

2022年度 修士論文

10 GHz帯におけるミリ波受信機を用いた  
ダークマター候補としてのダークフォトン  
の探索研究

2023年1月25日

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

高エネルギー物理学研究室

学籍番号 0530 - 33 - 0637

藤中 峻

## 概要

宇宙全体のエネルギーのうち、約4分の1はダークマターと呼ばれる「質量は持つが光学的に観測できない物質」と考えられている。ダークマターの候補として近年注目されているダークフォトン<sup>1</sup>は、電磁氣的境界である金属板表面でわずかな効率で光に転換される性質があり、その転換効率はダークフォトンと電磁場の結合定数 $\chi$ の2乗に比例する。その転換光を光受信機で捉えることで探索が可能となる。転換光の周波数はエネルギー保存則によってダークフォトンの質量に対応した周波数となる。特にミリ波に対応する質量領域は、宇宙観測による制限が弱く、また地上実験による探索が少ない。本研究では10 GHz帯での探索を行い、ダークフォトンの結合定数 $\chi$ と質量 $m_{\text{DP}}$ の測定、またはこれらの制限値を与えることを目的とする。10 GHz帯には人工的なミリ波のノイズが存在する。これらを取り除いた環境を実現するため、暗箱を作製し、受信機全体を覆うようなセットアップを開発した。本セットアップを用いて、14.0 ~ 14.1 GHz (質量に変換して57.9 ~ 58.3  $\mu\text{eV}/c^2$ ) において、ダークフォトンを探した。発見には至らなかったが、 $\chi < 0.8 \sim 1.8 \times 10^{-10}$  の上限を信頼度95%で設定した。この制限は宇宙観測からの制約を超える水準であり、これまでで最も厳しい制限値である。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>ダークフォトンとダークマター</b>	<b>3</b>
1.1	ダークマターとは	3
1.2	ダークフォトンとは	3
1.3	DP-CDM 探索の測定原理	4
1.3.1	DP-CDM の金属板での転換現象	4
1.3.2	ピーク信号から得られる情報	5
1.4	DP-CDM 探索の現状	5
1.5	本論文の構成	7
<b>第2章</b>	<b>実験セットアップ</b>	<b>8</b>
2.1	全体図	8
2.2	金属板	10
2.3	ホーンアンテナ	10
2.4	金属板とホーンアンテナの間の距離	10
2.5	アイソレーター	11
2.6	アンプ	11
2.7	アンプの電源	11
2.8	スペクトルアナライザ	14
2.9	暗箱	14
<b>第3章</b>	<b>測定</b>	<b>20</b>
3.1	測定の流れ	20
3.2	ゲインキャリブレーション	20
3.2.1	既知の温度での黒体輻射の測定	22
3.2.2	増幅率 $G$ と受信機雑音温度 $T_{RX}$ の算出方法	22
3.3	DP-CDM 探索のための測定	22
<b>第4章</b>	<b>ダークフォトン信号探索の解析手法</b>	<b>29</b>
4.1	データの整形	29
4.1.1	周波数ビン幅の変更 (リビン)	29
4.1.2	ゲインキャリブレーション	29
4.2	ダークフォトン信号のピークを探し出すスペクトルのフィット	29
4.3	ヌルサンプルの作成	31
4.4	各フィット結果の $p$ 値 $p_{local}$ の推定	31

---

4.5	探索全体の $p$ 値 $p_{\text{global}}$ の推定 . . . . .	32
<b>第 5 章</b>	<b>結果</b>	<b>34</b>
5.1	探索結果 . . . . .	34
5.2	結合定数 $\chi$ の上限 . . . . .	34
<b>第 6 章</b>	<b>まとめ</b>	<b>41</b>
	謝辞	42
	参考文献	42

# 第1章 ダークフォトンとダークマター

## 1.1 ダークマターとは

今日の実験結果から、宇宙における暗黒物質(ダークマター)の構成は、全エネルギー総量の4分の1を占めていることが明らかになっているが、その性質の多くは未解明である [1].

ダークマターは質量を有する物質であり、非相対論的な ( $v/c \sim 10^{-3}$ ) 粒子であることがわかっているので「冷たい」ダークマター、CDMとも呼ばれる。その候補として、比較的質量が重い(少なくとも MeV スケール以上の) WIMP(Weakly Interacting Massive Particles) が長年探索されてきたが未だ決定的な結果は得られていない。このような背景から近年は、WIMP より軽い質量の粒子である WISP(Weakly Interacting Slim Particles) も注目されている [2]. WISP の候補の一つがダークフォトンであり、本実験ではこれを探索対象とした装置の開発、およびそれを用いた探索実験を行った。

## 1.2 ダークフォトンとは

素粒子物理学における標準模型は、暗黒物質の存在や強い CP 問題などを説明できておらず、現状不十分である。これらの問題を解決するために、標準模型の様々な拡張理論が提案されており、U(1) 対称性はその一つである。このような模型拡張により表される電磁場とダークフォトン場のラグランジアンは

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}X_{\mu\nu}X^{\mu\nu} + \frac{m_{\text{DP}}^2}{2}X_\mu X^\mu - \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}X^{\mu\nu} - J^\mu A_\mu \quad (1.1)$$

である。  $X_\mu \rightarrow \tilde{X}_\mu - \chi A_\mu$  と定義し直すと

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\tilde{X}_{\mu\nu}\tilde{X}^{\mu\nu} + \frac{m_{\text{DP}}^2}{2}(\tilde{X}_\mu\tilde{X}^\mu - 2\chi A_\mu\tilde{X}^\mu + \chi^2 A_\mu A^\mu) - J^\mu A_\mu \quad (1.2)$$

である。ここで、 $A_\mu, F_{\mu\nu}$  は通常の電磁場とその強さ、 $X_\mu, X_{\mu\nu}$  はダークフォトンの場とその強さ、 $\chi$  は電磁場とダークフォトン場の結合定数、 $m_{\text{DP}}$  はダークフォトンの質量、 $J^\mu$  は通常の電磁場の電流を表す。

つまり、ダークフォトンは質量 ( $m_{\text{DP}}$ ) を持ち、電磁場と運動論的混合(結合定数  $\chi$ ) を介して相互作用する。また、 $\mathcal{O}(10-100)\mu\text{eV}/c^2$  程度の質量のダークフォトン(以下、DP-CDM) は、ハイスケールのインフレーション模型 [3] や超弦理論の特定のモデル [2] で存在すると予言されている。

## 1.3 DP-CDM 探索の測定原理

### 1.3.1 DP-CDM の金属板での転換現象

式 (1.2) のように導入されたダークフォトン場の運動を考えると、ダークフォトンが  $\chi$  に比例するごくわずかな通常の電場  $E_{\text{DP}}$  を持つことが言える。ダークマターは銀河中に局在しているので、地球上でも常にダークフォトン (DP-CDM) による電場が存在しているはずである。さらに、金属表面などの境界面においては電磁氣的境界条件  $E_{\parallel} = 0$  ( $\parallel$  は金属表面に対して並行成分を表す) が成り立つ。  $E_{\text{DP},\parallel}$  が存在する場合、

$$E_{\parallel} = E_{\text{DP},\parallel} + E_{\text{photon},\parallel} = 0 \quad (1.3)$$

が成り立つはずであり、これを満たすように通常の電場  $E_{\text{photon},\parallel} \neq 0$  が現れる。よって、DP-CDM が存在すると金属板表面から通常の光 ≡ “転換光” が現れる。さらに、並行方向の電場成分のみが生じるため、転換光の伝播方向は金属板に垂直になる。この転換現象を利用して、光受信機 (本研究ではホーンアンテナを用いたミリ波受信機) と金属板を用いて DP-CDM を探索することができる。実際には、DP-CDM の運動量を考慮すると転換光の方向は垂直とは限らないが、CDM の速さ  $v_{\text{DP}} \sim 220\text{km/s}$  であり、光速  $c$  より十分小さいために、運動量による効果はほとんど無視でき、垂直からのズレはせいぜい  $0.06^\circ$  となる [4].

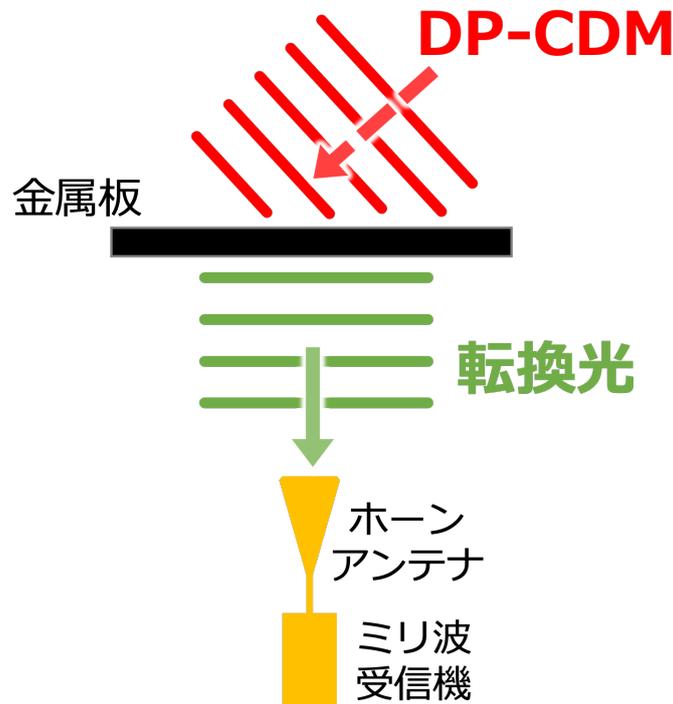


図 1.1: DP-CDM は、金属板でわずかに実光子と相互作用し、表面で転換光が発生する性質を持つ。この転換光は金属板に対してほぼ直角に放出される。

### 1.3.2 ピーク信号から得られる情報

転換現象の前後でのエネルギー保存則から運動量 0 の仮定では、転換光の周波数は DP-CDM の質量  $m_{\text{DP}}$  によって一意に決まり、転換光は周波数スペクトルのピークとして観測される。ピーク周波数  $\nu_0$  は  $h\nu_0 = m_{\text{DP}}c^2$  ( $h$  はプランク定数) である。DP-CDM の運動量を考慮すると、転換光の周波数は  $\nu_0$  からズレるが、運動量は十分小さく ( $v_{\text{DP}}/c \sim 10^{-3}$ )、ピークの幅  $\Delta\nu$  に関して、 $\Delta\nu/\nu_0 \sim (v_{\text{DP}}/c)^2 \sim 10^{-6}$  となる。また、ピークの形状は DP-CDM の運動量分布から決まり、CDM の運動量分布が Maxwell-Boltzmann 分布に従っていると仮定することで、ピークの形状は推定できる [6]。

また、有効開口面積  $A_{\text{eff}}$  [ $\text{m}^2$ ] を持つホーンアンテナで測定し、転換光のパワーが  $P_{\text{DP}}$  であった場合に推定されるダークフォトンと電磁場の結合定数  $\chi$  は

$$\chi = 1.248 \times 10^{-10} \left( \frac{P_{\text{DP}}}{10^{-19} \text{ W}} \frac{10^{-3} \text{ m}^2}{A_{\text{eff}}} \frac{0.39 \text{ GeV/cm}^3}{\rho} \right)^{1/2} \frac{\sqrt{2/3}}{\alpha} \quad (1.4)$$

となる [8]。  $\rho (= 0.39 \text{ GeV/cm}^3)$  は銀河ハロー内のダークマター密度、  $\alpha$  は DP-CDM の偏極によって変わる係数であり、偏極方向がランダムである場合、  $\alpha = \sqrt{2/3}$  である。検出された転換光の強度  $P_{\text{DP}}$  は、

$$P_{\text{DP}} \propto \chi^2 \quad (1.5)$$

となることがわかる。よって、転換光の周波数スペクトルを測定することで、そのピーク位置から DP-CDM の質量を、ピークの高さから結合定数  $\chi$  を求めることができる (図 1.2)。

さらに、DP-CDM が偏極を持つ場合も考えられ、偏極度を  $\epsilon$  ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ ,  $\epsilon = 0$  がランダムな場合、  $\epsilon = 1$  が一定方向のみの偏極を持つ場合になる)、偏極方向と金属板がなす角を  $\theta$  とした場合、  $P_{\text{DP}}$  は

$$P_{\text{DP}} \propto \chi^2 \left( \frac{1 - \epsilon^2}{3} + \epsilon^2 \cos^2 \theta \right) \quad (1.6)$$

という関係を持つ。図 1.3 のように、3 方向での測定を行うことで、結合定数  $\chi^2$ 、偏極度  $\epsilon$ 、偏極方向となす角度  $\theta$  の 3 つのパラメータを解明することも可能である。

## 1.4 DP-CDM 探索の現状

質量領域  $10^0 \sim 10^5 \mu\text{eV}/c^2$  における、DP-CDM 探索の現状を図 1.4 に示す。間接的な制限として、宇宙観測 (CMB) などの観測結果から求まるものや、太陽寿命によるものがある。また、実験による制限として、Haloscope 実験 (空洞共振器を用いてアクシオンやダークフォトンから生じる微弱な電場を増幅して測定する実験) や、本研究と同じ測定原理の先行実験 [5] [6] によるものがある。特に未探索の領域が多い  $\mathcal{O}(10 - 100) \mu\text{eV}/c^2$  の中の 10 GHz 付近のダークフォトンを探査することが、本実験の目的である。

また、我々の先行研究 [6] では極低温クライオスタットを用いて感度向上を図った受信機を開発したが、今回は 1.3 章で説明したような 3 方向の感度を持つ受信機への拡張を見越して、「常温」での受信機の開発をすることにした。極低温受信機ではクライオスタットの形状変更は容易ではなく、3 方向アンテナへの拡張が難しいためである。なお、本研究

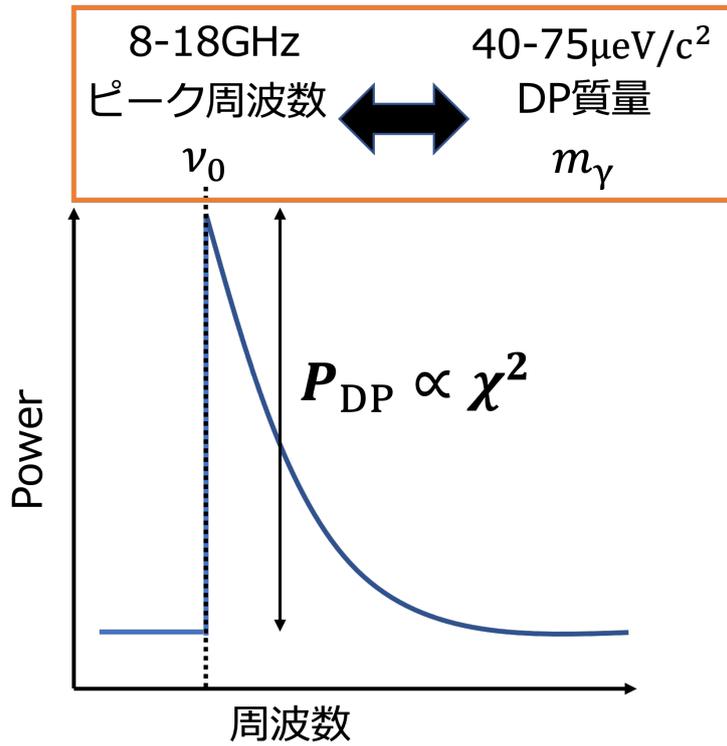


図 1.2: ピーク信号から得られる情報を示す. 周波数  $\nu_0$  と DP-CDM の質量  $m_{\text{DP}}$  はエネルギー保存則から一対一対応している. また, その強度  $P_{\text{DP}}$  から結合定数  $\chi$  もわかる.

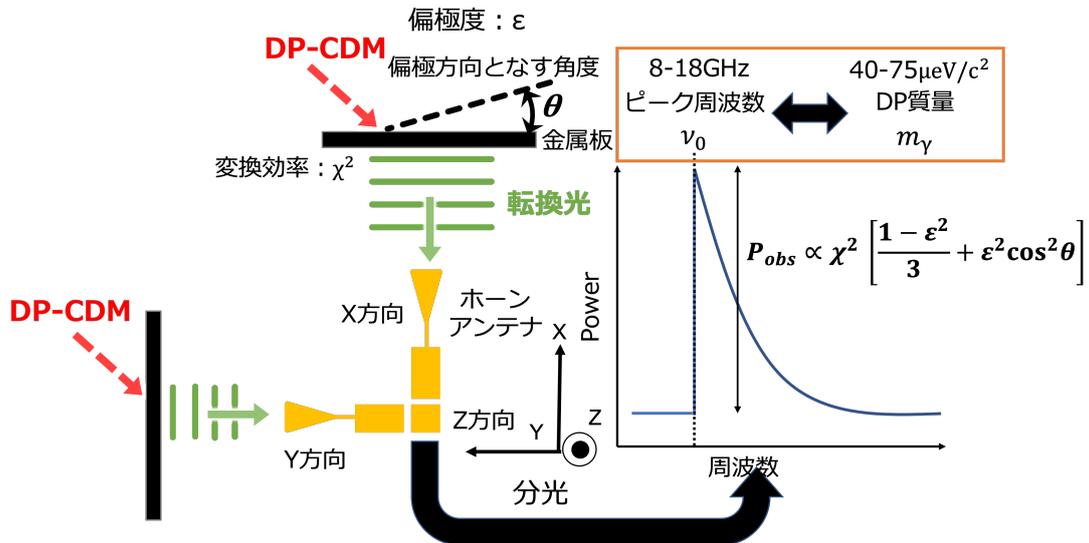


図 1.3: 3 方向での測定を行うことで, 結合定数  $\chi^2$ , 偏極度  $\epsilon$ , 偏極方向となす角度  $\theta$  の 3 つのパラメータを解明することが可能である. たとえばこの図では  $\theta$  が 0 に近く, X 方向の轉換光が Y 方向のそれよりも大きいことを示している.

は現時点では 1 方向のみのセットアップでの結果であり, 将来的に 3 方向での測定を行う計画である.

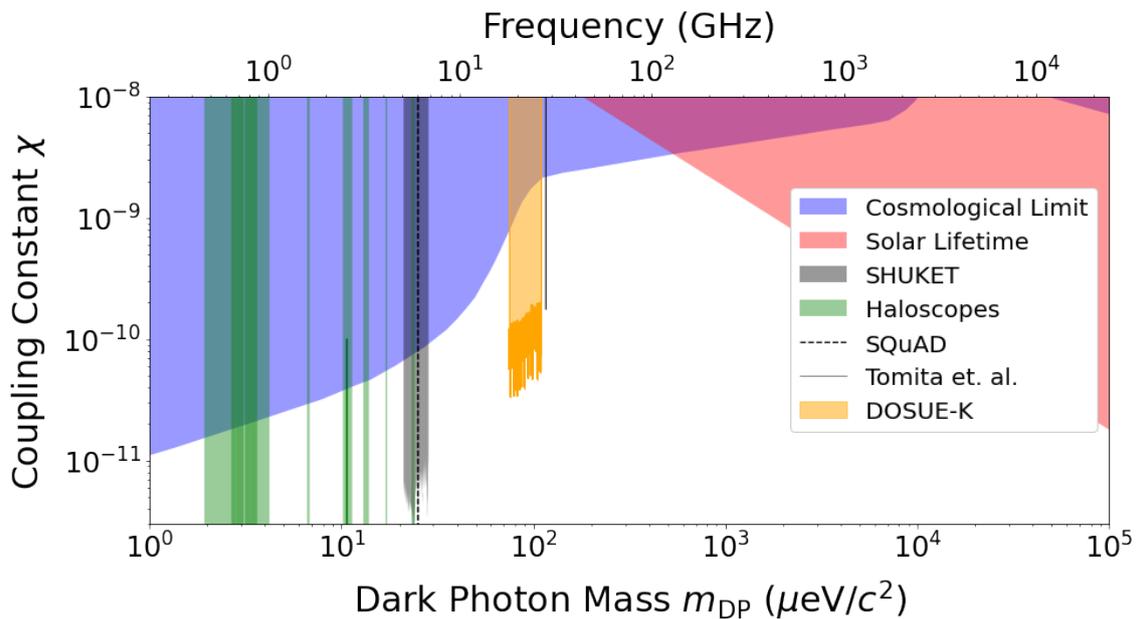


図 1.4: 本研究の探索領域と近いところの, 現在の探索状況を示す. 横軸が DP-CDM 質量 (下側) と対応する転換光周波数 (上側) で, 縦軸が DP-CDM と電磁場との結合定数  $\chi$  である. 色で塗られた領域が今までに 95% 信頼度で棄却された領域である. 青は宇宙観測 (CMB), 赤は太陽寿命, 緑は Haloscope 実験, 灰色はパラボラアンテナを用いた SHUKET 実験, 黄は我々の先行実験による制限である.

## 1.5 本論文の構成

第 2 章では, DP-CDM 探索に使用した実験セットアップについて, 装置を構成する各物品及び信号の流れ, またノイズ抑制のために作製した暗箱について述べる. 第 3 章では, 本研究の測定の一連の流れを示し, 装置の感度を測るゲインキャリブレーションについて述べる. 第 4 章では, ダークフォトンの信号探索のための解析手法を述べる. 第 5 章では本研究の結果について述べる. 第 6 章は, 本論文の結論である.

## 第2章 実験セットアップ

### 2.1 全体図

本研究では、DP-CDM 探索のために図 2.1 のようにセットアップを組む。まず金属板でダークマター候補としてのダークフォトンをわずかに実光子と相互作用させることで金属板表面で転換光を発生させる。金属板とホーンアンテナの間は、1.5 m の距離をとっている。転換光はホーンアンテナで集光されて電気信号に変換される。その後、アイソレータを通り、各アンプで増幅されてスペクトルアナライザで測定される流れとなっている。ホーンアンテナは、アルミフレームで組んだ土台に乗せた金属板に上向きに固定し (図 2.2), その裏にアイソレータから後段アンプまでを設置した (図 2.3).

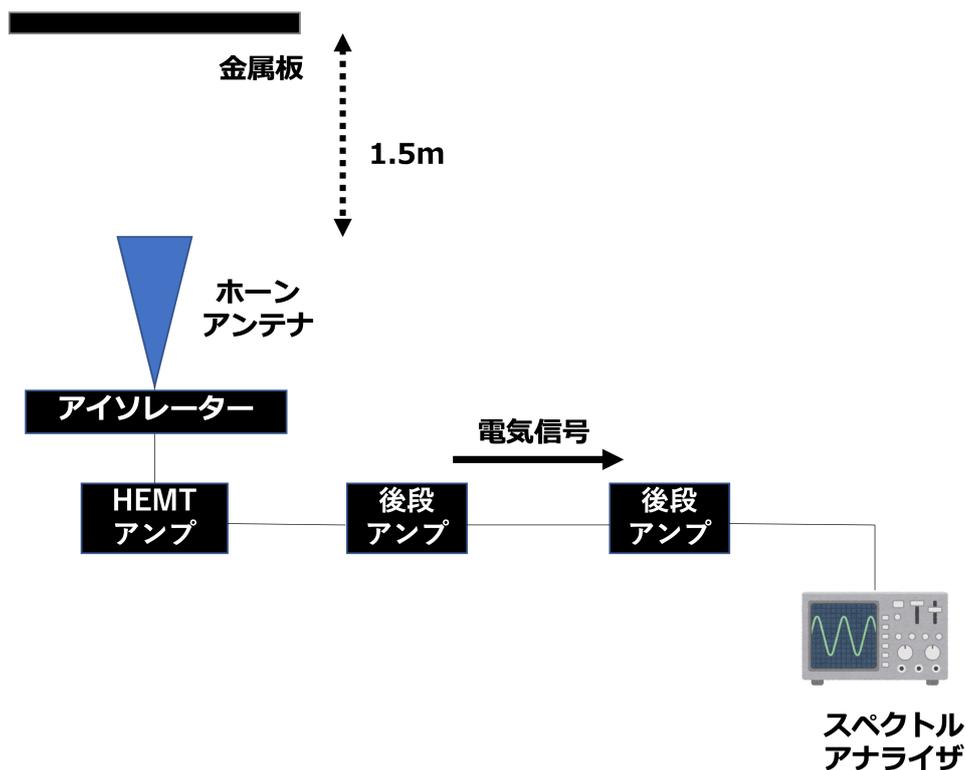


図 2.1: 本実験全体の信号の流れを示す。電磁場境界面でダークフォトンと実光子をわずかに相互作用させることで転換光を発生させ、それをホーンアンテナで集光し、各アンプの増幅を受けて分光したものをスペクトルアナライザで取得する。

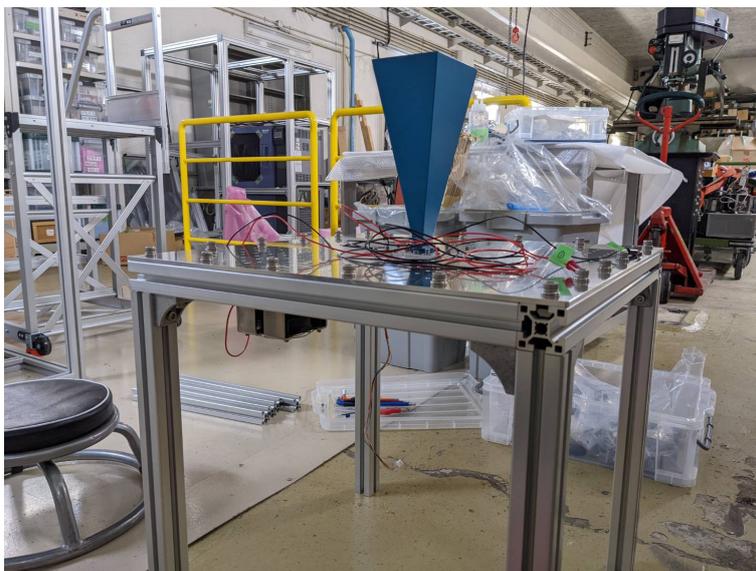


図 2.2: ホーンアンテナは, アルミフレームで組んだ土台に乗せた金属板に上向きに固定している.

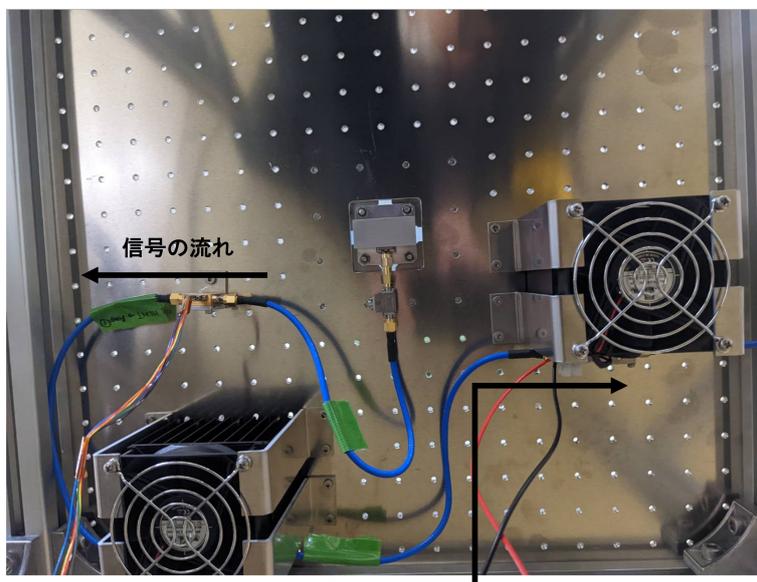


図 2.3: ホーンアンテナ裏の配線を示す. ホーンアンテナの出力からアイソレーター (2.5 節), HEMT アンプ, 後段アンプ (2.6 節) までを, ホーンアンテナを取り付けた土台裏に設置し, SMA ケーブルで配線した. 図中の→は信号の流れを示す.

## 2.2 金属板

用いた金属板を図 2.4 に示す。ミスミのアルミ製で、表面は  $690 \times 690\text{mm}$ 、厚さは  $4\text{mm}$  である。前述したとおり、この金属板の表面でダークフォトンの場の微小な実電場成分において、境界条件が成り立つように転換光が生じる。

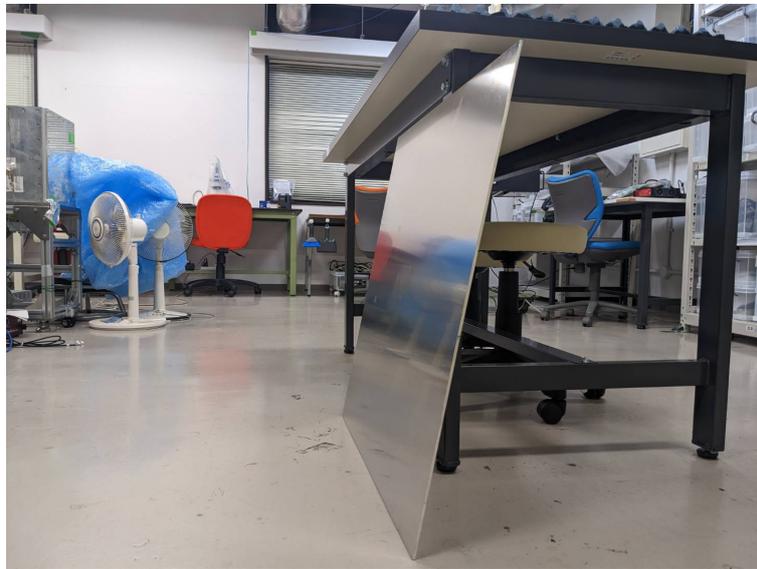


図 2.4: 金属板を示す。ミスミのアルミ製で、表面は  $690 \times 690\text{mm}$ 、厚さは  $4\text{mm}$ 。

## 2.3 ホーンアンテナ

用いたホーンアンテナは図 2.5 に示す PE9856/SF-20 である。集光可能な周波数帯は  $8.2 \sim 12.4\text{GHz}$  で、ゲインは  $20\text{dB}$ 、開口部は長方形をしており、物理的な開口面積は  $123.8 \times 91.9\text{mm}$  である。このホーンアンテナで転換光を集光する。検出できる偏光は  $91.9\text{mm}$  の辺と並行方向のみの片偏波アンテナであり、ホーンアンテナの物理的な開口面積は有効開口面積  $A_{\text{eff}}$  とは異なり、 $A_{\text{eff}} = 91.9 \times 91.9\text{mm}^2$  として評価する。

## 2.4 金属板とホーンアンテナの間の距離

ホーンアンテナと金属板の距離が近いと、複雑な電磁場を形成し、ある  $\chi$  を仮定した際に得られる信号強度  $P_{\text{DP}}$  の推定が難しくなる。遠方界条件を満たす距離以上に離すことで、平面波近似を適用でき、式 (1.4) で  $P_{\text{DP}}$  と  $A_{\text{eff}}$  から  $\chi$  を求めることができる。開口部の短辺の長さ  $D = 91.9\text{mm}$  のホーンアンテナで本実験で測定可能な最大周波数  $\nu = 18\text{GHz}$  (波長  $\lambda = 16.7\text{mm}$ ) のミリ波を検出する場合の遠方界条件は

$$\frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \times 91.9^2}{16.7} \simeq 1011\text{mm} \quad (2.1)$$

となる。本セットアップでは  $1\text{m}$  以上離しており、平面波近似が適用できる。

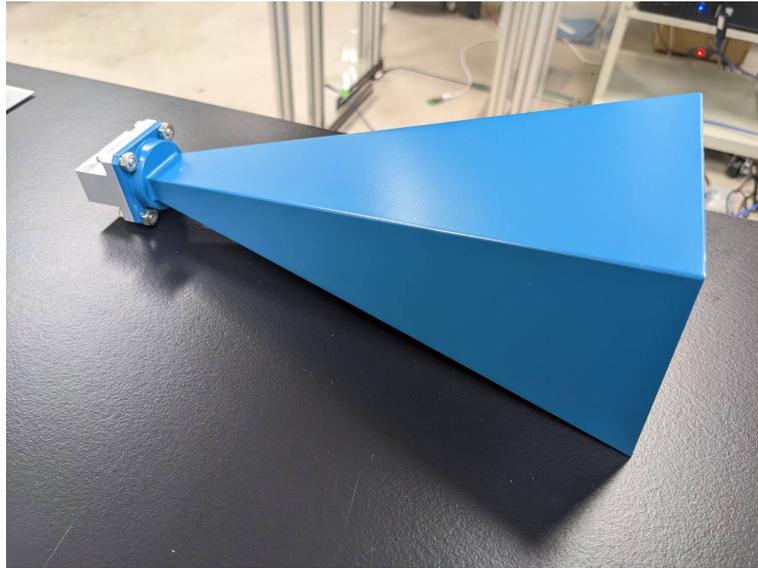


図 2.5: ホーンアンテナを示す. PE9856/SF-20. 集光可能な周波数帯は 8.2 ~ 12.4 GHz で, ゲインは 20 dB, 物理的な開口面積は  $123.8 \times 91.9$  mm.

## 2.5 アイソレーター

用いたアイソレーターは図 2.6 に示す PASTERNAK 製の PE8304 であり, ホーンアンテナの直下に接続した. 対応周波数は 8 ~ 18 GHz である. 信号の逆流を防ぐ (反射減衰量 -16 dB) 役割をしており, 挿入損失は -0.6 dB のみである.

## 2.6 アンプ

用いたアンプは図 2.7 に示す Low Noise Factory 製の LNF-LNR6.20A (以下 HEMT アンプ) および, 図 2.8 に示す Mini-Circuits 製の ZVA-183G-S+ $\times 2$  (以下後段アンプ) である. HEMT アンプは, 6 ~ 20 GHz の周波数帯で動作する超低雑音増幅器で, 典型的なゲインは約 33 dB, 後段アンプは, 0.5 ~ 18 GHz の周波数帯で動作する増幅器で, 典型的なゲインは約 38 dB である. また, 後段アンプの下部には FAN が装着されている.

## 2.7 アンプの電源

用いた直流電源は図 2.9 に示す KIKUSUI 製の PMX32-2QU である. 右側 4 端子 (2 CH 分) を用いて 2 つの後段アンプに, 左側 3 端子 (GND を含む) を用いて HEMT アンプに, それぞれ接続した.

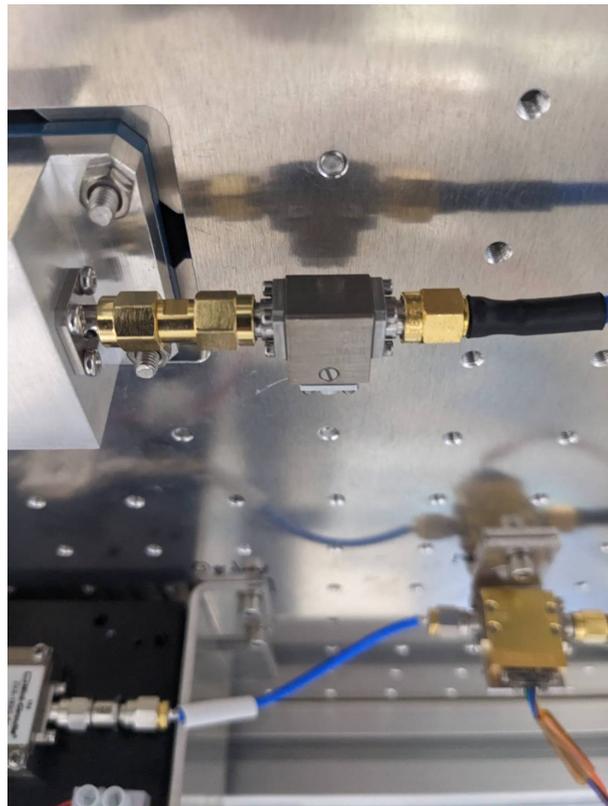


図 2.6: アイソレーターを示す. PASTERNAK 製の PE8304. 対応周波数は 8 ~ 18 GHz. 挿入損失は 0.6 dB, 反射減衰は -16 dB.

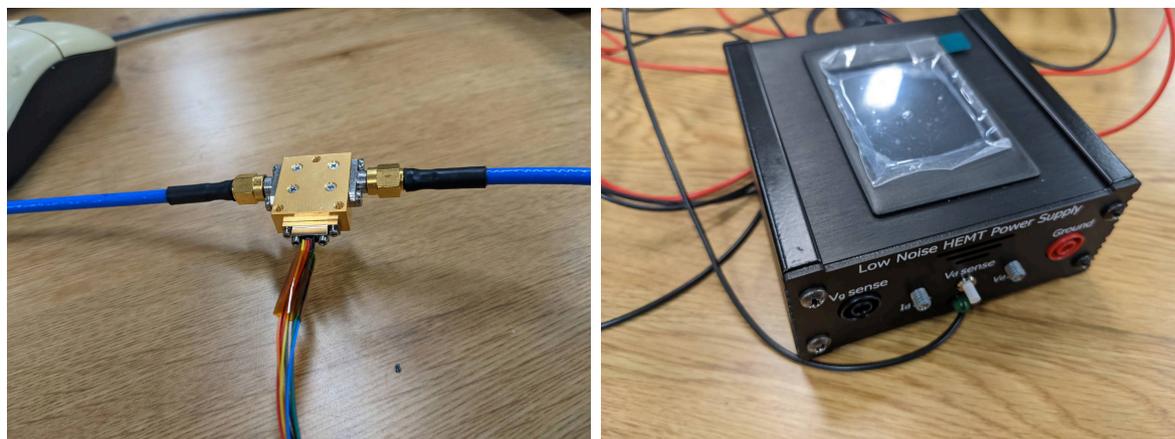


図 2.7: HEMT アンプ (左) とその電源 (右) を示す. Low Noise Factory 製の LNF-LNR6\_20A. 6 ~ 20 GHz の周波数帯で動作する超低雑音増幅器で, 典型的なゲインは約 33 dB. 設定値は  $V_{ds} = 2.00 \text{ V}$ ,  $I_{ds} = 47.0 \text{ mA}$ .

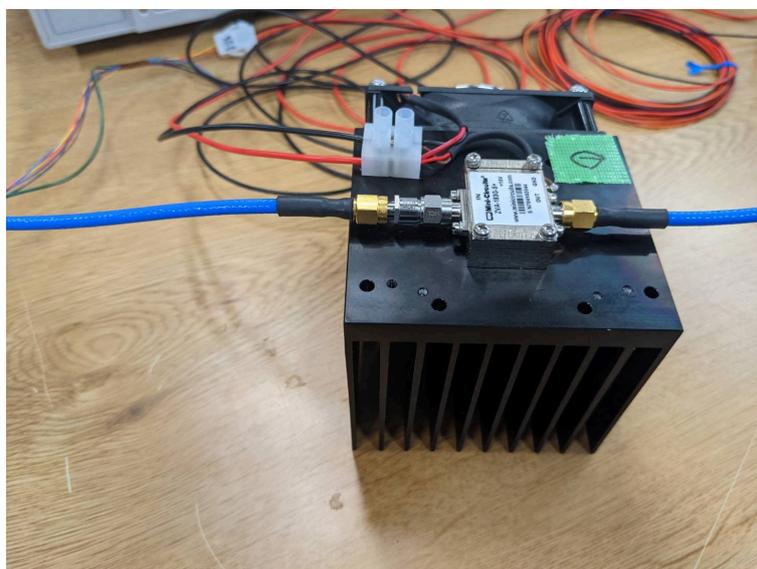


図 2.8: 後段アンプを示す. Mini-Circuits 製の ZVA-183G-S+. 0.5 ~ 18 GHz の周波数帯で動作する増幅器で, 典型的なゲインは約 38 dB.



図 2.9: アンプの直流電源を示す. KIKUSUI 製の PMX32-2QU.

## 2.8 スペクトルアナライザ

用いたスペクトルアナライザは図 2.10 に示すアンリツ製の MS2840A であり, 26.5 GHz まで対応している. 設定した周波数領域と周波数分解能で入力した電気信号の周波数パワースペクトルを記録できる. ただし, あとに示す図 2.15 は, 事前測定のため別のスペクトルアナライザ (Keysight 製, 型番 N9010A) を用いて信号取得している.

## 2.9 暗箱

本実験の探索領域である 10 GHz 帯には Wi-Fi などの人工的に発生されたミリ波ノイズ (以後, スプリアスノイズ) が存在する. これらを除いた環境を実現するため, 図 2.11, 図 2.12 のようなホーンアンテナと転換光発生用の金属板の間を覆った暗箱を作製した. 暗箱の天井の金属板は, 2.2 節で示した転換光発生用の金属板になっている.

まず, 金属板 (690 mm × 690 mm) に図 2.13 に示す電波吸収体 (E&C エンジニアリング製, 型番:CV-3) を整形したものを速乾ボンドで固定した (図 2.14). この電波吸収体は 9 GHz 以上のミリ波を約 -40 dB 以上減衰することができる. これを 8 枚用意し, 40 mm × 40 mm アルミフレーム材で囲った枠の側面に設置した. また, 暗箱の底面 (=ホーンアンテナの設置されている平面) も同様に金属板と電波吸収体で覆った. ホーンアンテナと転換光発生用の金属板の間を金属板で覆ったことで外来からのスプリアスノイズを遮断でき, さらに漏れこみも電波吸収体で吸収できるため, 十分にスプリアスノイズを取り除ける.

この暗箱でノイズ除去ができていないか確認するため, 暗箱の設置前後における信号の変化を確認した. 設置前の測定は暗箱の側面金属板 8 枚を除いた状態で 8 ~ 18 GHz までを



図 2.10: スペクトルアナライザを示す. アンリツ製の MS2840A.

測定した<sup>1</sup>. 図 2.15 からわかるように, 設置前では特に 9 GHz と 12 GHz に細いピークが多く立っていたのに対し, 暗室設置後には細いピークがなくなっているのがわかる.

<sup>1</sup>ホーンアンテナ以降はスペクトルアナライザがダークフォトン測定の際と機種が異なる以外は同じである



図 2.11: 実験セットアップ全体. 左側が暗箱で覆われた転換光発生用の金属板とホーンアンテナ. 青い発泡スチロールのところに上を向いたホーンアンテナが位置している. 実際の測定では手前の面も金属板+電波吸収体で覆われる. 右側が測定のためのアンプの電源やスペクトラムアナライザが置かれた 19 インチラック.

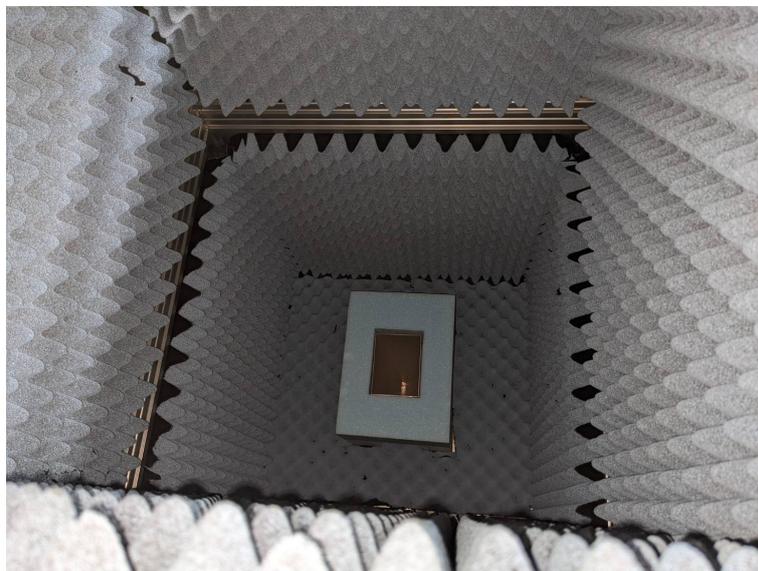


図 2.12: 暗箱の天井にある転換光発生用の金属板を外して上から撮った写真. 中央に見えるのがホーンアンテナの開口部である. ホーンアンテナの周りには発泡スチロール製(ミリ波に対して透明な材質)の置き台をセットしており, のちに述べるゲインキャリブレーションの 77 K 測定時に液体窒素を入れた箱を置くための台として用いている.

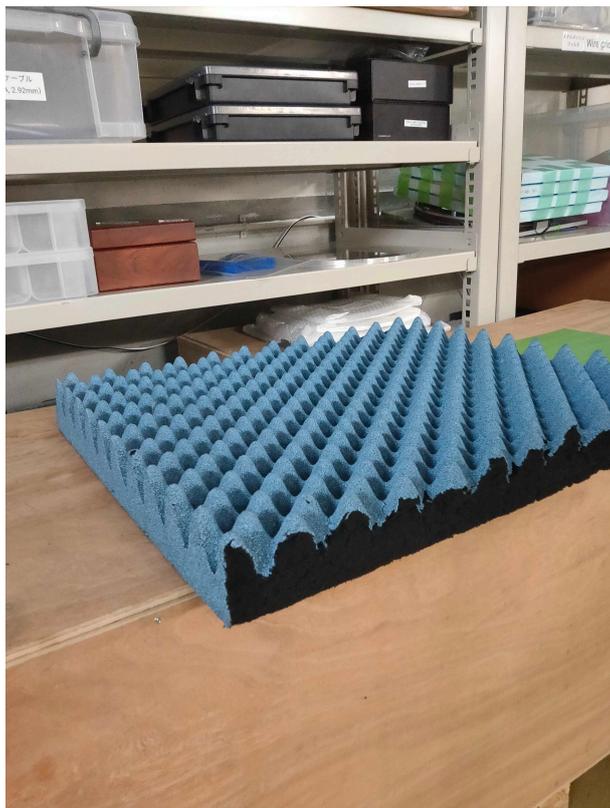


図 2.13: 電波吸収体を示す. E&C エンジニアリング製で, 型番 CV-3. 下限周波数を 9 GHz として約  $-40$  dB の特性を持つ.

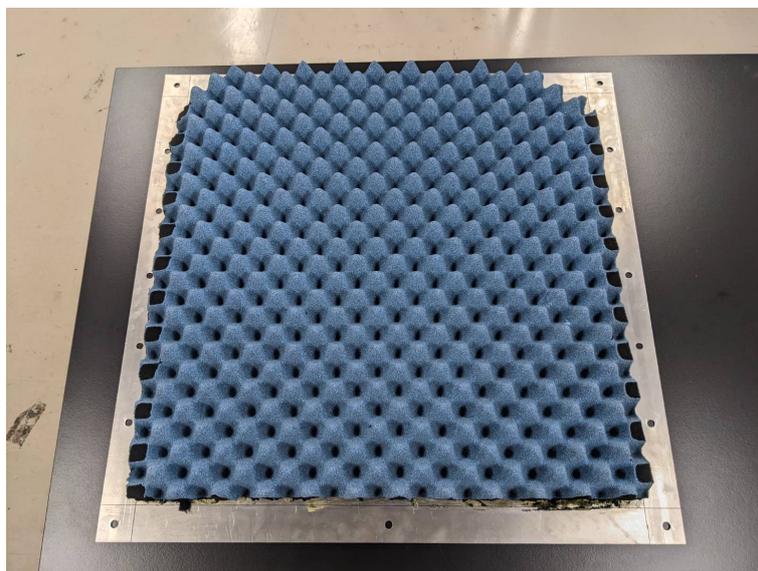


図 2.14: 暗室側面にあたる, 金属板プレートに電波吸収体を速乾ボンドで固定したもの. これを 8 枚用意し, 40 mm×40 mm アルミフレーム材で囲った枠の側面に設置した.

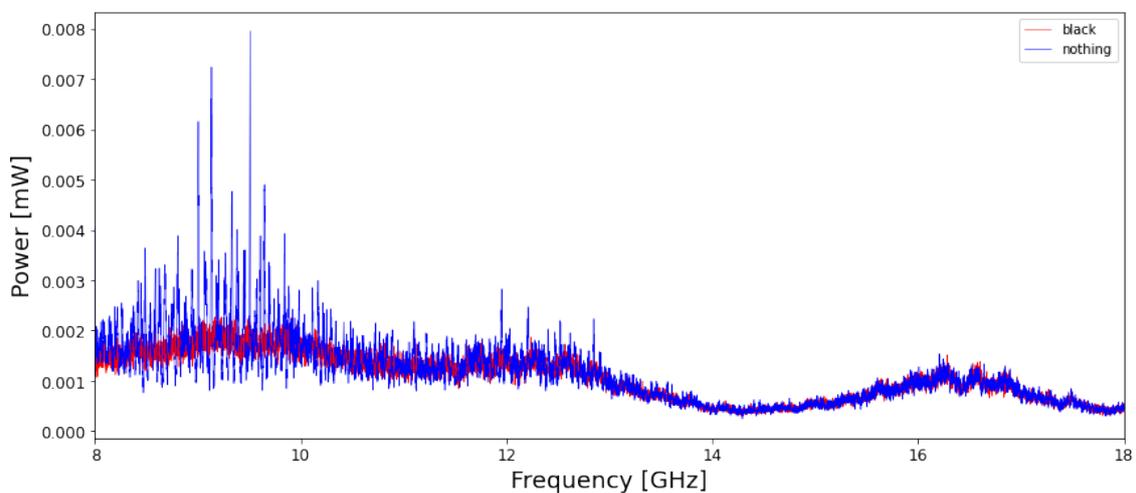


図 2.15: 暗箱の設置前後における信号の変化. 青線が暗箱で覆う前の測定スペクトル. 赤線が暗箱設置後の測定スペクトル. 設置前では特に 9 GHz と 12 GHz に細いピークが多く立っていたのに対し, 暗室設置後には細いピークがなくなっているのがわかる.

# 第3章 測定

## 3.1 測定の流れ

本実験セットアップで探索できる DP-CDM からの転換光の周波数領域は 8 ~ 18 GHz である<sup>1</sup>。スペクトルアナライザでこの帯域を一気に掃くことは不可能なので、測定範囲を 100 MHz ごとに分割して探索する。

図 3.1 に、100 MHz の探索手順の概要図を示す。一度に測定する範囲は 2.5 MHz とし、その両端 0.25 MHz ずつはデータの誤差の推定にのみ利用するため、実質 2 MHz が解析に用いるためのデータとなる。この領域が 100 MHz の探索範囲全てを漏れなく含むよう、この測定を 50 回繰り返すことで探索を完了する。

また、スペクトルアナライザは FFT(高速フーリエ変換) モードで行う。FFT モードとは、デジタル化した信号を高速フーリエ変換することでスペクトルを得るモードである。実質的な周波数分解能を示す Resolution Band Width(以下 RBW) は 300 Hz とした。

この 100 MHz の測定の前後において、3.2 章で示すゲインキャリブレーションの測定を行う。ここで、100 MHz の探索にかかる時間は約 20 分であり、この間はゲインは一定値であるとみなす。

## 3.2 ゲインキャリブレーション

スペクトルアナライザで測定されるパワー  $P_{\text{raw}}$  は、アンプの増幅やノイズの影響によって、実際にホーンアンテナの入ってくる信号のパワー  $P_{\text{in}}$  とは異なり、

$$P_{\text{raw}} = G(P_{\text{in}} + k_B T_{\text{RX}} \Delta\nu) \quad (3.1)$$

となる。 $G$  はホーンアンテナからスペクトルアナライザまでの増幅率、 $T_{\text{RX}}$  はその間に追加されるノイズに相当する温度(受信機雑音温度)、 $k_B$  はボルツマン定数、 $\Delta\nu$  は周波数分解能である。よって、入射パワーを知るためには、増幅率  $G$  と受信機雑音温度  $T_{\text{RX}}$  の両者を知る(キャリブレーションする)必要がある。ある周波数における  $G$  および  $T_{\text{RX}}$  は、常温  $T_{\text{amb}}$  である電波吸収体(=完全黒体輻射源)で受信機の入口をふさいだときの出力  $P_{\nu}(T_{\text{amb}})$  のほか、 $T_{\text{amb}}$  と異なる温度で同様に測定したときの出力との比から求めることができる [7]。

<sup>1</sup>ホーンアンテナの仕様としては 8 ~ 12.4 GHz に対応しているが、実際に測定すると 18 GHz まで感度がある

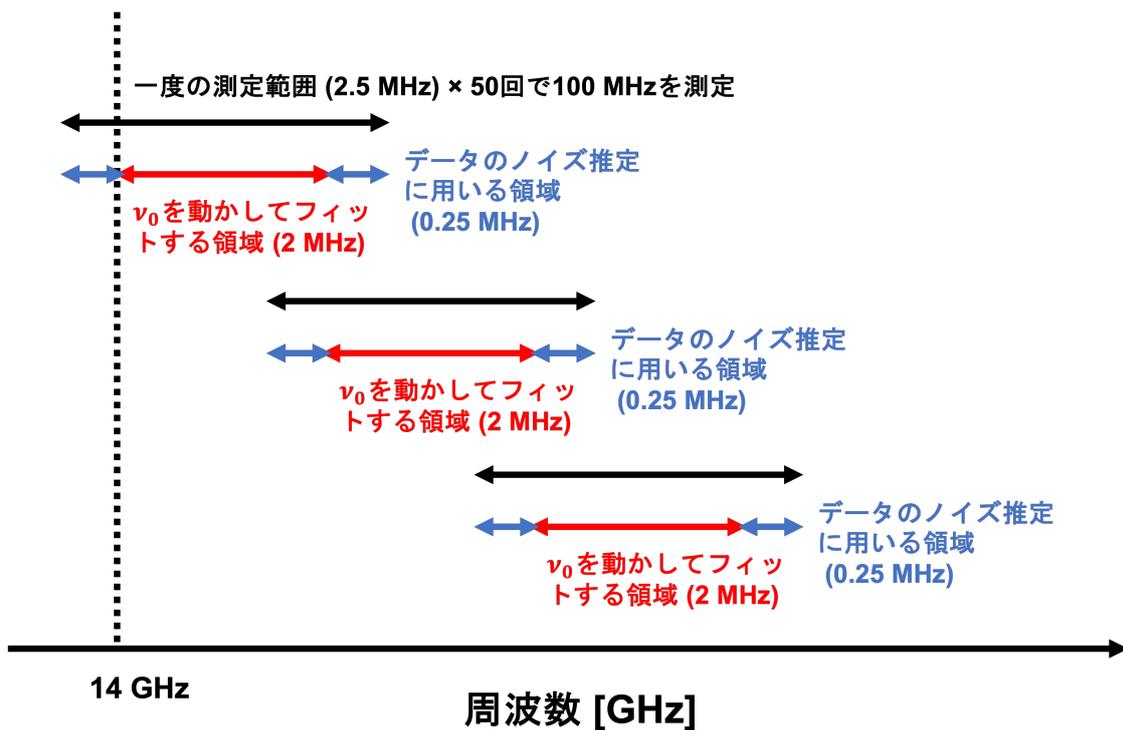


図 3.1: データ取得方法の概略図を示す. 一度に測定する範囲は 2.5 MHz とし, その両端 0.25 MHz ずつはデータの誤差の推定にのみ利用するため, 実質 2 MHz が解析に用いるためのデータとなる. この測定を 50 回繰り返すことで, 100 MHz の探索範囲全てを漏れなく含むことができる.

### 3.2.1 既知の温度での黒体輻射の測定

本実験における、ゲインキャリブレーションの測定手順の概要図を図 3.2 に示す。本実験では、 $T_{\text{amb}}$  の黒体輻射と 77 K(液体窒素の温度) の黒体輻射でのスペクトルアナライザの出力からキャリブレーションを行うことにした。具体的には、 $P_\nu(T_{\text{amb}})$  は、ホーンアンテナの直上に常温の電波吸収体(理想的な黒体放射源)を置いて測定し、 $P_\nu(77)$  は、液体窒素に浸された電波吸収体が入った発泡スチロールをホーンアンテナの上に置いて測定する。発泡スチロールと電波吸収体はアンテナの開口面積より十分に大きいものを使用した。

### 3.2.2 増幅率 $G$ と受信機雑音温度 $T_{\text{RX}}$ の算出方法

$G, T_{\text{RX}}$  の求め方の概要を図 3.3 に示す。数式的には、二つの温度の黒体輻射を測定したときのスペクトルアナライザの出力は、

$$P_\nu(T_{\text{amb}}) = Gk_B\Delta\nu(T_{\text{RX}} + T_{\text{amb}}) \quad (3.2)$$

$$P_\nu(77) = Gk_B\Delta\nu(T_{\text{RX}} + 77) \quad (3.3)$$

となる。出力の比  $Y$  は

$$Y = \frac{P_\nu(T_{\text{amb}})}{P_\nu(77)} = \frac{T_{\text{RX}} + T_{\text{amb}}}{T_{\text{RX}} + 77} \quad (3.4)$$

となる。したがって、受信機雑音温度  $T_{\text{RX}}$  は

$$T_{\text{RX}} = \frac{T_{\text{amb}} - 77Y}{Y - 1} \quad (3.5)$$

また、増幅率  $G$  は

$$G = \frac{1}{k_B\Delta\nu} \frac{P_\nu(T_{\text{amb}}) - P_\nu(77)}{T_{\text{amb}} - T_{77}} \quad (3.6)$$

となる。

これによって求めた 8~18 GHz の  $G$  と  $T_{\text{RX}}$  を、図 3.5, 図 3.6 に示す(本測定の際のキャリブレーションとは別個に測定した)。8~16 GHz の広い帯域で増幅率  $G$  が ~78 dB 以上、受信機雑音温度  $T_{\text{RX}}$  は ~300 K 以下であることがわかる。

## 3.3 DP-CDM 探索のための測定

今回はテストランとして 14.0 ~ 14.1 GHz の 100 MHz の範囲を 2022 年 12 月 26 日の 14 時から 16 時に測定した。スペクトルアナライザの RBW は 300 Hz として、前述の通り 2.5 MHz ずつ測定した。各周波数帯に対して、2 秒間の測定を 12 回繰り返し、計 24 秒の測定を行い、それを 50 回繰り返して 100 MHz をカバーした。

測定開始時と終了時の温度(ゲインキャリブレーションの  $T_{\text{amb}}$  になる)、金属板とホーンアンテナの開口部の平行度の確認(DP-CDM の転換光がホーンアンテナに入射するために必要)を行った。表 3.7 に本測定での値を示す。

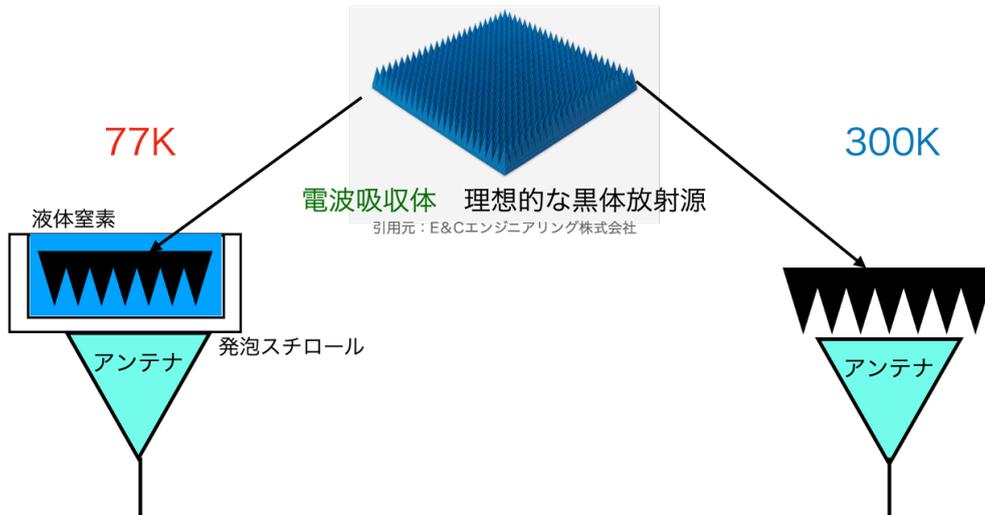


図 3.2: ゲインキャリブレーションの概要図. 電波吸収体を液体窒素で浸した 77 K および室温の 2 つの黒体放射を較正信号として用いる.

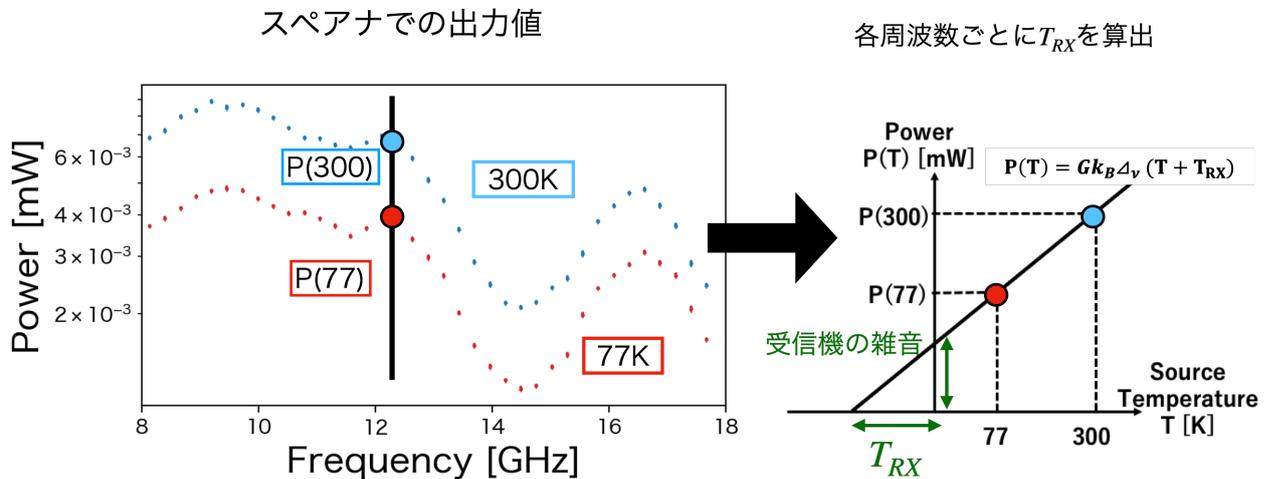


図 3.3: 検出器の増幅率  $G$  と受信機雑音温度  $T_{RX}$  のキャリブレーションは 2 種類の信号  $P_\nu(T_{amb})$  ( $T_{amb}$  の典型的な値は 300 K のため, この図中では  $P(300)$  としている), および  $P_\nu(77)$  を測定することで行う.

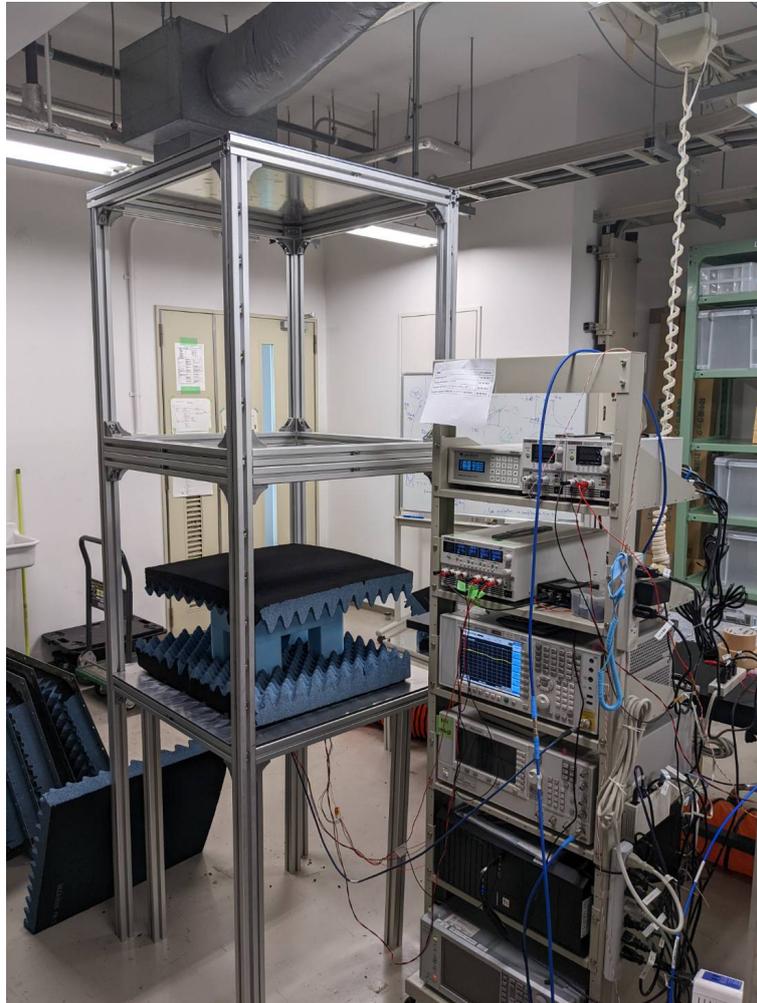


図 3.4: ゲインキャリブレーションを行う様子. これは 300 K の測定 (図 3.2 の右) であり, ホーンアンテナの直上にそれを覆うのに十分な大きさの電波吸収体 (理想的な黒体放射源) を置いている. 見やすさのため, 暗室を覆う金属板を取り外しているが, 実際は取り付け閉じている. また, ホーンアンテナを囲っている水色の発泡スチロール台は 77 K のゲインキャリブレーション測定時の, 液体窒素を浸した発泡スチロールを置くための台であり, ホーンアンテナの高さよりわずかに高くして設置している.

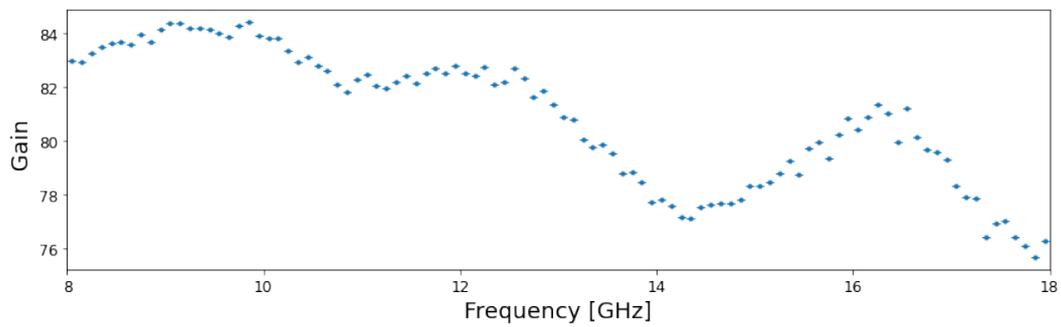


図 3.5: ゲインキャリブレーションで求めた, 本セットアップの増幅率  $G$  の典型的な値は約 80 dB である.

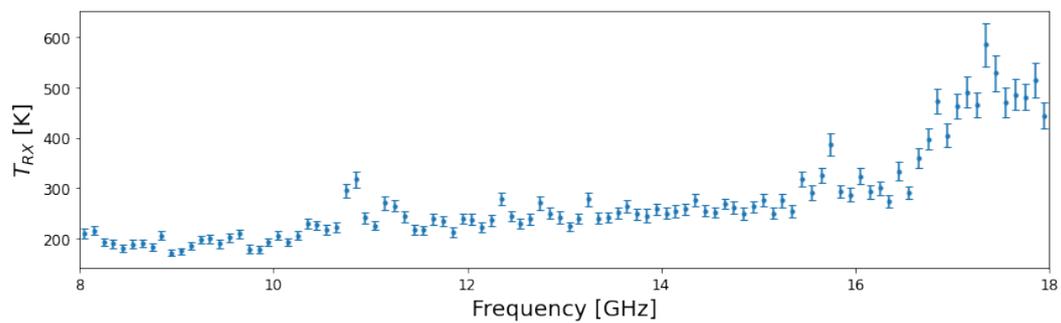


図 3.6: ゲインキャリブレーションで求めた, 本セットアップの受信機雑音温度  $T_{RX}$  の典型的な値は約 200 ~ 250 K である.

	時刻	電波吸収体の温度	金属板のアンテナ開口部 に対する傾き	
			縦方向	横方向
測定開始時	14:05	295.6 K	0.0°	0.1°
測定終了時	16:25	295.6 K	0.0°	0.1°

図 3.7: 測定時の環境. 温度はゲインキャリブレーション測定時の暗箱内に入れた電波吸収体の温度を図 3.8 に示す温度計で測定した. 勾配は, 暗室上部に設置した金属板に直交する 2 軸を設定し, 各方向の勾配を図 3.9 に示す水準器で測定した.

ゲインキャリブレーションを測定した結果を図 3.10 に示す. 周波数帯域 14 ~ 14.1 GHz において, 図上段よりゲインの値は約 80.8 ~ 81 dB で, 図中段より受信機雑音温度  $T_{RX}$  は 200 K 程度である. また,  $k \sim k + 0.002$  GHz の測定を行う前後のゲインキャリブレーション測定によるゲインの値を  $G_{\text{before}}$ ,  $G_{\text{after}}$  とするとき, 比率  $G_{\text{before}}/G_{\text{after}}$  を図下段に示す. ゲインの前後での違いは大きくても 1.4 % しかなく, 安定していたと言える.



図 3.8: シンワ測定株式会社製の, 品番 73014 の温度計を用いて常温時の電波吸収体の温度を測定した. 常温を  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  の精度で測定することができる.



図 3.9: シンワ測定株式会社製の, 品番 75321 の水準器を用いて金属板のアンテナ開口部に対する傾きを測定した.  $0^{\circ}, 90^{\circ}$  の時  $\pm 0.1^{\circ}$  の精度で測定することができる.

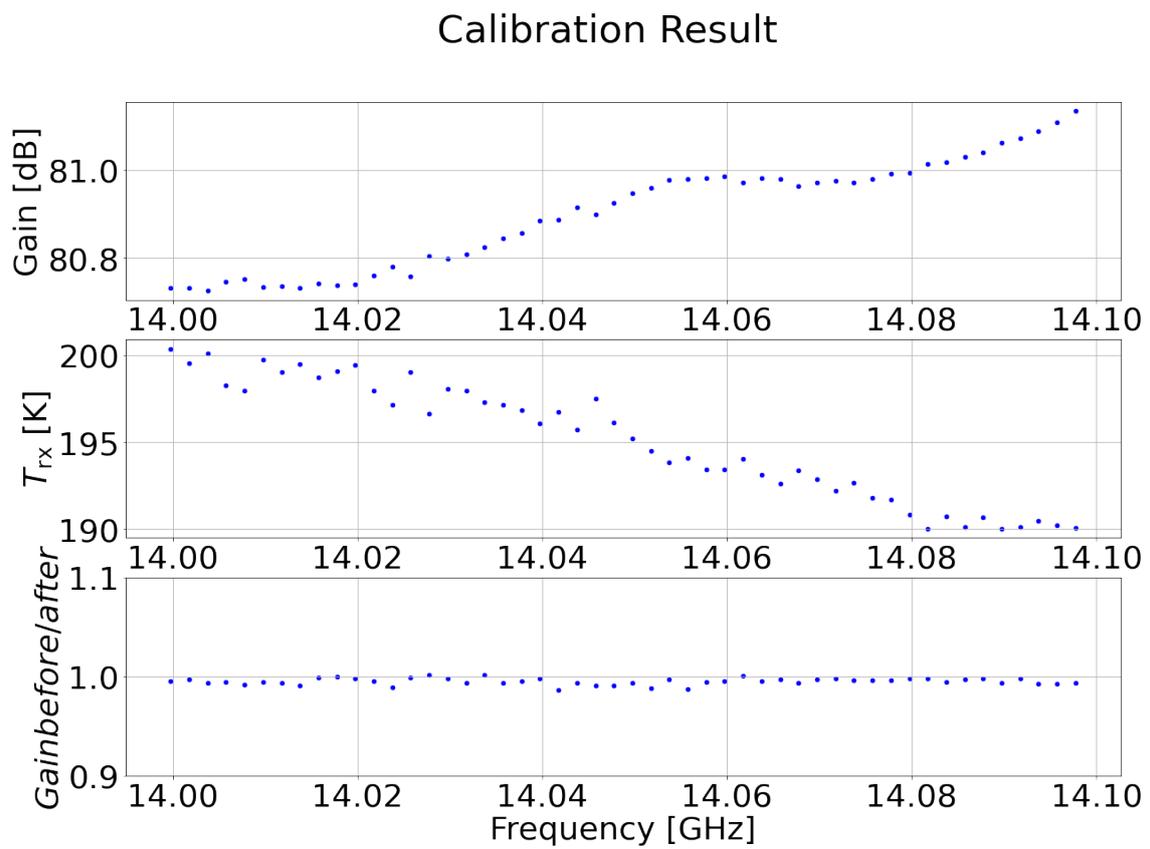


図 3.10: ゲインキャリブレーションの結果

# 第4章 ダークフォトン信号探索の解析手法

## 4.1 データの整形

測定は各周波数で12回行なっているため、12個の周波数スペクトルが存在する。実際には、平均をとって一個のスペクトルに合算する。そこからダークフォトンの信号ピークを探す(フィットをする)までのスペクトルの加工方法について説明する。

### 4.1.1 周波数ビン幅の変更(リビン)

スペクトルアナライザで分光した各周波数ごとの信号強度は、FFTの特性上、隣り合う周波数ビンとの相関がある。データ解析時にはその影響をなるべく減らすため、データ解析の前処理として隣り合う周波数ビンの合算(リビン)を行う。本実験では、RBW300 Hzでデータを取得しているものを2 kHzにした。

### 4.1.2 ゲインキャリブレーション

アンテナに入力したパワーは、スペクトルアナライザで測定されたパワー  $P_{raw}$  を用いて

$$P_{in} = \frac{P_{raw}}{G} - k_B T_{RX} \Delta\nu \quad (4.1)$$

と表される。ボルツマン定数  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} [\text{J/K}]$ 、周波数ビン幅  $\Delta\nu = 2\text{kHz}$  である。よって、ゲインキャリブレーションで得られた各周波数での  $G, T_{RX}$  を用いて  $P_{in}$  に変換した。

## 4.2 ダークフォトン信号のピークを探し出すスペクトルのフィット

ダークマターの速度分布から生じるピーク信号の周波数スペクトルでの形状について議論する。ダークマターの速度分布は Maxwell Boltzmann 分布に従い、

$$f(\mathbf{v}, \mathbf{v}_E) = \frac{1}{(\pi v_0)^{3/2}} \exp\left(-\frac{|\mathbf{v} + \mathbf{v}_E|^2}{v_0^2}\right) \quad (4.2)$$

である。ここで、 $v$ はダークマターの速度、 $v_E$ は銀河系に対する地球の速度で $v_E \sim 220\text{km/s}$ 、 $v_0$ はダークマターの速度分散を表し、 $v_0 \sim 220\text{km/s}$ である。DP-CDMの速度の累積分布は

$$F(v) = \int_0^v dv' \int^{4\pi} d\Omega f(\mathbf{v}') v'^2 \quad (4.3)$$

$$= \frac{v_0}{2\sqrt{\pi}v_0} \left\{ \exp\left[-\left(\frac{v+v_E}{v_0}\right)\right] - \exp\left[-\left(\frac{v-v_E}{v_0}\right)\right] \right\} \quad (4.4)$$

$$+ \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{v+v_E}{v_0}\right] + \operatorname{erf}\left[\frac{v-v_E}{v_0}\right] \right\}$$

となり、ここで

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4.5)$$

である。速度 $v_{\text{DP}}$ のDP-CDMの転換光の周波数は

$$\nu(v_{\text{DP}}, m_{\text{DP}}) = \frac{1}{h} \frac{m_{\text{DP}} c^2}{\sqrt{1 - (v_{\text{DP}}/c)^2}} \quad (4.6)$$

であるので、この式を用いて速度の累積分布 $F(v)$ を、 $F(\nu)$ に直すことができる。 $F(\nu)$ を用いて、ダークフォトン信号の形状 $f_{\text{DP}}$ は

$$f_{\text{DP}}(\nu; \nu_0) = F(\nu + 1.0\text{kHz}; \nu_0) - F(\nu - 1.0\text{kHz}; \nu_0) \quad (4.7)$$

と表せる。ビン幅が2kHzなので、 $\nu + 1.0\text{kHz}$ までの累積分布から $\nu - 1.0\text{kHz}$ までの累積分布を引くことで求めている。

周波数 $\nu_0$ の転換光を放射するDP-CDMの信号ピークを探すために、得られたスペクトル $P_{\text{in}}$ に対して、信号ピークの高さを $P_{\text{DP}}$ としてフィットを行った。フィットする時に使用する信号ピークとノイズの関数は

$$f(\nu; P_{\text{DP}}, \nu_0, a, b) = P_{\text{DP}} f_{\text{DP}}(\nu; \nu_0) + a(\nu - \nu_0) + b \quad (4.8)$$

で表せる。第1項はDP-CDMの信号を表し、 $f_{\text{DP}}(\nu; \nu_0)$ がMaxwell-Boltzmann分布から予言される信号ピークの形状である。第2,3項はノイズによるオフセットを直線で表す。このフィットでは $P_{\text{DP}}, a, b$ をフリーパラメータとした。また、ダークフォトンの質量も不明であるので、質量に対応する $\nu_0$ もわからないが、これは今回測定した14.0～14.1 GHzで2 kHz ( $\ll$  ダークフォトン信号ピーク幅 14 kHz) ずつずらして(1ビンごとにずらして)フィットをして、信号ピークを探し漏らさないようにした。よって、全周波数領域をカバーするフィットの合計回数は50000回になる。

このフィットで算出した周波数ごとの中心値と誤差の比 $S = P_{\text{DP}}/\Delta P_{\text{DP}}$ を図4.1に示す。この値が正に大きい場合は、信号ピークらしいスペクトルになっている可能性があるが、全体的に0を中心にランダムになっている。14.03 GHz付近に比較的大きい値のフィット結果があるが、これが信号らしいかは5.1章で見えていく。

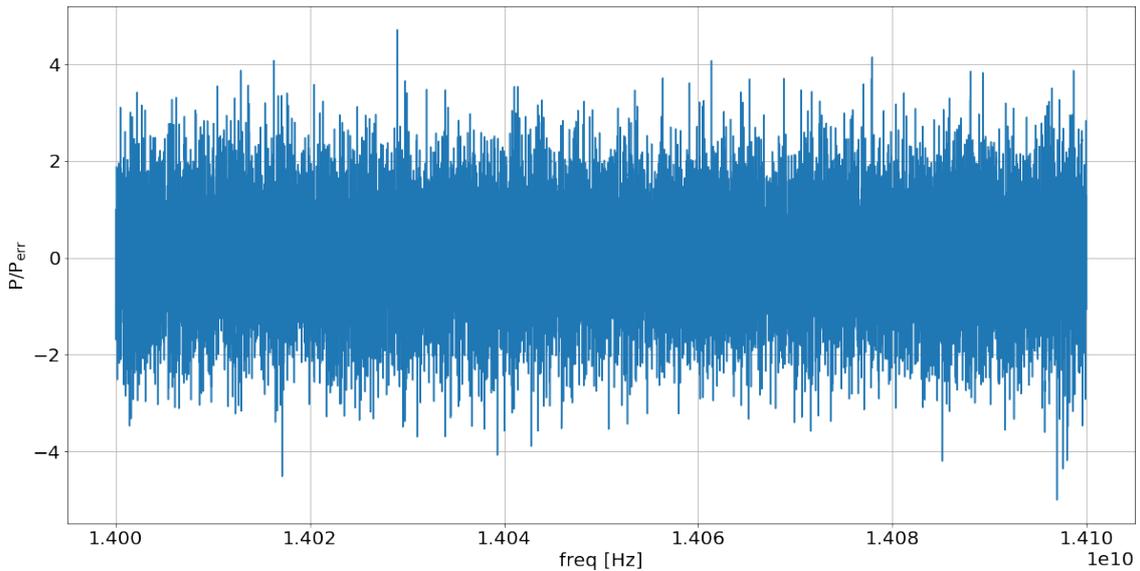


図 4.1: 14.0 ~ 14.1 GHz でのフィットの  $S = P_{\text{DP}}/\Delta P_{\text{DP}}$

### 4.3 ヌルサンプルの作成

4.4 節以降で述べる統計処理に用いるために、取得した実データスペクトル同士を引き算したヌルサンプルを作成した。差し引きによって、実データ中の DP-CDM 信号の成分は差し引かれ、ノイズのみが残るデータサンプルとなる。各周波数に対して 2 秒間のデータを 12 回取得しているので複数のヌルサンプルの作成が可能である。使用するヌルサンプルは、12 回のデータを 2 組に分け、各組の和の差をとった。引く順番を入れ替えただけのヌルサンプルはカウントしないので、各周波数帯域につき  ${}_{12}C_2/2 = 462$  種類のヌルサンプルを作成でき、ヌルサンプルのスペクトルに対して実データと同様のフィットを行うことで、信号がないスペクトルの時の  $S \equiv P_{\text{DP}}/\Delta P_{\text{DP}}$  が得られる。

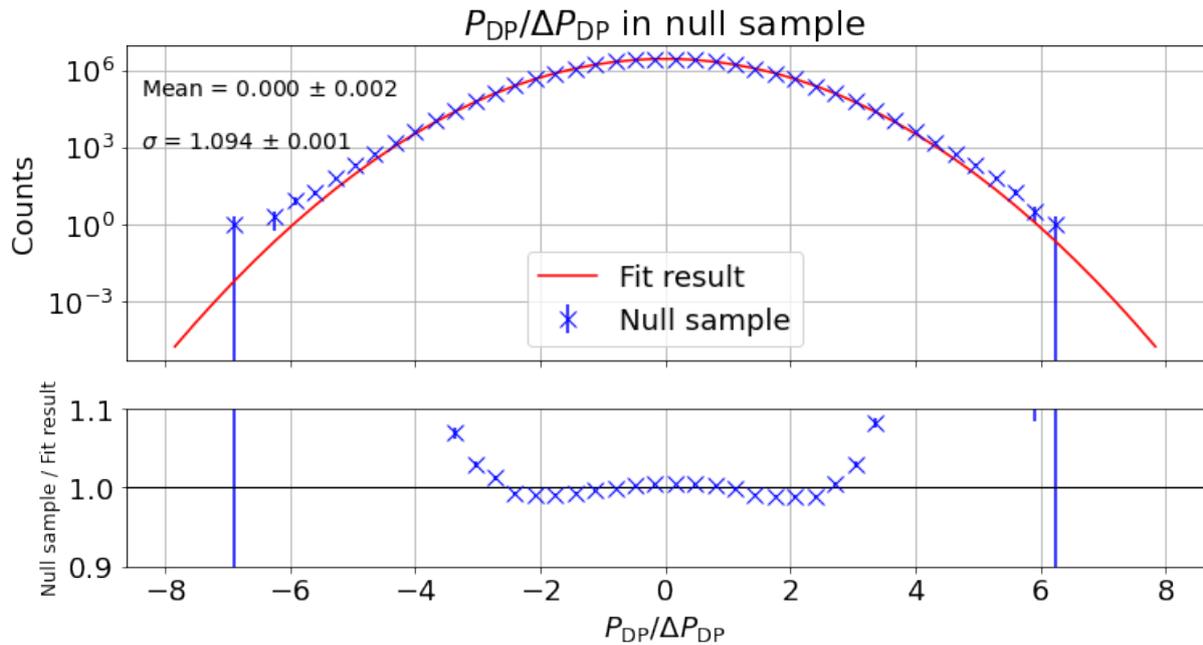
さらに、1 個のヌルサンプルに対して、異なる周波数ビンに対するフィットができるので、合計のヌルサンプルに対するフィット回数は

$$N_{\text{null}} = 462(\text{種類}) \times \frac{100\text{MHz}}{2\text{kHz}}(\text{フィット回数}) = 23,100,000 \text{ 個} \quad (4.9)$$

となる。この結果得られた  $S$  の値の分布は本実験での信号がない場合の  $S$  の分布  $\equiv F(S)$  と言えるので、信号がない仮定での有意確率  $p_{\text{local}}$  を求めるのに利用できる。図 4.2 はヌルサンプルから得られた  $S$  の分布を示す。ガウシアンでフィットした結果も示してある。ガウシアンから大きく形状は変わらないが、裾の大きな  $S$  に対する分布が微妙に異なる。

### 4.4 各フィット結果の $p$ 値 $p_{\text{local}}$ の推定

図 4.1 で得られた測定データのフィット結果  $S_{\text{fit}} \equiv P_{\text{DP}}/\Delta P_{\text{DP}}$  に対する、信号が無い仮定での各周波数でのフィット結果の有意確率  $p_{\text{local}}$  を推定する。

図 4.2: ヌルサンプルにおける  $P_{\text{DP}}/\Delta P_{\text{DP}}$  分布

ヌルサンプルから得られた  $S$  の分布  $F(S)$  から

$$p_{\text{local}} = \frac{\int_{S_{\text{fit}}}^{\infty} F(S) dS}{\int_{-\infty}^{\infty} F(S) dS} \quad (4.10)$$

と推定することができる.

## 4.5 探索全体の $p$ 値 $p_{\text{global}}$ の推定

測定データのフィットは 14 ~ 14.1 GHz 全体で計 50000 回もあるため, 統計的なふらつきにより, 信号でない場合にも  $p_{\text{local}}$  が小さい値をとりノイズでないように見えてしまうことがある. よって, 全  $N$  回のフィットで  $p_{\text{local}}$  より小さい値を 1 回でもとってしまう確率を大域的  $p$  値  $p_{\text{global}}$  として評価する. 仮に, 各フィットが独立であるとする

$$p_{\text{global}} = 1 - (1 - p_{\text{local-min}})^N \quad (4.11)$$

が成り立つ.

しかし, 実際は各フィットのピーク位置  $\nu_0$  は信号ピークの幅よりも小さくしかずらしていないので, 近くの  $\nu_0$  のフィット同士で相関等があり, 正しい  $p_{\text{global}}$  を求めるための指数は  $N$  よりも小さくなる. よって

$$p_{\text{global}} = 1 - (1 - p_{\text{local-min}})^{\mu N} \quad (4.12)$$

となるはずである ( $0 \leq \mu \leq 1$ ).

ヌルサンプルを用いて, この  $\mu$  を求めた. ヌルサンプルを 2 MHz 幅ずつに分け, 各 2 MHz 内でのフィット結果の  $p_{\text{local}}$  の最小値を  $p_{\text{local-min}}$  として, ヌルサンプルから  $p_{\text{local-min}}$  の算出を行った. フィットは  $\nu_0$  を 2 kHz ごとに移動させて行うため, 1 つのヌルサンプルは  $N_{\text{null}} = 1000$  回フィットされる ( $2 \text{ MHz}/2 \text{ kHz} = 1000$ ). したがって, 1000 個の  $p_{\text{local}}$  が得られる. ヌルサンプルから得られた  $p_{\text{local-min}}$  の分布  $F_{\text{min}}(p_{\text{local-min}})$  を用いて,  $N_{\text{null}} = 1000$  回のフィットにおける  $p_{\text{global}}$  を

$$p_{\text{global}}(p_{\text{local-min}}, N_{\text{null}} = 1000) = \frac{\int_0^{P_{\text{min}}} F_{\text{min}}(p_{\text{local-min}}) dp}{\int_0^1 F_{\text{min}}(p_{\text{local-min}}) dp} \quad (4.13)$$

とした. その分布が図 4.3 の青いデータ点である. これに対して, 式 (4.12) でフィットを行い,  $\mu$  を求めた. 結果,  $\mu$  は  $0.508 \pm 0.006$  となった. この  $\mu$  を用いて任意の  $N$  に対して式 (4.12) で  $p_{\text{local-min}}$  から  $p_{\text{global}}$  を求めることができる.

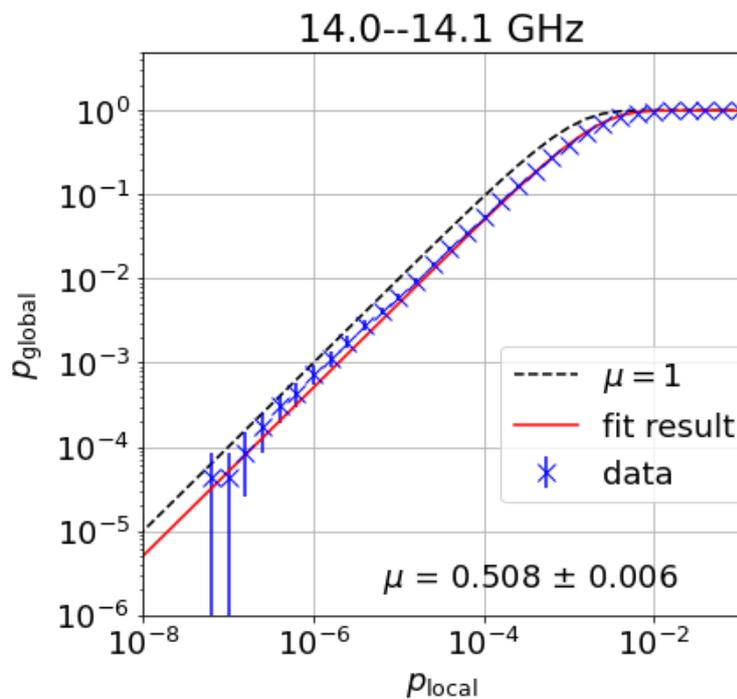


図 4.3:  $p_{\text{local-min}}$  の累積分布を式 (4.12) でフィットした結果を示す

# 第5章 結果

## 5.1 探索結果

測定データをフィットして得られた転換光の強度  $P_{\text{DP}}$  および,  $p_{\text{local}}$  の結果を図 5.1 に示す.  $p_{\text{local}}$  の最小値は  $1.7 \times 10^{-5}$  であった. この中の任意のビンが  $p_{\text{local}} = 1.7 \times 10^{-5}$  を下回る確率  $p_{\text{global}}$  は

$$p_{\text{global}} = 1 - (1 - p_{\text{local-min}})^{\mu N} \quad (5.1)$$

$$= 1 - (1 - 1.7 \times 10^{-5})^{0.51 \times 50000} \quad (5.2)$$

$$= 0.3518 \quad (5.3)$$

となり, 十分大きな  $p_{\text{global}}$  が得られたため, 有意な信号があるとは言えなかった.

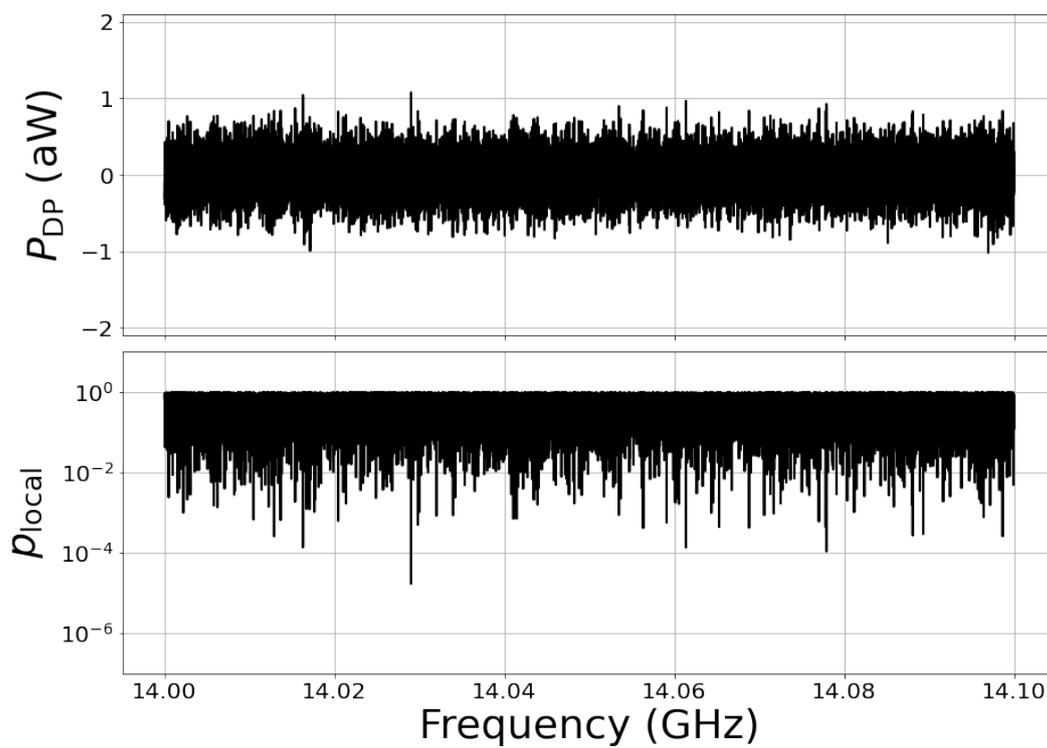
念の為,  $p_{\text{local}}$  が小さい  $p_{\text{local}} < 5 \times 10^{-4}$  となった箇所 12 点のフィットの様子を図 5.2 ~ 図 5.4 に示す. データ点の誤差は図 3.1 で示した通り, 解析領域の左右 0.25 MHz 幅の周波数領域での標準偏差から算出している. どれもノイズによるふらつきの大きさ程度のピークでしかなく, 有意に信号らしいとは言えないものだった.

## 5.2 結合定数 $\chi$ の上限

残念ながら有意な信号ピークは得られなかったため, 今回の探索から得られるダークフォトンの結合定数  $\chi$  に対する上限値を算出する. ダークフォトンの結合定数  $\chi$  は

$$\chi = 1.248 \times 10^{-10} \left( \frac{P_{\text{DP}}}{10^{-19} \text{ W}} \frac{10^{-3} \text{ m}^2}{A_{\text{eff}}} \frac{0.39 \text{ GeV/cm}^3}{\rho} \right)^{1/2} \frac{\sqrt{2/3}}{\alpha} \quad (5.4)$$

で表される. 本実験においては, 有効開口面積  $A_{\text{eff}} = 91.9^2 \text{ mm}^2$ , 銀河ハロー内のダークマター密度  $\rho = 0.39 \text{ GeV/cm}^3$ ,  $\alpha = \sqrt{2/3}$  である.  $P_{\text{DP}}$  の上限値を  $P_{\text{DP}}$  と  $\Delta P_{\text{DP}}$  から計算して (図 5.5), それを式 (5.4) を用いて,  $\chi$  に対する信頼度 95% での上限値に焼き直した. その結果を図 5.6 に示す.

図 5.1:  $P_{DP}$  と  $p_{local}$

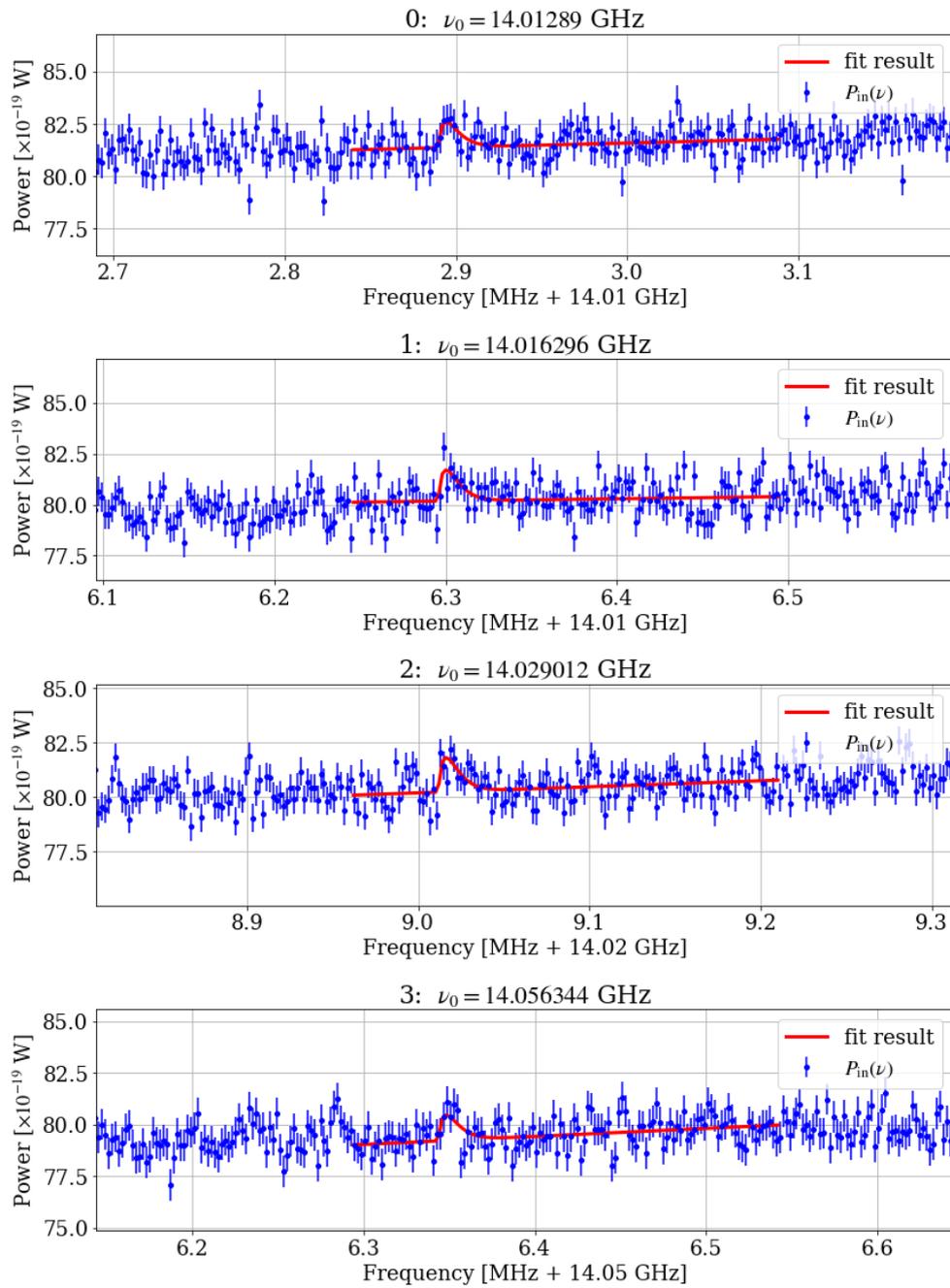


図 5.2:  $p_{\text{local}} < 5 \times 10^{-4}$  となった箇所 12 点のうち, 1 番目から 4 番目のスペクトルとフィット結果を示す.

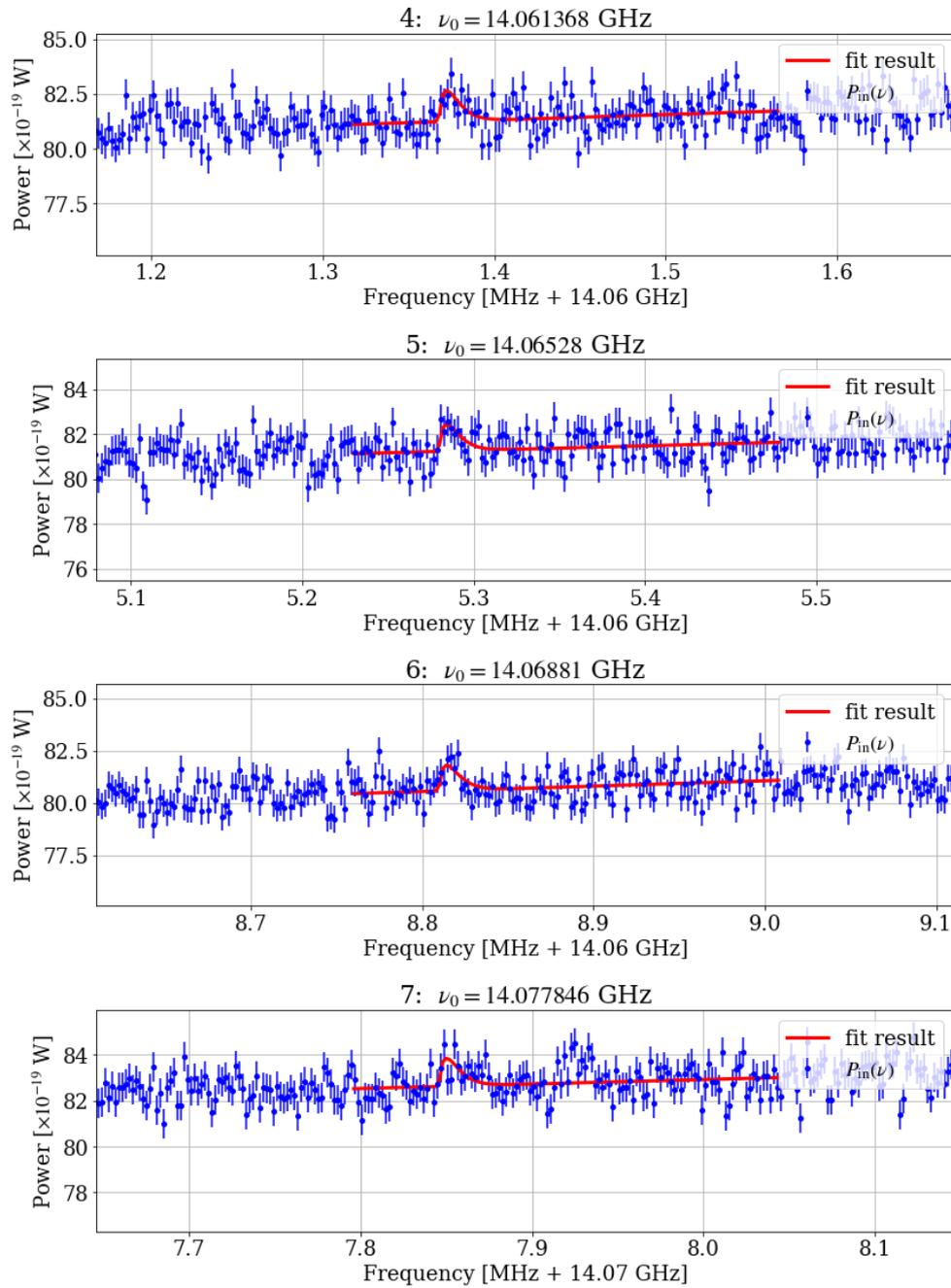


図 5.3:  $p_{\text{local}} < 5 \times 10^{-4}$  となった箇所 12 点のうち, 5 番目から 8 番目のスペクトルとフィット結果を示す.

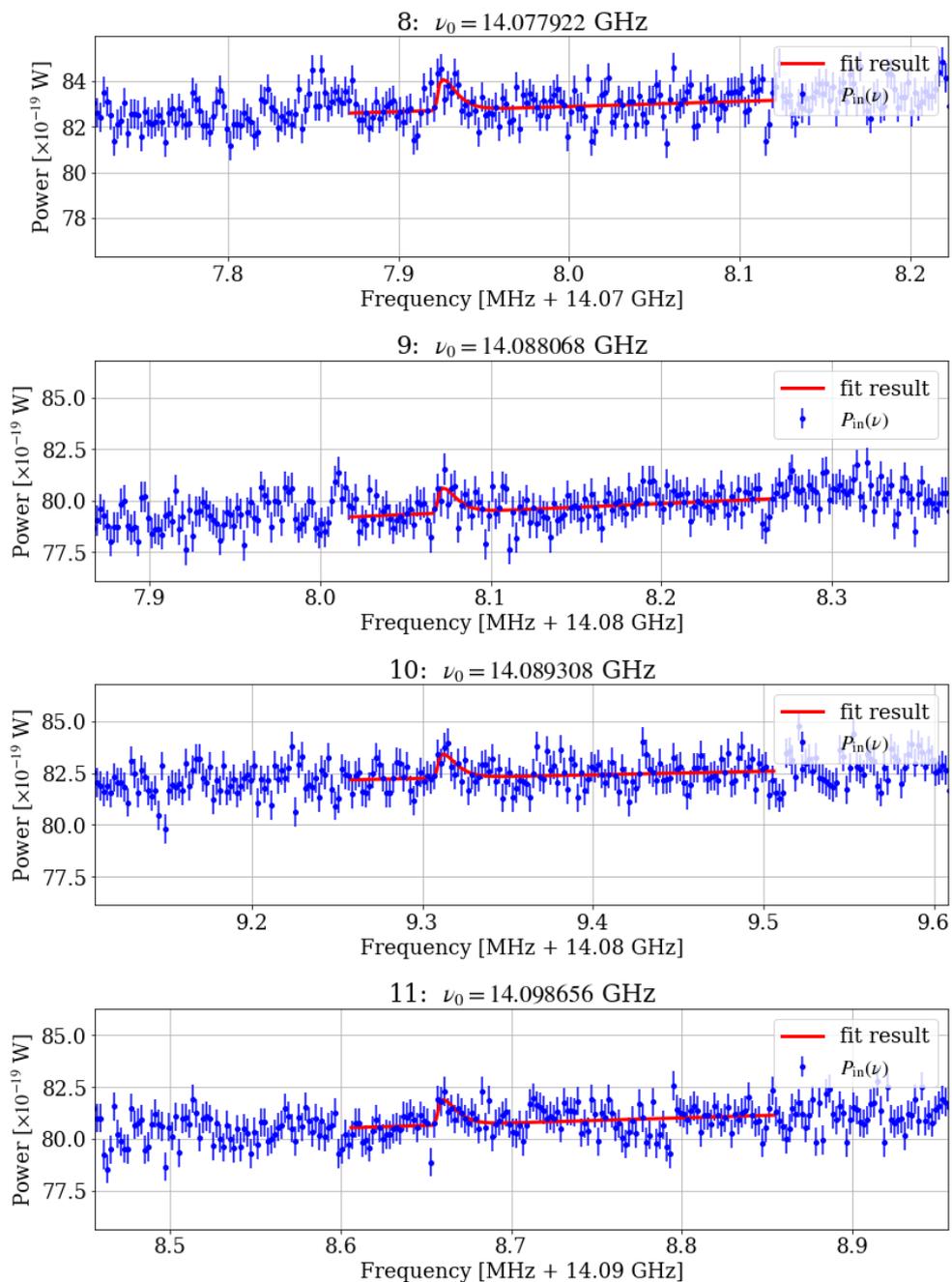


図 5.4:  $p_{\text{local}} < 5 \times 10^{-4}$  となった箇所 12 点のうち, 9 番目から 12 番目のスペクトルとフィット結果を示す.

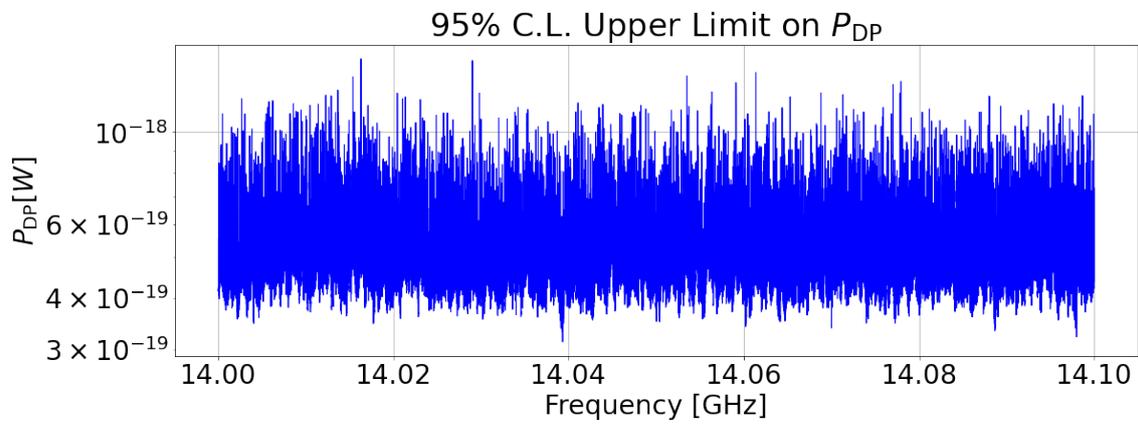


図 5.5:  $P_{DP}$  に対する 95% の信頼度での上限値を示す.

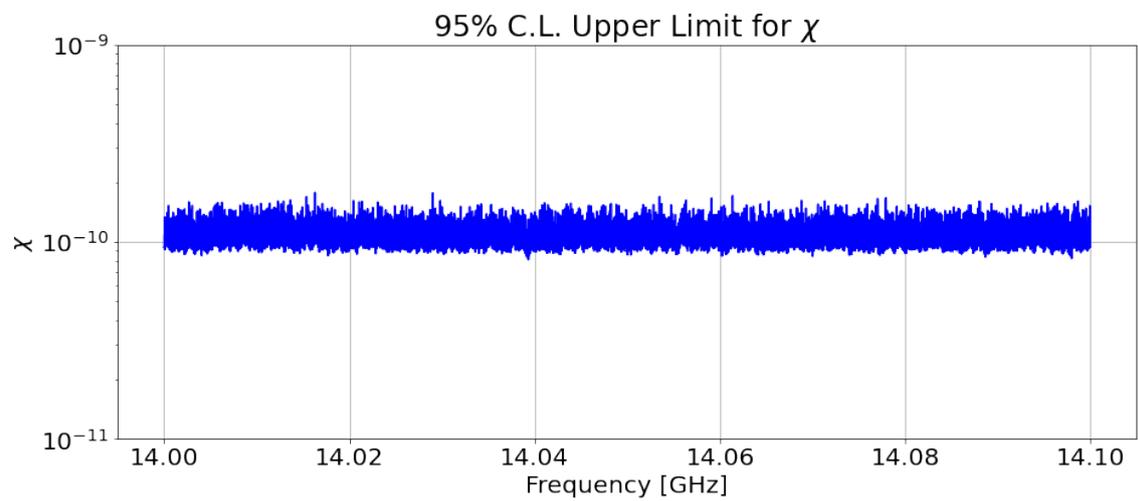


図 5.6: ダークフォトンの結合定数  $\chi$  に対する 95% の信頼度での上限値を示す.

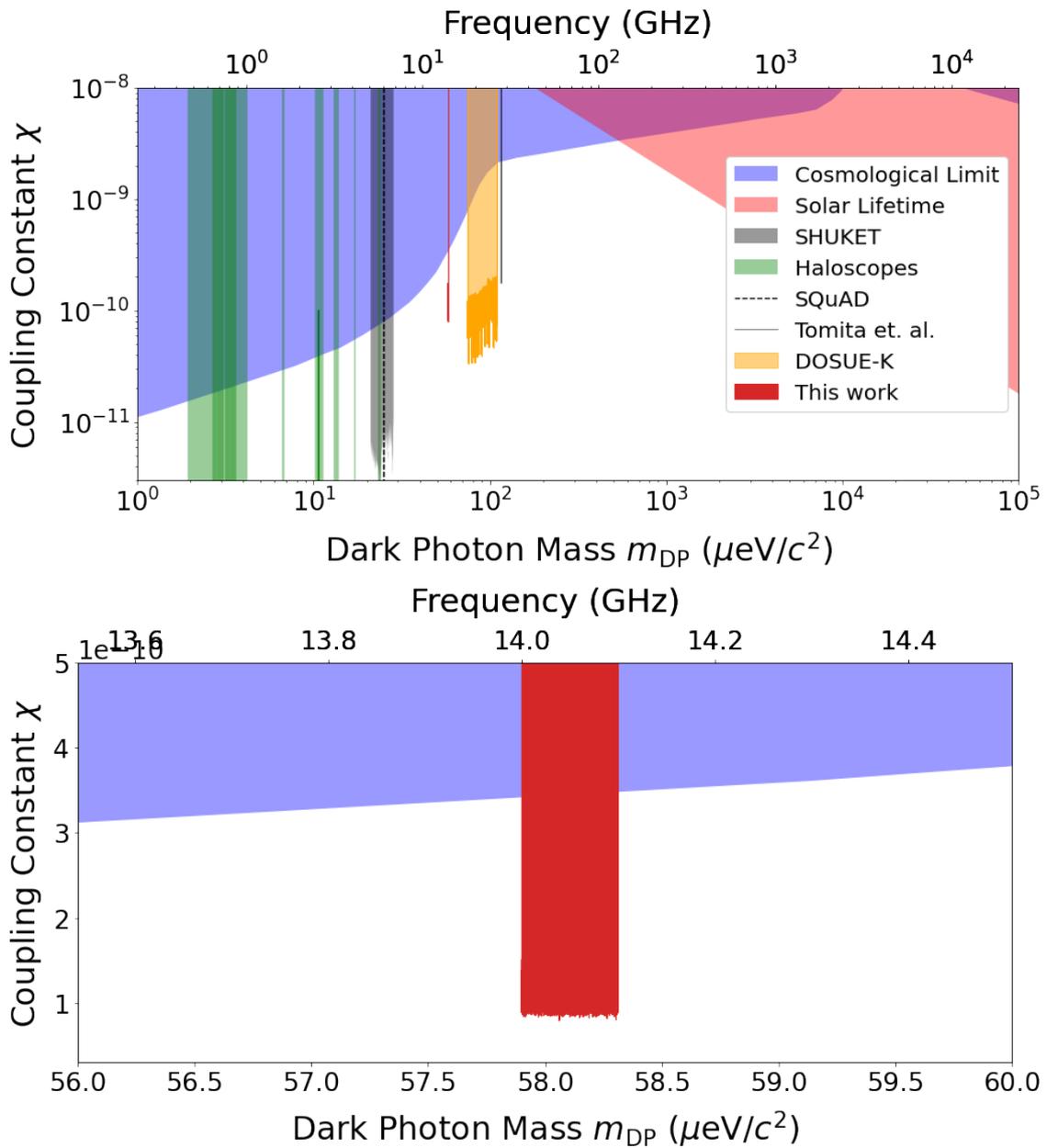


図 5.7: 本研究で得られたダークフォトンの質量  $m_{\text{DP}}$  に対するダークフォトンの結合定数  $\chi$  の 95% の信頼度での上限 (いずれも赤色) を, 現在の探索状況とともに示す. 上図は質量領域  $10^0 \sim 10^5 \mu\text{eV}/c^2$  における探索状況, 下図は  $56.0 \sim 60.0 \mu\text{eV}/c^2$  を拡大したものである. この制限は宇宙観測からの制約を超える水準であり, これまでで最も厳しい制限値である.

## 第6章 まとめ

本研究では、まず 10 GHz 帯に存在する人工的なミリ波のノイズを取り除いた環境を実現するため、暗箱を作製し、受信機全体を覆うようなセットアップを開発した。本装置を用いて、2022 年 12 月 26 日に、14.0 ~ 14.1 GHz 帯 (質量に変換して  $57.9 \sim 58.3 \mu\text{eV}/c^2$ ) において、ダークフォトン CDM を探索した。発見には至らなかったが、図 5.6 に示すように、結合定数  $\chi < 0.8 \sim 1.8 \times 10^{-10}$  の上限を信頼度 95 % で設定した。この制限は宇宙観測からの制約を超える水準であり、これまでで最も厳しい制限値である。

本セットアップは 8 ~ 18 GHz を探索できる仕様であり、この度の測定結果により、この周波数帯で、まだ DP-CDM の存在が否定されていない領域にアプローチできることがわかった。今後本装置を用いて測定範囲を広げた探索を続けていく予定である。

# 謝辞

本論文を作成するにあたり、ご協力いただいた全ての方、特に CMB グループの先生方、先輩方に感謝申し上げます。

安達さんは京大に戻ってこられて以降、ほぼ付きっきりで実験の相談に乗っていただきました。安達さんの手厚いサポートなしでは私は恥ずかしながら何も出来なかったと思います。本当にありがとうございました。

田島さんからはミーティングをはじめ様々な場で優しい助言をいただき、本論文の執筆までたどり着くことが出来ました。劣等生でご迷惑ばかりおかけしてしまい、申し訳ございませんでした。

鈴木さんは修士一回生で隣席だったことから、私が一番身近に「わからない」と言える方でした。ホワイトボードで毎日のように疑問点を解消して頂けたことはとても印象に残っています。

隅田さんは廊下等でお会いするたびに実験の進捗等を気にかけてくださり、とても嬉しかったです。

清野さんは短い間でしたが物腰柔らかく接していただき、気が滅入った時も救われました。マラソンのマの字もお話できなかったことを後悔しています。

末野さんは球面鏡を用いた装置開発以降、よくお話させていただきました。ご自身のアイデアで、1つの実験を生み出すお姿が自分の理想で眩しく感じました。

小高さんからは先行研究の先輩として技術的なことをご教授いただきました。小高さんが築いてくださったノウハウを必死に追いかけてきましたが、遠く及びませんでした。

中田さんは最も気さくにお話して下さった先輩です。積極性が乏しい私達の学年に対して、常日頃からお声がけいただき、修論執筆時の差し入れまでいただきありがとうございました。

武市君、私を CMB グループに誘ってくれてありがとう。研究内容をフラットに話し合える良い関係を築けてよかったです。

夏以降の半年は私の良くない部分が出てしまい、悔やんでも悔やみきれないかつ、皆様にはご迷惑ばかりおかけしてしまい申し訳ない思いでいっぱいです。思い返せば頭が上がりませんが、この場を借りて心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] P. A. R. Ade et al., “Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters,” [arXiv:1303.5076].
- [2] P. Arias et al., “WISPy cold dark matter,” JCAP 1206 (2012) 013, [arXiv:1201.5902].
- [3] Peter W. Graham, Jeremy Mardon, Surjeet Rajendran, “Vector Dark Matter from Inflationary Fluctuations,” (2016), [arXiv:1504.02102].
- [4] J. Jaeckel and S. Knirck, “Directional resolution of dish antenna experiments to search for WISPy dark matter,” JCAP 01 (2016) 005.
- [5] N. Tomita et al., “Search for hidden-photon cold dark matter using a K-band cryogenic receiver,” JCAP09(2020)012, arXiv:2006.02828 [hep-ex].
- [6] 小高駿平 (2022).  $74 - 110 \mu\text{eV}/c^2$  質量領域におけるダークマターとしてのダークフォトンの探索研究, 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻修士論文.
- [7] 中井直正・坪井昌人・福井康雄 (2009) 『現代の天文学 16 宇宙の観測 2 電波天文学』日本評論社.
- [8] Dieter Horns<sup>1</sup>, Joerg Jaeckel<sup>2,3</sup>, Axel Lindner<sup>4</sup>, Andrei Lobanov<sup>5</sup>, Javier Redondo<sup>6,7</sup> and Andreas Ringwald<sup>4</sup>, “Searching for WISPy cold dark matter with a dish antenna,” JCAP 04 (2013) 016.