

令和元年度（2019年度） 卒業論文

GHz帯マイクロ波による未知場探索に向けた
集光光学系の開発

広島大学理学部
物理科学科
クォーク物理学研究室

学部4年
学生番号 B166319

長谷川 拓郎

指導教員 志垣 賢太 教授
主査 本間 謙輔 助教
副査 水野 恒史 准教授

2020年2月25日

概要

南部-Goldstone の定理によると，大域的対称性が自発的に破れると破れた対称性の数と等しい数のゼロ質量の粒子（南部ゴールドストーンボソン, NGB）が出現する．ただし，対称性が近似的な場合は粒子は質量を獲得し，この粒子は擬南部ゴールドストーンボソンと呼ばれる．ヒッグスボソン（ $125\text{GeV}/c^2$ ）カイラル対称性の自発的破れに伴い出現する擬南部ゴールドストーンボソンである π^0 中間子（ $135\text{MeV}/c^2$ ）など 2 光子に崩壊する粒子が 3 桁も異なるエネルギー領域に存在することから，他のエネルギー領域にも同様に光と結合する未知の対称性由来の粒子が存在することが考えられる．Peccei-Quinn 対称性の自発的破れに伴い現れるアクシオンや，スケール対称性の破れに伴うディラトンがその例として挙げられる．質量が $10^{-7}\sim 10^{-6}\text{ eV}/c^2$ 領域の場を探索する実験として，GHz 帯マイクロ波を集光することを用いて未知場を介した光子-光子散乱を探索する手法が提案されている [1]．探索実験では，低い重心系エネルギー共鳴状態をつくりだす「生成光」と，共鳴を特定の終状態へと誘導する「誘導光」を用いる．これら二種類の GHz 帯マイクロ波を集光する光学系が必要である．本研究の目的は，焦点距離が可変な非軸放物面鏡の設計・動作原理を確立し，調整法などを習得するためのプロトタイプを試作することである．本研究では，自由空間でのマイクロ波集光光学系の設計・開発を行ない，幾何光学を仮定すると，レーザー平行ビームを縦 8.6cm，横 15cm の領域まで集光可能な焦点距離が 5 m 程度で可変である非軸放物面鏡を製作し得ることを示した．

目次

第 1 章	序論	1
1.1	標準模型	1
1.2	暗黒物質	2
1.3	暗黒エネルギー	5
1.4	対称性の破れとアクシオン	5
第 2 章	研究背景	7
2.1	準平行光子-光子衝突系	7
2.2	誘導	8
2.3	本研究の目的	8
第 3 章	光学系	10
3.1	マイクロ波	11
3.2	発振器	11
3.3	電磁ホーン	12
3.4	パラボラミラー	13
3.5	ループアンテナ	14
3.6	スペクトラムアナライザ	15
第 4 章	非軸放物面鏡の製作	17
4.1	放物面の設計	17
4.2	アクリル板を用いた曲面近似	18
4.3	レーザー光を用いたパラボラ曲率調整	21
4.4	集光性能測定	28
4.5	集光性能結果	34
第 5 章	結論	36

第 6 章	議論	37
第 7 章	展望	38
付録		39
A	電磁ホーンからの放射のシミュレーション	39
謝辞		41
参考文献		42

目次

1.1	Planck 衛星による観測結果 [3]	3
1.2	アキシオンの質量域 [5]	4
2.1	準平行衝突系 [1]	8
3.1	光学系概要	10
3.2	電磁波の種類 [14]	11
3.3	発信器	12
3.4	電磁ホーン PE9863/NF10	13
3.5	パラボラミラー	14
3.6	ループアンテナ	15
3.7	ループアンテナ感度の方向依存性 [16]	15
3.8	スペクトラムアナライザ	16
3.9	ホーン電磁波スペクトル	16
4.1	パラボラ曲線と直線の比較	18
4.2	焦点の水平位置	18
4.3	焦点の垂直位置	18
4.4	ディフォーダブルミラーの動作原理 [17]	19
4.5	上から見たパラボラ機構	19
4.6	横から見たパラボラ機構	20
4.7	横から見たパラボラ機構 (詳細)	21
4.8	パラボラ調整原理	22
4.9	パラボラ背面	23
4.10	パラボラ曲率調整その 1	24
4.11	パラボラ曲率調整その 2	25
4.12	パラボラ曲率調整その 3	26

4.13	パラボラ曲率調整その4	27
4.14	1 段目の調整結果	28
4.15	2 段目の調整結果	29
4.16	3 段目の調整結果	30
4.17	4 段目の調整結果	31
4.18	5 段目の調整結果	32
4.19	中心への照射	33
4.20	横方向の調整結果	34
7.1	ディラトンの質量領域と提案されている実験手法での探索可能領域 [1]	38
A.1	HFSS 上でデザインしたホーンアンテナ	39
A.2	ホーンアンテナ PE9863/NF10 の強度分布	40

表目次

1.1	物質を構成する素粒子	1
1.2	力を媒介する素粒子	2

第 1 章

序論

1.1 標準模型

クォークとレプトンは物質を構成する最小単位である素粒子だと考えられている。それぞれ 3 世代 6 種類の粒子が確認されている（表 1.1）。粒子は整数スピンのものと半整数スピンのものに分類され、整数スピンの粒子をボソン（ボース粒子）といい、半整数の粒子をフェルミオン（フェルミ粒子）という。クォークとレプトンは全てフェルミオンである。

表 1.1: 物質を構成する素粒子

	第一世代	第二世代	第三世代
クォーク	u (アップ)	c (チャーム)	t (トップ)
	d (ダウン)	s (ストレンジ)	b (ボトム)
レプトン	e^- (電子)	μ^- (ミュー粒子)	τ^- (タウ粒子)
	ν_e (電子ニュートリノ)	ν_μ (ミューニュートリノ)	ν_τ (タウニュートリノ)

陽子は二つの u クォークと一つの d クォークから成り、中性子は一つの u クォークと二つの d クォークから成る。クォーク三つから成る粒子をバリオンといい、クォークと反クォークから成るメソン（中間子）という。バリオンとメソンをまとめてハドロンと呼ぶ。

物質間の相互作用は、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用、重力相互作用の四種類確認されている。強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用に関しては、それらを媒介するゲージボソンが存在し、それぞれグルーオン、光子、 $W \cdot Z$ ボソン（まとめてウィークボソンという）と呼ばれる（1.2）。グラビトン（重力子）は重力相互作用を媒介すると言われているゲージボソンで、2020 年 2 月現在未発見である。

表 1.2: 力を媒介する素粒子

相互作用の種類	ゲージ粒子	到達距離	相対的な結合定数の大きさ
強い相互作用	g (グルーオン)	$\sim 10^{-15}\text{m}$	1
電磁気相互作用	γ (光子)	∞	$\frac{1}{137}$
弱い相互作用	Z, W^\pm (ウィークボソン)	$\sim 10^{-17}\text{m}$	$\sim 10^{-5}$
重力相互作用	グラビトン?	∞	$\sim 10^{-39}$

これに加え、粒子に質量を与える粒子として、2012年7月に欧州原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (large hadron collider, LHC) でヒッグス粒子が見つかった。

標準模型 (standard model, SM) とは自然界における重力相互作用以外の強い、電磁、弱い相互作用についての基礎理論であり、電弱相互作用に関するグラショー-ワインバーグ-サラム (Glashow Weinberg Salam, GWS) 理論、強い相互作用に関する量子色力学 (quantum chromodynamics, QCD)、ヒッグス機構によるフェルミオンの質量獲得についての理論、クォークの世代間混合についての小林・益川理論の総称である。

標準理論は多くの物理現象を説明することに成功しているが、暗黒物質の存在、バリオン数の破れ、インフレーションなどは標準理論では説明できない現象であり、標準理論を超えた新物理理論の手がかりになると目されている。また、標準理論には理論的に決定することのできないパラメーター (25 個, θ_{CP} を入れると 26 個) を含む。12 種類のクォーク・レプトンの質量 $m_u, m_d, m_c, m_s, m_t, m_b, m_e, m_\mu, m_\tau, m_{\nu_1}, m_{\nu_2}, m_{\nu_3}$ とゲージ相互相互作用の強さを表す α, G_F, α_S とヒッグス場の真空期待値とヒッグス粒子の質量 v, m_H , 及び、ポンテコルボ・牧・中川・坂田 (PMNS) 行列とカビボ・小林・益川 (CKM) 行列を表す $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta, \lambda, A, \rho, \eta$ である。これに後述する、

$$\theta_{CP} \simeq 0 \quad (1.1)$$

を含める場合もある。これらのパラメーターは実験や観測から決定され、上記の無秩序パラメーターを標準理論では予言することはできていない [2].

1.2 暗黒物質

宇宙を構成する物質のうち標準模型で理解されている物質の割合はわずか 5% で、残りの 68% は暗黒エネルギー、27% は暗黒物質とよばれるものである [3].

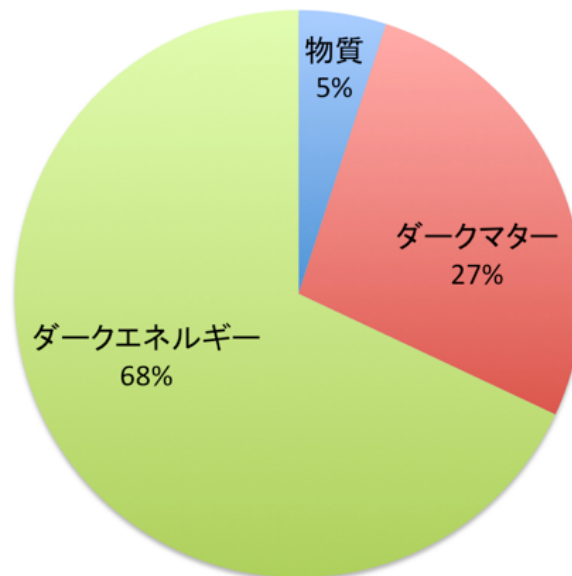


図 1.1: Planck 衛星による観測結果. バリオン物質, 暗黒物質, 暗黒エネルギーの割合 [3].

物理学の未解決問題の一つとして暗黒物質の直接検出が挙げられる. 暗黒物質が存在することは重力レンズ効果などから間接的に確かめられているが, 未だ直接検出されたことはない. 暗黒物質の探査法は以下の 3 つの方法に大別される [4].

- 加速器を用いて暗黒物質を生成する方法
- 宇宙空間に漂う暗黒物質が崩壊した信号を検出する方法
- 周囲に漂う暗黒物質を検出器で直接探査する方法

暗黒物質の候補として *weakly interacting massive particles* (WIMP), アクシオン, ステライルニュートリノなどが考えられている.

WIMP とは $10 \text{ GeV}/c^2$ から数 TeV/c^2 領域に存在する物質と弱く結合する粒子である. 現代の素粒子物理学では, 宇宙の温度が冷えるにつれて, 対称性が破れ, SM のエネルギースケールの相互作用が現れたと考えられている. 高いエネルギー領域において重力以外の弱い相互作用, 電磁相互作用, 強い相互作用を統一する理論を大統一理論 (*grand unified theory*) という. 大統一理論のエネルギースケールと電磁相互作用のスケールが大きく異なっていて不自然である. これを解決するために導入されたのが, 超対称性 (*supersymmetry, SUSY*) である. 超対称性とはフェルミオンとボソンの間の対称性で, 表 1.1, 1.2 の標準理論の粒子それぞれに対し, 超対称性粒子のペア*¹が存在することが予言されている. 最も軽い超対称性粒子 (LSP, *lightest supersymmetric particle*) は WIMP

*¹ フェルミオンにはボソンのペア, ボソンにはフェルミオンのペア

の候補となりうる [5][6].

アクシオンは Peccei-Quinn 対称性 (PQ 対称性) の破れに伴いあらわれる擬南部-ゴールドストーンボソン (pseudo Nambu Goldstone boson, p-NGB) で, 質量が $0.2 \text{ eV}/c^2$ より軽いときに暗黒物質の候補となりうる. 図 1.2 の青い領域は存在が棄却された領域 [5].

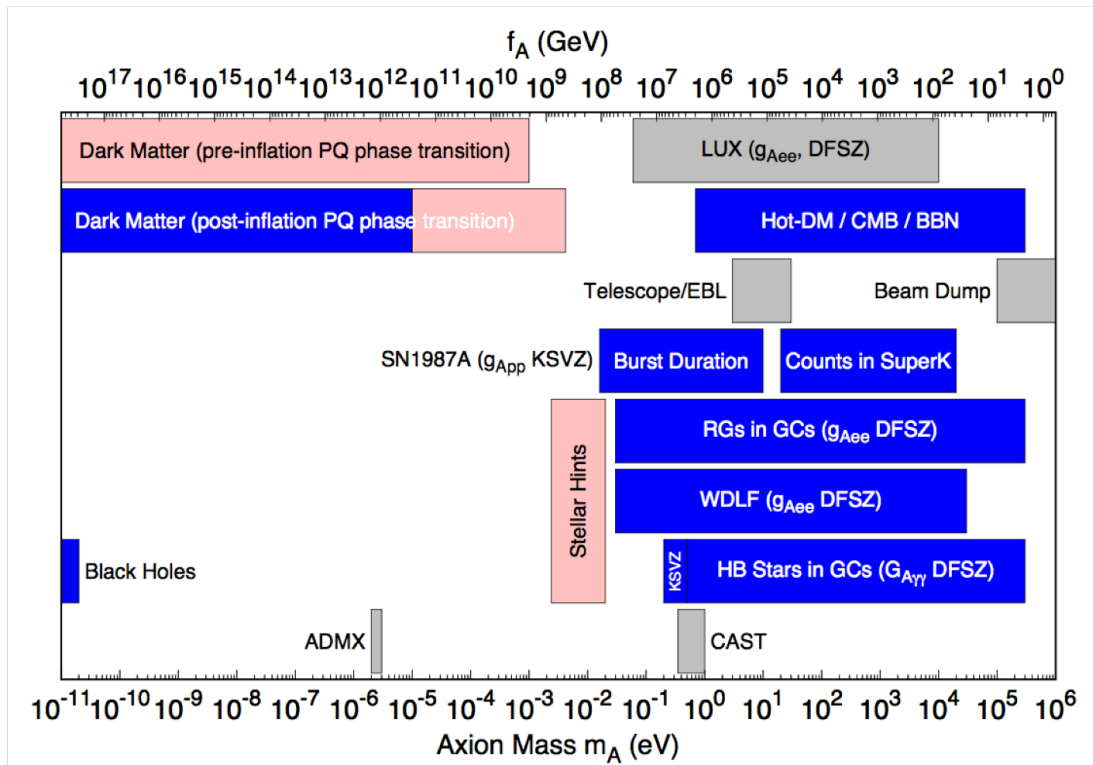


図 1.2: アクシオンの質量域. 青い領域は天体観測によって棄却されている. ピンクの領域は, 暗黒物質の候補となりうる領域. 灰色は実験探索が行われている/行われていた領域. 軸はアクシオンの質量 [5].

ニュートリノは宇宙に光子数と同程度存在するため, わずかでもニュートリノに質量があるならば暗黒物質の候補となりうる. しかし, 軽いニュートリノは相対論的に運動し (熱い暗黒物質), 熱い暗黒物質は宇宙の小規模構造を説明できないため, ニュートリノのみが暗黒物質であることは否定されている [7].

ステライルニュートリノは keV/c^2 領域の $SU(2) \times U(1)_Y$ 一重項ニュートリノで「cusp/core 問題」を解決する. cusp/core 問題とは dark matter halo 中心部の密度分布が理論と観測で食い違う問題のことである. 理論では, 中心密度分布が発散すること (cusp 構造) が予想されているが, 観測によると中心密度分布が平坦 (core 構造) となっている [5].

1.3 暗黒エネルギー

遠方の Ia 型超新星爆発の観測結果から宇宙が加速膨張していることが明らかとなった。他に宇宙背景輻射 (cosmic microwave background, CMB) やバリオン音響振動 (baryon acoustic oscillation, BAO) などの観測結果も暗黒エネルギーの存在を裏付けている。アインシュタイン方程式から、宇宙の膨張加速度について、

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \quad (1.2)$$

が成り立つ。 ρ はエネルギー密度、 p は圧力。 a はスケール因子と呼ばれる時間だけの関数で宇宙が全体として膨張したり収縮したりする尺度を表す。右辺第一項は通常のエネルギー成分 $\rho + 3p$ が正であるから負となる。これは宇宙が収縮することを示す。宇宙定数 (右辺第二項) は歴史的にはアインシュタインによって、物質の重力を打ち消して静止宇宙とするために導入された。膨張宇宙は正の宇宙定数によって簡単に説明できる。この他に、まだ見つかっていないエネルギーが存在すると主張する立場もある。この未知のエネルギーを暗黒エネルギーと呼ぶ [8]。

本研究の究極的な観測対象はディラトンと呼ばれるスカラー場の一種である。ディラトンは、有限到達距離の重力源とも捉えられ、暗黒エネルギー源の候補となる。長い焦点距離のパラボラミラーを用いて GHz 帯マイクロ波を集光することによりディラトンが予想されるエネルギー領域の探索を行うことができる。

1.4 対称性の破れとアクシオン

対称性の破れは、次の三種類に分類される。

- 明示的な対称性の破れ
- 自発的な対称性の破れ
- 量子異常による対称性の破れ

南部-Goldstone 定理によると、系の大域的連続対称性が自発的に破れた場合、破れた対称性の数だけ質量 0 の粒子 (Nambu Goldstone boson, NGB) が新たに出現する。ただし、Higgs 機構では NGB が発生するかわりにゲージ場が質量を獲得する。

標準模型の QCD Lagrangian は CP 対称な項と CP 非対称な項が存在する。零質量のクォークからなる系の QCD Lagrangian は強い相互作用に関して $SU_L(3) \times SU_R(3) \times U_V(1) \times U_A(1)$ 変換に対して対称である。 $SU_{L+R}(3)$ 対称性が自発的に破れることにより、pNGB として π^0 , π^\pm , K^0 , \bar{K}^0 , K^\pm と η 中間子が出現する。 $U_A(1)$ 対称性が自発的に破

れることにより η' 中間子が出現する. π_0 中間子と η' 中間子の質量は,

$$m_{\eta'} \leq \sqrt{3}m_{\pi_0} \quad (1.3)$$

と予想されているが, 実験によると $m_{\pi} = 135\text{MeV}/c^2$, $m_{\eta'} = 985\text{MeV}/c^2$ が得られる. この矛盾を $U(1)_A$ 問題という. CP 対称である QCD Lagrangian に新たに CP 対称ではない項を加えることにより, この問題は解決される.

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_0 + \frac{g^2 \theta_{CP}}{32\pi^2} G_{\mu\nu}^\alpha \tilde{G}_\alpha^{\mu\nu} \quad (1.4)$$

$G_{\mu\nu}^\alpha$ はグルーオン場の強さテンソルである. ここで新たに導入する真空を θ 真空と呼ぶ. 場の量子論における真空 (自由真空) とは, 粒子の総個数演算子の固有値 0 をとる状態である. 相互作用が存在する場合は, 粒子の仮想的な生成と消滅により真空偏極が起きるため定常状態ではなくなる. 自由場と相互作用を分離しないハイゼンベルグ表示では真空偏極の問題は起きない代わりに個数演算子が定義されないため, ハミルトニアン of 最低エネルギー固有値をとる状態が真空と定義される.

インスタントンの研究により巻き付き数で区別されるような摂動論的な真空の構造が存在していることが分かった. この真空は巻き付き数を 1 だけ変えるゲージ変換 T_1 に対して不変ではない. そこで新たに T_1 に対してゲージ不変な巻きつき数について無限に縮退した真空が導入された. この真空を θ 真空と呼び, 有効ラグランジアンに無次元パラメータ θ_{CP} が入る (式 1.4).

ところが, 中性子電気双極子モーメントの測定より,

$$|\theta_{CP}| \lesssim 10^{-9} \quad (1.5)$$

となっており, 標準理論のフリーパラメータの一つが 0 となり, 不自然である. この問題を強い CP 問題という.

そこで, 新たに Peccei-Quinn 対称性 $U_{PQ}(1)$ を導入することにより強い CP 問題を解決する. アクシオンは PQ 対称性の自発的破れに伴い出現する粒子である. 新たなラグランジアンは,

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_0 + \frac{1}{2} \partial_\mu \phi_a \partial^\mu \phi_a + \frac{g^2}{32\pi^2} (\theta_{CP} + \frac{\phi_a}{f_a}) G_{\mu\nu}^\alpha \tilde{G}_\alpha^{\mu\nu} \quad (1.6)$$

と書き直すことができる [9]. 右辺第三項

$$\theta_{CP} + \frac{\phi_a}{f_a} \quad (1.7)$$

が 0 となれば良く,

$$|\theta_{CP}| \sim -\frac{\phi_a}{f_a} \quad (1.8)$$

アクシオンの導入によって, フリーパラメータの一つ θ_{CP} が 0 になってしまう問題が解決される.

第 2 章

研究背景

2.1 準平行光子-光子衝突系

質量 $135\text{MeV}/c^2$ の中性 π 中間子や質量 $126\text{GeV}/c^2$ のヒッグスボソンなど 2 光子に崩壊するような粒子が 3 桁異なるエネルギー領域に存在する。これらの粒子以外にも 2 光子と共鳴する未知粒子が存在する可能性がある [12]。光子対を衝突させ、2 光子に崩壊する逆過程を起こすことで、未知場を介した共鳴散乱 ($\gamma\gamma \rightarrow \phi \rightarrow \gamma\gamma$) を探索することができる。電子陽電子衝突実験では仮想光子対からの π^0 中間子生成が観測されており、仮想度が低い光子からも生成されている [10][11]。

GHz 帯マイクロ波をかすり衝突させることにより低い重心系エネルギーでの散乱が実現でき、 μeV 質量域の 2 光子と共鳴する未知場を探索することができる。光子対をかすり衝突させるために、長い焦点距離のパラボラを用いて GHz 帯マイクロ波を集光する。探索実験では生成用と誘導用のエネルギーの異なったマイクロ波を用いる。倍波などの影響を考慮しエネルギーの比が整数比とならないよう設定する。生成用マイクロ波のエネルギーを ω 、誘導用マイクロ波のエネルギーを $u\omega$ とすると、この過程の光子の始状態と終状態は、

$$\omega + \omega \rightarrow (2 - u)\omega + u\omega \quad (2.1)$$

となる [13]。

光子衝突における重心系衝突エネルギーは、

$$E_{CMS} = 2\omega \sin \vartheta \quad (2.2)$$

となる。

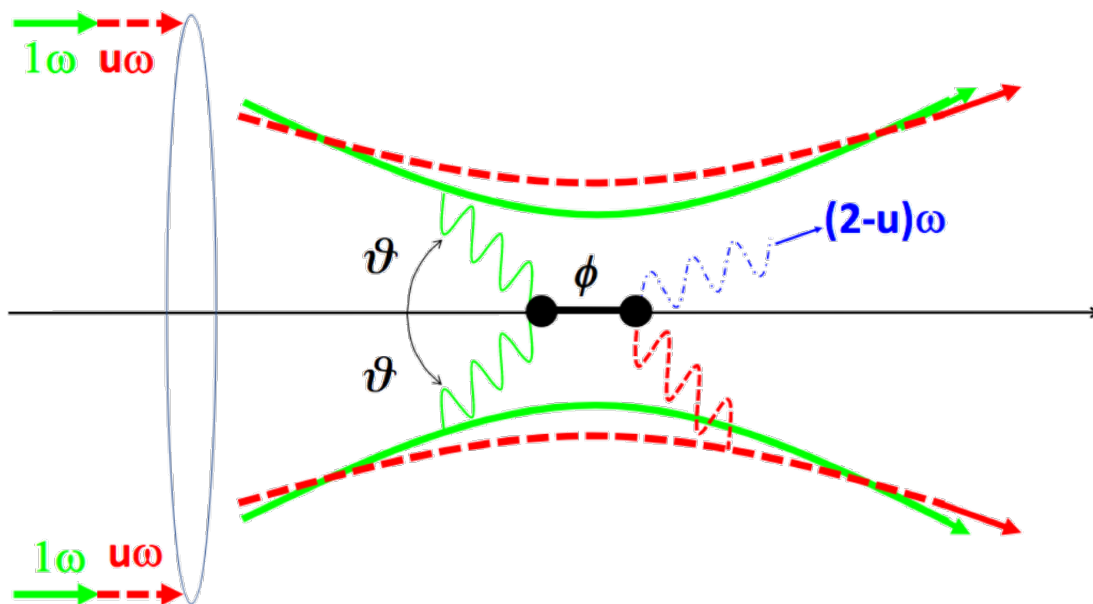


図 2.1: 準平行光子-光子衝突系では光子対を浅い角度で衝突させることで低質量の共鳴生成が可能. これにより $\mu\text{-eV}/c^2$ 程度の質量域での探索ができる [1].

さらに、コヒーレント光同士を散乱させることにより、確率が GHz 帯マイクロ波の強度の 3 乗に比例するような 2 体散乱を起こすことができる。

2.2 誘導

生成用のマイクロ波と誘導用のマイクロ波の役割について述べる。共鳴を強制的に誘導崩壊させることにより長寿命の場であっても観測することができる。誘導光を導入することで、崩壊光子対の一方は誘導光と等しい波長に誘導される。もう一方の崩壊光子は運動量・エネルギー保存を満たす波長となる [1][13].

図 2.1 の緑色の光同士の散乱が観測対象の光子-光子散乱である。終状態の崩壊二光子のうち一方を赤色の光に指定する効果が誘導である。もう一方の崩壊光子の波長は運動量・エネルギー保存則から一意に定まり、図の青色の信号光として観測される。

2.3 本研究の目的

将来の光子-光子散乱を用いた未知場探索実験では、直径数 m、焦点距離数十 m の非軸放物面鏡を実装することが要求されている。また、GHz 帯マイクロ波を用いることによって $\mu\text{eV}/c^2$ 質量域の場を探索することができる [1].

本研究の目的は、焦点距離が可変な非軸放物面鏡の設計・調整方法を確認し、調整法など

を習得するためのプロトタイプを試作することである。焦点距離が可変であることの最大の利点は散乱角 θ を変えることで探索領域を変更できることにある。3章で説明する、二色の光を混合する光源（導波管と電磁ホーン部分）などは、現在概念設計の段階にある。これらの設計の変更に柔軟に対応可能できる必要性からも、焦点距離を容易に変更・調整できる機構の開発は、光学系全体の設計をする上で重要な課題である。

第 3 章

光学系

本章では，概念設計の段階にある暗黒物質探索実験の光学系について説明する．暗黒物質探索実験の光学系の概要図を図 3.1 に示す．

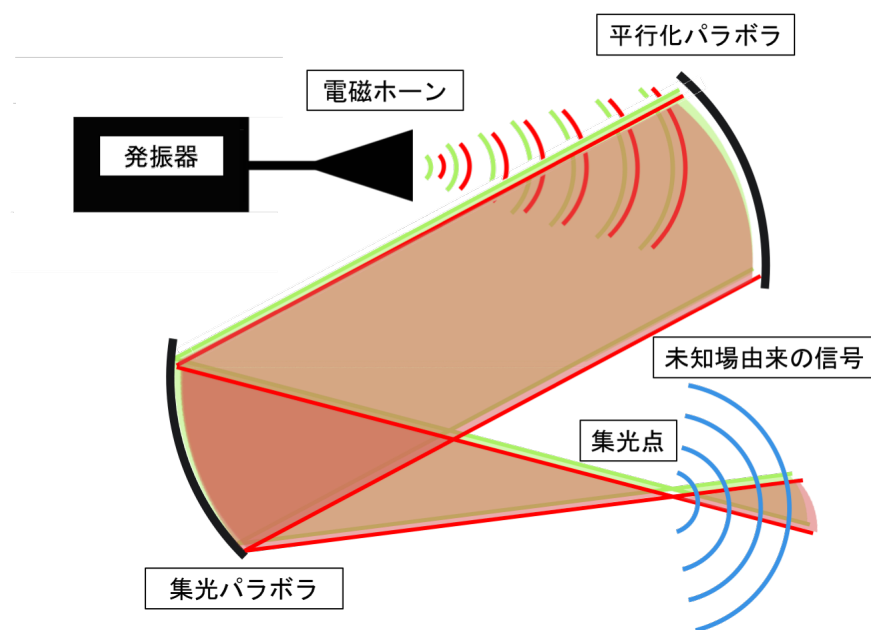


図 3.1: 光学系概要．導波管で 2 色の GHz 帯マイクロ波を混合し，自由空間にホーンアンテナから放出しされた GHz 帯マイクロ波を 2 組のパラボラを用いて集光する．2 色の GHz 帯マイクロ波のそれぞれの偏光を揃える偏光子などの光学素子を設置するために，一度ビームを平行化している．

3.1 マイクロ波

電磁波は振動数（波長・エネルギー）ごとに分類される（図 3.2）。一般的にマイクロ波は 300 MHz から 300 GHz の電波を指す。この領域には UHF（ultra high frequency）波，SHF（super high frequency）波，ミリ波，サブミリ波を含む。本論文では GHz 帯マイクロ波とは 1 GHz から 10 GHz の波長帯のマイクロ波を指す。

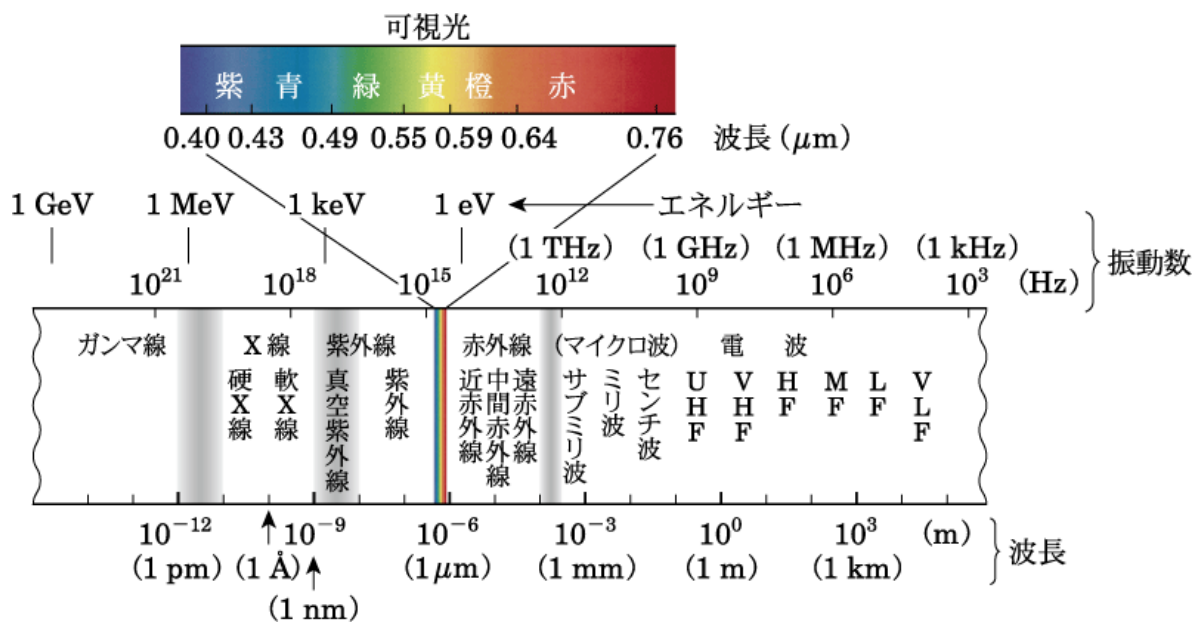


図 3.2: 電磁波の種類 [14]

3.2 発振器

GHz 帯の信号源として，米 Mini-Circuits 社の Synthesized Signal Generator (SSG-6000RC) を用いる。周波数は 25~6000 MHz の間で変更可能で，-65~+14 dBm の強度のパルス光（矩形波）及び連続光を放出可能（実験で用いた 3.5 GHz は 10 dBm まで）である。

dBm（デシベルミリワット）とは，電力の単位で電力 P [mW] との関係は，

$$x[\text{dBm}] = 10 \log_{10} \frac{P}{1[\text{mW}]} \tag{3.1}$$

で表される。

USB/Ethernet により PC より操作可能で，電磁ホーンと同軸ケーブル（N 型コネクタ）で接続されている。



図 3.3: Mini-Circuits 社 SSG-6000RC

3.3 電磁ホーン

同軸ケーブルを伝わる信号は導波管に接続される。同軸ケーブルの芯線が導波管底部の突起と、同軸ケーブルの外線が導波管本体と接続されている。図 3.4 の銀色の部分を導波管と呼び、断面積が一定である。導波管内を伝わる電磁波は、電磁ホーン部に入り徐々に管の断面積を大きくしながら、最終的には自由空間へと放出される。徐々に断面積を変えるのは、導波管（あるいは同軸ケーブル）と自由空間でのインピーダンスを滑らかに整合させるためである。自由空間（大気中）のインピーダンス Z は、空気中の誘電率 ϵ と透磁率 μ をもちいて、

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3.2)$$

と書ける。

米 Pasternack Enterprises 社の PE9863/NF10 を用いる。最大の出力は 10 dBm で、水平方向のビームアパーチャー（図 3.4 の開口部から放出されるビームが広がる角度）は 54.1 deg., 垂直方向は 50.8 deg.（半値幅）である [15].

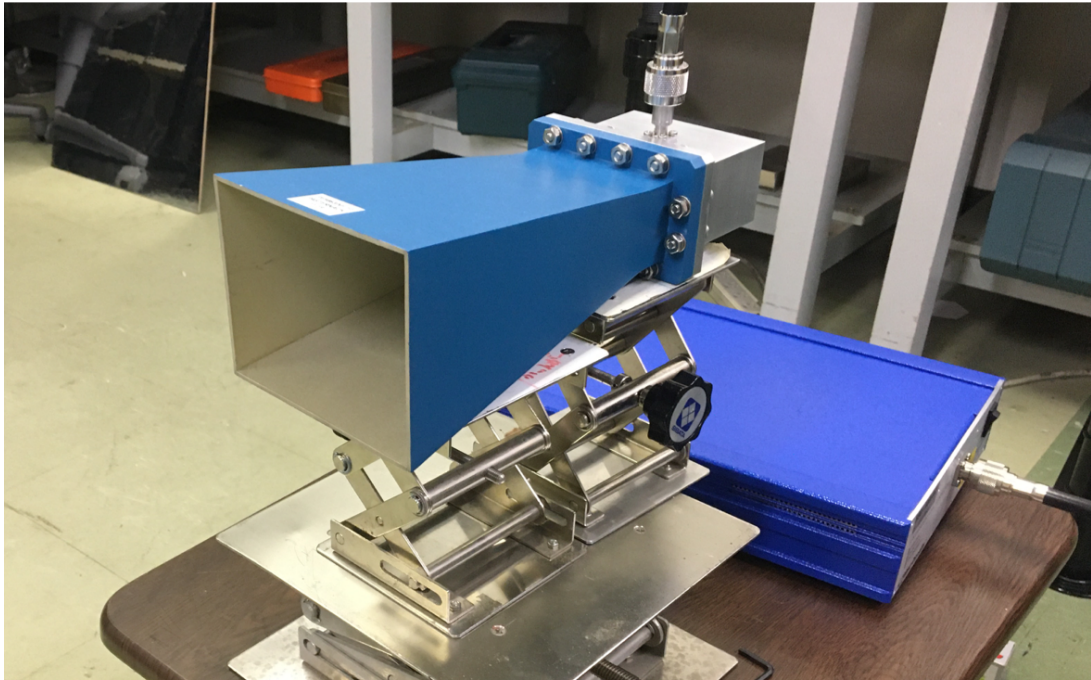


図 3.4: 電磁ホーン PE9863/NF10. 画面手前開口部からマイクロ波が放出される.

3.4 パラボラミラー

アンテナが入射光を妨害しないためには非軸パラボラが必要である. 入射ビーム中心軸に対し水平方向に 1.5 m ずれた焦点を持つパラボラ面を製作した. 専門業者に発注することも検討したが, 10 cm 程度の波長を反射するためには, mm 程度の表面の加工精度がで十分であるため, 自作可能であると判断した. また, 焦点距離を可変な設計とすることで, 光子-光子散乱の重心系エネルギーを変更することで, 探索する未知場の質量領域を変えることが可能となる. 4 章で焦点距離を可変にできる機構の設計・開発について述べる.

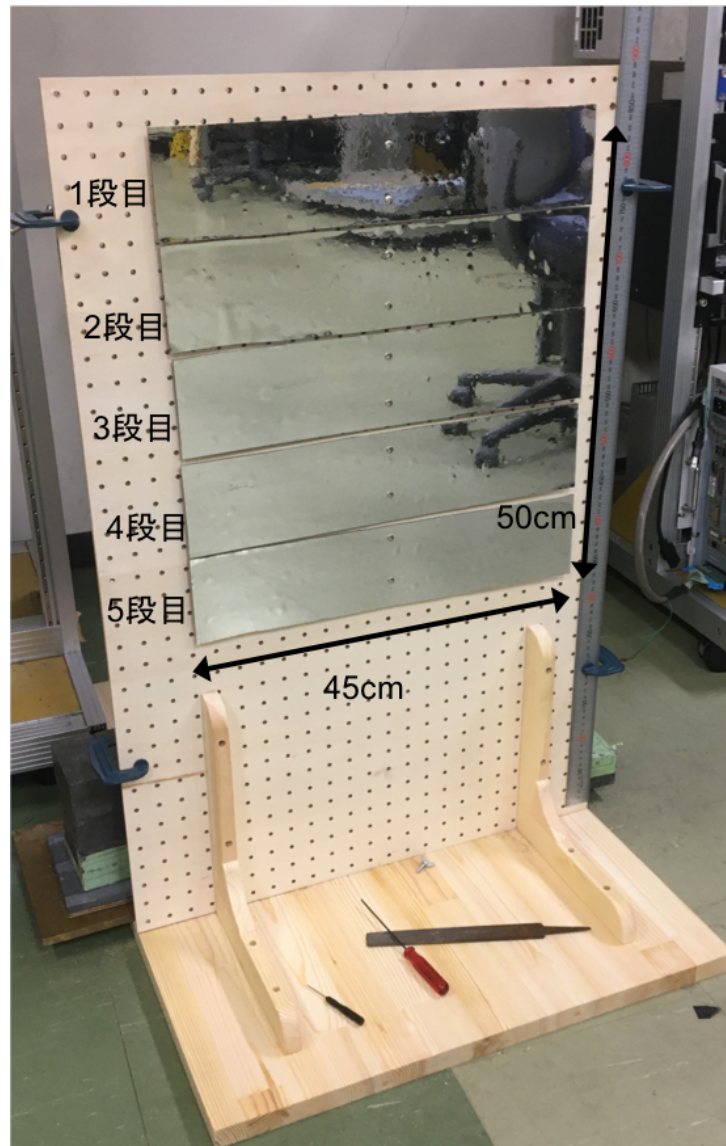


図 3.5: パラボラミラー

3.5 ループアンテナ

ループアンテナは指向性は 8 の字型でループ面内から到来する電波に感度があるが (図 3.7), ループ面に垂直方向から到来する電波に関しては感度がない. 最大強度に対する最小強度は 5.1×10^{-4} 倍である [16].

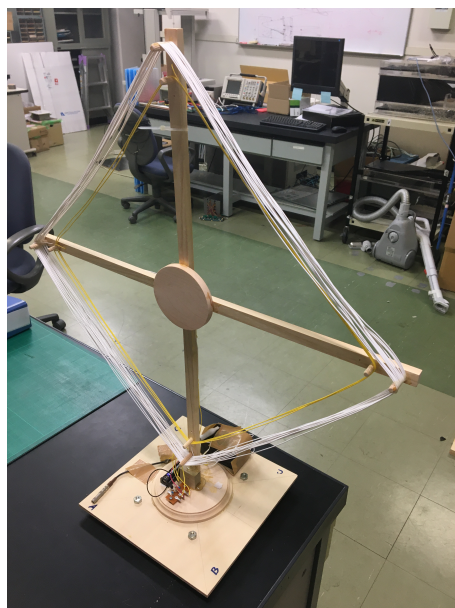


図 3.6: ループアンテナ

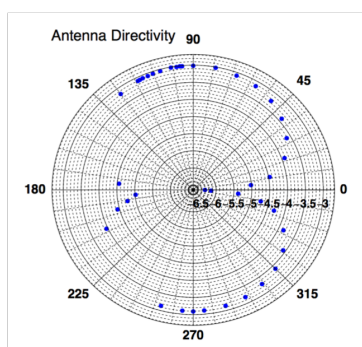


図 3.7: ループアンテナ感度の方向依存性. 円周方向は度数を, 半径方向は積分強度 [mW] を対数表示している [16].

ループアンテナは, ホーンから放出したマイクロ波のビームプロファイルを測定し集光を確認することや, ビーム伝搬面内での偏光を測定する用途に用いる.

3.6 スペクトラムアナライザ

スペクトラムアナライザとは周波数ごとの電力 (あるいは電圧) を測定する機器である. 用いるのは, tektronix 社製スペクトラムアナライザ RSA306B で測定可能振動数は, 9 kHz ~ 6.2 GHz である. -160 ~ +20 dBm の入力レベルの信号を分解能 1Hz で測定することができる.



図 3.8: tektronix スペクトラムアナライザ RSA306B

ホーンアンテナから放出した 3 GHz, 10 dBm の矩形波を図 3.6 のループアンテナとスペクトラムアナライザを用いて測定した結果が以下の図 3.9 である. 3 GHz の電磁波が正しく自由空間に放出されている.

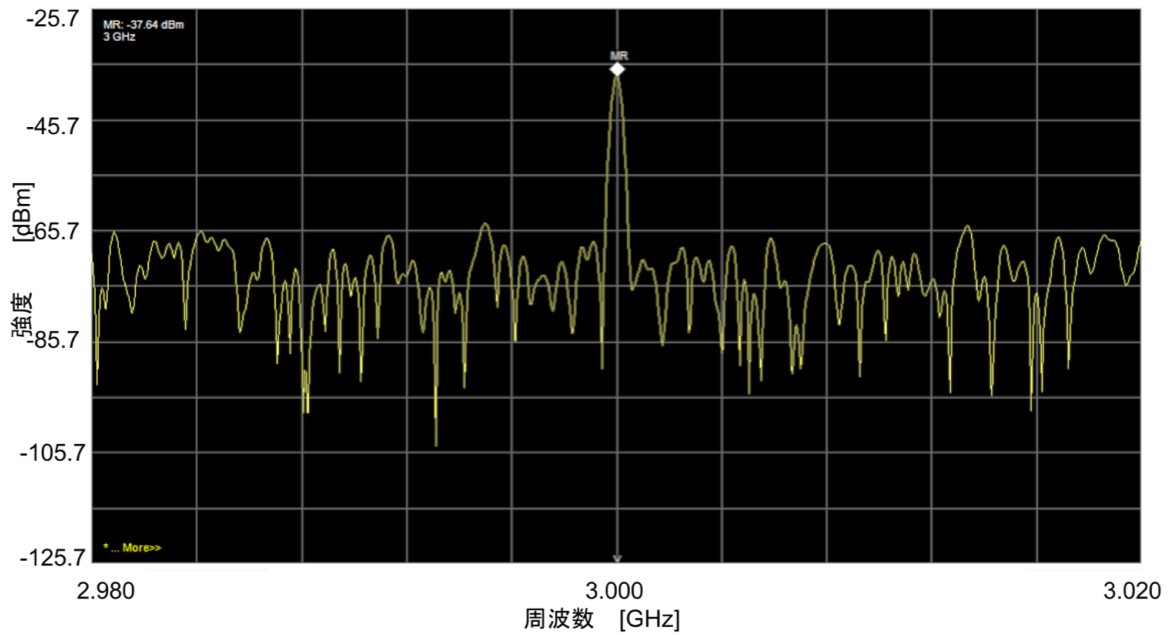


図 3.9: 3 GHz, 10 dBm の矩形波をスペクトラムアナライザで測定した.

第 4 章

非軸放物面鏡の製作

4.1 放物面の設計

本研究では，光学系の設計は幾何光学に基づいて行なったが，電磁波の伝搬は波動方程式で記述される．また，量子力学の不確定性原理から光を一点に集光することは不可能で，集光点付近ではある幅を持った領域に局在している*1．上記の二点に留意する必要があるものの，幾何光学の近似が十分に成立するスケールで光学系を実装することで，散乱角 θ の不定性の影響を小さくできるなどの利点もある．これは，散乱の重心系エネルギー E_{CMS} の不定性を小さくすることにつながる．

回転放物面（放物線を軸の周りに 180 度回転して得られる曲面）に軸と平行に入射した光は全て放物面の焦点を通る．放物面の一部をパラボラとして用いた．ビーム直径は 45 cm，焦点距離は $f = 500$ cm，非軸角（回転放物面の頂点と焦点とパラボラ中心のなす角度） θ は，

$$\tan \theta = \frac{3}{10} \quad (4.1)$$

を満たす設計とした．後述するように，レーザーを用いてミラー面の調整することから室内での実験が要求される．実験装置を設置できるスペースの要請で，焦点距離を 5 m とした．将来的には，焦点距離を延長し，式 2.2 の重心系エネルギーを下げることにより，さらなる低質量域での探索を目指す．

回転放物面の式は，

$$z = \frac{1}{4f}(x^2 + y^2) = \frac{1}{2000}(x^2 + y^2) \quad (4.2)$$

とした．この放物面の

$$\begin{cases} -172.5 \leq x \leq -127.5 \\ -25 \leq y \leq 25 \end{cases} \quad (4.3)$$

*1 回折限界という．不確定性関係から運動量に応じて決まる．

部分をパラボラとして用いた。

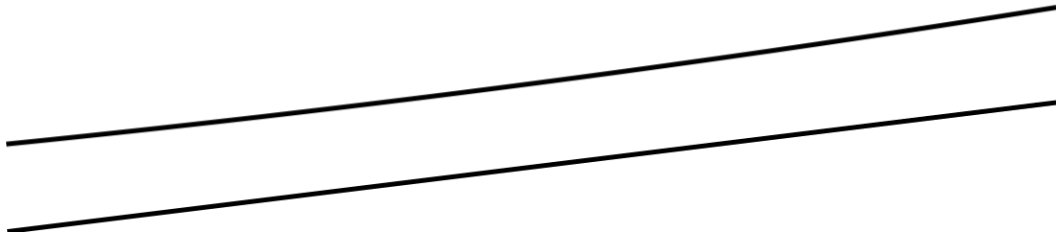


図 4.1: 上が設計した放物面の断面となる放物線。下は直線。放物線はわずかに下に凸になっている。

図 4.2, 図 4.3 のように, パラボラに平行ビームが入射した際に, ビーム軸から 1.5m 離れた, 同じ高さの点に焦点を結ぶよう設計した。

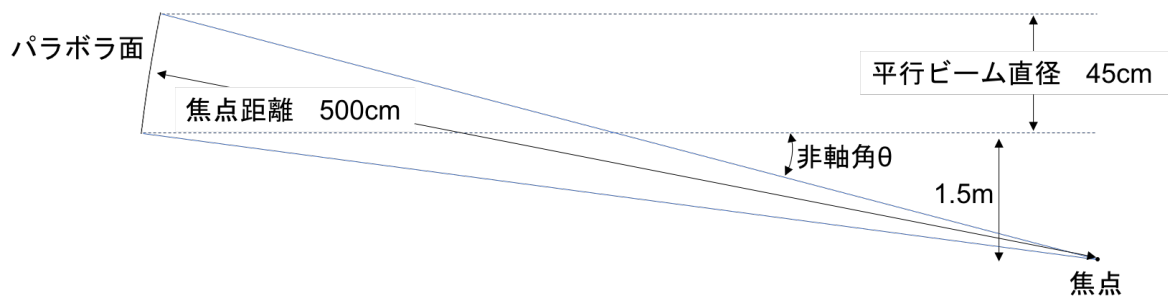


図 4.2: 焦点の水平位置。真上から見た図。

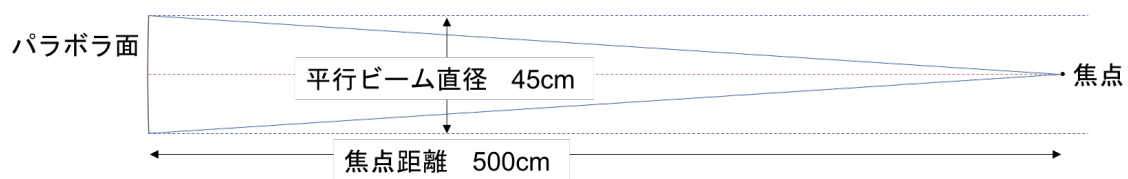


図 4.3: 焦点の垂直位置。真横から見た図。

4.2 アクリル板を用いた曲面近似

実際に製作した方法以外にも, 銀鏡反応を利用して鏡面を形成する方法や, 分割鏡をつなぎ合わせる方法なども検討したが, いずれの方法でも曲率の調整は容易には行えないと判断し, 平面を変形させて曲面を実現する方法を用いることとした。図 4.1 にあるように, 放物面はほとんど平面とみなせることから平面板を変形させる方法で十分に製作可能で

あると考えた。この方法はディフォーダブルミラーと呼ばれる光学素子から着想を得た。ディフォーダブルミラーとは、図 4.4 にあるように鏡の表面を変形させて、反射光の波面を均一に補正するために用いる素子である。

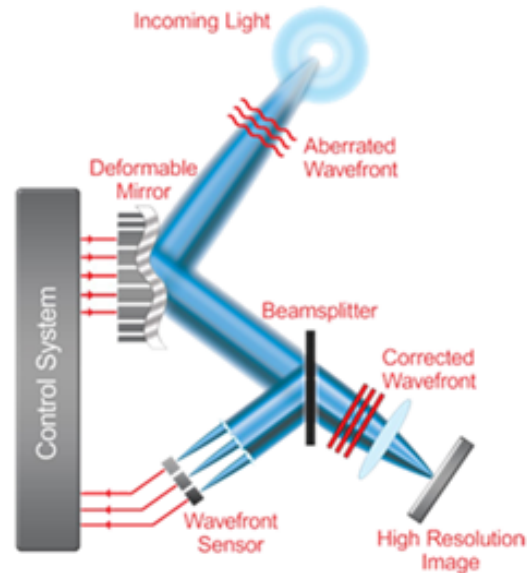


図 4.4: ディフォーダブルミラーの動作原理。図上から波面が乱れている波が入射している。左下のセンサで波面の乱れを読み取り、左上のミラーを変形し、波面を補正する [17].

放物面を表現するために、光沢面を貼り付けたアクリル板（厚さ 3 mm）を傾ける/曲げることができる機構を設計・製作した。縦 50 cm、横 45 cm の放物面を縦 10 cm、横 45 cm に 5 分割し、それぞれの層を幅 10 cm のアクリル板を曲げることで放物面を実現した（図 3.5）。穴あきボードを地面に垂直に立て、2 本の低頭ねじでアクリル板を固定し、ミラー面の裏側から 12 本の蝶ねじでアクリル板を押しることによりパラボラの曲面を実現した。

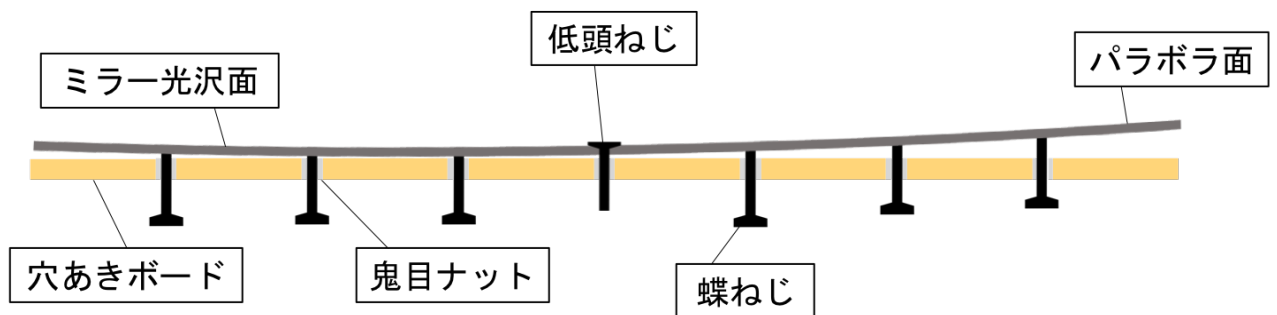


図 4.5: 上から見たパラボラの機構図。裏からボルトでアクリル板を押し曲げている。

パラボラの縦方向の曲面を実現するため、各段に応じた枚数のゴムワッシャーを穴あき

ボードと亚克力板の間に挟んで低頭ねじで固定した。1段目の上のねじには3枚のゴムワッシャー，下のねじには2枚のゴムワッシャーを挟むことにより，図3.5では1段目の亚克力板の上部を画面手前に傾かせることが可能になった。また，これと2列のねじで裏面から押し出すことにより煽り角も調整できる。ここで煽り角とは，ミラーの垂直方向の曲面を5枚の亚克力板で近似する際の角度をいう（図4.7）。

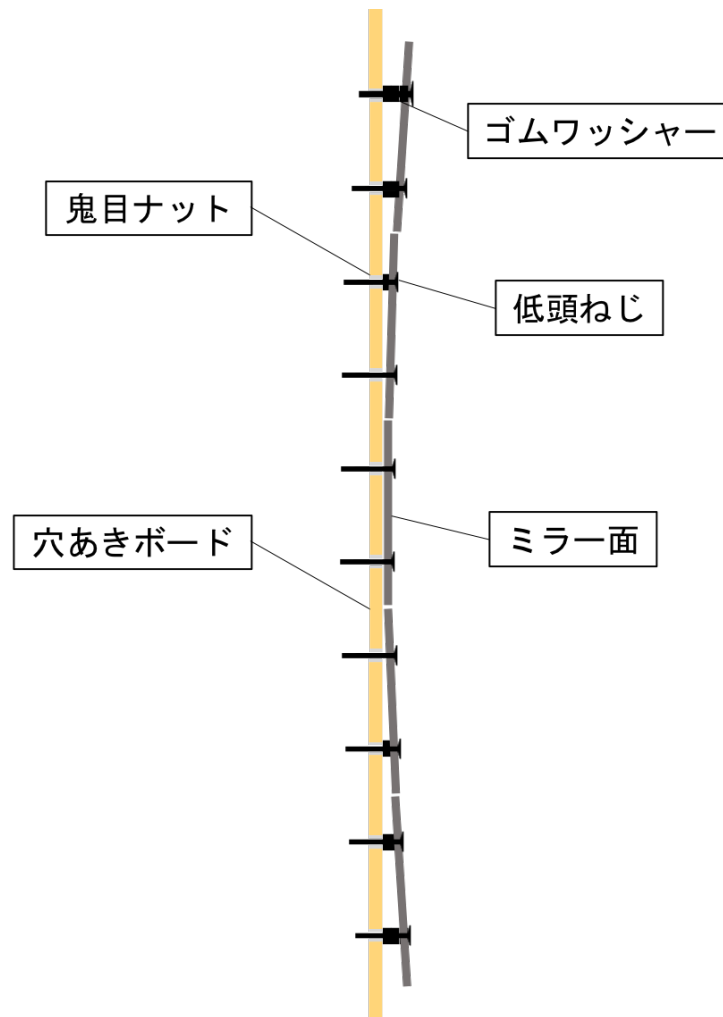


図4.6: 横から見たパラボラの機構図。亚克力板の裏にゴムワッシャーを挟み，亚克力板の上部と下部で高さが異なるよう設置している。

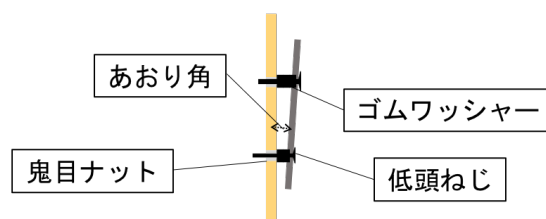


図 4.7: 横から見たパラボラ機構 (詳細)

4.3 レーザー光を用いたパラボラ曲率調整

パラボラミラーが GHz 帯マイクロ波を正しく集光していることを視覚的に確認することは非常に困難である。幾何光学に基づいたパラボラの焦点距離は光の波長に依存しないため、光路の観察が容易な緑色レーザー光を用いてパラボラの集光性能を評価した。Huepar 社製 BOX01G 型レーザー墨出し器（レーザー波長 510~530nm）を用いた。この光源は、十字型に発散するレーザー光を射出するもので、建築現場などで水平線や鉛直線などを罫書く用途に用いられる。数 10 cm のビーム幅を持ち平行なレーザー光を実現することは困難なため、一点から線上のレーザーを射出しパラボラで反射させ、反射像の長さがビーム伝搬面内で一定となるようにパラボラの曲率を調整した。パラボラの焦点としたい位置にレーザー光源を設置し、そこから十字型に拡散するレーザー光をパラボラミラーに向かって射出する。パラボラミラーで反射されたビーム幅が一定のままであれば、反射ビームは平行であるといえる。

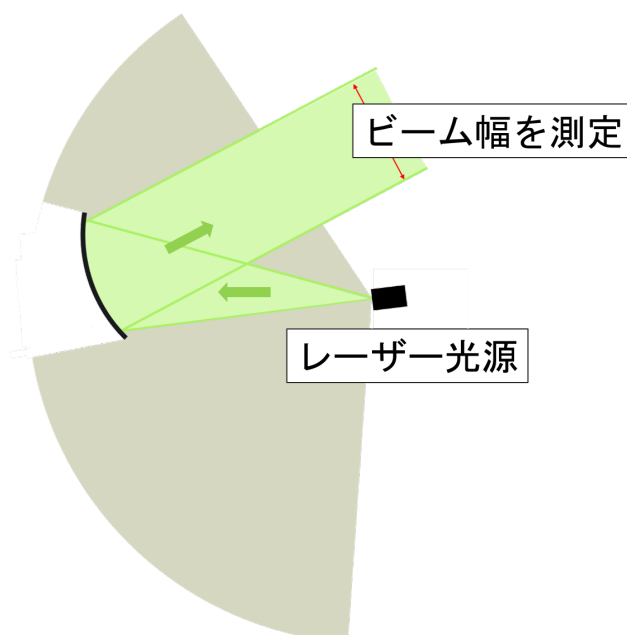


図 4.8: パラボラ調整原理. パラボラの焦点としたい位置にレーザー光源を設置し, そこから拡散するレーザー光をパラボラミラーに向かって射出する. パラボラミラーで反射されたビーム幅が一定のままであれば, 反射ビームは平行であるといえる.

反射像を標的 (図 4.10~図 4.13 の穴あきボード) に投影した際に, 墨出しレーザーの像の長さがアクリル板の長さと同じ 45 cm となることを確認した. 調整には穴あきボードの裏側からアクリル板を押す各段 12 本の蝶ねじを用いた.

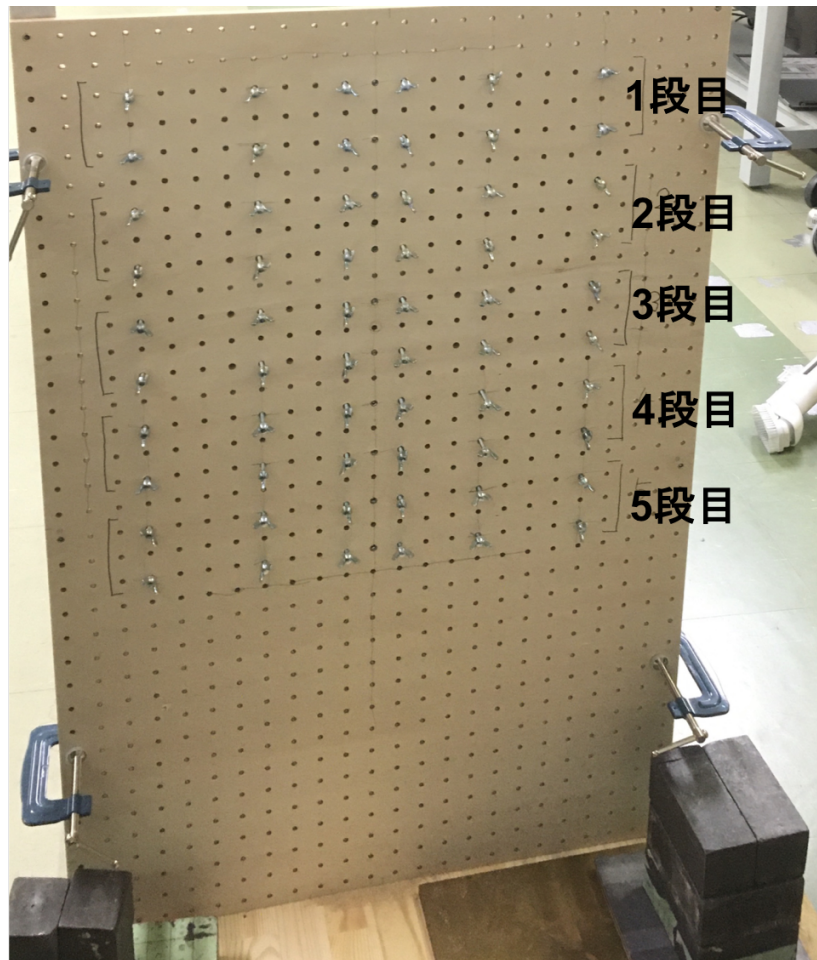


図 4.9: 各段 2 行 \times 6 列 \times 5 段 = 60 個の蝶ねじで背面からパラボラを押し出すことにより曲面を表現する。

各段で反射された像がパラボラの中心（3 段目）と同じ高さに投影されると，図 4.3 のように曲面を形成できる。

以下，実際の調整手順を示す。なお，以下に示す調整はパラボラの 2 段目を用いて行なったものである。

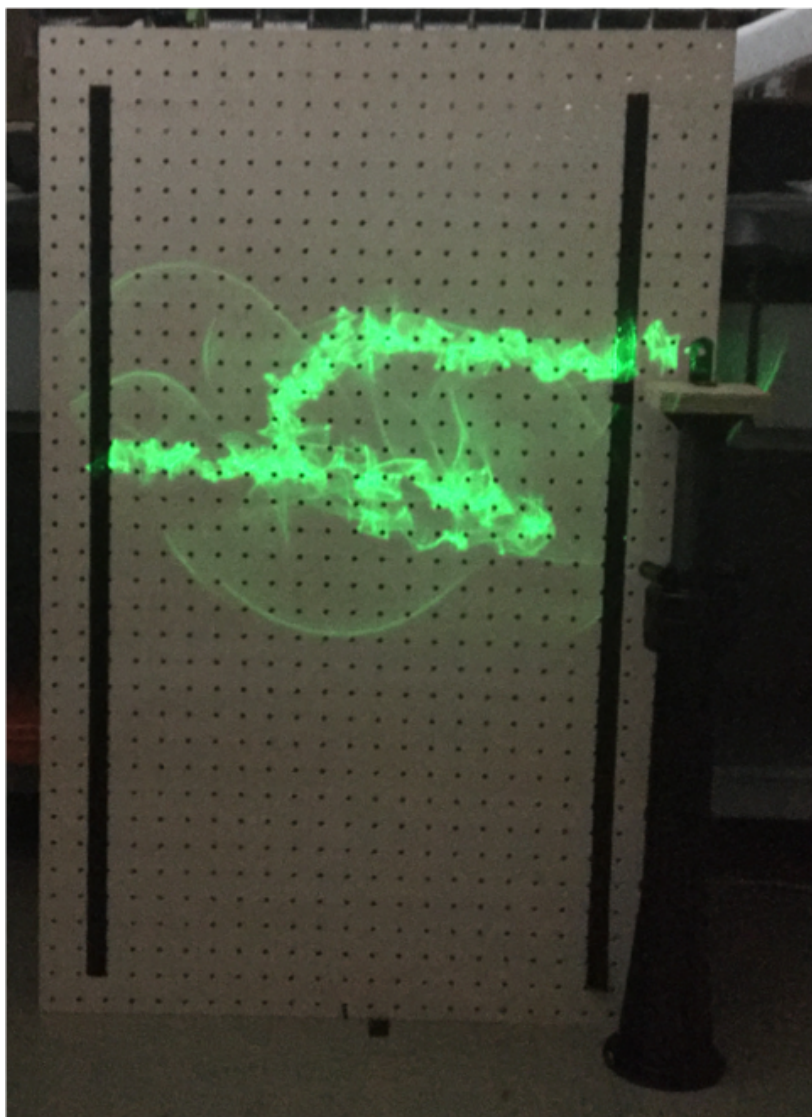


図 4.10: アクリル板がねじれている

図 4.10 では、ミラー左端で反射した像とミラー右端で反射した像の高さが異なっている。これはミラーの左右で煽り角が異なっていることが原因である。ミラー右側で反射した像は目標の高さ（図 4.10 の穴が空いている黒い物体）に達しているのでミラー右側のねじはそのまま、ミラー左側で反射した像が上に移動するようにミラー左側上段のねじを緩めて、下段のねじを締める。これにより煽り角が小さくなり、ミラー左側で反射した像が上に移動した。その調整の結果が以下の図 4.11 である。

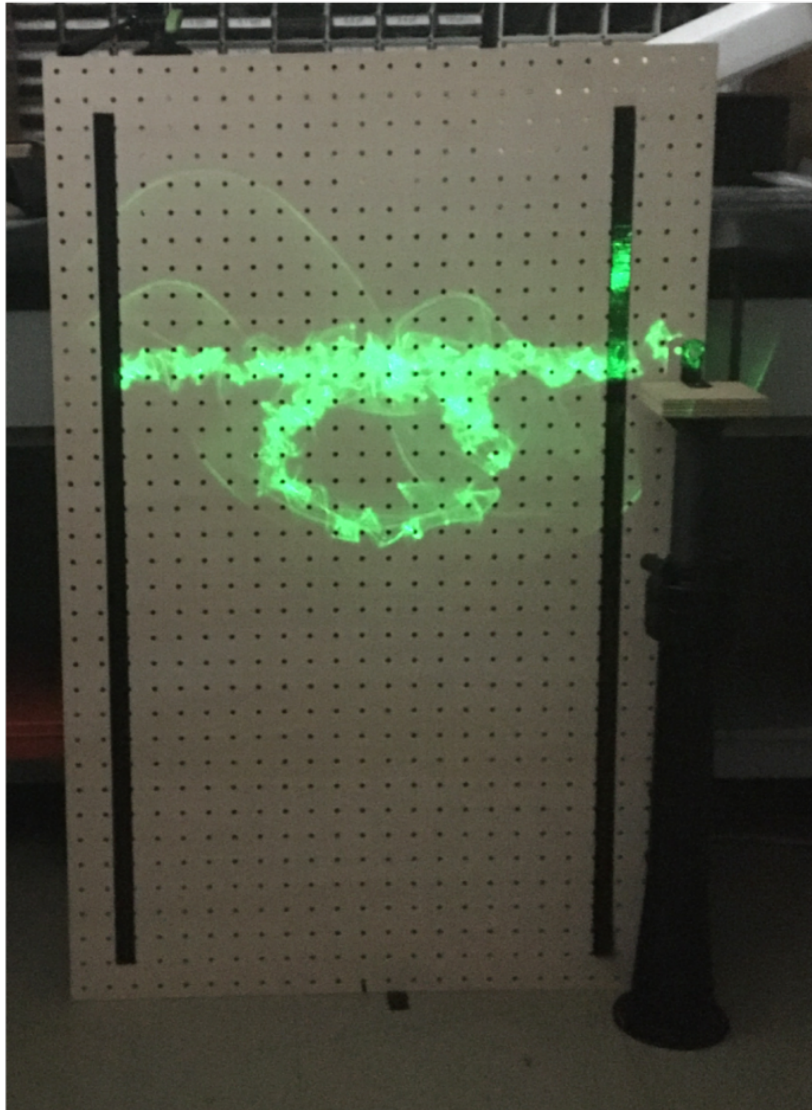


図 4.11: 中央部が両端部に対して下を向いている

図 4.11 ではミラーの左右の像の高さはそろっているが、中央部分で反射した像が目標の高さの下に投影されている。これは、中央部分のあおり角が左右のあおり角に比べ大きくなっており、アクリル板の中心部が左右端部に対して下を向くようにねじれていることが原因である。そのため中心部下段のねじを締めて調整を行なった。また、像の右端が図の黒線（黒線の間隔が 45 cm）をはみ出してしまっているため、ミラー右端の上下のねじを締め、像を 5.8 m 先の穴あきボードに投影した際に像の長さが 45 cm となるよう調整した。これにより、反射した直線レーザー光が十分遠方において長さが不変であることを担保できる。

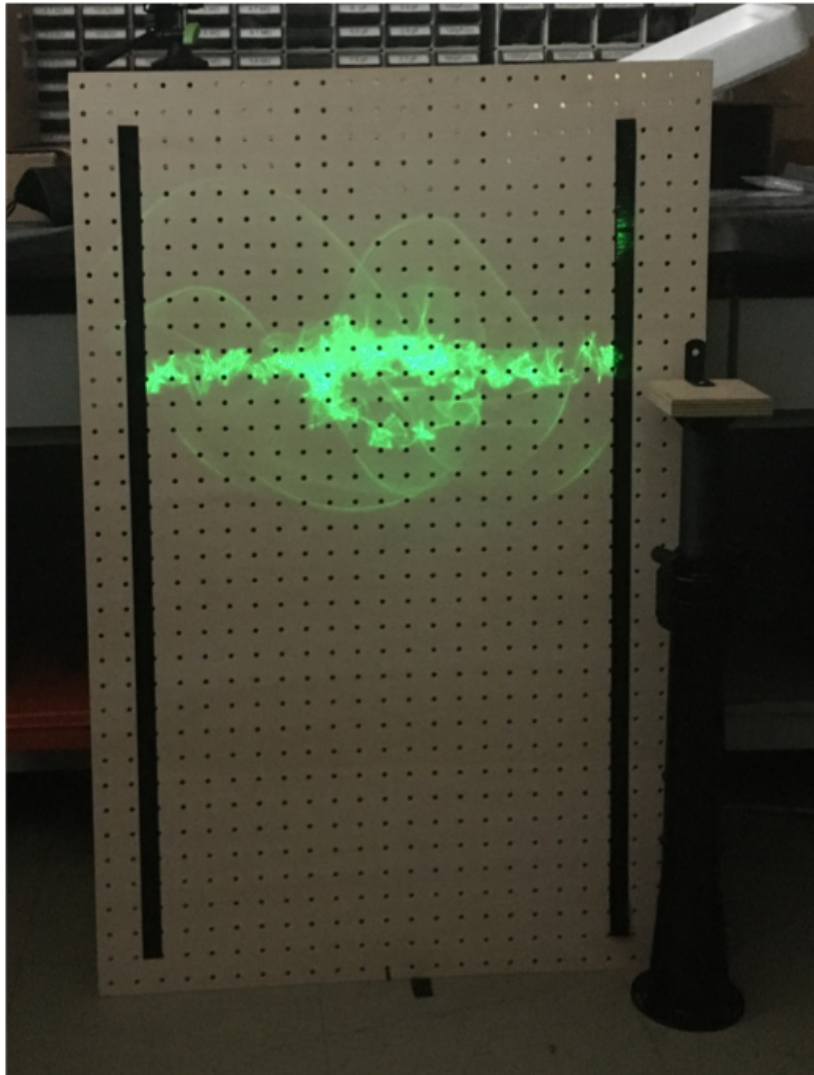


図 4.12: 中央部分のあおり角を修正

調整の結果、反射像の幅が正しく 45 cm となった。図 4.12 のような結び目状の構造は見られる原因は、パラボラの曲率すなわち焦点距離が左右の端と中央部分で異なることにある。この曲率の違いは、図 4.20 のように、縦方向のレーザー像のずれとして観測される。また、アクリル板の中心部と左右端部のねじれをさらに補正した。その結果が図 4.13 である。



図 4.13: 中央部分のあおり角を修正し，像が直線となった。

反射像は直線となったが，図 4.12 の結び目状構造が一部直線と重なって残っている．このことから，段（1 枚の亚克力板）内の各点で焦点距離が一つに定まっていないことを表す．

4.4 集光性能測定

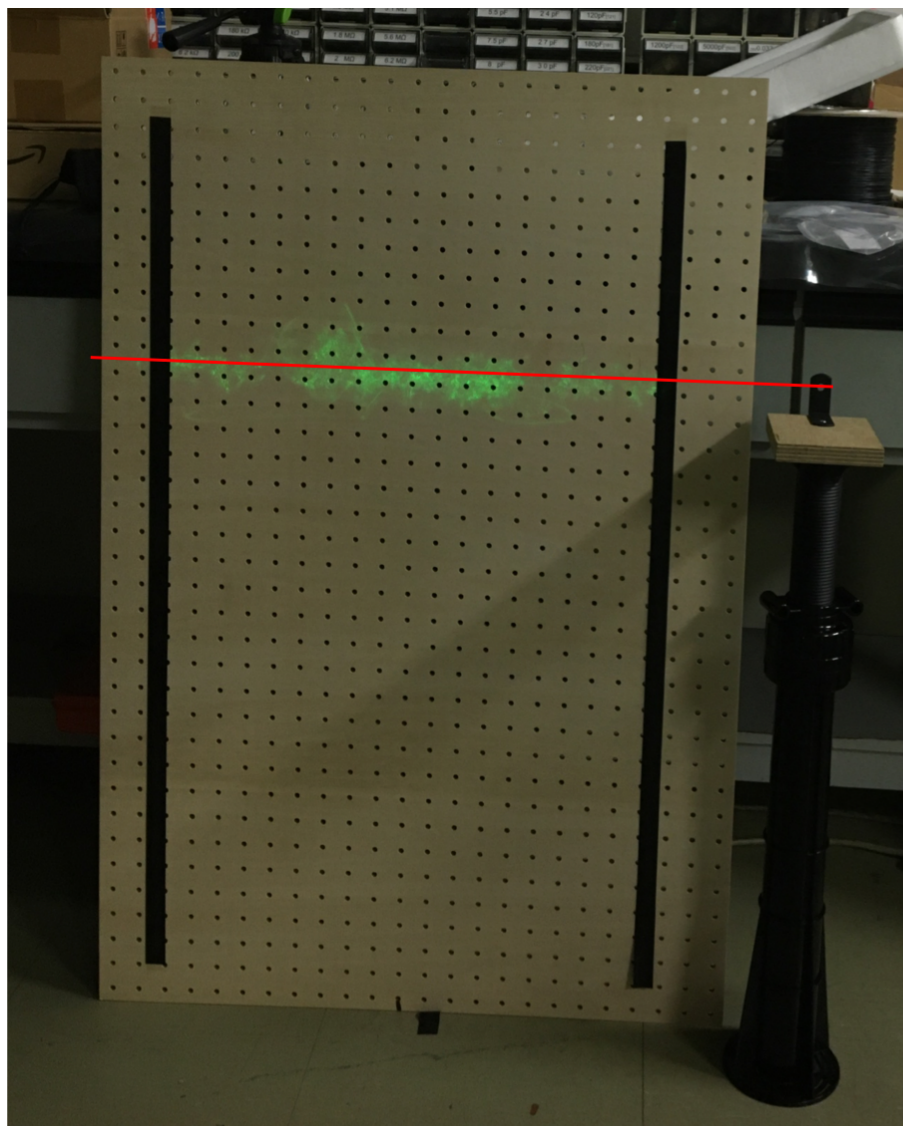


図 4.14: 1 段目の調整結果

図 4.14 の赤線は、図 4.3 の赤破線と同じ高さ（パラボラ中心）で、赤線は理想的な放物面でレーザーが反射された時の像の位置を示す。この赤線を目標に、パラボラの煽り角を調整した。

1 段目の目標(赤破線)とのずれは、図の穴あきボードの 0.5 グリッド ($2.5\text{ cm} \times 0.5 \cong 1.3\text{ cm}$) であった。誤差はレーザー像の広がり 1 グリッドを採用した。

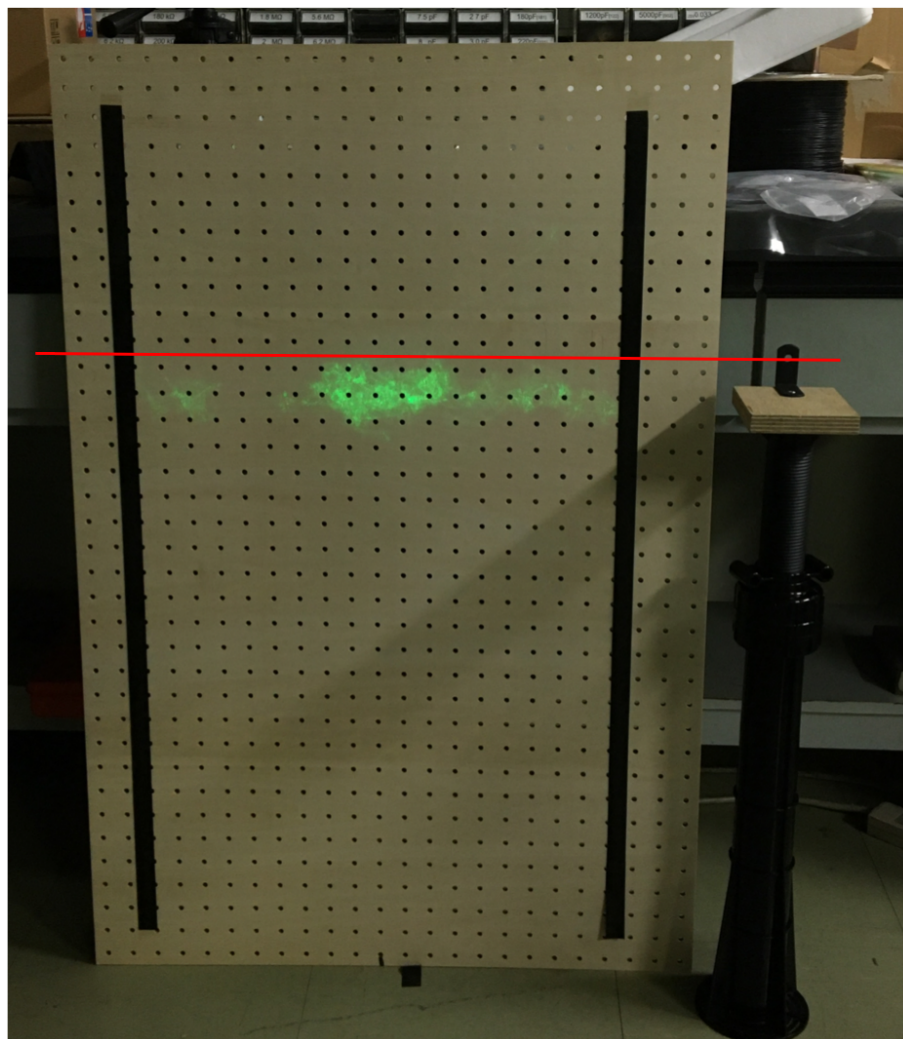


図 4.15: 2 段目の調整結果

2 段目の目標とのずれは、図の穴あきボードの 1.5 グリッド ($2.5\text{ cm} \times 1.5 \approx 3.8\text{ cm}$) であった。誤差はレーザー像の広がり 1 グリッドを採用した。

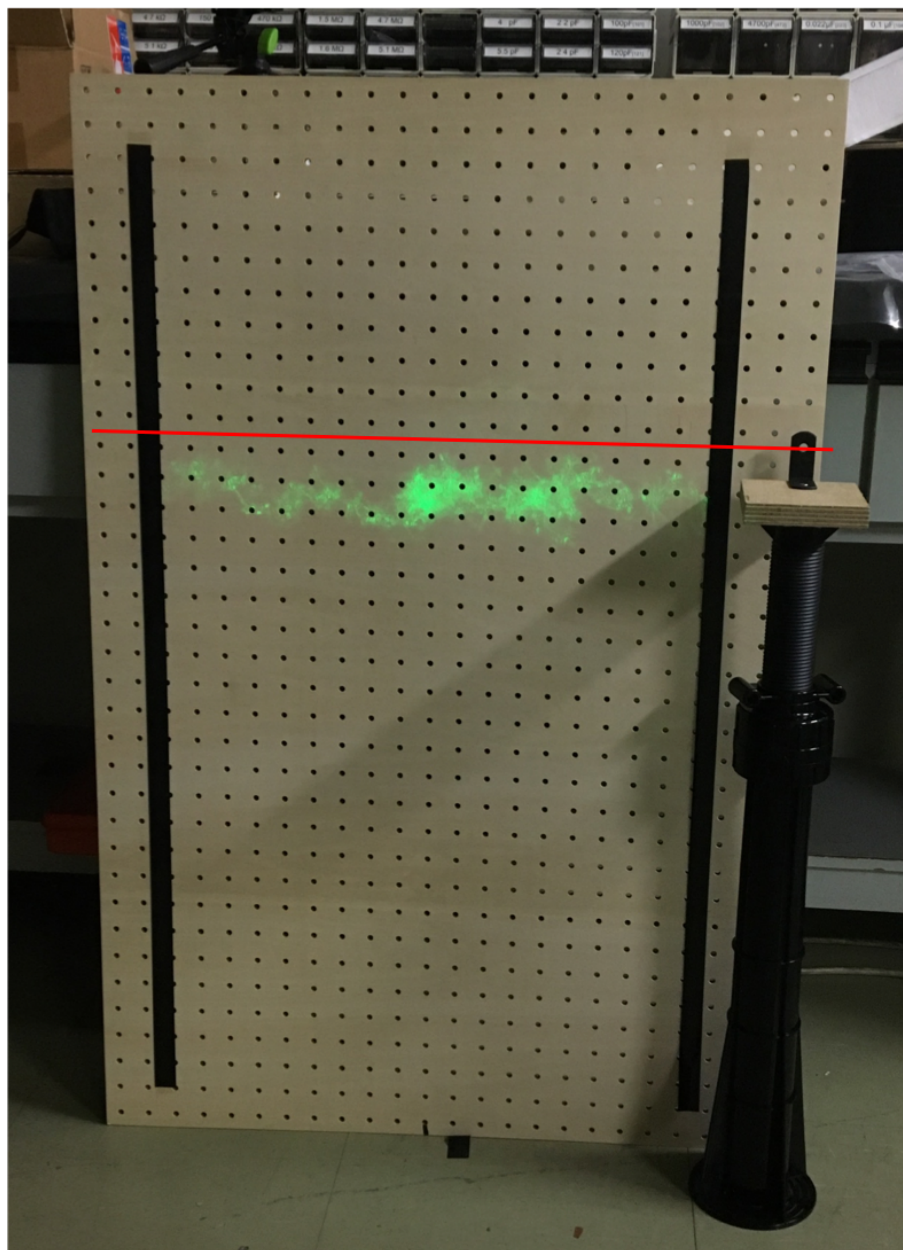


図 4.16: 3 段目の調整結果

3 段目の目標とのずれは、図の穴あきボードの 2 グリッド ($2.5 \text{ cm} \times 2 = 5.0 \text{ cm}$) であった。誤差はレーザー像の広がり 1 グリッドを採用した。

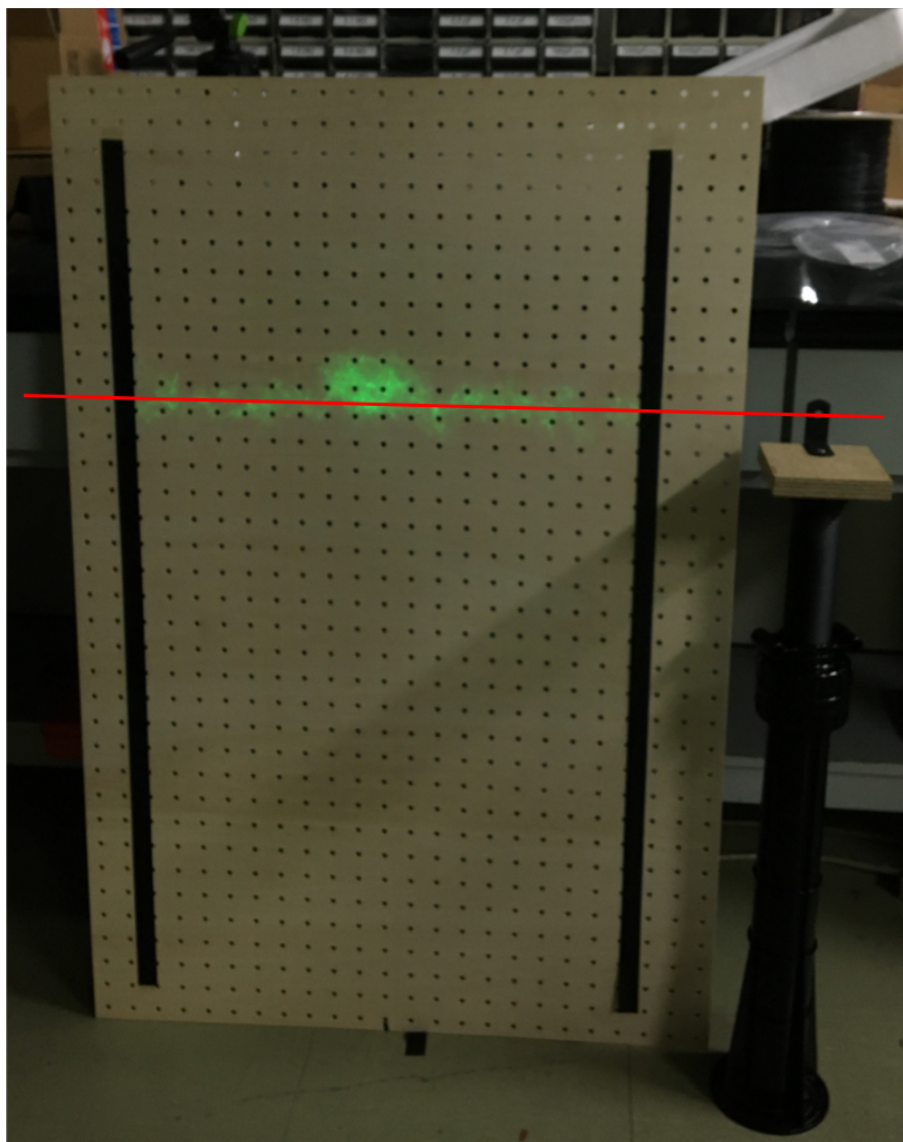


図 4.17: 4 段目の調整結果

4 段目の目標とのずれは、図の穴あきボードの 0 グリッド ($2.5 \text{ cm} \times 0 = 0.0 \text{ cm}$) であった。誤差はレーザー像の広がり 1 グリッドを採用した。

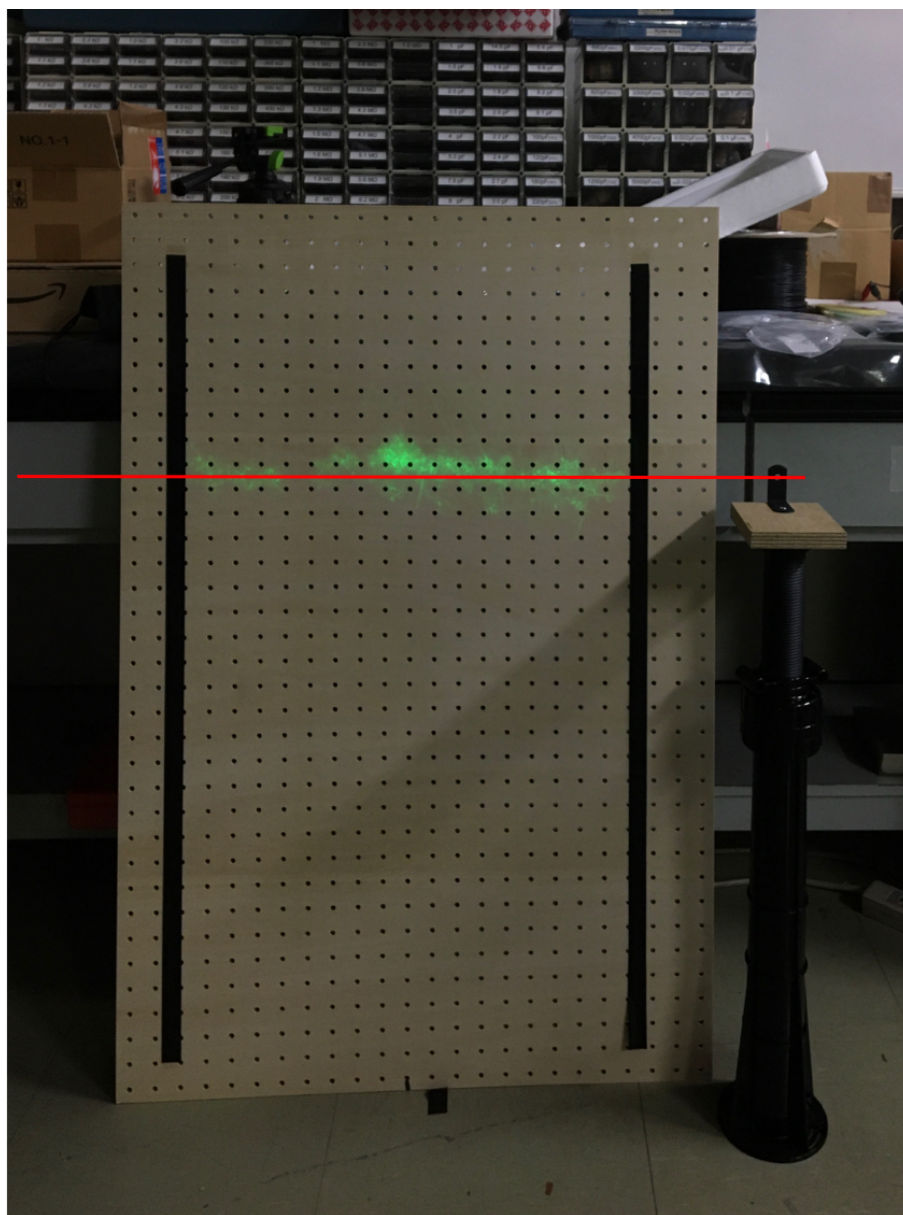


図 4.18: 5 段目の調整結果

5 段目の目標とのずれは、図の穴あきボードの 0 グリッド ($2.5 \text{ cm} \times 0 = 0.0 \text{ cm}$) であった。誤差はレーザー像の広がり 1 グリッドを採用した。

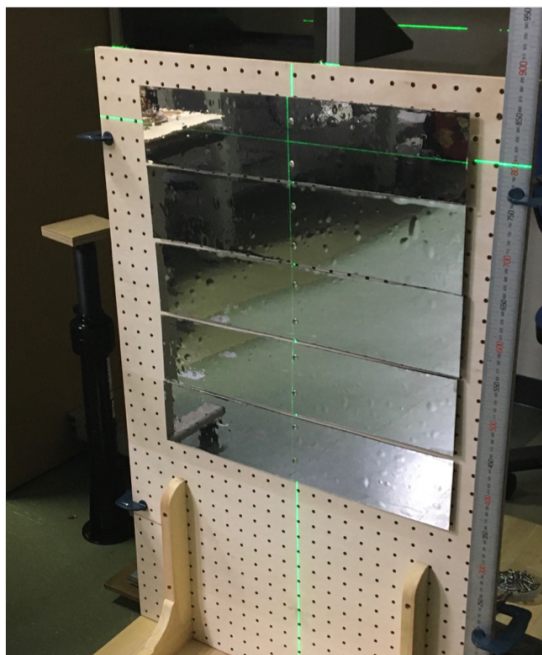


図 4.19: パラボラ中心へ照射した.

図 4.18 のようにパラボラの中心（低頭ねじで止めている部分）にレーザーを照射し，反射像のずれを観測した.

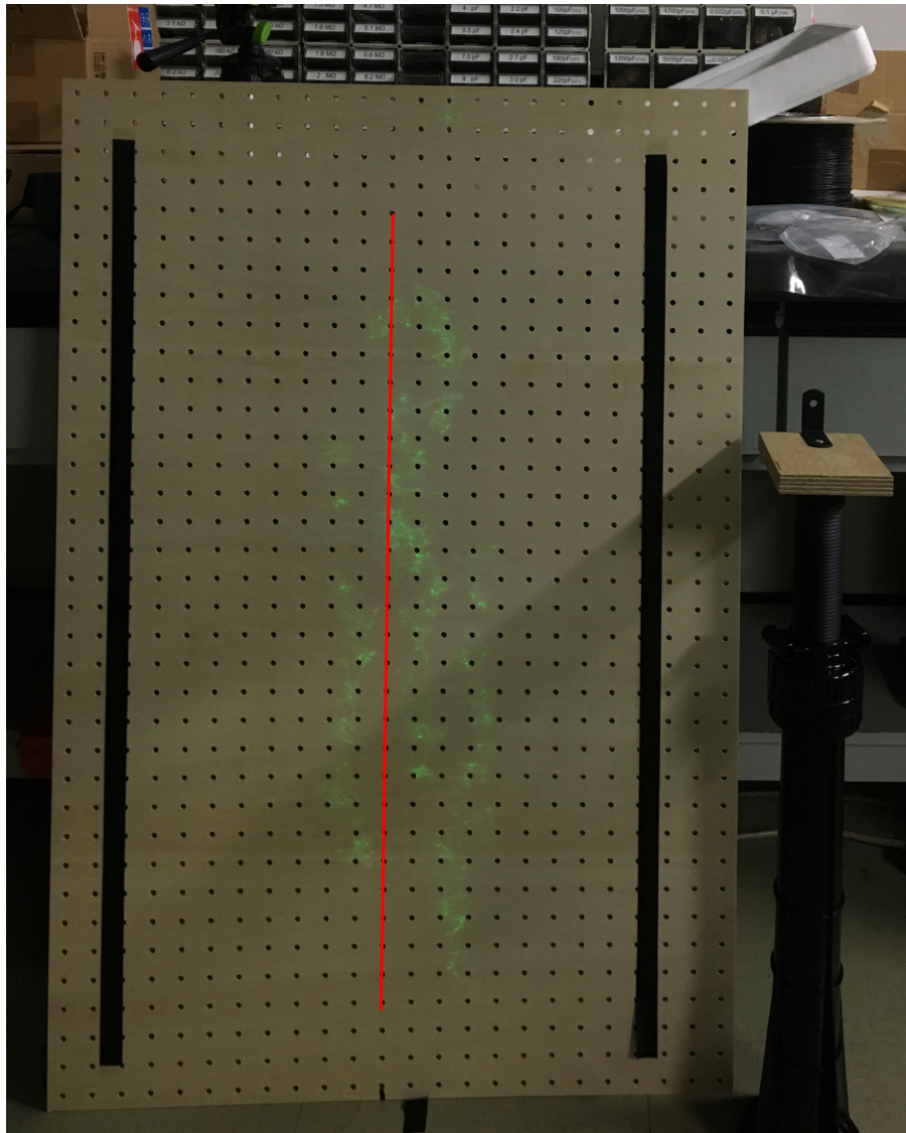


図 4.20: 横方向の調整結果

右方向に 3.5 グリッド (8.8 cm), 左に 2 グリッド (5.0 cm) ずれている. このずれは一枚の亚克力板内での焦点距離ずれに起因するものである.

4.5 集光性能結果

縦方向の最大のずれは 3 段目の 5.0 cm, 横方向のずれは 8.8 cm であった. 図 4.14~4.20 の測定では, 反射像を 5.8 m 先の穴あきボードに投影し測定を行なった. 縦横のずれはそれぞれ入射角に換算して, 0.000862 rad, 0.0151 rad となる. 焦点距離 5 m のパラボラとして実装した際の焦点のずれは, 縦 ± 4.3 cm, 横 ± 7.6 cm となる. これにより, 製作した非軸放物面鏡は縦 50 cm, 横 45 cm の平行マイクロ波を縦 8.6 cm \times 横 15 cm = 129 cm² に

集光できることがわかった。

第 5 章

結論

製作した非軸放物面鏡は縦 50 cm, 横 45 cm の平行マイクロ波を縦 8.6 cm, 横 15 cm の長方形領域 129cm^2 に集光できる. これにより, 幾何光学を仮定すると, レーザー平行ビームを縦 8.6cm, 横 15cm の領域まで集光可能な焦点距離が 5 m 程度で可変である非軸放物面鏡を製作し得ることを示せた.

縦方向のずれが最大となったのは 3 段目であった. これは 3 段目にはゴムワッシャーを設置しておらず, 台座に立てた板のずれやねじの締め度合いに起因する歪みを補正できなかったことが一因である. 横方向のずれはアクリル板を現在の 3 mm から薄いものへ変更し, 蝶ねじで調整するグリッドを細かくすることで対応できるであろう.

第 6 章

議論

3 GHz のマイクロ波を発振器の最大強度の 10 dBm(=10mW) で放射し，図 3.1 のような光学系で，10 dBm の信号を全て集光できたと仮定すると，集光点での光子数は 3.93×10^{18} 個/cm² となる．実際には，発振器とホーンの間 N 型ケーブル，導波管と電磁ホーン及び導波管と自由空間のインピーダンス不整合及び，ミラーの反射効率などに電波強度がより減衰することが予想される．

GHz 帯マイクロ波での集光の様子を実際に観察するために，微小ループアンテナ*1を用いてビームプロファイルや集光時のビーム内での偏光の様子を測定する必要がある．

電磁界シミュレーターを用いた実際のマイクロ波の伝搬のシミュレートも重要である．今回のパラボラミラーの設計は，光子の運動を考え幾何光学に基づいて計算を行なったが，回折や干渉といった波の性質も考慮する必要がある．アンテナの形状，材質，境界条件など，多岐にわたる条件をを設定するができ，自動でメッシュを最適化した波動方程式の有限要素解から，実測する物理量まで計算することが可能である．ANSYS-HFSS(High Frequency Structure Simulator) を用いて，設計する際に無視した波としての性質がどのような光学系のセットアップの場合に無視できなくなるかを見極めることが可能である．ANSYS-HFSS(High Frequency Structure Simulator) は有限要素法（領域をメッシュに分割し計算する方法）により，三次元空間の Maxwell 方程式を解くソフトウェアである [付録参照]．

HFSS を用いると，2 種類の波長の GHz 帯マイクロ波を同じ導波管で混合し，電磁ホーンから自由空間に放出できる光源の設計などにさらなる応用をすることができる．

*1 波長に対してアンテナの有効長が 1/4 以下のものを微小ループアンテナと呼ぶ．

第 7 章

展望

大気起因の信号がバックグラウンドとなるため、探索実験を実施する際、集光は真空チェンバー内で行う必要がある。また、二色の異なる波長の GHz 帯マイクロ波を同じ導波管から同軸で混合する技術についても課題が残っている。

さらに、パラボラミラーの焦点距離を長く ($\tan \vartheta = \frac{1}{100}$ 程度) した光学系で光子をかすり衝突させることができれば、式 2.2 の重心系エネルギーは

$$E_{CMS} = 2\omega \sin \vartheta = 2.44 \times 10^{-6} [\text{eV}/c^2] \quad (7.1)$$

となり、探索可能質量域がディラトンの質量域に到達する [1]。ディラトンは質量 $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{eV}/c^2$ 、結合の強さ $10^{-21}/\text{GeV}$ に予想されている (7.1)。また、パルス圧縮による光源の強度を増加させることにより弱い結合領域まで探索可能となる。

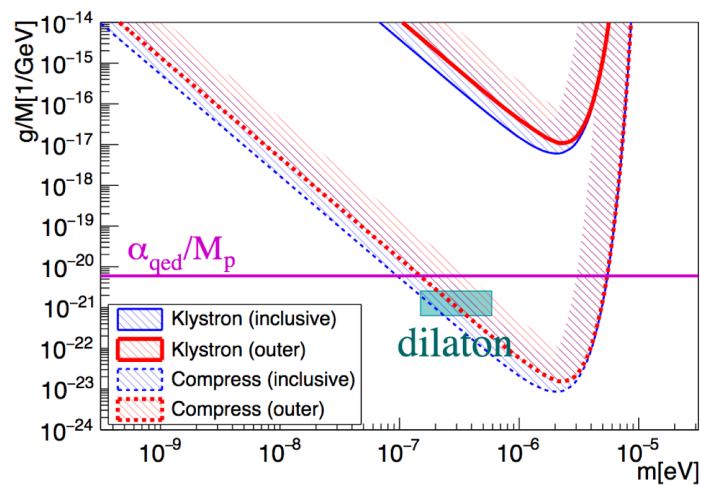


図 7.1: ディラトンの質量領域と提案されている実験手法での探索可能領域 [1]

付録

A 電磁ホーンからの放射のシミュレーション

ANSYS 社 HFSS を用いて電磁ホーンから放射した GHz 帯マイクロ波強度のシミュレーションを行った。ANSYS-HFSS(High Frequency Structure Simulator)は有限要素法(領域をメッシュに分割し計算する方法)により、三次元空間の Maxwell 方程式を解くソフトウェアである。

ANSYS 社の HFSS を用いることで、波動方程式を解く際にどの程度まで幾何光学の近似が成立するかをシミュレーションすることが可能となる。

今回、3 GHz の電磁波をホーンアンテナから自由空間に放出した際の電磁界分布をシミュレートした。図 A.1 のように、ホーンアンテナは米 Pasternack Enterprises 社の PE9863/NF10 と同じサイズのホーンアンテナをデザインし、計算を行なった。

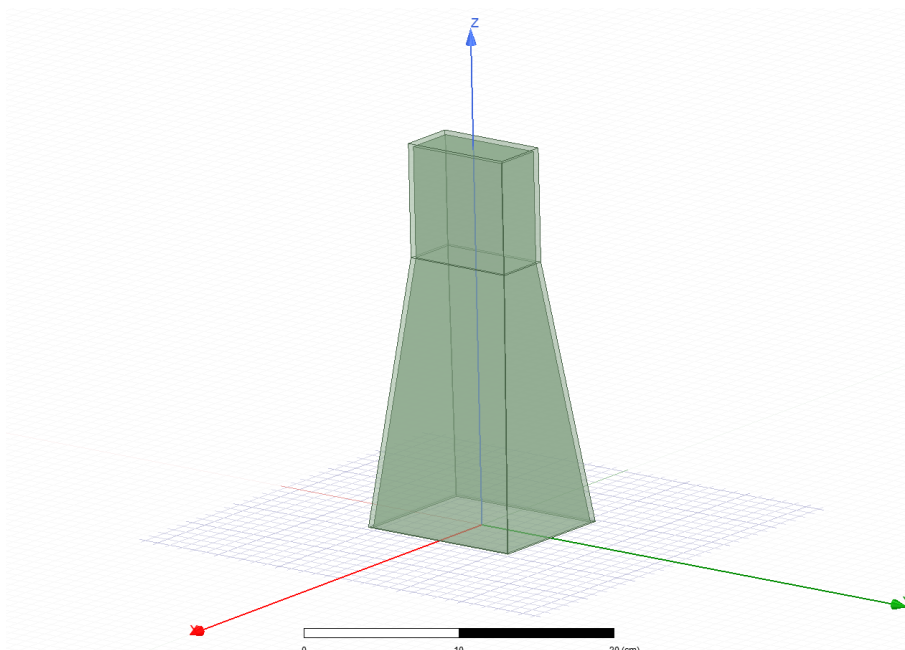


図 A.1: HFSS 上でデザインしたホーンアンテナ

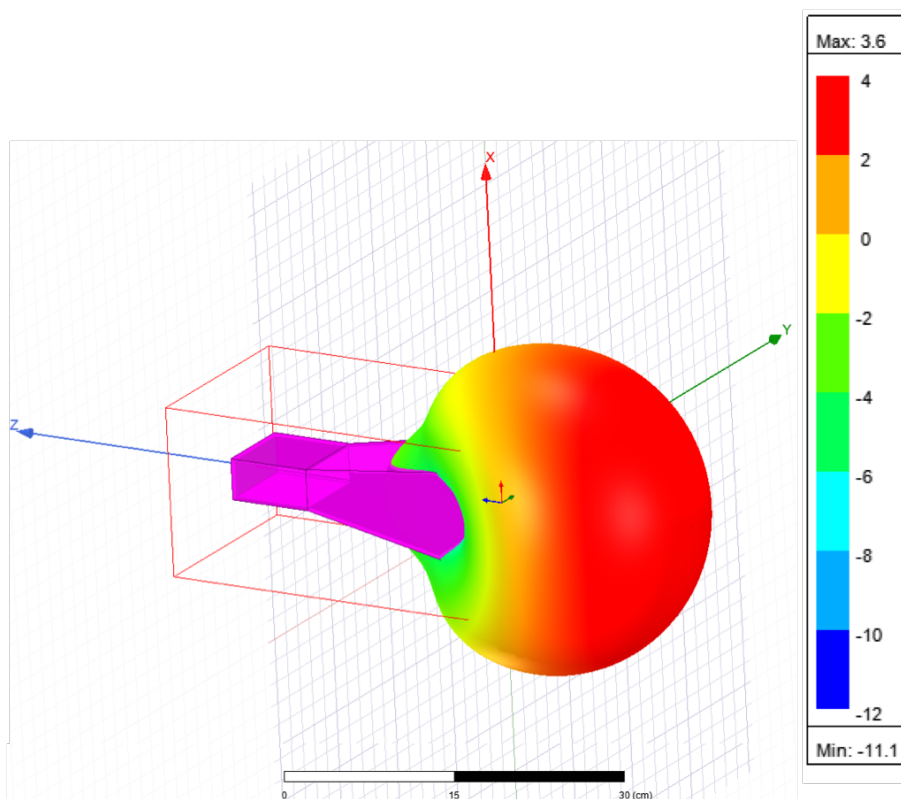


図 A.2: ホーンアンテナ PE9863/NF10 の強度分布 [dBm]

謝辞

本研究を進める上でお世話になった多くの方に感謝申し上げます。本研究のきっかけをくださった本間謙輔助教には忙しいにもかかわらず、研究を進める上での確かなアドバイスを頂きました。

志垣賢太教授にはラボラトリエクササイズや毎週のミーティングにおいて不十分な点を指摘していただいたり、新しい視点から助言していただいたきました。三好隆博助教にはB4の原子核物理学ゼミでお世話になりました。原子核物理に関する理解を大きく手助けして頂きました。山口頼人特任助教には検出器ゼミでお世話になりました。実体験を交えた多くの話を聞かせていただき、将来研究者を目指す上で貴重な体験ができました。

大川正典名誉教授と飯沼昌隆助教には大学院進学について多くの相談に乗っていただきました。松村武准教授と樋口克彦准教授には、大学生活全般について様々なアドバイスをいただきました。

楽しい一年間を送らせていただいたクォーク物理学研究室の学生の皆様にお礼申し上げます。特に、柴田早由里さんは、共同研究者として微小ループアンテナの製作など多くの実験を手伝っていただきました。平原祐輔さんには背景理論について丁寧に教えていただきました。山川皓生さん、尾崎堯弥さん、近藤丈仁さんには卒論の構成などについて多くのアドバイスをいただきました。また、同じ部屋の信廣晃秀さん、大佐古拓海さん、大矢元海さん、桐田勇利さんには研究の話はもちろん、くだらない話にもお付き合いいただきありがとうございました。そして、同期の木村健斗さんと徳本涼香さん、物理の議論にとことん付きあってくれてありがとう。

また、本学宇宙科学センター水野恒史准教授には、お忙しい中副査として時間を割いていただきました。併せて感謝申し上げます。

最後になりましたが、これまで温かい目で見守ってくれた家族、友人たちに深く感謝します。

参考文献

- [1] K. Homma and Y. Kirita, “Stimulated radar collider for testing a model of dark energy,” arXiv:1909.00983.
- [2] M. Thomson, “Modern Particle Physics,” Cambridge University Press (2013).
- [3] 名古屋大学素粒子宇宙起源研究所 HP, “スポットライト第6回：ダークマターを捕まえる,” . <http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/blog/2014/03/14/spotlight06/>.
- [4] 日本物理学会誌第 72 巻第 9 号（通巻 823 号）付録, “物理学 70 の不思議,” . https://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/files/71-09_70fushigi.pdf.
- [5] M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018)
- [6] 松原 隆彦, “現代宇宙論,” 東京大学出版会 (2010).
- [7] C. Grupen, 小早川 恵三 訳, “宇宙素粒子物理学,” シュプリンガー・ジャパン (2009).
- [8] 松原 隆彦, “宇宙論の物理〈下〉,” 東京大学出版会 (2014).
- [9] R.D. Peccei and H. Quinn, Phys. Rev. Lett. 38, 1440 (1977); Phys. Rev. D 16, 1791 (1977).
- [10] B. Aubert et al. (BABAR Collaboration), Phys. Rev. D 80, 052002 (2009)
- [11] S. Uehara et al. (Belle Collaboration), Phys. Rev. D 86, 092007 (2012)
- [12] 本間 謙輔, 長谷部 孝, 久米 一輝, 阪部 周二, 橋田 昌樹, “真空内四光波混合による sub-eV 中性ボゾンの共鳴探索,” 高エネルギーニューズ 32-3,(2013).
- [13] 豊田 雄一 修士論文, “高強度レーザーを用いた弱結合未知粒子探索へ向けた光子光子衝突幾何と背景事象の研究,”(2018).
- [14] 日本天文学会 HP, “天文学辞典「マイクロ波」,” . <http://astro-dic.jp/wp/wp-content/uploads/spectrum.png>.
- [15] Pasternack 社 HP PE9863/NF-10 データシート. <https://www.pasternack.jp/images/ProductPDF/PE9863-NF-10.pdf>.
- [16] 中部 倫太郎 学士論文, “ 10^{-8} eV 質量域のアクシオンの粒子探索へ向けた試験的計測,”(2019).
- [17] 株式会社オプトサイエンス HP MEMS デフォーダブルミラー.

https://www.optoscience.com/maker/bmc/lineup/img/MEMS_Deformable_Mirror-img2.png

[18] 阿部 英太郎, 物理工学実験シリーズ “マイクロ波技術,” 東京大学出版会 (1979).

[19] D. M. Pozar, “Microwave engineering 4th ed.,” John Wiley & Sons, Inc. (2012).