 程度の領域となっているが、角度発散が10倍になることでシグナルの角度発散の $1\sim 2\sigma$ 程度の領域になりアクセプタンスが大幅に向上する。また集光によりレーザー、XFELの強度が増すため反応確率が $\times 10^9$ となる。これによってレーザー、XFELを絞ることによる感度向上は正味で $\times 10^{31}$ となる。

XFELのビームウエストはSACLAで既に実現されている値で、技術的に難しい点は特にない。最小で $1\mu\text{m}$ の集光サイズが可能である。レーザーを $1\mu\text{m}$ に集光するには市販のOAPでは径が小さすぎるため、自ら設計し特注する必要がある。また回折限界近くまで集光する必要があり、集光前に形状可変ミラー等を用いて波面の整形を行う必要がある。レーザーの $1\mu\text{m}$ 集光はすでに300 TWレーザーで達成されており[9]、十分実現可能なパラメーターである。

BGの抑制が可能かどうかはstudyを行う必要がある。BGの抑制が不可能であった場合、シグナル量を増やしてS/Nを上げるか統計量を増やす必要がある。レイリー散乱やコンプトン散乱などのX線を粒子として扱った際に考えられるBGはジオメトリカルに抑制することが容易であり、X線をプローブ光として使った本実験の強みである。3.11.1章で示した値では残留ガスによる散乱の寄与が大きく 10^{-15} となっている。これは本実験時の真空度2 Paから計算される値である。真空度は 10^{-2} Pa程度まで下げることが可能であるので、残留ガスによる散乱を要求水準まで下げることが可能である。

問題はX線を波動として扱った際の振る舞いであり、この点に着目してBG源の検証を行う予定である。2017年度初めに放射光施設のSPring-8でBG studyを行う予定である。現在BG源の推測として、スリット3付近を伝播する光子がフレネル回折を起こしてスリット4の開口を通過している可能性が高いと考えている。これが原因である場合、スリット3付近を伝播する光を減らすと、これに比例してBG量も減少する。XFELがスリット3の位置で $6\ \mu\text{m}(2\sigma)$ 以下に集光されていて、空間プロファイルがガウシアンのとを考える。このような状況の場合スリット3付近に伝播する光子数は強く抑制され、この光子がフレネル回折を起こしたとしても検出器に入るBGは抑制率の要求を満たす。BGの抑制に必要なのはスリット3付近に伝播する光子をなくすことで、そのためにスリット3付近でXFELを小さく集光すること、また何らかの理由でスリット3付近を伝播する光子をスリット3より上流側のスリット等でカットすることの2点である。BG studyでは、まずスリット3付近でXFELを小さく集光させてXFELの空間プロファイルを測定する。そしてスリット3付近に多数の光子が伝播していた場合は上流のスリット等によるスキャンでスリット3付近を伝播する光子の発生源を特定する。この結果からスリット3付近を伝播する光子をカットできるように、真空回折実験のセットアップを改善する予定である。

表 5.1: 将来的な実験パラメータ

項目	値	感度向上率
レーザーパワー	12.5 J	$\times 10^5$
繰り返し周波数	1 Hz	$\times 0.1$
レーザーのビームウエスト	1 μm	
XFELのビームウエスト	2 μm	$\times 10^{31}$
BGの抑制率	10^{-16}	$\times 10^7$
測定時間	1.5 日	$\times 10^2$

第6章 まとめ

QED は真空は無ではなく仮想粒子が生成消滅を繰り返していることを記述している。この効果により真空が伝播する光にもたらず運動量変化は真空回折と呼ばれ、本研究ではこの効果の探索実験を世界で初めて行った。真空回折の有意なシグナルは得られなかったが、真空回折の反応確率に対して 95% C.L. で以下のリミットをつけた。

$$\text{反応確率の QED 理論値からのエンハンス} < 1.3 \times 10^{41} \text{ 倍} \quad 95\% \text{ C.L.} \quad (6.1)$$

これは真空回折に対する世界で初めてのリミットである。

付録A Interaction Volumeの導出

この章では、Interaction Volume がシグナルの確率密度分布であることを近似的に導出する。プローブ光の X 線とポンプ光のレーザーが z 軸上で正面衝突する状況を考える。(1.8) 式は M とその係数に分かれる。係数のうち dk'^3 の積分に依存する項は k', θ', φ' である。真空回折現象による運動量変化は非常に小さいため、係数項は $k' \approx k'_z, (1 + \theta') \approx 2, \varphi' \approx \varphi$ と近似することが出来る。xy 方向の空間広がりである Interaction Volume を導くには $dk'_x dk'_y \approx k'_z d \cos \theta' d\varphi'$ の積分を計算すればよく、係数項は積分に寄与しないため (1.5) 式で表される M を計算すれば良い。

簡単のため、プローブ光とポンプ光の電場強度分布として以下のもの考える。

$$\varepsilon^2(x) = \frac{1}{2} \varepsilon_0^2 e^{-2 \frac{(z-t)^2}{(\tau/2)^2}} \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 e^{-2 \frac{x^2+y^2}{w^2(z)}} \quad (\text{A.1})$$

$$g(x) = g_0 e^{-\frac{(z-t)^2}{(T/2)^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{w_{12}^2}} \quad (\text{A.2})$$

位相に寄与する項を無視している。またプローブ光とポンプ光は集光点で衝突するとして、これらのずれはないとする。またプローブ光の集光サイズは縦横で等しく w_{12} とする。時間幅が 10 fs 程度のパルスレーザー同士の衝突を考える。レーザーサイズを $5 \mu\text{m}$ とすると、レーザーのサイズが $\sqrt{2}$ 倍になるレイリー長の長さは $4 \mu\text{m}$ となり時間にして 300fs となる。そのため X 線とレーザーが相互作用する時間に比べレイリー長は十分長いとし、 $w(z) = w_0$ とする。すると、

$$\begin{aligned} M &= \int d^4x e^{ik'_x x} \frac{g(x)}{g_0} \left(\frac{\varepsilon(x)}{\varepsilon_0} \right)^2 \\ &= \int dx dy e^{i(k'_x x + k'_y y)} e^{-2 \frac{x^2+y^2}{w_0^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{w_{12}^2}} \int dz dt e^{i(k'_z z + k'_t t)} e^{-2 \frac{(z-t)^2}{(\tau/2)^2}} e^{-\frac{(z-t)^2}{(T/2)^2}} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

のように変数分離することができる。さらに

$$\begin{aligned} \int dx dy e^{i(k'_x x + k'_y y)} e^{-2 \frac{x^2+y^2}{w_0^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{w_{12}^2}} &= \int dx dy e^{i(k'_x x + k'_y y)} e^{-2 \frac{x^2+y^2}{w^2}} \\ &= \pi w^2 e^{-\frac{w^2}{4} (k_x'^2 + k_y'^2)} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} |M|^2 &\propto w^4 e^{-\frac{w^2}{2} (k_x'^2 + k_y'^2)} \\ &= w^4 e^{-\frac{w^2}{2} k^2 \sin^2 \theta'} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

となる。 $|M|^2$ の係数のうちポンプ光とプローブ光のサイズに依存するのはピーク強度の ε_0, g_0 の二項のみであり、これより

$$d^2N = d \cos \theta' d\varphi' \frac{C}{w_0^4 w_{12}^2} w^4 e^{-\frac{w^2}{2} k^2 \sin^2 \theta'} \quad (\text{A.6})$$

となり (2.21) 式を導くことが出来た。これより運動量空間の波動関数が

$$\tilde{\psi}_x(k'_x) \tilde{\psi}_y(k'_y) = \frac{w^2}{w_0^2 w_{12}} e^{-\frac{w^2}{2} k^2 \sin^2 \theta'} \quad (\text{A.7})$$

となり、これの逆フーリエ変換の 2 乗である Interaction Volume を導出することが出来る。

付録B アライメント及び解析の詳細な手順

B.1 カメラの調整

カメラは2つ使用したが解析に用いたのはカメラ1のみのため、カメラ1に対する結果のみ述べる。

B.1.1 ピント合わせ

レーザーの集光像をモニターするカメラのピントは、サンプルステージの位置に合わせた。ピント合わせの方法は以下のように行った。

1. サンプルステージに亜鉛薄膜 20 μm 厚をセットし、XFEL で 20 \times 40 μm (縦 \times 横) 程度の穴を開ける。
2. 穴の横方向に外れるあたりにレーザーを照射し、穴の像をみる。
3. カメラを前後に動かし、像がきれいな位置を探す。

1. の XFEL で開けた穴の顕微鏡画像が図 B.1 である。穴の大きさが横長であるのは、縦方向のスリットで XFEL ビームを整形しているためである。

次にカメラ1の位置を前後させた際の穴の像を示す。カメラのピントがずれると像が乱れることがわかる。これより、図 B.4 の位置をカメラ1のピントがっている状態とした。なお B.1.2 章の結果により、カメラの 160 pixel 程度が 40 μm に相当する。そのため、穴の大きさと同程度の像がみえているこれができる。

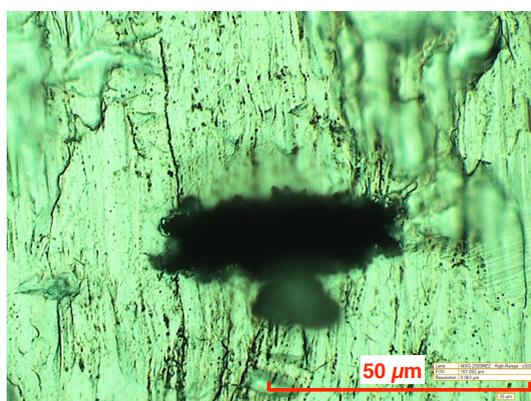


図 B.1: 亜鉛薄膜に XFEL で開けた穴の画像

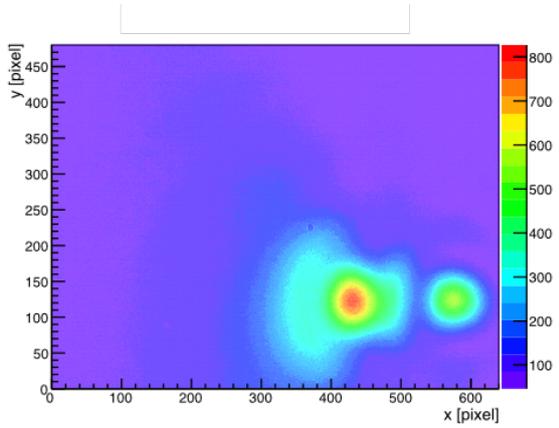


図 B.2: 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $-4000 \mu\text{m}$)

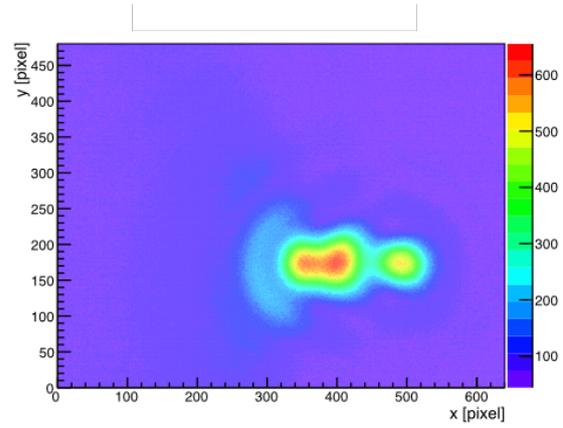


図 B.3: 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $-1500 \mu\text{m}$)

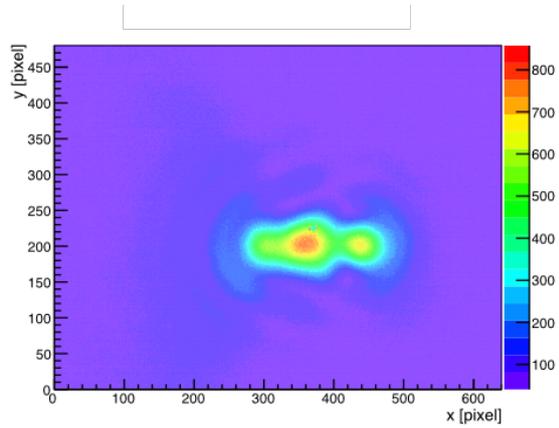


図 B.4: 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $0 \mu\text{m}$)

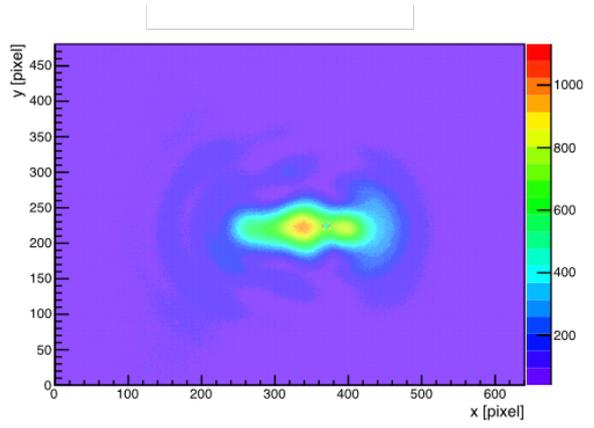


図 B.5: 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $+1000 \mu\text{m}$)

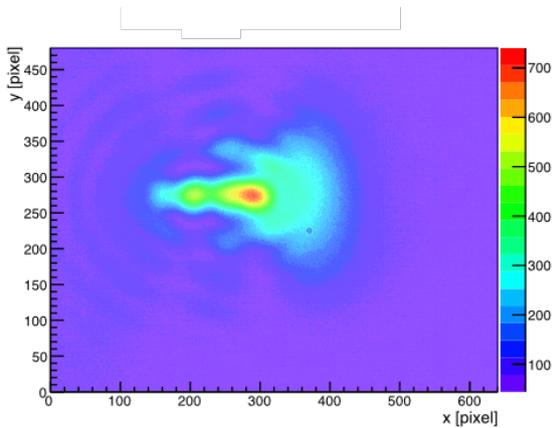


図 B.6: 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $+3500 \mu\text{m}$)

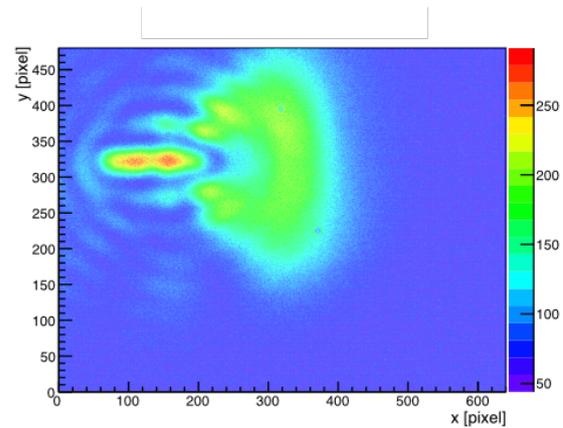


図 B.7: 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $+6000 \mu\text{m}$)

B.1.2 pixel 数と距離の較正

次にカメラ 1 の pixel 数と衝突点での実際の長さとの較正を以下の方法で行った。

1. ピント合わせに使用した穴の像をみる。このとき、レーザーは穴の横方向に外れるあたりに照射する。
2. 亜鉛薄膜 (穴の位置) を上下左右に動かし、像の位置変化をみる。その際、レーザーの照射位置も同程度動かす。
3. 穴の位置の変化量と像の位置の変化量から較正を行う。

像の位置の決定は、像を各軸に射影して頂点を $\pm 0.5\sigma$ のガウシアンで Fit することで求めた。結果を表 3.10 にまとめる。なお各状況で 100 イベントの計測を行い、結果の分散をエラー値とした。これにより較正結果は以下になった。

表 B.1: 穴の位置の変化に対する像の位置の変化量

穴の位置 (縦) [μm]	穴の位置 (横) [μm]	頂点の位置 (縦) [pixel]	頂点の位置 (横) [pixel]
-30 μm	0	344.8 ± 0.9	339.1 ± 1.3
+30 μm	0	101.2 ± 1.3	339.2 ± 1.2
0	-30 μm	222.5 ± 1.0	459.6 ± 1.6
0	+30 μm	201.4 ± 0.5	364.3 ± 0.7

$$\text{縦 } 4.06 \pm 0.03 \text{ [pixel}/\mu\text{m}] \quad (\text{B.1})$$

$$\text{横 } 4.02 \pm 0.03 \text{ [pixel}/\mu\text{m}] \quad (\text{B.2})$$

CCD カメラの 1pixel の大きさは $7.4 \mu\text{m}$ であるので拡大倍率は 30 倍である。真空チャンバ内のレンズで 4 倍程度、カメラのレンズで 7 倍程度拡大しているので両者は概ね一致する。

B.2 タイミングモニタの解析方法

タイミングモニタでは、GaAs 薄膜に対してレーザーと XFEL が照射されているが、レーザーの照射領域の下半分のみには XFEL は照射されていない。図 B.8 のタイミングモニタの画像データでは、縦軸の 200 から 300pixel の領域にレーザーが照射されていて、XFEL は 220 から 250pixel の領域に照射されている。タイミングエッジの検出には、主に XFEL の照射されている領域を使用して解析を行う。タイミングエッジはレーザーの透過率の変化を表すものである。そのためレーザーの透過量を規格化する必要があるため、XFEL を照射しない状況でもタイミングモニタのデータ取得を行い、このデータを用いてレーザーの透過量を規格化して透過率を求めた。タイミングエッジの解析方法を以下にまとめる。

1. タイミングモニタ画像図 B.8 を、XFEL を照射しなかったときの画像で割り、レーザーの透過率を出す図 B.9。
2. 図 B.9 XFEL が照射されている領域を取り出して x 軸に射影をする。縦軸の 230 から 245pixel の領域を切り出して x 軸に射影をする。
3. レーザー光量には左右方向に勾配があり、勾配の大きさがイベントごとに異なる。この勾配の影響をキャンセルするために、図 B.9 のレーザーのみが照射されている領域である 265 から 280pixel を切り出して x 軸に射影を行う。
4. 2. で得たヒストグラムを 3. で得たヒストグラムで割る。これによりイベントごとのレーザー光量の左右方向の勾配をキャンセルすることが出来る。これにより得られるヒストグラムが図 B.10 である。1550pixel 付近から左側にかけてレーザーの透過率が減少しており、これがタイミングエッジである。
5. タイミングエッジを以下の関数で Fit する。透過率が最小になる位置から右側を Fit する。

$$f(x) = a(x - b)(x - x_0) + c \quad x < x_0 \quad (\text{B.3})$$

$$f(x) = \alpha(x - x_0) + c \quad x_0 < x \quad (\text{B.4})$$

Fit 結果が図 B.10 の青線であり、2つの関数の変わり目である $x = x_0$ の位置をタイミングの基準点としてとる。

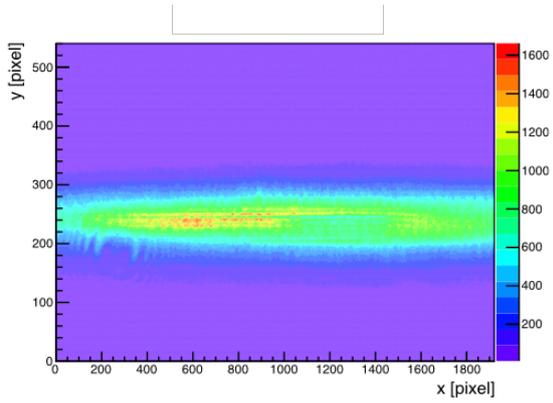


図 B.8: タイミングモニタの画像データ

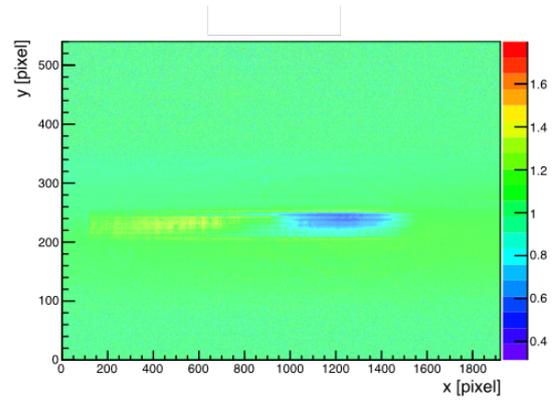


図 B.9: タイミングモニタのデータを BG のデータで割ったヒストグラム

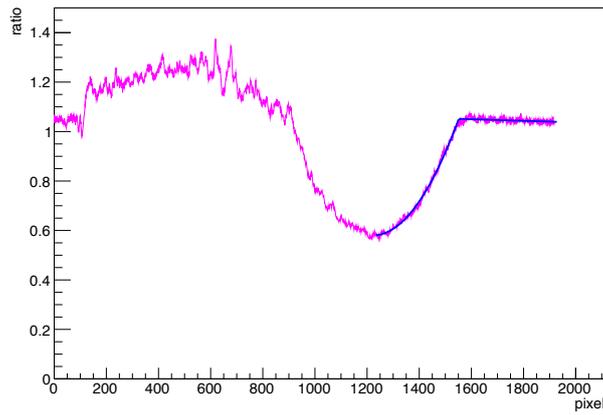


図 B.10: タイミングエッジ

付録C Spring-8におけるBG測定

本実験ではBGを抑制し、シグナルとBGの分離を行うため4象限スリットを用いる。複数のスリットのシステムにより、BGの抑制が可能かどうかSpring-8にてBG測定を行った。測定は、SACLAでの本実験と同様のスリット配置で行った。特に特徴的な振る舞いが観測された結果についてまとめる。

C.1 SPring-8

SACLAの隣に建設されているSPring-8は周長1.4 kmの電子蓄積リングを要する放射光施設であり、2016年現在、56本のビームラインが稼働している。そのうちBL19LXUは27 mのアンジュレータを整備していて、SPring-8の電子ビームをアンジュレータに入射させることで高輝度なX線を得ることが出来る。

SPring-8の電子ビームはバンチと呼ばれるかたまりで蓄積リングを周回しており、バンチを詰めることが出来る場所をバケットと呼ぶ。蓄積リングのバケットは2436個あり任意の場所に電子バンチを詰めることができる。実際の運転ではバンチの詰め方にはいくつかのパターンがあるが電子バンチの周回周期は4.7 μ sであるので、得られるX線はDC光源とみなすことが出来る。表C.1にSPring-8のパラメータをまとめる。

表 C.1: SPring-8 のパラメータ

蓄積リングパラメータ	電子ビームエネルギー	< 8 GeV
	電子バンチ間隔	23.6 ns, 57.0 ns ...etc
BL19LXU パラメータ	光子エネルギー	7.2-18 keV
	フラックス	$\sim 2 \times 10^{14}$ photon/s at 14 keV
	ビームサイズ (非集光時)	~ 0.8 mm \times 1.5 mm

C.2 実験セットアップ

スリットの配置とその距離関係を図C.1に示す。ナイフエッジスキヤンの光子数の測定は、スリット5の下流に設置したPDで行った。

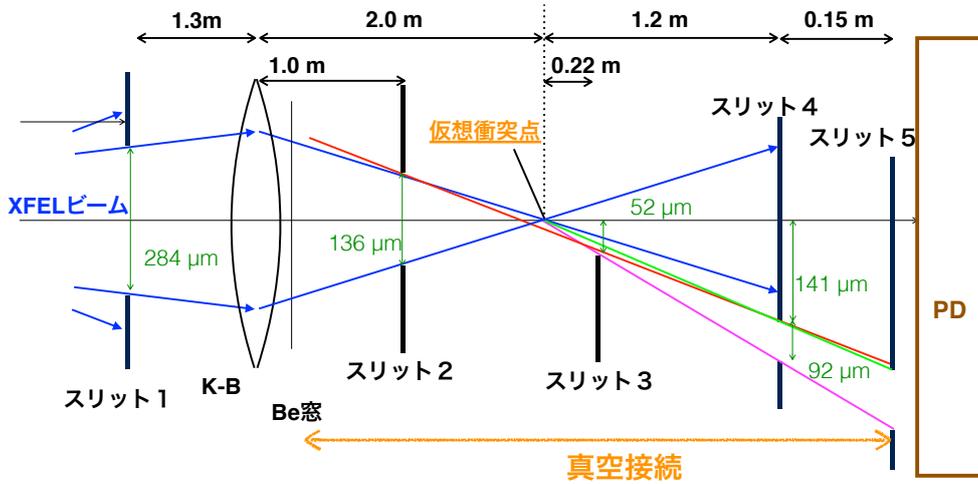


図 C.1: SPring-8 でのスリットの配置

C.3 スリット 2 からの散乱 X 線

スリット 1 のみ設置した後に、スリット 2 位置でのナイフエッジスキャンを行った。スリット 2 下の刃でのナイフエッジスキャン結果を微分したものを図 C.2 に示す。これはスリット 2 位置での XFEL 分布を表す。

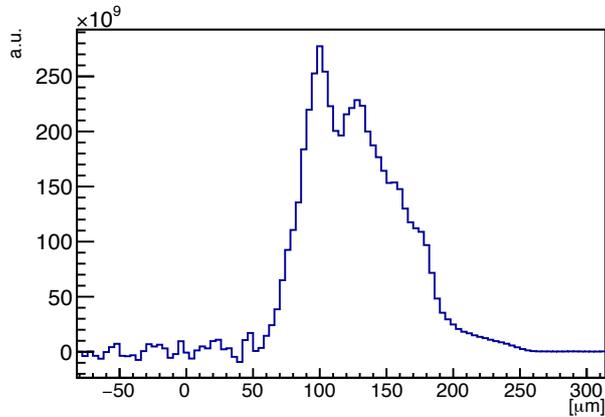


図 C.2: スリット 2 位置での XFEL 分布

次に、スリット 2,3,4 を図 C.1 のように設置した。その後、スリット 2 の上の刃でナイフエッジスキャンを行った。結果を図 C.3 に示す。スリットが閉まっていく方向はマイナス方向である。スリット 2 の上の刃を閉めていくとスリット 4 の開口を通過する光子数が増えた後に減少することがわかる。スリット 2 の上の刃が、幾何学的にスリット 4 の開口が見えなくなる図 C.1 の状況の位置が青線で示された位置で、この位置の光子数はスリット 2 の影響がない $50 \mu\text{m}$ 付近の光子数と同じになる。これから、スリット 2 の刃で X 線が散乱していることが予想される。図 C.4 に、スリット 2 位置での XFEL 分布を重ねたプロットを示す。スリット 2 からの散乱だと予想される

光子数は XFEL 分布と一致する。これよりスリット 2 で X 線が散乱しており、その数は XFEL の光子数に比例していると考えることが出来る。またこの散乱光はスリットの幾何学的配置により除くことができるということがわかる。

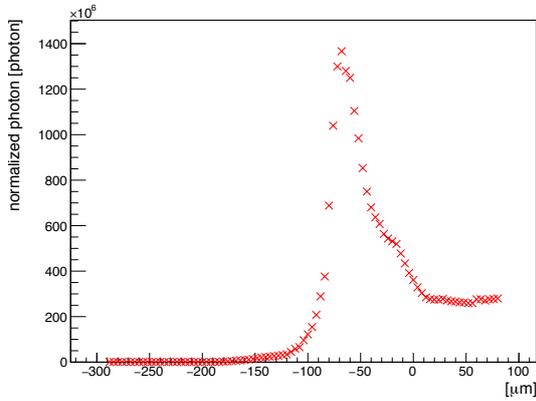


図 C.3: スリット 2 のナイフエッジスキャン

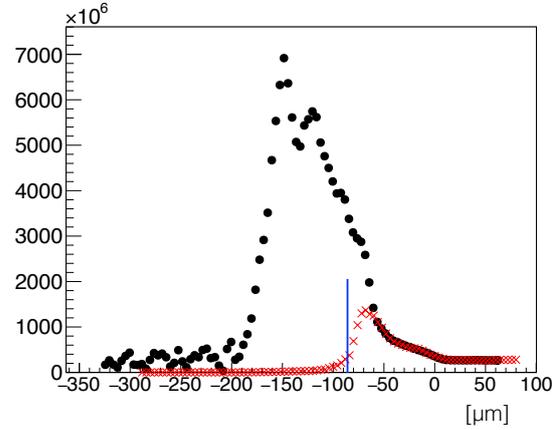


図 C.4: スリット 2 のナイフエッジスキャンと XFEL 分布

C.4 スリット 3 の位置に対する BG の振る舞い

スリット 3 の位置に対して BG がどのように振る舞うかを検証するため、スリット 3 の位置を変えて光子数分布の測定を行った。初めにスリット 1,2 を図 C.1 のように配置した。スリット 3 を設置し、スリット 4 で縦 $10 \mu\text{m}$ の開口をつくりスリット 4 位置での光子数分布の測定を行った。スリット 3 の位置は、光軸から $20 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ の 3 パターンの測定を行った。結果を図 C.5 に示す。横軸には、衝突点を基準として光軸に対する角度をとった。赤のときがスリット 3 の光軸からの距離が $20 \mu\text{m}$ 、黒のときが $40 \mu\text{m}$ 、青のときが $100 \mu\text{m}$ である。測定はレンジが大きいので、4 段階程度のゲインで複数回行った。プロットはすべての結果をまとめたものである。それぞれの測定で $-300 \mu\text{rad}$ ほどではテールを作っており、これより外側では大きな光子数の減少は見られない。これはスリット 2 からの散乱が、スリット 3 の幾何学的配置によりスリット 4 の開口を通過できなくなるためである。つまり、このテールを構成している光子はスリット 2 の刃からの散乱によるものではない。

図 C.5 にスリット 3 で同様の開口スキャンを行った結果を示す。測定は 2 段階のゲインで行った。スリット 3 はマイナス方向の位置に設置しており、スリット 3 の設置位置では一定数の光子数があり外側に移るにつれ光子数が減少していることがわかる。図 C.5 ではスリット 3 の位置が光軸から離れるほどテールの量は減少する。このことからスリット 3 位置での光子数の減少に対応して、スリット 4 位置でのテールの量も減少していると考えることが出来る。このような振る舞いを示す物理過程としてスリットでの散乱とフレネル回折が考えられる。しかしスリットでの散乱は微小角散乱であるため、 f_{ref} スリット 4 位置での光子数分布のようなテールは作らないと考えられる。スリット 3 の付近を通過する光子がスリット 3 のポテンシャルを感じてフレネル回折を

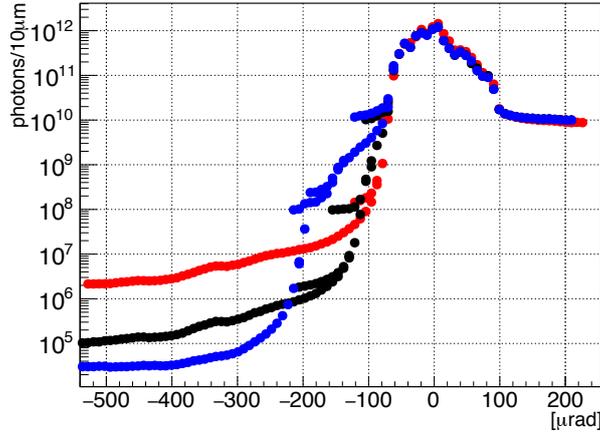


図 C.5: スリット 4 位置での光子数分布。赤がスリット 3 の光軸からの距離が $20 \mu\text{m}$ 、黒が $40 \mu\text{m}$ 、青が $100 \mu\text{m}$ 。

した場合、回折光はこのようなテールを作る。そのためテールを作った原因はフレネル回折ではないかと現在予想しているが、明確な確証を得るためにはさらなる BGstudy を行う必要がある。

このテールを構成している位置が真空回折実験でのシグナル領域であるため、BG の抑制率は $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 程度となった。

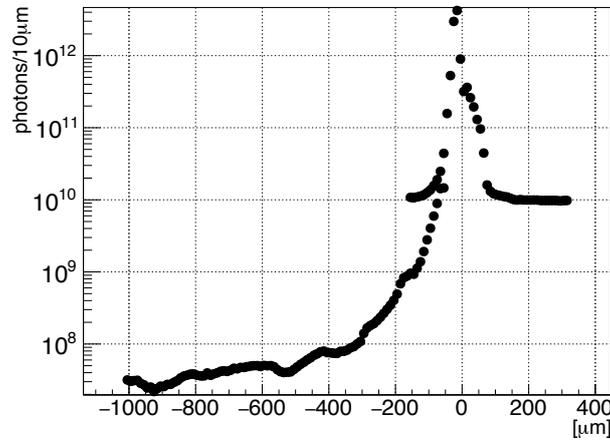


図 C.6: スリット 3 位置での光子数分布。 $0 \mu\text{m}$ 位置が光軸。

C.5 結果および考察

スリット 2 の刃からの散乱はスリット 3 による幾何学的配置によりカット出来ているということがわかった。スリット 3 の設置位置には一定数の光子が伝播しており、これがフレネル回折を起こすことで検出器に入射しているという予想を現在たてているが、これを実証するためにはそれぞれのスリット位置での光子数密度の計測や、光子の伝播方向の計測を行う必要がある。真空

回折実験としては、スリット 3 付近に伝播する光子を抑制し、スリット 3 付近には光子がほぼないような環境を作る必要がある。現在、スリット 3 付近をなぜ多くの光子が伝播しているのか原因が特定できておらず、BGstudy としてはスリット 3 付近を伝播する光の発生源を突き止めることが必要となる。

謝辞

本実験を進めるにあたり、様々な方々にご指導、ご協力を頂きました。

坂本宏教授には身勝手な私を暖かく応援していただきました。感謝してもしきれません。本当にありがとうございます。

浅井祥二准教授には実験のガイドラインを示していただき、また研究者として目指すべき姿をご指導頂きました。

難波俊雄助教授には日々のミーティングで様々な助言を頂き、時には叱咤激励のお言葉の数々をかけて頂きました。それらのお言葉、忘れることが出来ません。

石田明准教授には、右も左もわからなくなったときに自分の進むべき道へと導いて頂きました。

山崎高幸特任研究員、稲田聡明特任研究員には実験の計画から準備、実行、解析に至るまで様々なご指導を頂きました。日々の議論、ご助言のおかげで実験を成功させられたことは言うまでもありません。また共に駆け抜けた72時間、忘れません。

SACLA、SPring-8の石川哲也さん、犬伏雄一さん、藪内俊毅さん、富樫格さん、玉作賢治さん、大和田成起さん、矢橋牧名さんには放射光施設のいろはから様々なことをお教えいただき、実験の構想段階からビームタイム中の実験装置や作業に至るまで本実験に大変ご協力頂きました。またSACLA、SPring-8のビームラインスタッフの皆様には実験作業のご協力やレーザーの運用など、共に実験を行って頂きました。ありがとうございます。

フォトサイエンスリーディング大学院の緑川克美副指導教官にはレーザー開発の専門家として様々なご意見を頂きました。

小実験グループの山道智博さん、周健治さん、樊星さん、上岡修星さん、村吉諄之さんとの日々の様々な議論は実験を進める大きな原動力となりました。

この他にも大塚茂巳氏を始めとした試作室の皆様、素粒子センター事務室の皆様などの支えによって研究を行うことが出来ました。皆様に心より感謝いたします。

目次

1.1	真空回折現象の模式図	2
1.2	リーディングオーダーの Feynman diagram	3
1.3	それぞれの角度の定義	4
2.1	レーザーと XFEL による真空回折実験	7
2.2	ガウシアンビームのサイズ変化	8
2.3	シグナルの角分布:ch02	10
2.4	シグナルの角分布 (log)	10
2.5	散乱確率のプローブ光の光子エネルギー依存性	11
2.6	プローブ光の時間幅変化に対するシグナル量	12
2.7	ポンプ光の時間幅変化に対するシグナル量	12
2.8	XFEL の大きさに対する角度発散	13
2.9	レーザーの大きさに対する角度発散	13
2.10	Interaction Volume に対する角度発散	14
2.11	Interaction Volume の積分に対する反応確率	14
2.12	セットアップの概略図	16
2.13	スリットによる XFEL ビームの角度発散の抑制と BG のカット	17
2.14	衝突点でのシグナルと XFEL の角度発散の計算値	18
3.1	実験セットアップ:全体図	20
3.2	アンジュレータの概略図	21
3.3	XFEL のエネルギー分布	22
3.4	スリット 1 上の刃での縦方向のナイフエッジスキャン	23
3.5	スリット 1 右の刃での横方向のナイフエッジスキャン	23
3.6	XFEL 診断系の各検出システムの配置	24
3.7	ビームモニタの模式図	25
3.8	ビームモニタ 2 の電荷量	25
3.9	スクリーンモニタの模式図	26
3.10	スクリーンモニタで観測した XFEL の空間強度分布	26
3.11	Be レンズの模式図	26
3.12	Be レンズの集光調整の各パラメータ	27
3.13	Be レンズの枚数 n に対する衝突点での縦方向の集光サイズ $w(n)$	28
3.14	レーザー光学系の配置	29
3.15	OAP による集光	30

3.16	OAP と自動ステージ	30
3.17	4 象限スリット	31
3.18	フォトダイオード (Be 窓あり)	32
3.19	タイミング合わせの模式図	33
3.20	GaAs 薄膜	34
3.21	ジッター計測システムの模式図	35
3.22	タイミングモニタ画像	35
3.23	タイミングモニタのレーザー透過率	35
3.24	レーザー顕微鏡の模式図	36
3.25	各スリットの位置関係	37
4.1	レーザーの集光像 (数 nJ)	40
4.2	レーザーの集光像 (81 mJ)	40
4.3	レーザーの集光像の X 軸への射影 (数 nJ)	41
4.4	レーザーの集光像の Y 軸への射影 (数 nJ)	41
4.5	レーザーの集光像の X 軸への射影 (81 mJ)	41
4.6	レーザーの集光像の Y 軸への射影 (81 mJ)	41
4.7	ビームモニタ値と衝突点での光子数の対応付	43
4.8	衝突点での横方向のワイヤスキャン結果	44
4.9	衝突点での縦方向のワイヤスキャン結果	45
4.10	衝突点での縦方向のワイヤスキャン結果 (微分)	45
4.11	スリット 2 上の刃のナイフエッジスキャン結果を使用した光軸決定の Fit 結果	47
4.12	スリット 3 上の刃のナイフエッジスキャン	49
4.13	XFEL の角度発散 (縦)	50
4.14	XFEL の角度発散 (横)	50
4.15	レーザーの透過率に変化がないときのカメラ画像	51
4.16	レーザーの透過率が減少しているときのカメラ画像	51
4.17	レーザーの GaAs 薄膜透過率測定結果	52
4.18	タイミングエッジの 0 点位置	53
4.19	Zn 薄膜の顕微鏡画像	55
4.20	Zn 薄膜に開いた穴のレーザー顕微鏡画像	56
4.21	2 値解析の 2 次元ヒストグラム	56
4.22	2 次元ヒストグラムの x 軸への射影	56
4.23	レーザーが Zn 薄膜につくる窪みの Fit	57
4.24	レーザーが Zn 薄膜につくる窪みの Fit(3D)	57
4.25	シグナルの角分布の理論値	62
4.26	XFEL の空間分布	63
4.27	Interaction Volume(xy 空間)	63
4.28	衝突点でのシグナルの y 方向の位相空間	64
4.29	波面の傾きを補正した衝突点での y 方向の位相空間	65
4.30	スリット 4 を通過する光子の衝突点での y 方向の位相空間	66

4.31 レーザーと XFEL のタイミング	68
4.32 PD で検出された光子数	69
4.33 衝突点での光子数	69
B.1 亜鉛薄膜に XFEL で開けた穴の画像	78
B.2 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $-4000 \mu\text{m}$)	79
B.3 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $-1500 \mu\text{m}$)	79
B.4 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $0 \mu\text{m}$)	79
B.5 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $+1000 \mu\text{m}$)	79
B.6 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $+3500 \mu\text{m}$)	79
B.7 亜鉛薄膜の穴の像 (カメラ位置 $+6000 \mu\text{m}$)	79
B.8 タイミングモニタの画像データ	82
B.9 タイミングモニタのデータを BG のデータで割ったヒストグラム	82
B.10 タイミングエッジ	82
C.1 SPring-8 でのスリットの配置	84
C.2 スリット 2 位置での XFEL 分布	84
C.3 スリット 2 のナイフエッジスキャン	85
C.4 スリット 2 のナイフエッジスキャンと XFEL 分布	85
C.5 スリット 4 位置での光子数分布	86
C.6 スリット 3 位置での光子数分布	86

表 目 次

2.1	レーザーと XFEL の集光サイズの目標値と角度発散	16
2.2	信号強度の概算値	19
3.1	SACLA の XFEL パラメータ (bl3)	21
3.2	スリット 1 のナイフエッジスキャン結果	23
3.3	集光サイズの測定結果から得られた値	28
3.4	同期レーザー (2.5 TW) のパラメータ	29
3.5	CCD カメラのスペック	31
3.6	衝突点下流の物質と透過率	32
3.7	バックグラウンドの候補と抑制率	38
4.1	各種パラメータとその安定性	42
4.2	スクリーンモニタ位置での XFEL サイズ及びポジションのふらつき	43
4.3	横方向の各スキャン結果	45
4.4	縦方向の各スキャン結果	46
4.5	XFEL サイズの各スキャン結果	46
4.6	光軸の決定結果 (縦)	48
4.7	XFEL の角度発散	49
4.8	XFEL とレーザーの相対位置の測定結果	58
4.9	XFEL に対するレーザーの相対位置	59
4.10	衝突タイミングがずれたときの XFEL に対するレーザーの相対位置	60
4.11	シグナルの角分布と感度計算に用いるパラメータ	61
4.12	衝突時の各サイズと相対位置	62
4.13	反応確率と検出効率	65
4.14	反応確率と検出効率、シグナルの期待値の系統誤差	67
4.15	バックグラウンドの候補と推定量	69
4.16	本測定結果	70
5.1	将来的な実験パラメータ	74
B.1	穴の位置の変化に対する像の位置の変化量	80
C.1	SPring-8 のパラメータ	83

関連図書

- [1] F. Karbstein and C. Sundqvist, "Probing vacuum birefringence using x-ray free electron and optical high-intensity lasers", *Phys. Rev. D.* **94**, 013004 (2016)
- [2] F. D. Valle et al, "The PVLAS experiment: measuring vacuum magnetic birefringence and dichroism with a birefringent Fabry-Perot cavity", *Eur. Phys. J C* **76**:24 (2016)
- [3] F. Karbstein, H. Gies, M. Reuter and M. Zepf, "Vacuum birefringence in strong inhomogeneous electromagnetic fields", *Phys. Rev. D* **92**, 071301(R) (2015)
- [4] F. Karbstein and R. Shaisultanov, "Stimulated photon emission from the vacuum", *Phys. Rev. D* **91**, 113002 (2015)
- [5] M. Yabashi et al., "Overview of the SACLA facility", *J. Synchrotron Rad.* **22**, 477 (2015)
- [6] 登野 健介, 「光ビームライン」, 高エネルギー加速器セミナー OHO'13
- [7] K. Tono et al., "Single-shot beam-position monitor for x-ray free electron laser", *Rev. Sci. Instrum.* **82**, 023108 (2011)
- [8] T. Katayama et al., "A beam branching method for timing and spectral characterization of hard X-ray free-electron lasers", *Struct. Dyn.* **3**, 034301 (2016)
- [9] V. Yanovsky et al., "Ultra-high intensity- 300-TW laser at 0.1 Hz repetition rate", *Optics Express.* **16**, 3, 2109-2114 (2008)
- [10] 「XFEL 施設 SACLA ホームページ - 実験ステーション」, <<http://xfel.riken.jp/users/bml04-11.html>> (2017年1月5日参照)