

修士論文

CMB 望遠鏡のためのワイヤーを用いたアンテナ角度較正装置の  
開発研究

京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻  
物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室

阿部 倫史

2020年1月29日



## 概要

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光パターン観測は、原始重力波の検出によるインフレーション理論の検証、重力レンズ効果の測定を介したによるニュートリノ質量和の測定など、様々な新物理を探る強力なプローブであり、現在、多くのプロジェクトが高性能な望遠鏡を用いた CMB 偏光観測に乗り出している。新物理に最も感度を有するのが、空間反対称な偏光パターンの B モードの測定である。これは空間対称なパターンである E モードや無偏光信号のゆらぎに比べて非常に弱い信号である。そのため、B モードでない信号を B モードと見誤るクロストークを最大限取り除く必要がある。とくに大口径の CMB 望遠鏡は、B モード観測のための二つの課題を抱えている。一つは検出器の偏光角度の較正である。この較正の精度が不十分であると E モードを B モードと見誤るクロストークを生じる。とくに較正精度  $\Delta\theta < 0.1^\circ$  を満たさないと、結果として重力レンズ効果起源の小スケールの B モードの系統誤差が増大し、ニュートリノ質量和の測定を困難にする。もう一つは望遠鏡を構成する反射鏡が作る偽偏光である。無偏光である大気揺らぎや CMB 温度揺らぎに由来する偽偏光のゆらぎは、B モードの強度に大きな系統誤差を生む。本研究では、ワイヤーグリッドを偏光源として用いた較正装置を考案・開発した。この装置は、ワイヤーの設置角度を可変とすることで反射鏡で作られる偽偏光と空からの偏光信号を分離し、アンテナ角度を高い精度で較正する。まず、モンテカルロシミュレーションによって較正信号の強度と較正精度の関係を調べ、 $\Delta\theta < 0.1^\circ$  をみたすために必要なワイヤーの偏光信号の強度  $> 100\text{mK}$  を算出した。実際には、ワイヤーが作る偏光の強度は実験によって決定すべき未知パラメータである。それを調べるため、Simons Array 望遠鏡のための較正装置を製作した。ただし Simons Array は、偏光変調機である半波長板が実装される前段階にあった。そこで半波長板がなくとも行える性能試験として、望遠鏡の眼前でワイヤーを手動で回転させることで偏光源としての機能を検証する試験をチリ・アタカマ高地の観測サイトにて行った。結果、製作したワイヤーグリッドは最大 1K 以上の強度の偏光を発生し、1 分程度の短時間の観測で偏光角度の較正を行うには、ワイヤー本数 3 本以上のワイヤーグリッドで要求する性能をみたすことを確認した。

# 目次

<b>第 1 章 宇宙論と CMB</b>	<b>1</b>
1.1 $\Lambda$ -CDM モデル	1
1.2 CMB	2
1.2.1 宇宙の晴れ上がり	2
1.2.2 温度揺らぎ	2
1.2.3 トムソン散乱	3
1.2.4 ストークスパラメータ	4
1.2.5 EモードとBモード	5
1.2.6 温度揺らぎが作る偏光パターン	7
1.3 $\Lambda$ -CDM モデルの問題	8
1.4 インフレーション理論	9
1.4.1 インフレーションによる揺らぎ	10
1.4.2 テンソルゆらぎ	10
1.4.3 スカラーゆらぎ	11
1.5 CMB 偏光観測の意義	11
1.5.1 原始重力波由来 B モード	11
1.5.2 重力レンズ効果由来 B モード	13
<b>第 2 章 大口径 CMB 望遠鏡の抱える課題</b>	<b>15</b>
2.1 望遠鏡の基本的構造	15
2.1.1 Huan Tran Telescope	15
2.1.2 受信機 PB2a	17
2.1.3 焦点面検出器	17
2.1.4 TES の動作原理と読み出し	19
2.1.5 望遠鏡および受信機 PB2a の性能まとめ	20
2.2 半波長板による偏光変調	21
2.2.1 半波長板の基本的性質	21
2.2.2 偏光変調機の原理と役割	22
2.2.3 半波長板を回転させる機構	23
2.2.4 PB2b,c の半波長板	23

2.3	望遠鏡の抱える課題	25
2.3.1	受信機のアンテナ角度較正	25
2.3.2	反射鏡が作る偽偏光	27
<b>第3章</b>	<b>ワイヤーグリッドによる角度較正の原理と課題</b>	<b>29</b>
3.1	偏光発生の原理	29
3.2	データ取得・解析のシミュレーション	30
3.2.1	時系列データ	30
3.2.2	偏光情報の取り出し	32
3.2.3	偽偏光の測定・角度の較正	36
3.2.4	較正の精度	39
3.3	課題	41
<b>第4章</b>	<b>望遠鏡 POLARBEAR2a のための較正装置の製作</b>	<b>42</b>
4.1	PB2a における較正装置の設置位置	42
4.2	較正装置デザイン	43
4.2.1	要求される性能	43
4.2.2	デザイン	43
4.2.3	角度計	44
4.3	製作	45
4.3.1	フレーム	45
4.3.2	ワイヤー張り	46
4.3.3	完成品	49
<b>第5章</b>	<b>PB2a を利用した較正の原理検証</b>	<b>52</b>
5.1	データ取得	52
5.1.1	検証の概要	52
5.1.2	検証の方法	52
5.2	想定される信号	55
5.3	解析	56
<b>第6章</b>	<b>まとめ</b>	<b>58</b>
	謝辞	59
	参考文献	60
<b>付録 A</b>	<b>Simons Observatory 望遠鏡の半波長板システムの製作</b>	<b>62</b>

# 目 次

1.1	CMB の温度揺らぎ	3
1.2	トムソン散乱による CMB 偏光の生成	4
1.3	単一波数の E モードと B モード	6
1.4	E モードと B モード	7
1.5	温度揺らぎが作る偏光パターン	8
1.6	ゆらぎによる偏光パターン	12
1.7	CMB 異方性の角度パワースペクトル	14
2.1	反射鏡の模式図	16
2.2	Huan Tran Telescope	16
2.3	PB2a 受信機	17
2.4	前景放射	18
2.5	焦点面検出器	19
2.6	TES のバイアス電圧	20
2.7	半波長板の基本原理	22
2.8	PB2a 半波長板	23
2.9	超伝導軸受による半波長板回転	24
2.10	角度のずれによる偏光モードの混合	26
2.11	CMB 揺らぎのスペクトルと角度のずれ	27
3.1	ワイヤーによる光の散乱	30
3.2	ワイヤーグリッドから得られる時系列データのシミュレーション	32
3.3	シミュレーションの時系列データと偏光情報 (1)	34
3.4	シミュレーションの時系列データと偏光情報 (2)	35
3.5	シミュレーションの時系列データと偏光情報 (3)	36
3.6	偏光データのミラー, ワイヤーの分離	37
3.7	ワイヤー角度を変えた時の複素数のプロット	38
3.8	偽偏光の決定精度	39
3.9	アンテナ角度測定値の分布	40
3.10	アンテナ角度測定値の標準偏差	41

4.1	ワイヤーグリッドの位置	42
4.2	望遠鏡への取り付け方	43
4.3	ワイヤーグリッドのデザイン	44
4.4	較正装置に用いた角度計	45
4.5	ワイヤー張りの模式図	47
4.6	ワイヤー接着部	48
4.7	ワイヤー張りの様子	49
4.8	ワイヤーリング	50
4.9	治具	51
5.1	ワイヤーグリッド試験の模式図	53
5.2	ワイヤーの手動回転	54
5.3	イベントディスプレイで見たワイヤーグリッド	55
5.4	想定される信号	56
5.5	ワイヤーグリッド試験の時系列データ	57
A.1	gripper の構造	62
A.2	gripper の断熱接続部品	63

# 第1章 宇宙論とCMB

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) は観測宇宙論における極めて強力なプローブである。この章では、はじめに宇宙論の標準モデルである  $\Lambda$ -CDM モデルの概観を述べ、それから CMB の生成や偏光について述べる。続いて初期宇宙の進化モデルであるインフレーション理論を紹介し、その後、CMB 偏光観測によって期待される物理結果についてまとめる。

## 1.1 $\Lambda$ -CDM モデル

$\Lambda$ -CDM モデル ( $\Lambda$  は宇宙定数, CDM は Cold Dark Matter を意味する) は、一様かつ等方的に膨張している宇宙のモデルである。空間上の任意の2点間の距離は時間に依存しない共動座標  $\boldsymbol{x}$  と、座標に依存しないスケール因子と呼ばれる量  $a$  によって記述される。

$$r(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2, t) = a(t)|\boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{x}_2| \quad (1.1)$$

この宇宙の膨張、すなわちスケール因子  $a$  の時間発展を記述するのが (1.2) で、これをフリードマン方程式という。

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \sum_{\alpha} \rho_{\alpha}(a) + \frac{\Lambda}{3} - \frac{K}{a^2} \quad (1.2)$$

ここで  $G$  は万有引力定数,  $\rho_{\alpha}$  はエネルギー要素  $\alpha$  ごとのエネルギー密度,  $\Lambda$  は宇宙定数,  $K$  は空間の曲率をあらわす。各エネルギー要素は輻射と物質の2つに大別でき、そのエネルギー密度  $\rho_R, \rho_M$  はそれぞれ  $a^{-4}, a^{-3}$  に比例することから、フリードマン方程式はハッブルパラメータ  $H = \dot{a}/a$  を使って次のように書き換えることができる。

$$H^2 = H_0^2 \left[ \frac{\Omega_R}{a^4} + \frac{\Omega_M}{a^3} + \frac{\Omega_K}{a^2} + \Omega_{\Lambda} \right] \quad (1.3)$$

ただしここで、 $\Omega_{\alpha}$  は密度パラメータと呼び、現在のエネルギー密度から与えられる無次元量である。

$$\Omega_R \equiv \frac{8\pi G \rho_R(a=1)}{3H_0^2}, \quad \Omega_M \equiv \frac{8\pi G \rho_M(a=1)}{3H_0^2}, \quad \Omega_K \equiv \frac{K}{H_0^2}, \quad \Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2} \quad (1.4)$$

ハッブル定数  $H_0$  や密度パラメータは観測によって決定する量であり、観測値を入力することで宇宙の時間発展を計算することが可能になる。K は極めて小さいことがわかっており、 $\Omega_R + \Omega_M + \Omega_{\Lambda} = 1$  である。つまり宇宙定数を未知のエネルギー要素 (これをダークエネルギーという。) と考えれば、密度パラメータは全宇宙のエネルギー中を占める割合をあらわす。現在の観測結果では  $\Omega_M \sim 0.3, \Omega_{\Lambda} \sim 0.7$  で

あり。  $\Omega_M$  のうち 0.05 程度がバリオンであり、0.25 程度がダークマターである。

## 1.2 CMB

CMB は全天から観測されるマイクロ波であり、現在観測される CMB は約 2.73K の黒体放射スペクトルを持つ。これは宇宙が高温高密度であった頃の熱放射が波長を引き伸ばされて冷えたものであり、膨張宇宙モデルの決定的証拠となった。CMB の生成過程とその揺らぎ、偏光について述べる。

### 1.2.1 宇宙の晴れ上がり

宇宙が高温高密度であるとき、宇宙のエネルギーは輻射が支配的である。このとき全ての粒子は輻射としてふるまい、全ての粒子は互いに熱平衡にあった。特に光子は、宇宙を飛び交う多数の自由電子によって絶えず散乱されていた。宇宙が膨張するにつれて温度は下がっていき、質量の大きい粒子から熱平衡を外れていく。温度が 4000K まで下がると、自由電子が近傍の陽子に捕獲され始め、荷電粒子の密度が急激に減少していく。温度が 3000K になる頃には、自由電子の多くは水素原子を形成しており、光子は電子による散乱を受けず、直進するようになる。この時代を「宇宙の晴れ上がり」と呼び、ここで直進を始めた光が長い年月をかけて地球まで届いているものこそが CMB である。CMB が最後に散乱された点は観測点を中心とする球面上にあり、この球面を「最終散乱面」と呼ぶ。

### 1.2.2 温度揺らぎ

CMB の温度は基本的に等方的だが、ごくわずかな異方性を含む。(図 1.1)CMB の最大の異方性は、平均値の  $10^{-3}$  倍程度の双極成分で、これは地球が CMB に対して動いていることに起因する。この効果を除いても存在する  $10^{-5}$  倍程度の異方性は、最終散乱面における密度の揺らぎと、観測者に届くまでの重力ポテンシャルに起因する揺らぎによるものである。この密度揺らぎの精密観測は、宇宙論パラメータの決定に非常に重要な役割を果たした。



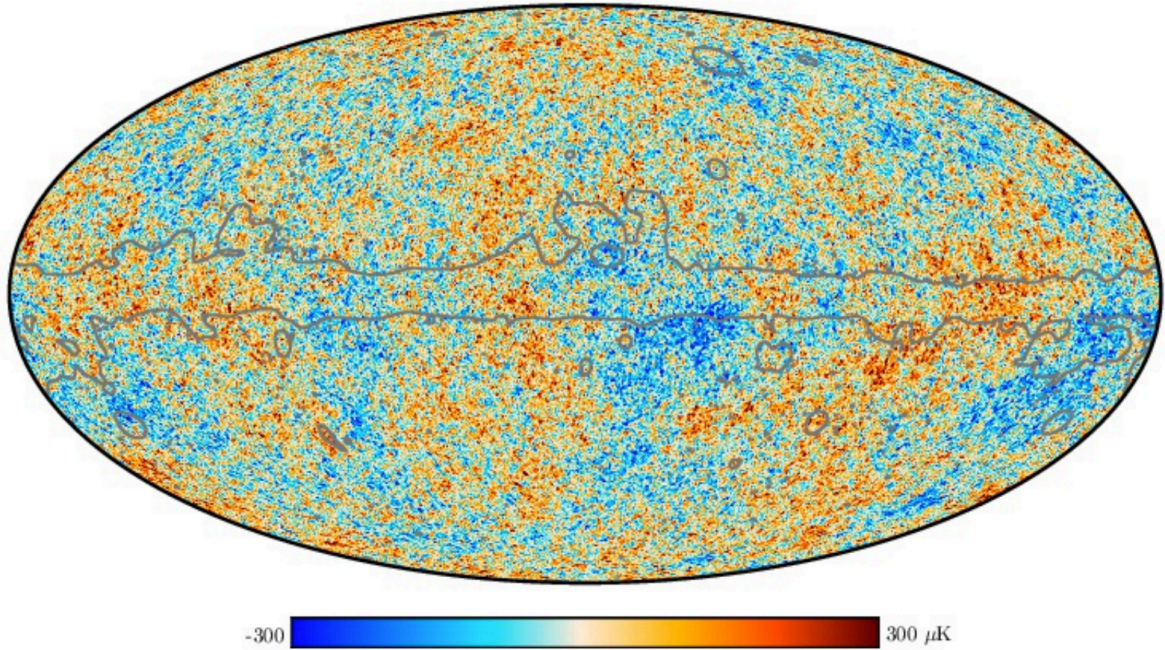


図 1.1 Planck 衛星 [1] によって測定された, CMB 温度揺らぎの全天マップ.

### 1.2.3 トムソン散乱

CMB は最終散乱面で自由電子によるトムソン散乱を受けて観測者まで届く. この散乱過程によって, CMB(の光子 1 つ 1 つ) は直線偏光している. トムソン散乱は光の電場によって電子が振動し, その電子が加速度運動による輻射をすることで起こる. 散乱光の電場は,

$$\mathbf{E}_{\text{out}}(t, \mathbf{r}) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 c^2 m_e r} \mathbf{n} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{E}_{\text{in}}(t - \frac{r}{c})) \quad (1.5)$$

と表せる. ここで,  $\mathbf{r}, r$  は散乱点を原点とした観測者の位置と距離,  $\mathbf{n} \equiv \mathbf{r}/r$  は散乱光の向きである. CMB が完全に等方的であれば, 様々な方向から来た光が散乱されて観測者に届くので, CMB は全体として無偏光となる. しかし実際には, CMB には温度揺らぎが存在するので, 図 1.2 のように, 温度揺らぎの熱い方に沿った向きに偏光が生じる. これが各方向で起こることで, CMB は偏光の模様 (パターン) を持つ.

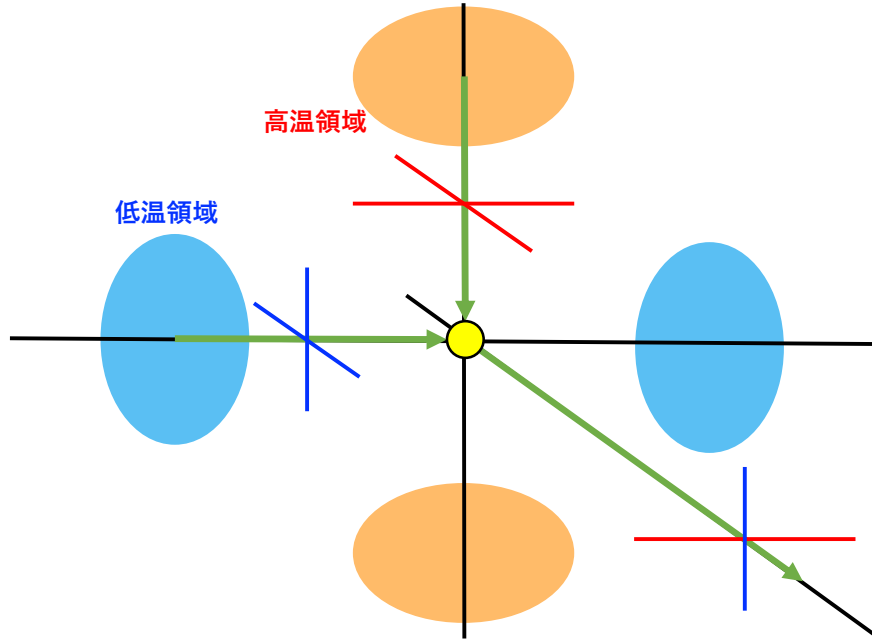


図 1.2 四重極の温度揺らぎによる，CMB の偏光生成の様子．最終散乱面上のある一点において，周りの高温領域から来る光は，低温領域からの光よりも強度が高い．それぞれの光の散乱光は決まった方向に偏光しているので，CMB は高温領域からやってきた光の偏光を持つ．

#### 1.2.4 ストークスパラメータ

CMB が偏光することを述べたが，その偏光を観測しようとしたとき，実際に検出器のアンテナによって測定できるものは，「電場の特定の方向成分の強度」である．そこで，偏光を記述するための観測可能な量として，次のストークスパラメータを定義する．

$$I = E_x^2 + E_y^2 \tag{1.6}$$

$$Q = E_x^2 - E_y^2 \tag{1.7}$$

$$U = 2E_x E_y = E_a^2 - E_b^2 \tag{1.8}$$

ここで， $x, y$  は観測者が定めた直交座標， $a, b$  は  $x$  軸， $y$  軸を  $45^\circ$  回転した座標である．定義から円偏光を含んだ偏光を記述したいときは，パラメータ  $V$  を加えた 4 つのパラメータを用いることになるが，こ

ここではCMBの直線偏光が記述できればよいのでこの定義を用いる。

### 1.2.5 EモードとBモード

ストークスパラメータ  $Q, U$  は座標の取り方に依存した量であり、座標の回転に対して不変でない。具体的な変換性は、座標軸の  $\phi$  回転に対して

$$\begin{pmatrix} Q' \\ U' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-2\phi) & -\sin(-2\phi) \\ \sin(-2\phi) & \cos(-2\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q \\ U \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

である。そこで座標の取り方に依存しない量を  $Q, U$  を組み合わせて作り、それを偏光パターンの分析に用いることにする。天球の任意方向を見て、その向きの近傍の領域を平面で近似し、直交座標を貼る。その平面上で  $Q, U$  をフーリエ変換する。

$$\tilde{Q}(\ell) = \int d^2\theta Q(\theta) \exp(-i\ell \cdot \theta) \quad (1.10)$$

$$\tilde{U}(\ell) = \int d^2\theta U(\theta) \exp(-i\ell \cdot \theta) \quad (1.11)$$

ここで、 $\ell, \theta$  はそれぞれ波数ベクトルと平面上の座標である。ここで新たな量、 $E, B$  を

$$\begin{pmatrix} E(\ell) \\ B(\ell) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-2\psi_\ell) & -\sin(-2\psi_\ell) \\ \sin(-2\psi_\ell) & \cos(-2\psi_\ell) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{Q} \\ \tilde{U} \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

で定義する。ここで  $\psi_\ell$  は波数  $\ell$  の方位角である。このように定義することで、 $E, B$  は座標の取り方によらない量となる。実際、座標軸の  $\phi$  回転に対して  $\psi_\ell \rightarrow \psi_\ell - \phi$  と変換されることで  $Q, U$  の変換を打ち消すことが確認できる。この  $E, B$  をそれぞれ偏光のEモード、Bモードと呼ぶ。また、 $y$  軸を反転させるパリティ変換に対して  $Q \rightarrow Q, U \rightarrow -U, \psi_\ell \rightarrow -\psi_\ell$  と変換することから、Eモードは空間対称性、Bモードは空間反対称性を持つことがわかる。ある1つの波数  $\ell$  の  $E, B$  が実空間に作る偏光のパターンを調べる。 $x$  軸を  $\ell$  の向きにとってやれば、ストークスパラメータは

$$Q(x) = E \exp(ix) \quad (1.13)$$

$$U(x) = B \exp(ix) \quad (1.14)$$

となり、図 1.3 のように、Eモードは波数ベクトルに対し平行か垂直な偏光、Bモードは波数ベクトルに対し  $\pm 45$  度傾いた偏光である。実際には様々な波数の重ね合わせであるので、天球面上にそれぞれのモードがつくる偏光模様は図 1.4 のようになる。

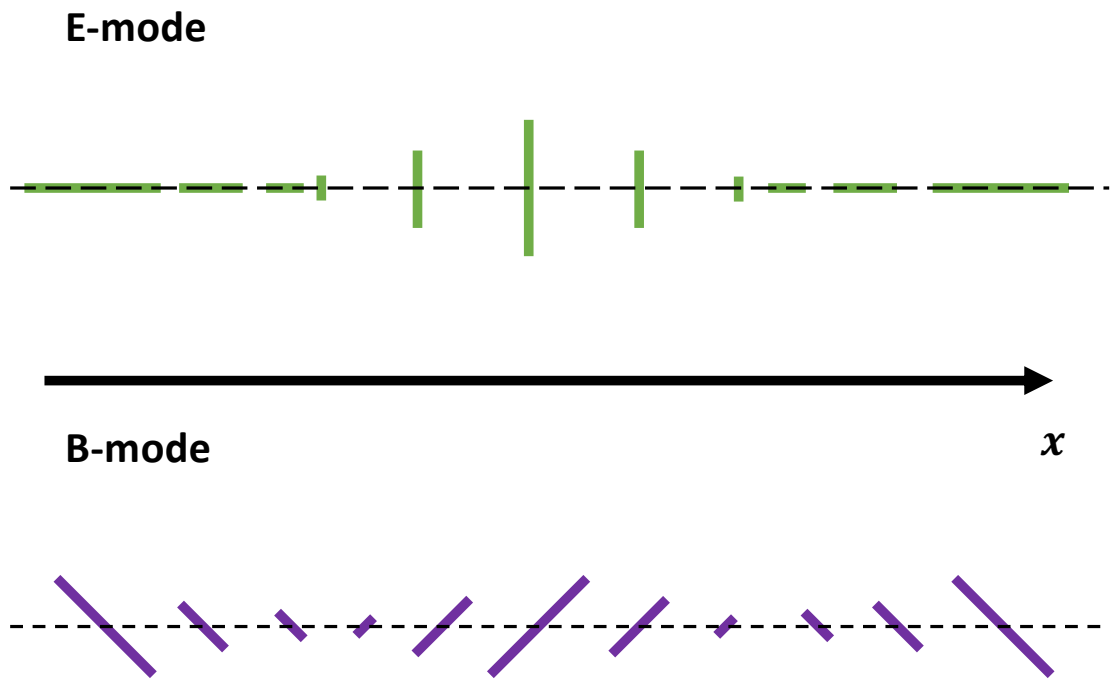


図 1.3 1つの波数のEモードとBモードの偏光パターン. 波数の向きにx軸をとった. Eモードは進行方向に対し平行または垂直に偏光し, Bモードは $\pm 45$ 度傾いた偏光.

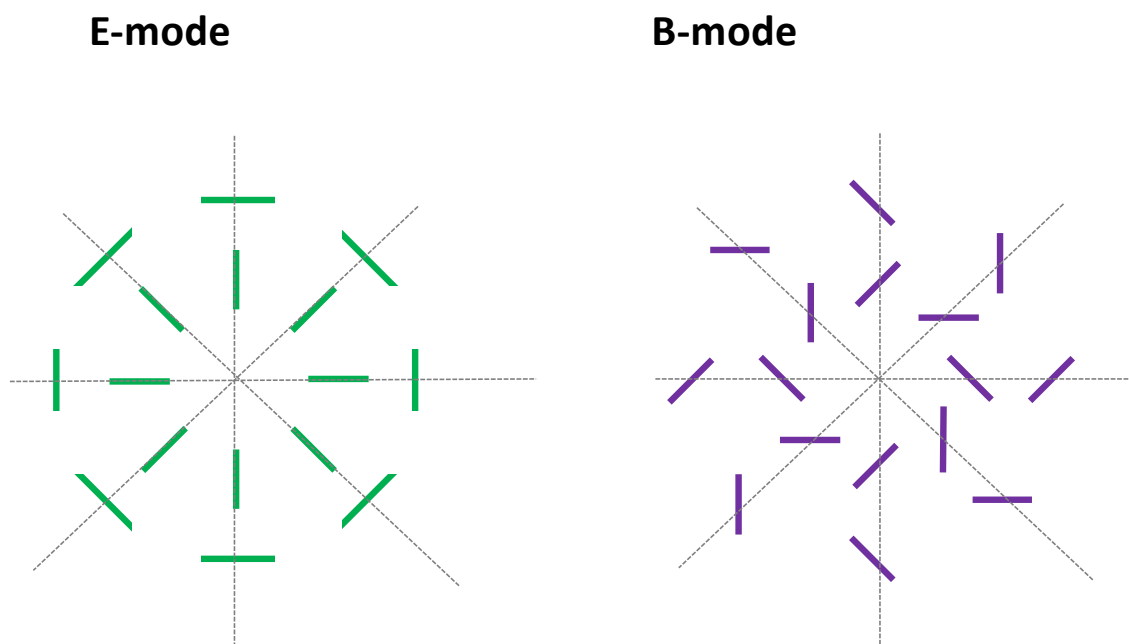


図 1.4 様々な波数が重なった E モードと B モードの偏光パターン。E モードは空間対称，B モードは反対称な偏光模様になる。

### 1.2.6 温度揺らぎが作る偏光パターン

ある波数の温度揺らぎが天球面上に作る偏光パターンを考える。波数に沿った向きに、温度の高い低いを繰り返すので、一点から見ると四重極揺らぎとなるので、図 1.5 のように偏光は波数の向きに対して平行あるいは垂直になる。つまり温度揺らぎは偏光の E モードを作る。実際の空の温度揺らぎは様々な波数のゆらぎの重ね合わせになるが、1つ1つが E モードのみを作る以上、温度揺らぎによってできる偏光模様は空間対称なパターンとなる。

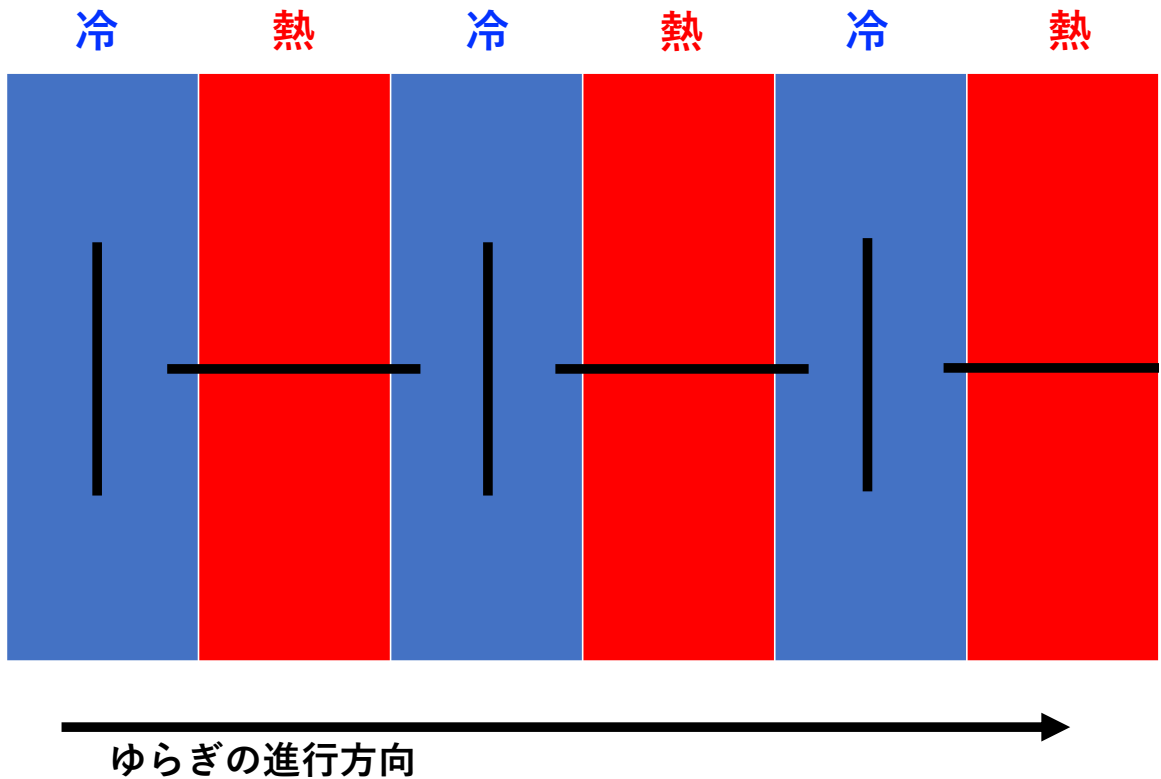


図 1.5 温度揺らぎが作る偏光パターン．ある波数の温度揺らぎが作る，熱い，冷たいを繰り返す分布は，この平面上の点から見れば四重極の揺らぎである．よって熱い方向に沿って，縦，横を繰り返す偏光模様を生成する．これは偏光 E モードに他ならない．

### 1.3 $\Lambda$ -CDM モデルの問題

$\Lambda$ -CDM モデルはこれまでの観測事実の多くをよく説明するが，不自然な点も指摘されている．そのうちの1つとして，地平線問題と呼ばれるものを紹介する．情報伝達の手伝いは光速を超えない．宇宙のある時刻  $t$  において，時刻  $0$  に発生した光が時刻  $t$  でたどり着く点までの距離を  $d_H$  とする．時刻  $t$  で，宇宙の2点間の距離が  $d_H$  を超えていた場合，その2点の物理状態は因果関係を持たない．この距離を粒子の地平線距離，もしくは単に地平線距離と呼ぶ．地平線距離は，

$$d_H = a(t) \int_0^t dt' \frac{c}{a(t')} \tag{1.15}$$

で表される．スケール因子  $a(t)$  で割って時間微分をとると，

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{d_H}{a(t)} \right) = \frac{da}{dt} \frac{d}{da} \left( \frac{d_H}{a(t)} \right) = \frac{c}{a(t)} \quad (1.16)$$

とかける． $\Lambda$ -CDM モデルでは，宇宙は膨張していくにつれて輻射優勢期，物質優勢期を経てダークエネルギー優勢期と変遷していく．各時期の  $a(t)$  の振る舞いは，フリードマン方程式 (1.3) から

$$\dot{a} \propto a^{-1} \quad (\text{輻射優勢期}) \quad (1.17)$$

$$\dot{a} \propto a^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{物質優勢期}) \quad (1.18)$$

$$\dot{a} \propto a \quad (\text{ダークエネルギー優勢期}) \quad (1.19)$$

であるので，輻射優勢期では，

$$\frac{d}{da} \left( \frac{d_H}{a(t)} \right) = c \quad (1.20)$$

より， $d_H/a$  は定数を除いて  $d_H/a \propto a(t)$  で変化する．同様に，物質優勢期は  $d_H/a \propto a(t)^{1/2}$ ，ダークエネルギー優勢期は  $d_H/a \propto a^{-1}$  となる．ここからわかることとして，地平線距離は，輻射優勢期，および物質優勢期の間は2点間の距離  $L(t) = L_0 a(t)$  よりも速く広がっていく．すなわちある時刻で2点が地平線の外にある場合，時間を遡ってもその2点は地平線の外にあるままである．CMBの温度揺らぎの大きさは  $10^{-5} T_{\text{CMB}}$  であり，全天に渡って高い一様性をもつ．これは最終散乱面において宇宙の温度が均一だったことを意味するが，宇宙の晴れ上がり期の地平線距離は約40万光年，最終散乱面では約1000倍に引き伸ばされて4億光年程度である．最終散乱面までの距離は約140億光年であるので，この地平線距離は視野角で言えば

$$\frac{4 \text{ 億光年}}{140 \text{ 億光年}} [\text{Radian}] \sim 2^\circ \quad (1.21)$$

に相当する．つまりこのモデルでは， $2^\circ$  を超えた範囲でCMB温度が一様であることは単なる偶然としか言えないのである．こんな偶然は不自然であるとして，CMB温度の一様性を説明する宇宙モデルが求められた．

## 1.4 インフレーション理論

$\Lambda$ -CDMモデルが抱える問題点を解決する初期宇宙のモデル「インフレーション」が，1981年に佐藤勝彦<sup>[?]</sup>などによって提唱された．地平線問題は，地平線距離が2点間の距離よりも早く広がるため，最終散乱面で因果を持ち得ない2点はそこからどれだけ時間を遡っても因果を持たない，という $\Lambda$ -CDMモデルの性質から生じている．そこで，2点間の距離(スケール因子)が地平線距離よりも速く引き伸ばされる期間を輻射優勢期よりも前の段階として定義してやれば，最終散乱面で $2^\circ$ を超えた範囲も，過去

には因果関係を持つことが可能になる。ダークエネルギー優勢期と同じように、

$$H = \text{const.} \quad (1.22)$$

$$a(t) \propto \exp Ht \quad (1.23)$$

で  $a$  が加速度的に膨張すればよい。地平線問題を解決するには、宇宙の始まりから  $\sim 10^{-35}$  秒の間に距離が  $\sim \exp 60$  に膨張したことになる。

### 1.4.1 インフレーションによる揺らぎ

インフレーションは空間とともに、空間に分布していた物理量の量子的な揺らぎも引き延ばす。ここで引き伸ばされた揺らぎが、CMBの異方性、またその後の宇宙の構造形成の初期値を与えた。引き伸ばされたゆらぎは、計量テンソルの揺らぎと、インフレーションによる膨張時間の空間ごとの違いから来るスケール因子の揺らぎである。

### 1.4.2 テンソルゆらぎ

計量テンソルは、一般相対論において時空上の2点の距離を

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (1.24)$$

の積分で与えるテンソルであり、

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a^2(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^2(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a^2(t) \end{pmatrix} \quad (1.25)$$

と表される。テンソルゆらぎはこの計量テンソルのゆらぎであり、 $z$  軸方向に進むゆらぎは

$$\delta g_{\mu\nu} = a^2(t) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.26)$$

と表せる。 $z$  はゆらぎの進行方向に固定されているが、 $x$  軸、 $y$  軸の回転により  $h_+$  と  $h_\times$  は回転変換される。 $h_+$  は  $x$  軸と  $y$  軸の計量、 $h_\times$  は  $xy$  軸から  $45^\circ$  傾いた方向の計量を伸び縮みさせる。この伸び縮みは空間の体積は変化させない。波数の大きなゆらぎはアインシュタイン方程式に従うエネルギー・運動量との相互作用によって減衰するので、最終散乱面において残っているテンソルゆらぎは天球上で見込み角  $1^\circ$  以上の大スケールのものに限られる。この大スケールのテンソルゆらぎを原始重力波とよぶ。



### 1.4.3 スカラーゆらぎ

スカラーゆらぎはインフレーション終了時点でのスケール因子のゆらぎ,

$$s = \frac{\delta a}{a} \quad (1.27)$$

であり, 物理的距離で見た密度のゆらぎを作る. CMB 温度ゆらぎはこの密度ゆらぎと, 最終散乱面から観測者までの光路上の重力ポテンシャルによる効果 (ザクス-ヴォルフェ効果) によって形成されている.

## 1.5 CMB 偏光観測の意義

CMB の黒体放射スペクトルはビッグバン理論を宇宙論のスタンダードに押し上げ, 温度揺らぎの測定は宇宙パラメータの決定に貢献した. 現在の CMB 観測実験のターゲットは偏光ゆらぎのパターンである. 偏光パターン, 特に B モード偏光を測定することでどんな物理に繋がるかを紹介する.

### 1.5.1 原始重力波由来 B モード

原始重力波は空間の体積を変えないので, 観測者から見て CMB の温度揺らぎを生じることはない. しかし, 最終散乱面上の一点から見れば, 計量が伸びた方向が冷たく, 縮んだ方向が熱い四重極の温度異方性が存在する, すなわち CMB は計量が縮んだ方向に偏光する. CMB の偏光を天頂から  $x$  軸方向の水平線に向かって観測すると,  $z$  軸向きの波数を持った重力波の  $h_{\times}$  成分によって図 1.6 上のような, ゆらぎの進行方向に対して  $45^{\circ}$  傾いた偏光パターン, すなわち B モードが観測される. 観測を  $xy$  平面で  $45^{\circ}$  の方向の水平線に向かうようにすれば,  $h_{+}$  成分による B モードが見える. B モードの強度は視線方向と波数が平行な天頂で最大, 垂直な水平線上でゼロとなるが, これは温度揺らぎが作る E モード (図 1.6 下) とは逆の特徴である. これは横波である重力波と縦波である粗密波の違いから来ている.

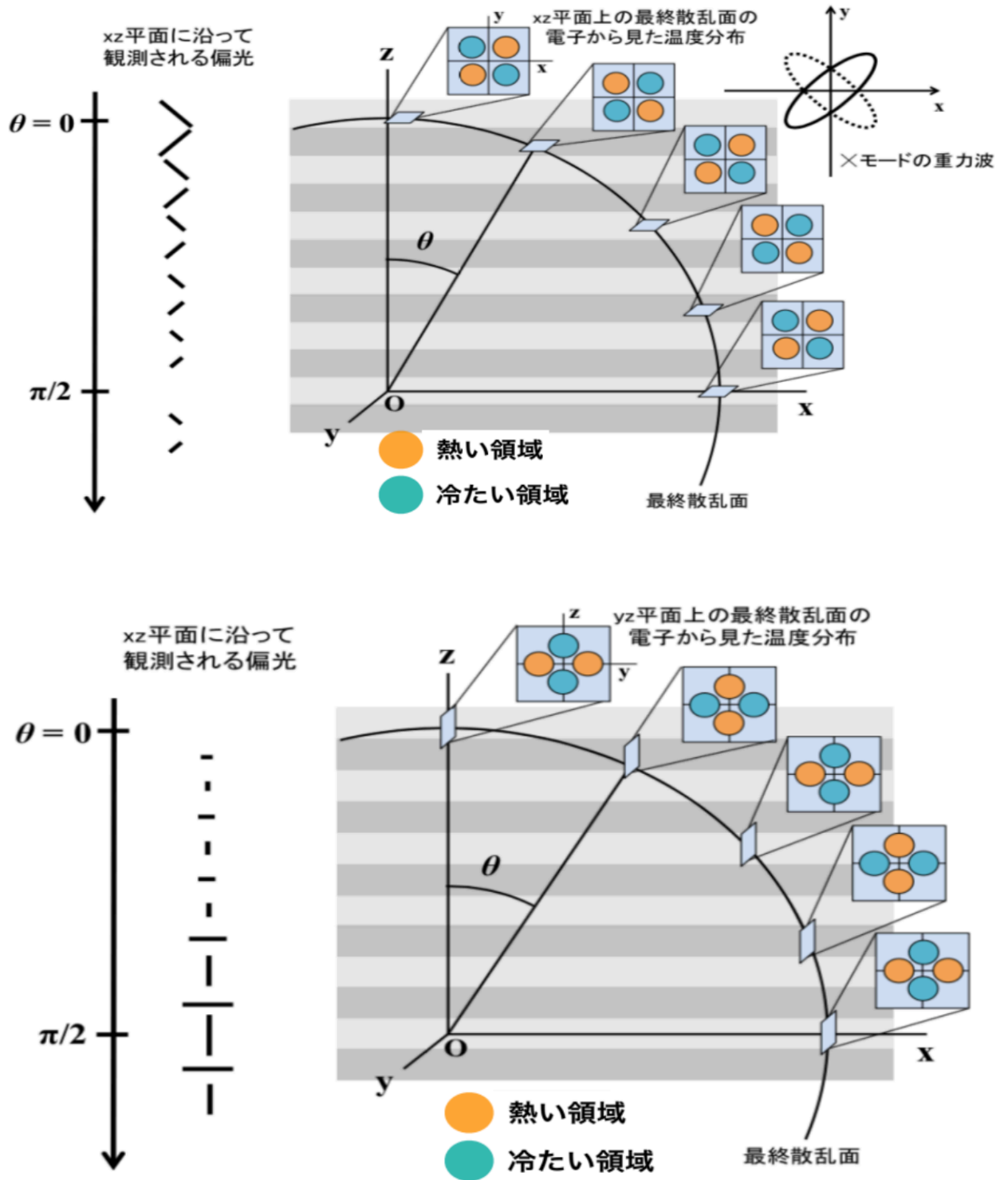


図 1.6 重力波の  $h_x$ (上) と、温度揺らぎ(下) が作る偏光パターン. 図は小峯順太氏の修士論文 [5] から引用.

原始重力波はCMBのBモード偏光, それも見込み角  $1^\circ$  以上の大スケールのもことによって観測される

ことが期待できる。スカラー・テンソル比,

$$r \equiv \frac{(|h_+| + |h_\times|)^2}{|s|^2} \quad (1.28)$$

が0でない値で測定されれば, それはインフレーション理論の直接証拠となる。現在の観測結果で与えられている制限は  $r < 0.07(95\% \text{C.L.})$ <sup>[4]</sup> である。

### 1.5.2 重力レンズ効果由来 B モード

CMB は最終散乱面から観測者まで, 宇宙の大規模構造が形成されていく最中を通り抜けてきている。その経路は完全な直線ではなく, 大規模構造が作る重力ポテンシャルの影響で曲がっている。したがって, 観測される CMB は真にその方向の最終散乱面からではなく, 天球上の CMB の分布は散乱面での分布からわずかに歪められたものになる。

この効果は温度ゆらぎの分布にも影響を与えるが, より大きな影響として, 重力レンズ効果によって歪められた CMB の E モード信号はその空間対称性を破るため, 見かけの B モード成分を含むことになる。ここで, 重力レンズ効果による観測位置のずれに対して波数の小さな E モードほど大きくゆがみ, 見かけの B モードの割合は大きくなる。重力レンズ効果起源の B モード強度が最大となるのは視野角  $0.2^\circ$  付近のスケールである (図 1.7) ので, 観測には角度分解能の高い大口径の望遠鏡が必要になる。

ニュートリノは非常に軽い素粒子であり, 一定時期までは輻射として振舞うので他の物質に比べて密度揺らぎが成長しない。よって他の物質と比べて局在化が進んでいないニュートリノの存在は, その質量によって重力ポテンシャルを均す方向にはたらく。CMB の重力レンズ効果由来 B モードはそれだけ強度が小さくなるので, その減り幅から宇宙背景ニュートリノの全質量, ひいてはニュートリノの3つの質量固有値の和に制限を与えることができる。

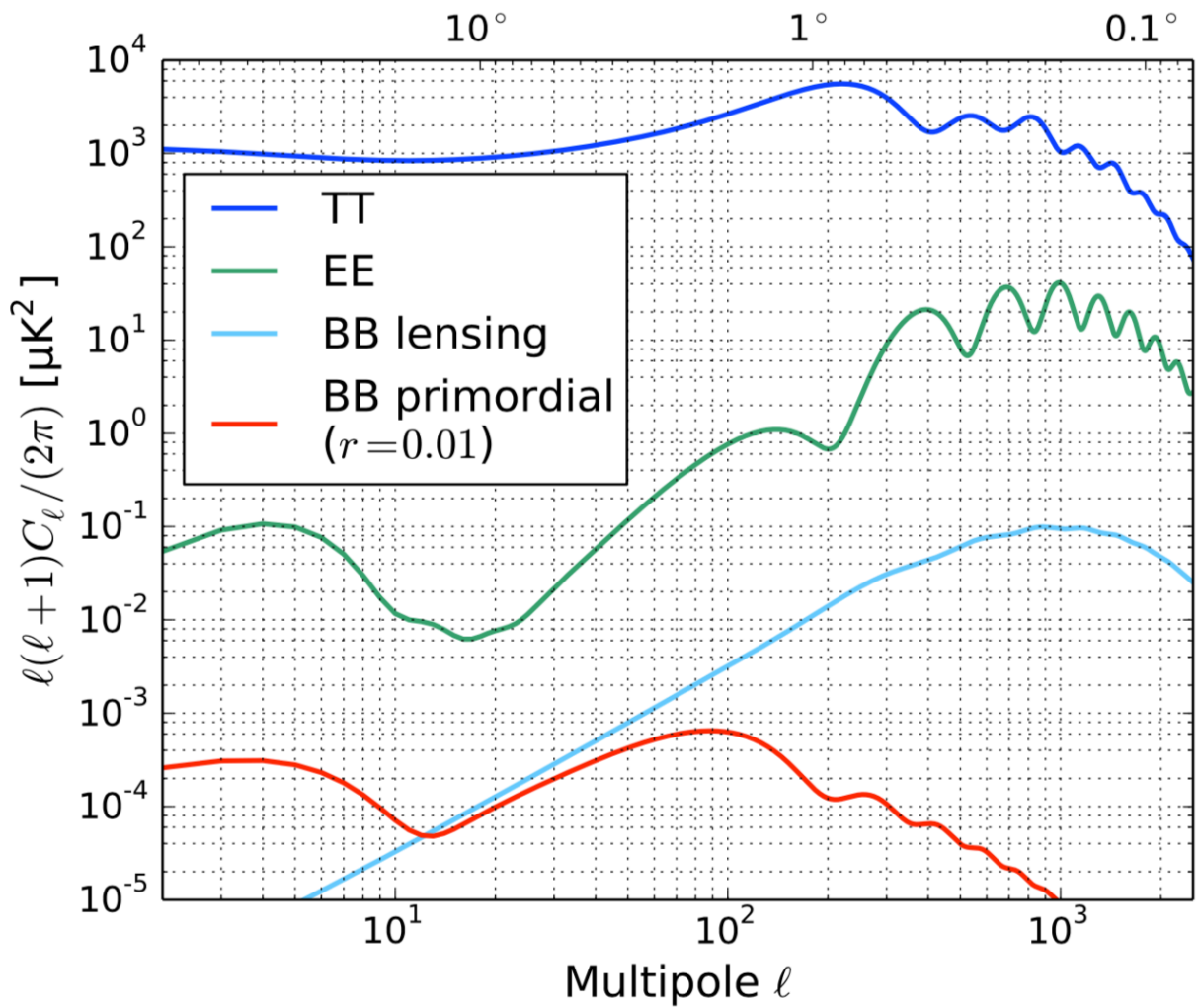


図 1.7 CMB のゆらぎを，球面調和関数で展開した係数のプロット．図は高倉理氏の博士論文 [6] より引用

## 第2章 大口径CMB望遠鏡の抱える課題

この章では、CMB 偏光観測のための大口径地上望遠鏡が抱える課題について述べる。まず望遠鏡の基本的な構造を、Simons Array 実験 (以下, SA) の望遠鏡, Huan Tran Telescope (以下, HTT) とその受信機である POLARBEAR2a (以下, PB2a) を例に挙げて説明する。つぎに、望遠鏡の要素の一つである半波長板 (Half Wave Plate, HWP) の機能とその望遠鏡における利用方法について説明し、最後に望遠鏡の抱える課題について述べる。

### 2.1 望遠鏡の基本的構造

図 2.1 に示すように、CMB をはじめとする空からの光がデータとして読み出されるまでの大まかな流れは以下のようになっている。

1. 反射鏡によって、空の一方方向からの光を集光する。
2. 半波長板による偏光変調をかける。
3. 受信機のレンズで光路を整え、焦点面へと光を導く。
4. 検出器にエネルギーを落とし、電気信号として読み出される。

これより各装置について、その機能について述べていく。

#### 2.1.1 Huan Tran Telescope

図 2.2 はチリのアタカマ高地に設置された HTT である。HTT は 2 つの反射鏡を用いて図 2.1 のように光を受信機へ導く。主鏡は直径 3.5m, 焦点距離 2.2m の軸外し放物面ミラーである。ビームの半値全幅は 150Hz で 3.5', 90Hz では 5.2' となっている。副鏡は切断面で直径 1.5m の楕円面である。望遠鏡は首を振って空をスキャンできるようになっており、全天の 8 割をカバーし、スキャン速度は最大  $4^\circ/s$  となっている。<sup>[6]</sup>

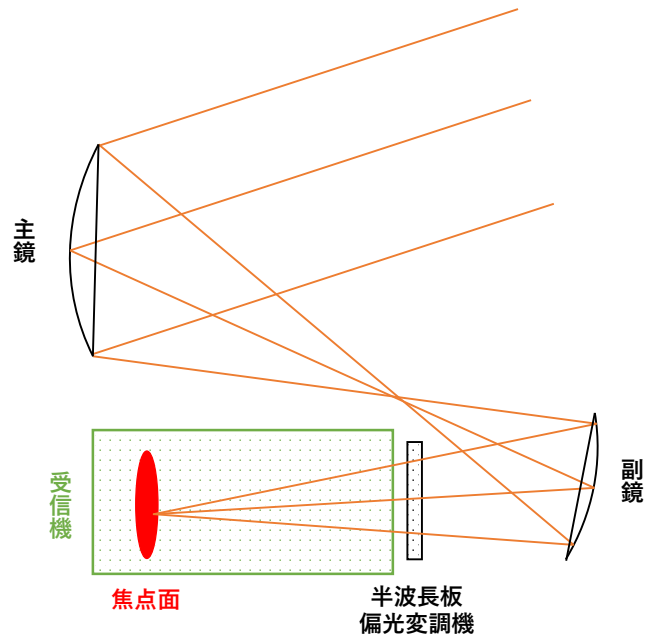


図 2.1 望遠鏡反射鏡による光路の模式図. 2回の反射によって光を検出器に集めるが, 後述するように, 反射率が100%でないことに起因して, 偽偏光も生成してしまう.



図 2.2 Huan Tran Telescope. Simons Array 実験ではこの望遠鏡を3つ用いて CMB 偏光の精密観測をする.

### 2.1.2 受信機 PB2a

SA 実験で3つの HTT にインストールされる受信機の1つ, PB2a の構造を図 2.3 に示す. ミラーで反射され, 入射した光は3つあるレンズによって光センサーの配置された焦点面上に像を結ぶ. [7] 焦点面および光学系は冷凍機によって極低温に保たれている. 光学系の温度は 4K, 焦点面の温度は 270mK である. 受信機入射窓の手前にはサファイア半波長板を配置して, 偏光変調をかけられるようになっている. 半波長板については後述する.

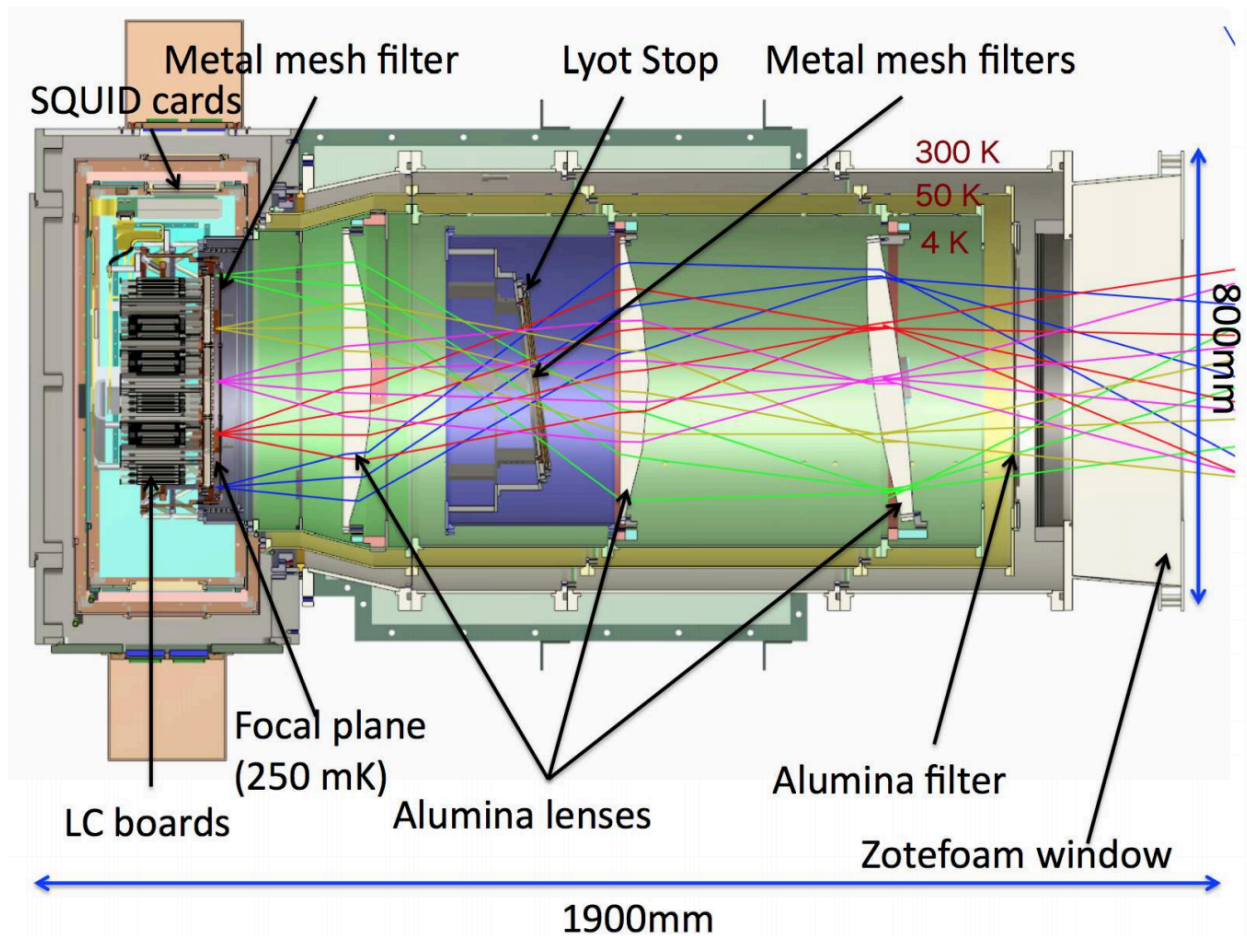


図 2.3 PB2a 受信機的设计. 反射鏡から入射してきた光は3枚のレンズで屈折し, 焦点面に入射する.

### 2.1.3 焦点面検出器

焦点面へと導かれた光は, 図 2.5 に示す焦点面検出器によって検出される. [8]1897 個あるレンズを介して直交する2つの広帯域アンテナに入射し, 各アンテナごとにバンドパスフィルターによって 95GHz 帯と 150GHz 帯に分けられ, 別々のセンサーで入射強度を計測する. 2つの周波数帯で観測を行うこと

によって、図 2.4 に示すような前景放射をその周波数依存性の違いによって除去することが意図されている。PB2 では光センサーに超伝導転移端センサー (TES) によるボロメータを用いていて、アンテナに入射したエネルギーをボロメータの温度上昇として読み取る。PB2a では焦点面は、270mK に冷やして動作する。アンテナは広い周波数帯に感度を持つように曲がったつくりをしている。これによってアンテナが受けるエネルギー量を増加させ、統計量を増やす設計である。1つのアンテナは1つの方向の電場のみに感度を持つので、偏光を測ることができる。センサーの設計感度は、95GHz と 150GHz それぞれについて、ボロメータ一つで見た場合温度換算ノイズ (NET) が  $360\mu\text{K}\sqrt{s}$ 、検出器アレイ全体で見た場合  $5.8\mu\text{K}\sqrt{s}$  である。ここで  $s$  は観測時間である。95GHz と 150GHz を組み合わせて、全 7588 のボロメータを全て用いれば、NET は  $4.1\mu\text{K}\sqrt{s}$  となるデザインである。

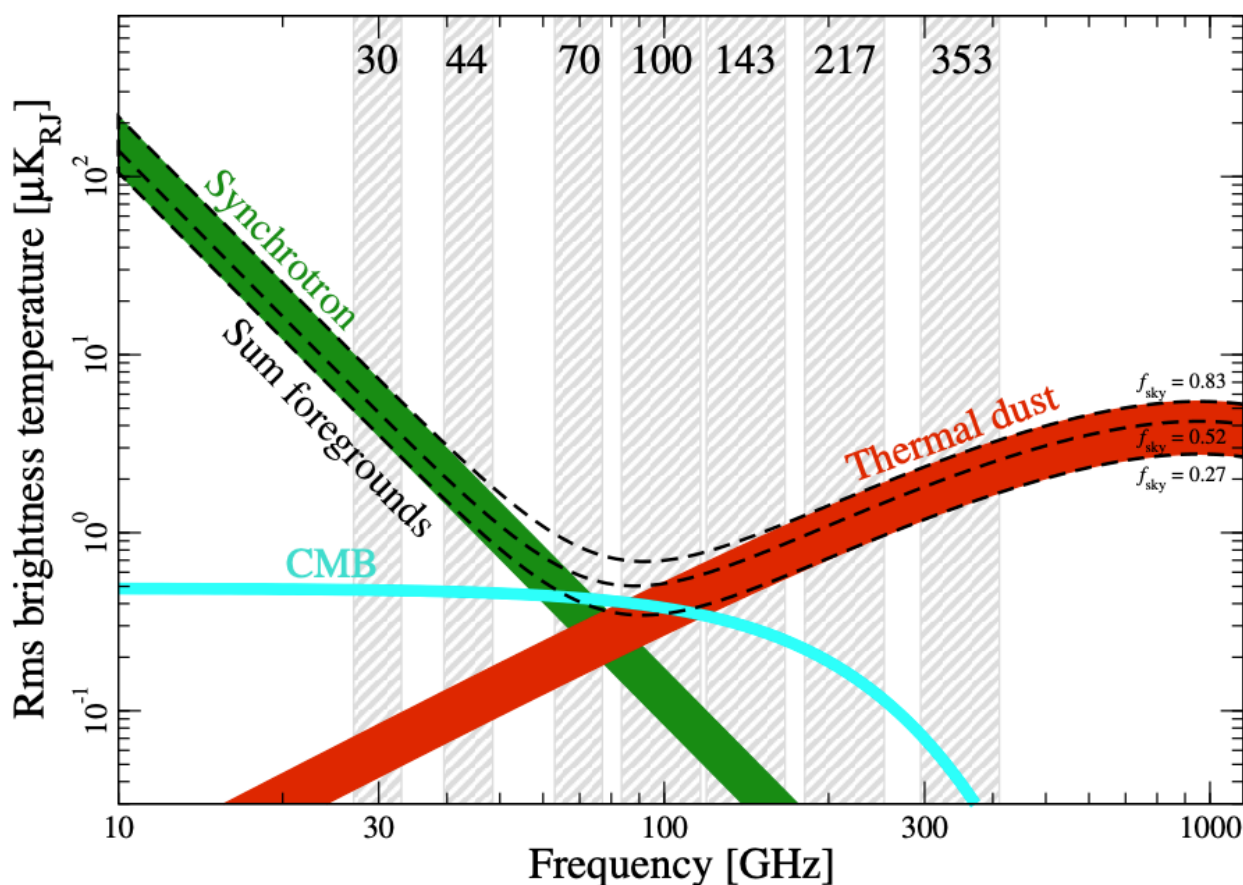


図 2.4 Planck 衛星<sup>[1]</sup>によって測定された、2つの前景放射、シンクロトロン放射とダスト熱放射および CMB の偏光強度の周波数分布。CMB の偏光は前景放射の中に埋もれており、測定するためには複数の周波数帯で観測し、周波数依存性の違いによって前景放射を取り除くことが必須となる。



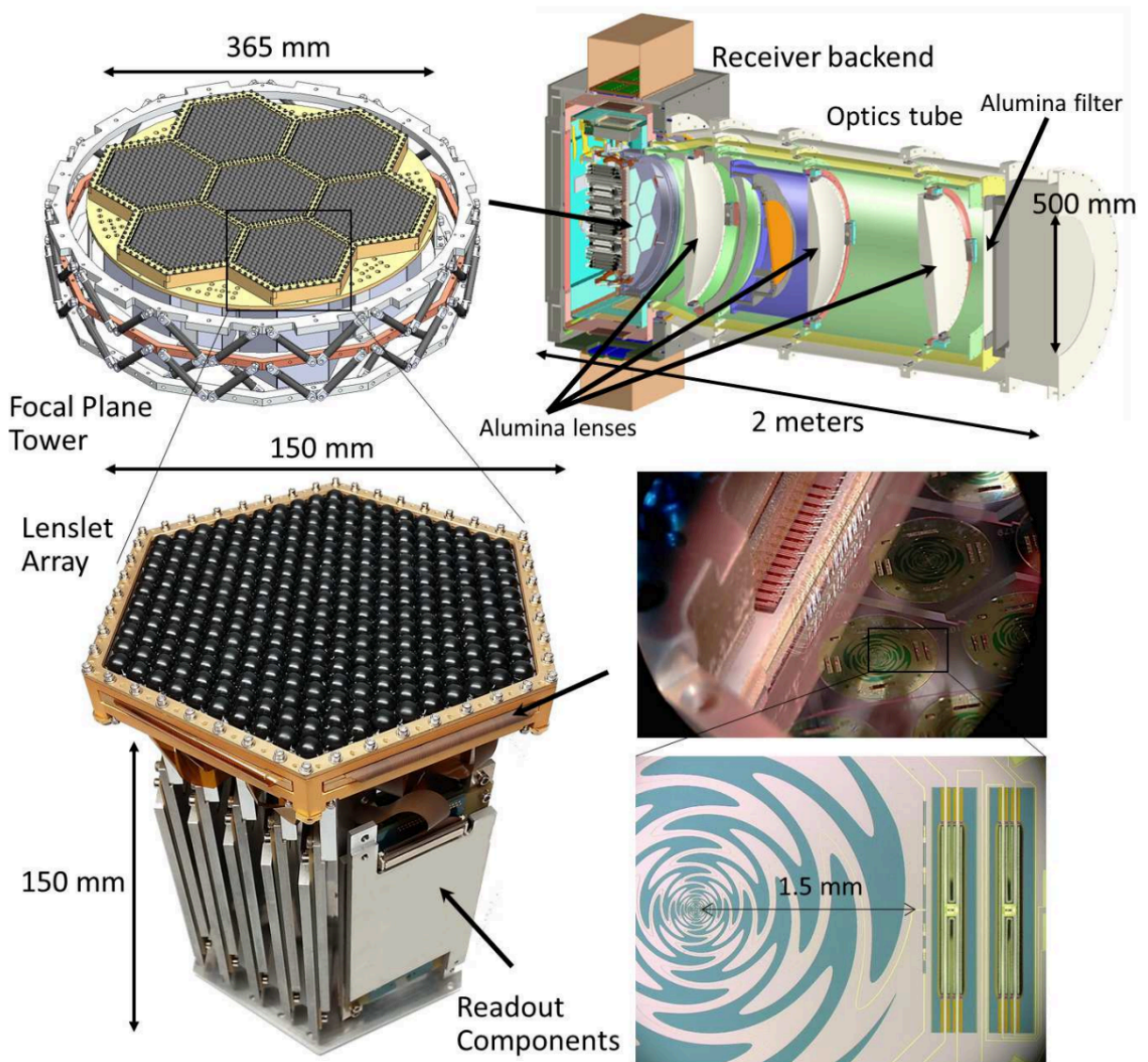


図 2.5 PB2a の、受信機の焦点面に配置される検出器。焦点面に入射した光は 1897 個のレンズを介して、レンズごとに 2 つの直交する広帯域アンテナに入射する。図の右下のような曲がったアンテナによって広い周波数域に対して感度を持つことができるので、拾う光の統計量を稼ぐことができる。受信した光は終端抵抗で熱に変換され、アンテナの右にある TES ボロメータの抵抗の変化として読み取られる。

#### 2.1.4 TES の動作原理と読み出し

TES(Transition Edge Sensor) ボロメータは、超伝導物質の転移温度付近での電気抵抗の急激な変化を利用した温度計で、アンテナが受けた光を電流にしたのちに、終端抵抗で熱エネルギーへと変換し、抵抗に隣接したボロメータの電気抵抗を計測することで温度変化を測る。ボロメータは、最も抵抗の変化率が

大きい転移温度に留めた状態で動作させる。このような高精度の温度調整は冷凍機では不可能で、ボロメータに一定の電圧をかけて電流を流し、ジュール熱と冷凍機による冷却が釣り合うようにして温度調整を実現している(図 2.6)。この温度調整のための一定電圧をバイアス電圧と呼ぶ。電流ではなく電圧を一定に保つことで、信号の流入で温度が下がった際に、ジュール熱が小さくなる負のフィードバックがはたらくようになっている。抵抗変化の信号電流は、低温で動作する増幅装置、SQUID(superconducting quantum interface device)によって電圧に変換されて増幅されたのちに、室温に置かれた Analog to Digital Converter(ADC)で読み取られる。PB2a では、読み出しの手法として周波数分割多重読み出し(frequency-domain multiplexing, fMUX)を用いており、それぞれ異なった共振周波数 LC フィルタをつないだ TES に各共振周波数を合成した交流のバイアス電圧をかけることで、1本の信号線で40のボロメータを読み出す。[9]

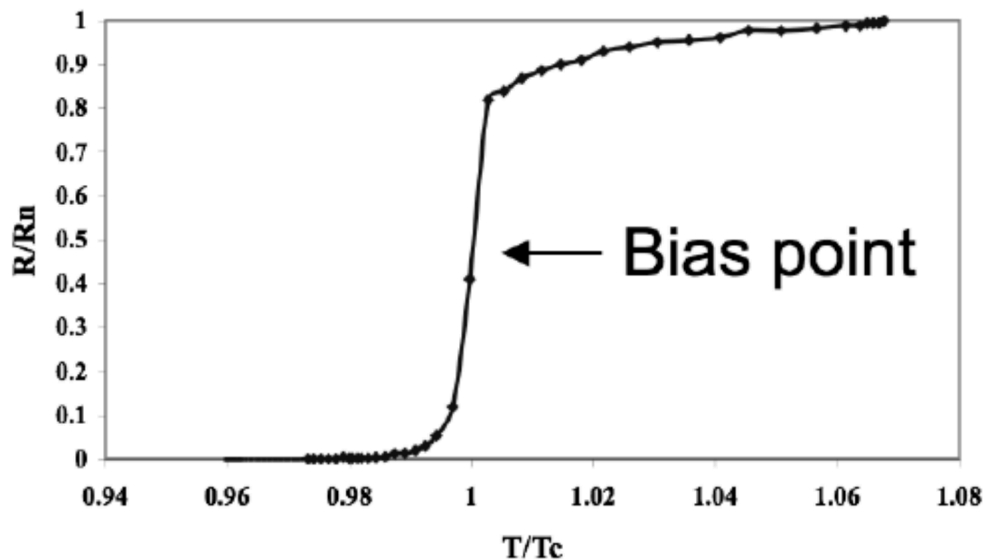


図 2.6 TES の抵抗の温度依存性。[10]TES は転移温度  $T_c$ (PB2a の TES では約 500mK) 付近で抵抗値が急激に変化する。これを利用するため、一定のバイアス電圧によって TES の温度を保つ設計である。

### 2.1.5 望遠鏡および受信機 PB2a の性能まとめ

ここまでで述べた望遠鏡および PB2a の基本的な性能を表 2.1 にまとめる。

表 2.1 望遠鏡と PB2a の設計性能まとめ

周波数	95GHz,150GHz
ピクセル数	1897
ボロメータ数	7588
NET(ボロメータごと)	360 $\mu$ K
NET(周波数ごと)	5.8 $\mu$ K
NET(全ボロメータ)	4.1 $\mu$ K
焦点面温度	270mK
ビーム幅	5.2'(95GHz),3.5'(150GHz)
最大スキャン速度	4.8°

## 2.2 半波長板による偏光変調

サファイアなどの結晶は、電場の向きによって屈折率が異なるという特徴を有する。これを複屈折と呼ぶ。ここに直線偏光した光が入射した場合、直交する2つの偏光成分の間に位相差が生じる。この位相差によって、直線偏光を円偏光に変えたり、直線偏光の偏光角を変化させたりすることができる。こうした機能を持った光学素子を波長板 (Wave Plate) と呼ぶ。

### 2.2.1 半波長板の基本的性質

図 2.7 のように、波長板に対して直線偏光が入射した場合を考える、x,y 方向の屈折率をそれぞれ  $n_x, n_y$  とし、波長板の厚みを  $l$  とする。入射光の電場を

$$E_x = A \cos \theta \sin 2\pi \left( \frac{z}{\lambda} - \nu t \right) \quad (2.1)$$

$$E_y = A \sin \theta \sin 2\pi \left( \frac{z}{\lambda} - \nu t \right) \quad (2.2)$$

とすると、波長板内の光路がそれぞれ  $n_x l, n_y l$  となることから、波長板を透過した後の光の電場は、

$$E_x = A \cos \theta \sin 2\pi \left\{ \frac{z}{\lambda} - \nu t + \frac{(n_x - 1)l}{\lambda} \right\} \quad (2.3)$$

$$E_y = A \sin \theta \sin 2\pi \left\{ \frac{z}{\lambda} - \nu t + \frac{(n_y - 1)l}{\lambda} \right\} \quad (2.4)$$

と表せる。このように、波長板を通った光の2つの偏光成分の間に  $\frac{(n_x - n_y)l}{\lambda}$  の位相差が生じる。特に、

$$(n_x - n_y)l = (2n + 1)\lambda \quad (2.5)$$

を満たす時 ( $n = 0, \pm 1, \dots$ ), 電場は

$$E_x = A \cos(-\theta) \sin 2\pi\left(\frac{z}{\lambda} - \nu t + \phi\right) \tag{2.6}$$

$$E_y = A \sin(-\theta) \sin 2\pi\left(\frac{z}{\lambda} - \nu t + \phi\right) \tag{2.7}$$

$$\phi \equiv \frac{(n_x - 1)l}{\lambda} \tag{2.8}$$

と表すことができ、直線偏光の向きが波長板の軸に対して反転する。光路差が波長の半整数倍になっていることから、この条件を満たした光学素子を半波長板 (Half Wave Plate, HWP) という。

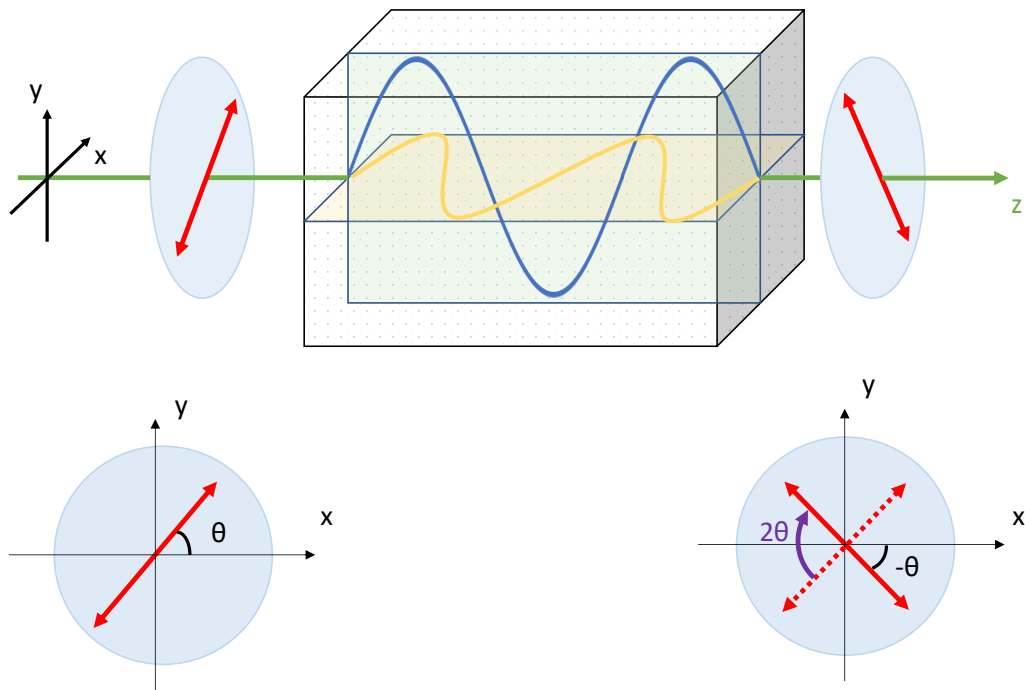


図 2.7 半波長板の機能を表す模式図。波長板の中を進む光は、直行する2つの偏光成分でちょうど  $\pi$  の位相差が生じた結果、半波長板を抜けると偏光の向きが反転する。

### 2.2.2 偏光変調機の原理と役割

半波長板の軸に対して角度  $\theta$  の傾きを持って入射した偏光は、角度  $-\theta$  の偏光となる、ここで半波長板自体を角速度  $\omega$  で回転させた場合を考える。偏光は角度  $\omega t$  に関して反転するので、偏光の角度は  $2\omega t - \theta$  となる。検出器のアンテナはある方向の電場の強度を測定する。つまり、半波長板の連続回転によって、

検出器の測定電場強度は角速度  $4\omega$  で振動する。これが半波長板による偏光変調の原理である。CMB 望遠鏡にこれを用いることで、偏光信号を変調し、無偏光の大気のノイズから分離することが可能になる。

### 2.2.3 半波長板を回転させる機構

半波長板を実際に回転させるための機構を、SA 望遠鏡を例に紹介する。図 2.8 は、PB2a の望遠鏡に搭載予定の半波長板である。受信機入射窓の手前(図 2.1)に配置し、電気モーターとベルトによって回転する。波長板の偏光軸の回転の位相は、波長板の側面に貼り付けたバーコードを光エンコーダで読み取ることで測定する。

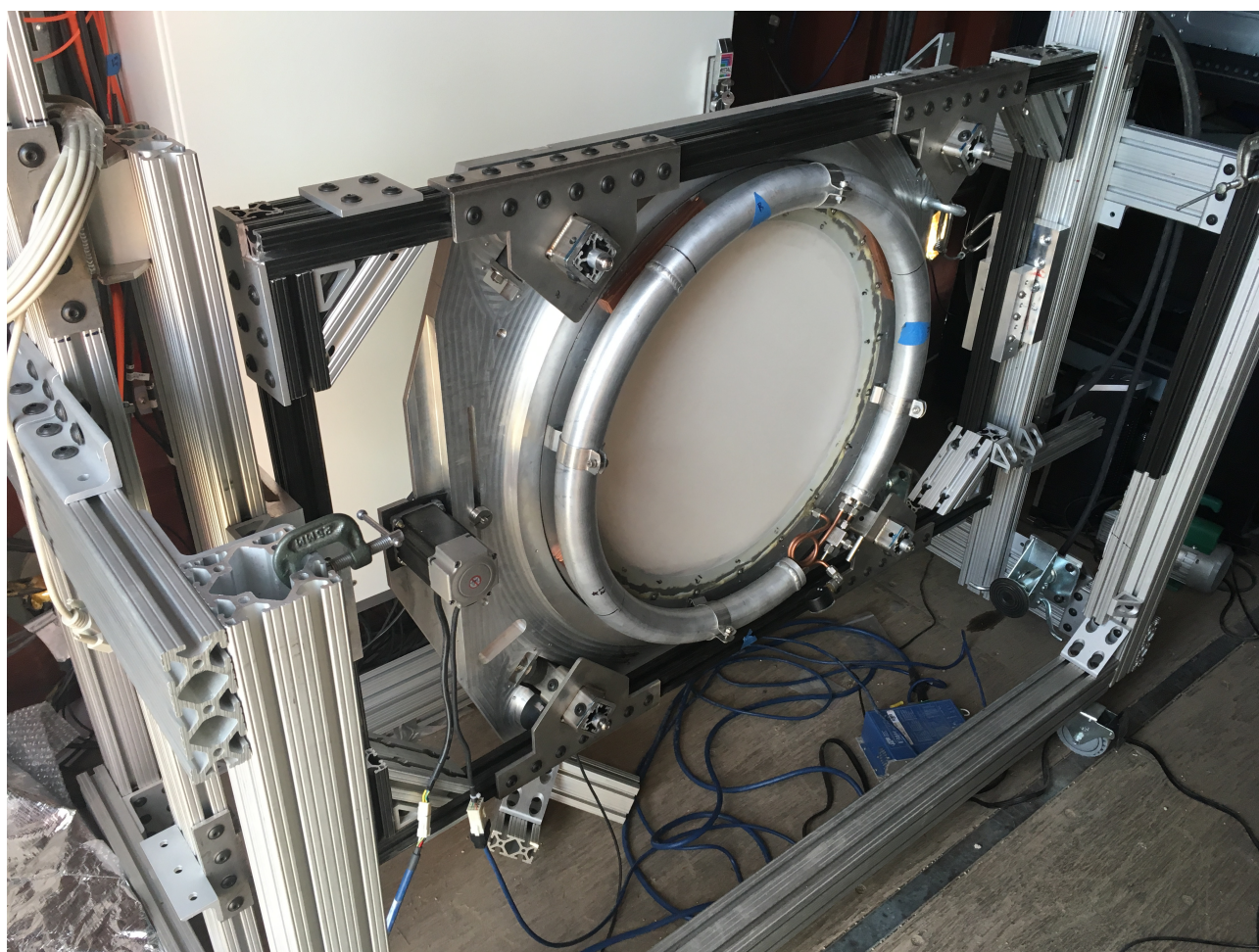


図 2.8 PB2a の半波長板。サファイア板に反射防止膜を貼り付けている。電気モーターとベルトによって回転し、回転の位相は光エンコーダによって測定する。

### 2.2.4 PB2b,c の半波長板

SA 望遠鏡の中でも、PB2b,c では半波長板を望遠鏡のシステム内で回転させるための機構が異なり、超伝導軸受によって半波長板を回転させる。<sup>[11]</sup> 図 2.9 は半波長板を乗せて回転する、CRS(Cryogenic

Rotating Stage) の模式図である。第二種超伝導体で作られた Stator の上にリング状の磁石である Rotor を吊り、転移温度まで冷却すると、超伝導体のマイスナー効果とピン留め効果により、Rotor は軸方向および半径方向への移動を止められる。ここで重要なのは、リング磁石の磁場が回転対称であれば、Rotor は回転方向へは自由であることである。さらに Stator の上に多数配置されたソレノイドに、三相交流の電流を流すことで回転する磁場を発生させ、Rotor 上に配置された磁石が磁場からの力を受けて Rotor に回転力を与える。この Rotor 上に半波長板を配置することで、摩擦による熱発生などを極力抑え、安定した回転をさせることができる。Rotor 上の円周上に開けられた多数の穴を通して、LED の光を読み取ることで回転の位相を測定する。

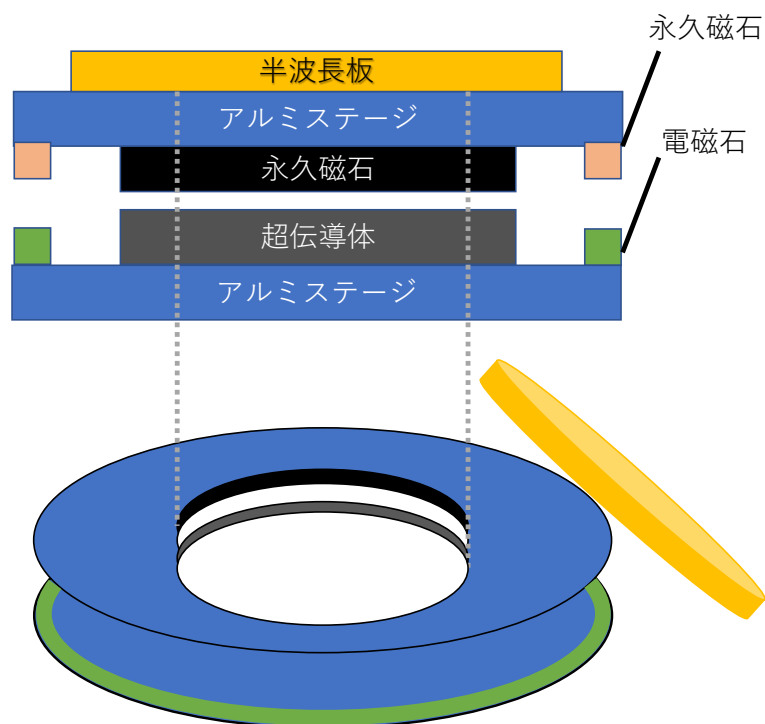


図 2.9 PB2b,c の半波長板回転の機構。超伝導体のマイスナー効果とピン留め効果によって磁石付きのステージを浮かせつつ、外側の電磁石によって回転させる。全体を冷やすことで、超伝導にするついでに半波長板自身の熱放射のノイズを低減できる。

## 2.3 望遠鏡の抱える課題

### 2.3.1 受信機のアンテナ角度較正

望遠鏡内に配置される光検出器はそのアンテナによって偏光に感度を持つが、各アンテナが向いている角度と空の偏光角度とを正確に較正するのは容易ではない。各アンテナに対する角度の較正の精度が悪ければそれだけ CMB 偏光の測定精度が悪くなる。とくにアンテナ角度が全体的にずれていると図 2.10 のように、CMB の E モードと B モードを混同することにつながる。各検出器の偏光角度が平均的に角度  $\Delta\theta$  だけずれていた場合、見かけの B モードのパワースペクトル  $C'_{BB}$  は真の E, B モードのパワースペクトル  $C_{EE}, C_{BB}$  を使って

$$C'_{BB} = C_{BB} \cos^2 2\Delta\theta + C_{EE} \sin^2 2\Delta\theta$$

$$C'_{BB} - C_{BB} \sim C_{EE} \sin^2 2\Delta\theta \quad (2.9)$$

と表される。E モードのパワースペクトルが B モードの 100 倍のスケールであることを考えると、アンテナ角度の少しのずれが大きな偽の B モード信号を生むことがわかる (図 2.11 参照。)。特にニュートリノ質量和に制限を与えるには B モードスペクトルを精密に測る必要があるので、角度のずれによる偽の B モードは測定結果に大きな系統誤差を生じる。SA 実験では較正精度の要求を、 $\Delta\theta < 0.1^\circ$  としている。偏光角度を較正するため、CMB 望遠鏡では天体からの偏光信号を用いることが多い。代表的な偏光天体として、超新星残骸 Tau A (かに星雲) がある。しかし Tau A の偏光角度は参照するカタログ精度 (現在約  $0.5^\circ$ ) に依存する点や、空からの信号は後述する反射鏡がつくる偽偏光を分離できないという問題を抱えている。人工光源を用いたアンテナ角度の較正装置が待望されており、本研究でその開発を行う。

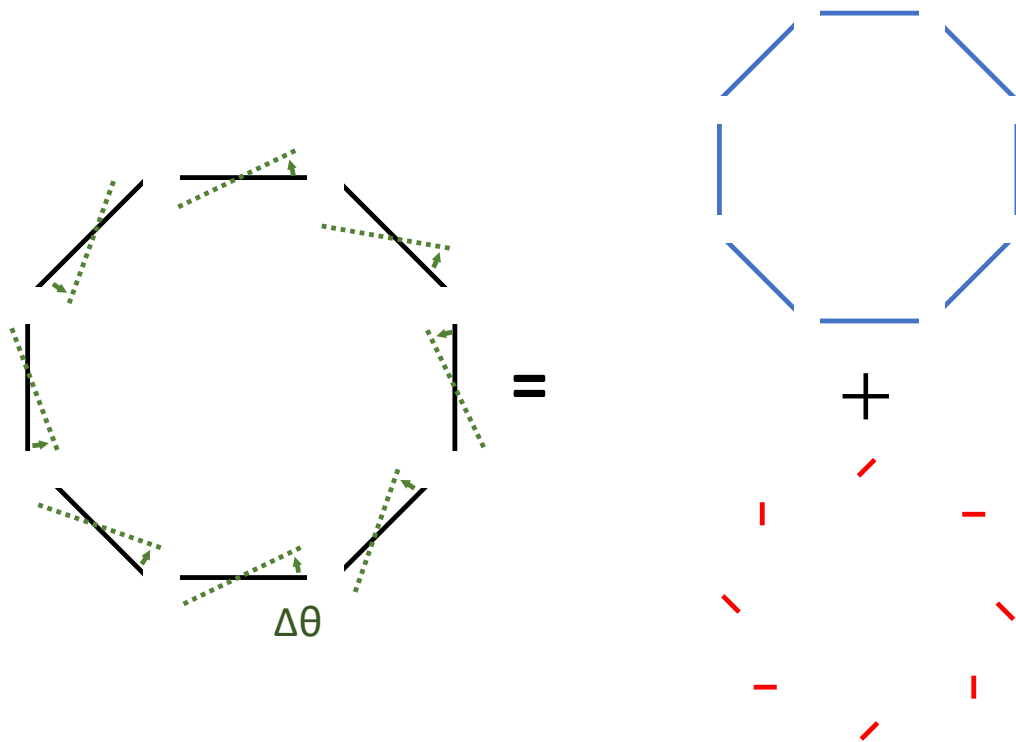


図 2.10 アンテナ角度がずれた場合の, EモードとBモードの混合の様子.



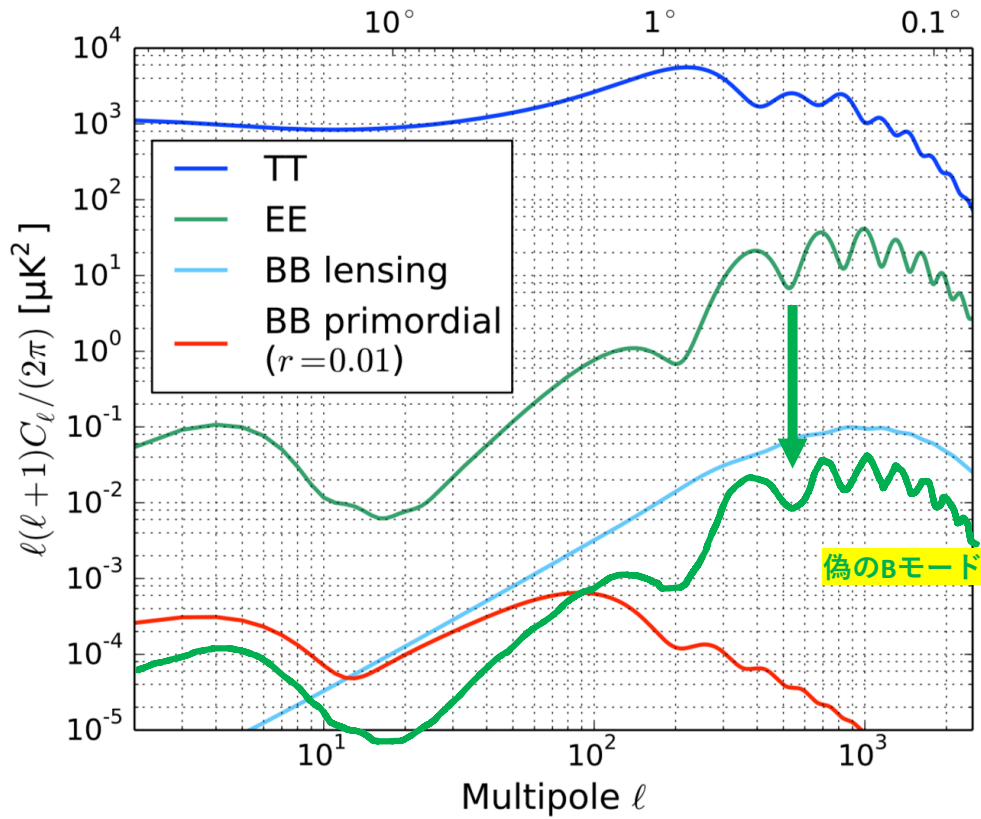


図 2.11 CMB の温度揺らぎと E モード，B モードのパワースペクトルと，アンテナ角度が  $1^\circ$  ずれた場合の偽の B モード．E モードのパワースペクトルは B モードの 100 倍程度であるので，少し B モードにずれ込むだけで大きな偽の B モードを作ってしまう．特にニュートリノ質量和の測定に関しては，重力レンズ由来 B モードのスペクトルを精密に測る必要があるため，測定精度に大きな影響を及ぼす．プロットは高倉理氏の博士論文<sup>[6]</sup>の図を一部修正したもの．

### 2.3.2 反射鏡が作る偽偏光

一般に，誘電体が無偏光の光を反射する時，反射光に余剰な偏光が生ずる．発生する偏光の強度  $P$  は，

$$P = 2\sqrt{16\pi\nu\rho\epsilon_0} \tan(\beta)(T_{\text{mirror}} - T_{\text{sky}}) \quad (2.10)$$

で計算される．<sup>[12]</sup>ここで， $\nu$  は光の周波数， $\rho$  は反射鏡材料の電気抵抗率， $\epsilon_0$  は真空の誘電率， $\beta$  は反射角， $T_{\text{mirror}}$  反射鏡の温度， $T_{\text{sky}}$  は検出器に入射する無偏光信号のアンテナ温度である．偏光の向きは反射面に平行な向きとなる．この偏光は空からの偏光信号に混ざりこみ，偽の偏光として較正および観測の精度に影響を与える．これを分離するには，様々な角度の偏光信号を観測してその offset を見る方法があるが，偏光天体をさまざまな角度から観測するには限界がある．本研究で開発する較正装置はさ

まざまな角度に設定できるため、偽偏光の評価にも有用である。

## 第3章 ワイヤーグリッドによる角度較正の原理と課題

細いワイヤーを平行に張った装置，ワイヤーグリッドは波長の長い光に対して偏光子としての機能を持つ．これを望遠鏡の視界に設置することで，アンテナ角度の較正用の偏光源として用いることができる．ここで特筆すべき点は，CMBと同じ黒体放射の偏光であり幅広い周波数帯に対して較正を行えることと，ワイヤーの向きを変えながら何度か測定することによって，ミラーが作る偽偏光とワイヤーの偏光とを分離できることである．

### 3.1 偏光発生 の原理

導体に光が入射すると，導体表面の伝導電子が電場によって振動し，入射光を打ち消す電場を発生させることによって光を遮断する．一方，振動する電子は加速度運動による輻射で光を放つ．これが導体における反射の原理である．ここで，光の波長に対して極端に小さな導体を考えてみる．小さな領域内に閉じ込められた伝導電子は入射光を打ち消すに十分な振動ができず，光は導体を素通りすることになる．ワイヤーについて考えてみると，図 3.1 のように，ワイヤーと平行に偏光した光は問題なくワイヤーの伝導電子に振動を励起し，反射・散乱される．この散乱光は，ワイヤーの方向と散乱光の方向が成す平面内の直線偏光となる．一方でワイヤーと垂直に偏光した光は波長よりも小さなワイヤーに吸収されることはない．この現象が起きるのは，長波長の光 (ワイヤー径を 0.1mm とすれば，波長 0.1mm 以上，周波数では 30THz 以下) に限られる．

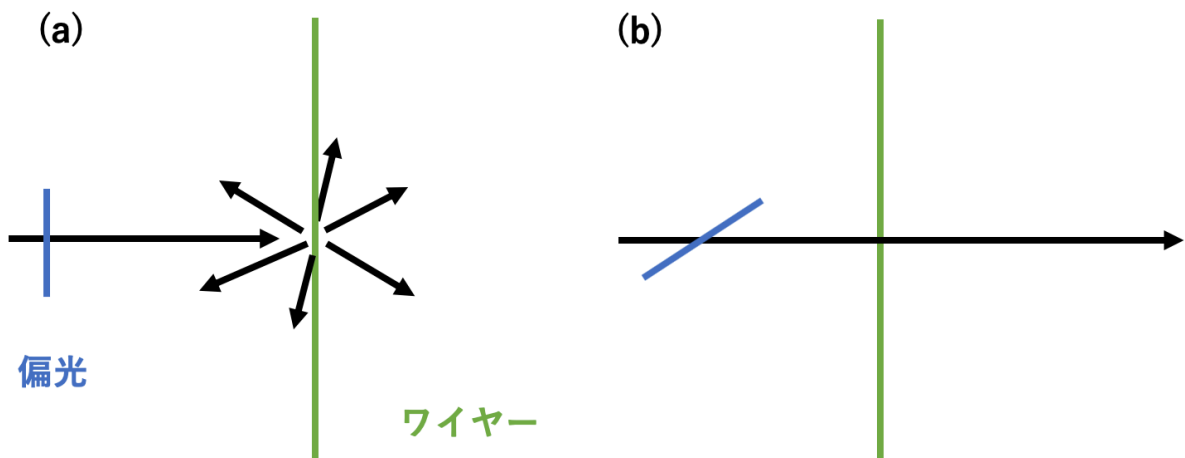


図 3.1 ワイヤによる光の散乱の模式図. ワイヤに平行な偏光 (a) は散乱されるが, ワイヤに垂直な偏光 (b) はワイヤを透過する.

望遠鏡の視野にワイヤを設置した場合を考える. 受信機が感度を持つ周波数帯が 100GHz 程度であることを踏まえて, 受信機が見る光は, もともと見えていた空の CMB・前景放射に加えて, ワイヤが散乱した周囲の物からの熱放射となる. この光はワイヤの張る向きに偏光しているため, これを較正用の偏光源として用いることができる. ただし, 一本のワイヤがどれだけの強度の偏光源となるかは検出器の視野や周りの環境に依存するため, 計算によって簡単には求まらないので, 実験的に確かめる必要がある.

## 3.2 データ取得・解析のシミュレーション

実際にワイヤグリッドを用いてアンテナ角度を較正する時の解析手順をシミュレーションしてみる.

### 3.2.1 時系列データ

望遠鏡に入ってくる光は, ワイヤグリッド, およびミラーによる直線偏光成分と, CMB, 大気の放射などの無偏光成分とが存在する. 直線偏光成分に対しては前述の半波長板による偏光変調がかかる. PB2a では半波長板は 2Hz で回転させる予定であり, この場合信号強度の変調は 8Hz になる. また, PB2a 検出器は一つのボロメータごとに見た場合  $500\mu\text{K}/\sqrt{s}$  のノイズをもつと仮定する. ここで  $s$  は観測時間である. シミュレーションでは測定レートは 200Hz として, 1 秒分のデータをとった. ワイヤがどれほどの偏光信号を作るかは未知であるので, ワイヤの信号強度は色々な数値を入れて行なった, ミラーが作る偏光強度は 100mK とした. 空の温度は 15K として, ADC のゲインは 10000[count/K] とした.

この設定のもと，得られる1秒間の時系列データをシミュレーションした．シミュレーションの設定を表3.1にまとめる．シミュレーション結果が図3.2である．

表 3.1 シミュレーションの設定

空の温度 (無偏光)	15K
半波長板の回転速度	2Hz
測定レート	200Hz
測定時間	1sec
アンテナ方向	0°
ワイヤー信号の強度	1mK, 10mK, 100mK, 1K, 10K
ワイヤーの角度	0°, 22.5°, ..., 157.5°
ミラー偏光の強度	100mK
ミラー偏光の角度	90°
ボロメータのノイズ	0.5mK/ $\sqrt{s}$
検出器のゲイン	10000count/K

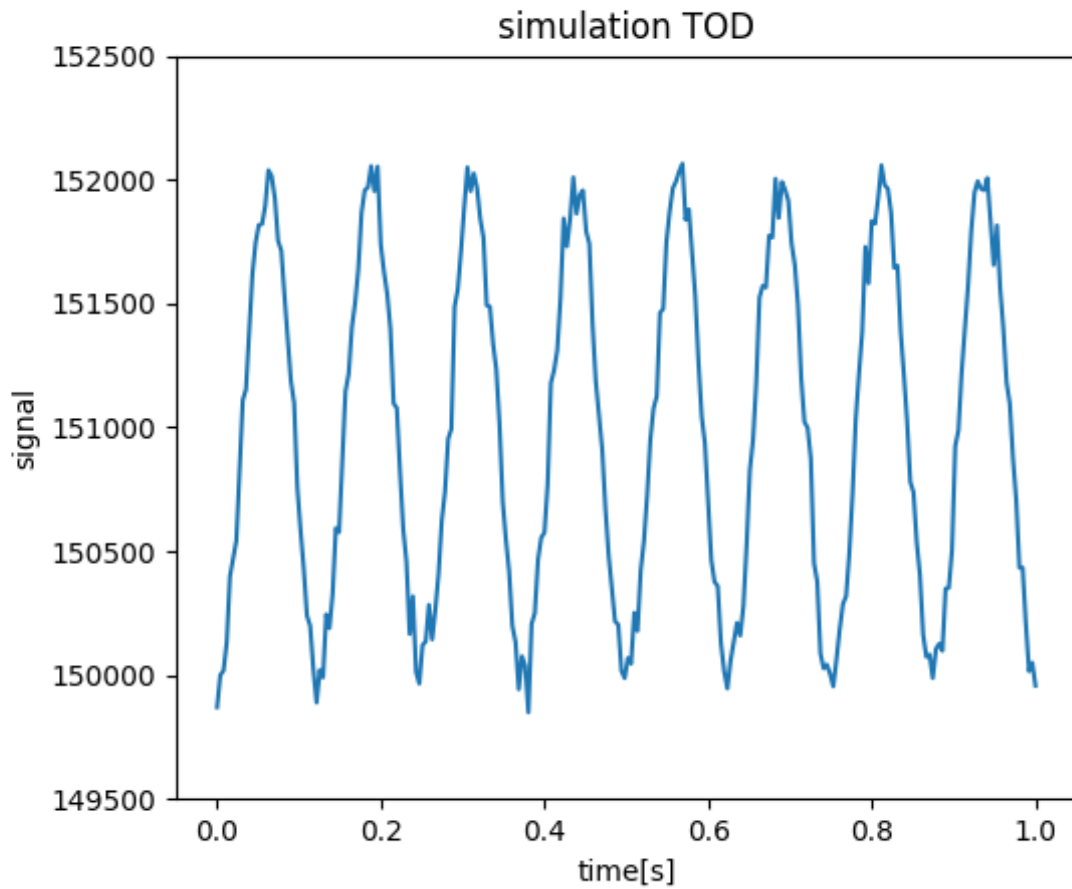


図 3.2 ワイヤグリッドから得られる時系列データのシミュレーション。これはワイヤが  $90^\circ$  のもの。半波長板は  $2\text{Hz}$  で回転し、偏光信号に  $8\text{Hz}$  の変調を与える。大気の放射や CMB の無偏光成分には半波長板による変調はかからず、ワイヤやミラーの偏光成分だけが変調を受けて高い周波数で振動する。

### 3.2.2 偏光情報の取り出し

アンテナの向きを角度  $0$  として、偏光が強度  $I$ , 角度  $\theta$  であったとする。半波長板の回転速度を  $\omega$  として、偏光信号の強度は

$$S_{\text{pol}} \propto I \cos^2(2\omega t - \theta) = \frac{I}{2}(1 + \cos(4\omega t - 2\theta)) \quad (3.1)$$

にしたがって変調している。ここから元の偏光情報を取り出すために、フーリエ変換

$$\tilde{S}(-4\omega) = \frac{1}{T} \int ds S(t) \exp(i4\omega t) = \frac{1}{4} I \exp(i2\theta) \quad (3.2)$$

をすれば、偏光信号の強度および偏光角の情報が、複素数として取り出すことができる。このプロセスを demodulation と呼ぶ。シミュレーションの時系列データに対しては、無偏光の直流成分を取り除いた

のちに各時刻の周りで離散フーリエ変換を施すことで, demodulation を行なう. 図 3.3, 3.4, 3.5 に, ワイヤ角度を変えてシミュレーションした時系列データと, それに demodulation をかけて得られる複素数の時系列データを示す. なお, demodulation 結果は偏光強度が  $I$ , 偏角が  $2\theta$  になるようにしている.

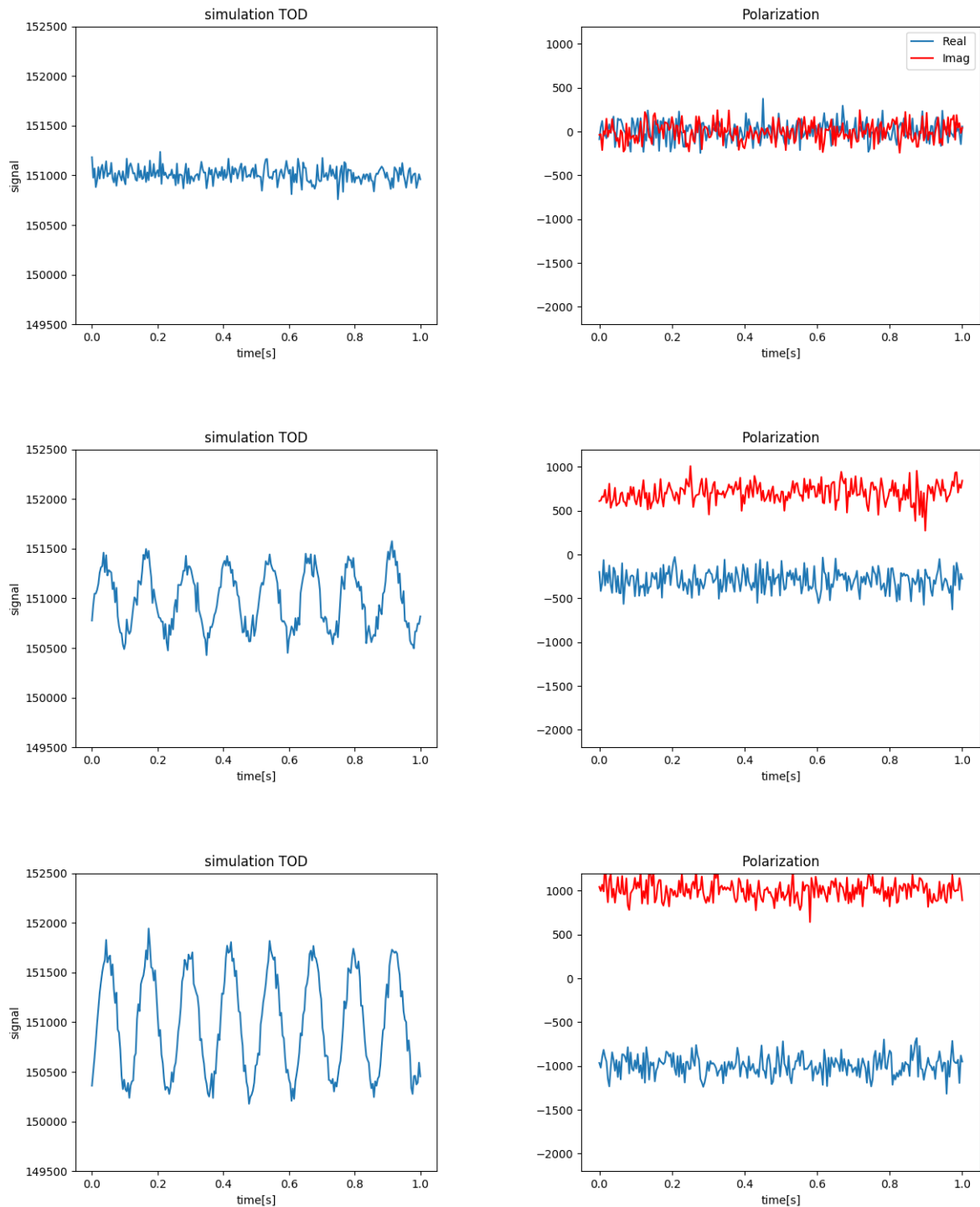


図 3.3 シミュレーションの時系列データと偏光情報 (1). 上からワイヤ角度が  $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$  の場合についてシミュレーションした時系列データと, それに demodulation をかけることで取り出した偏光情報. ワイヤが作る偏光強度を 100mK (ミラーの偽偏光と同じ強度) としたときのもの. 複素数の絶対値が偏光強度, 偏角が偏光角の 2 倍に対応している. ワイヤ角が  $0^\circ$  のものでは, x 軸方向のワイヤ偏光と y 軸方向の偽偏光が合わさり, 無偏光に見える.



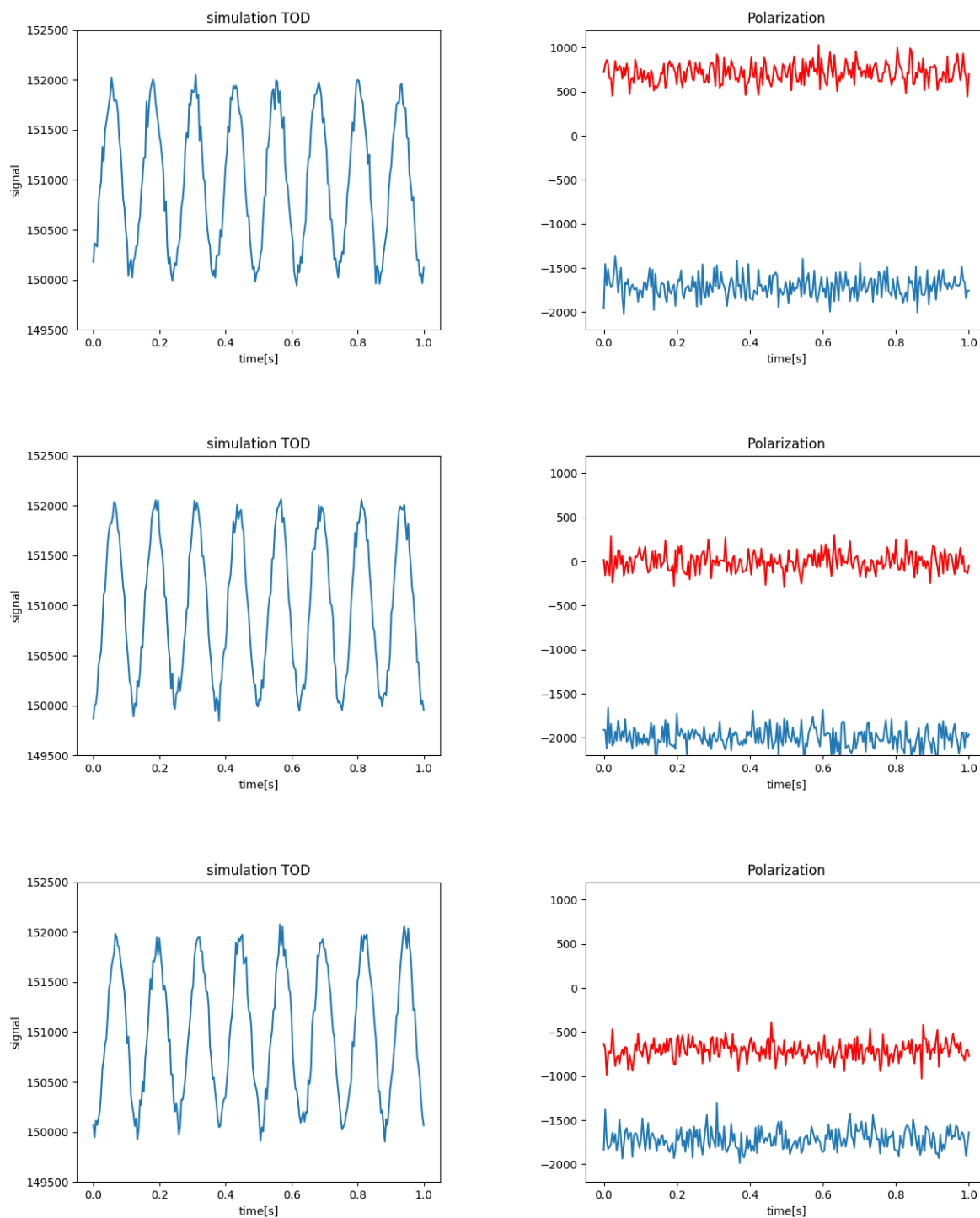


図 3.4 シミュレーションの時系列データと偏光情報 (2). 上からワイヤ角度が  $67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ$  の場合について.  $90^\circ$  のときにワイヤとミラーの偏光方向が揃うので, 最も強い偏光を感知する.

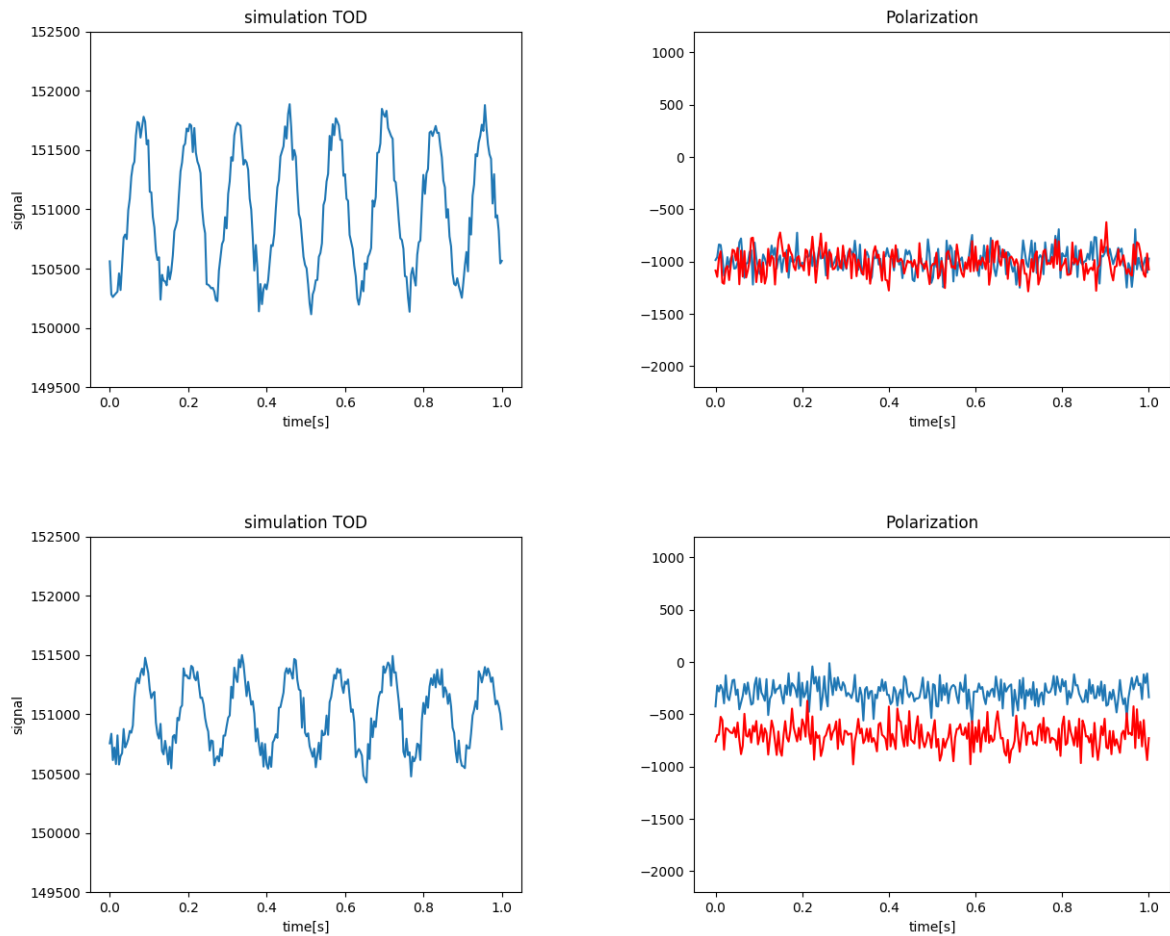


図 3.5 シミュレーションの時系列データと偏光情報 (3). 上からワイヤ角度が  $135^\circ$ ,  $157.5^\circ$  の場合について.

### 3.2.3 偽偏光の測定・角度の較正

この複素数の時間平均を取ることで、偏光情報とその誤差を得る。ワイヤの方向を変えて測定を行い、偏光情報をプロットしていくと図 3.6 のように複素平面上で円を描くように並ぶ。ワイヤ強度を変えていった時のプロットを、図 3.7 に示す。その円の中心がミラーが作る偏光である。つまり 8 点の重心を取ってやればミラーが作る偽偏光の強度を測ることができる。あとは偽偏光を除いた部分がワイヤの偏光情報であることを用いてアンテナ角度を較正することができる。具体的には、ワイヤが  $0^\circ$  の点からミラー偏光を差し引いた複素数の偏角を、アンテナ角度の 2 倍として求める。

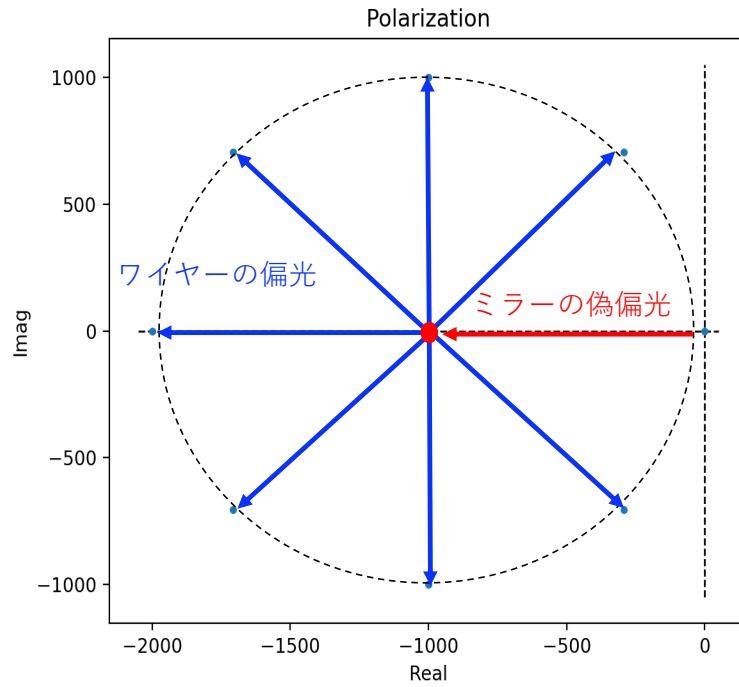


図 3.6 半波長板による変調を戻して得られる偏光情報の概念図。複素数で表現される偏光情報はミラーとワイヤーの偏光が足し合わされているが、ワイヤー角度を変えながら複数回測定することでミラーが作る偏光を測ることができる。

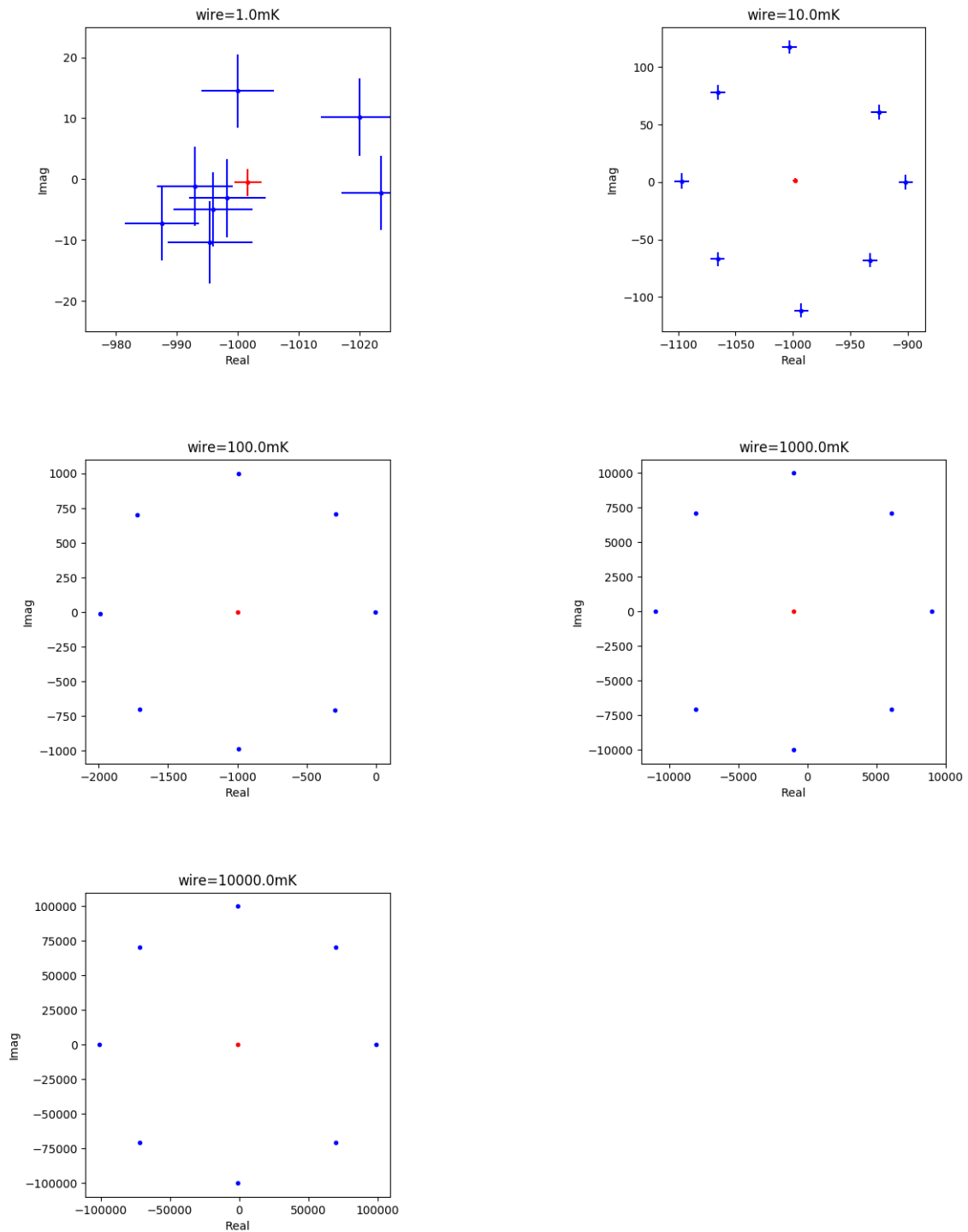


図 3.7 ワイヤ角度を変えた 8 点と、8 点の重心として求めたミラー偏光の誤差付きプロット。ワイヤ偏光の強度 1mK や 10mK ではノイズによって円の形が大きく崩れるが、強度が大きくなるにつれて綺麗な円形に並ぶ。

### 3.2.4 較正の精度

偏光情報の複素数が持つ揺らぎは、ボロメータのノイズ由来のもので、ノイズ振幅は実部、虚部共に  $0.5\text{mK} \times \sqrt{2} \times \sqrt{200}$  となる。較正の精度を求めるシミュレーションを行なった。ワイヤ偏光の強度  $1\text{mK}, 10\text{mK}, 100\text{mK}, 1\text{K}, 10\text{K}$  について、8点それぞれの実部、虚部を  $0.5 \times \sqrt{2} \times \sqrt{200}\text{mK}$  の標準偏差を持つガウス分布として200点ずつ生成し、その平均として決定する。8点の重心を計算し、ミラー偏光の測定値とした。測定値の絶対値が強度、偏角の半分が偏光の向きとなる。これを10000回行ったときのミラー偏光の複素数の分布を図3.8に示す。ミラー偏光の測定精度は、誤差伝播の式から

$$\Delta \text{Re}_{\text{mirror}} = \sqrt{8 \left( \frac{\Delta \text{Re}_{\text{ewire}}}{8} \right)^2} = \frac{\sqrt{2} \text{NET}}{\sqrt{t}} \quad (3.3)$$

となる ( $\text{Im}_{\text{mirror}}$  についても同様)。tは合計の観測時間である。アンテナ角度の較正については、ワイヤ角  $0^\circ$  の点からミラー偏光を差し引いた複素数の偏角の半分をアンテナ角度として計算した。アンテナ角度の分布を図3.9、ワイヤ偏光の強度ごとの標準偏差  $\sigma_{\text{angle}}$  を図3.10に示す。図3.9を見ると、角度の測定値の分布はガウス分布となるので、角度の測定誤差は  $\sigma/\sqrt{N}$  となる。Nは測定回数である。このシミュレーションは8点それぞれに1回あたり1秒分のデータを用いているので、仮に偏光強度が  $100\text{mK}$  であれば、合計30秒程度のデータを用いて角度の較正精度  $0.1^\circ$  を達成できることがわかる。実際にはワイヤ自体の角度の測定精度と合わせて  $0.1^\circ$  の精度となるだけの観測時間が要求される。

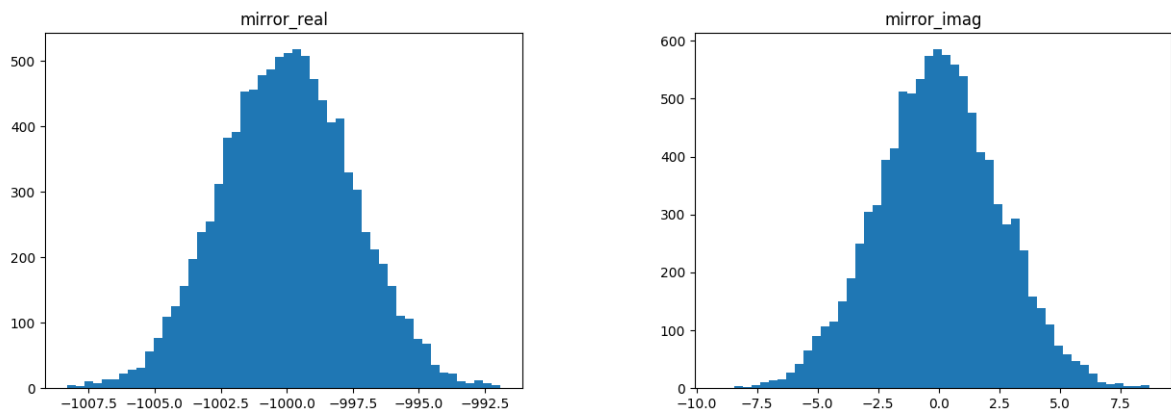


図 3.8 ワイヤ角度を変えた8点の重心として算出した偽偏光の複素数情報の分布。

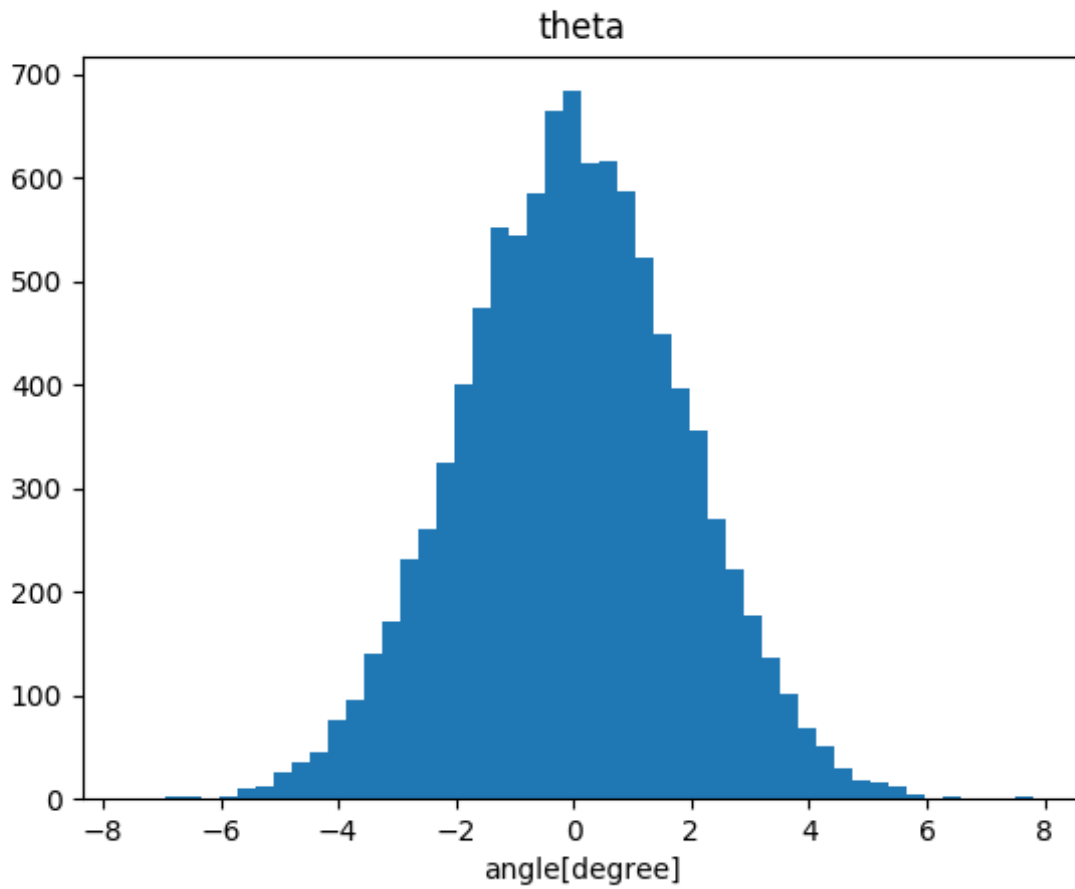


図 3.9 ワイヤの偏光強度が 100mK のときの，アンテナ角度の測定値の分布．分布がガウス分布をしているので，角度測定の精度は  $\Delta\theta = \sigma/\sqrt{N}$  で与えられる．N は測定回数であり，測定 1 回あたり 8 秒分のデータを使う．

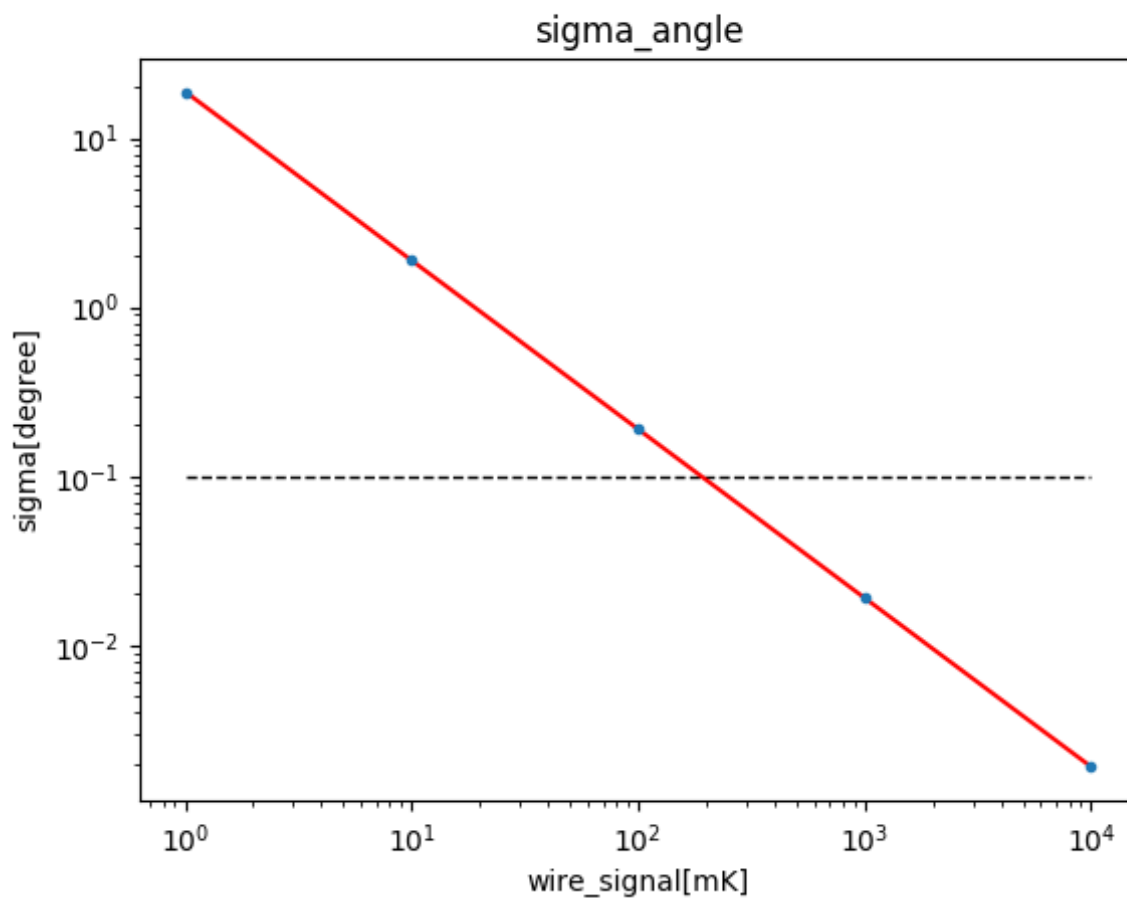


図 3.10 ワイヤの偏光強度を変えた時の，角度の測定値の標準偏差．赤線は  $y = a/x$  でフィッティングした直線．角度の標準偏差は偏光強度に反比例している．

### 3.3 課題

前節より，較正のためにはワイヤがつくる偏光の強度は 100mK 程度は欲しい．しかしながら，その強度は実測によって知る必要がある．また，アンテナ角度較正の精度を与え，CMB 観測の系統誤差を評価するにも実測が必要である．そこで，ワイヤグリッドの性能試験を行うため，SA の望遠鏡に用いることのできる較正装置を製作した．製作した装置について次章で述べる．

## 第4章 望遠鏡POLARBEAR2aのための校正装置の製作

### 4.1 PB2aにおける校正装置の設置位置

PB2aの望遠鏡・検出器の基本構造は2章で述べたとおりであるが、PB2b,cと違い、半波長板は望遠鏡入射窓の外に配置され、電気モーターによって回転する。半波長板を取り付けているフレームを、ワイヤーグリッドを取り付けるのにも利用する。(図4.1,4.2参照)

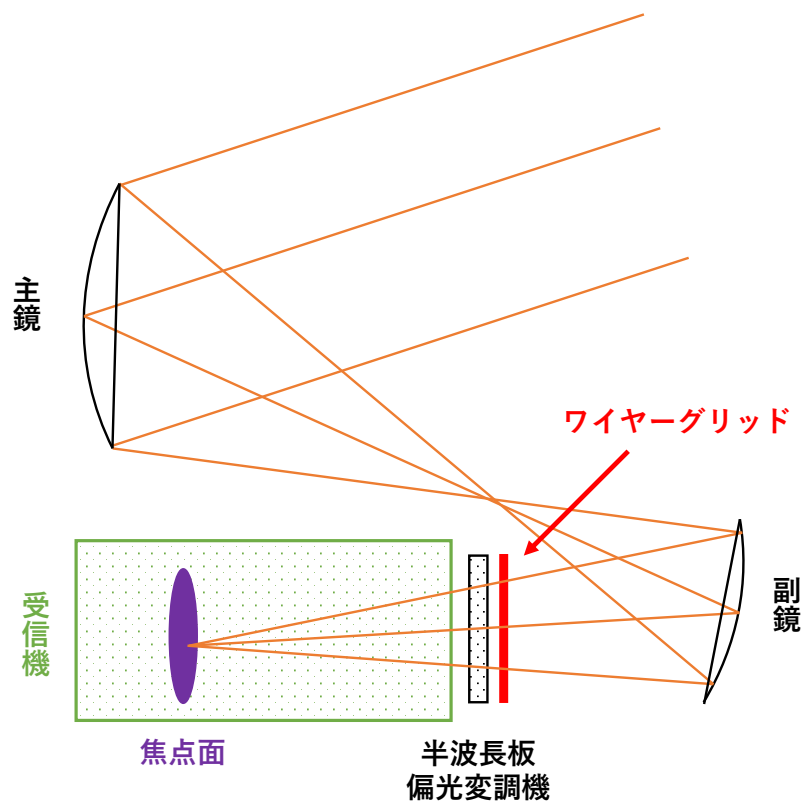


図 4.1 ワイヤーグリッドの取り付け位置。副鏡と半波長板の間に取り付ける。



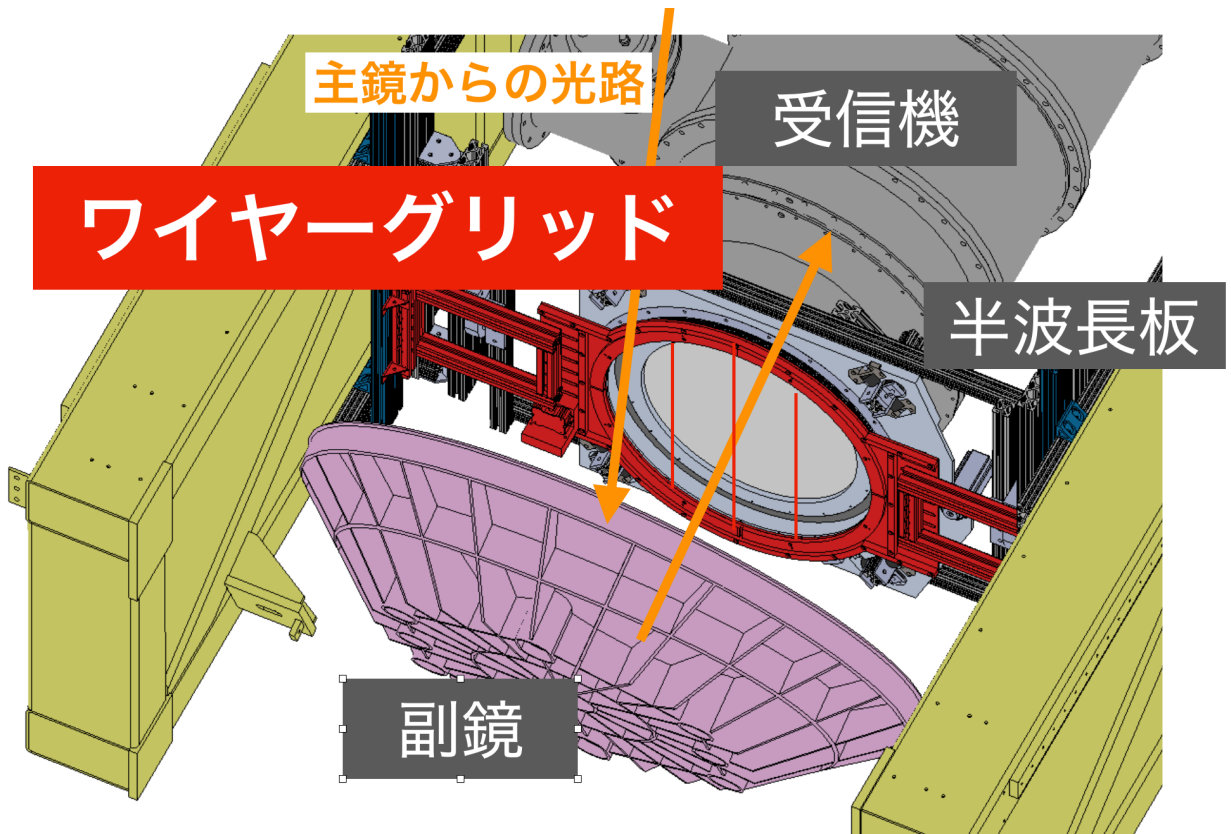


図 4.2 PB2a への取り付けの予定図。半波長板取り付けのためのフレームを利用して取り付け、較正を行うとき以外は外しておく。

## 4.2 較正装置デザイン

### 4.2.1 要求される性能

まず、較正装置に求められる要素を列挙すると、

- 較正に十分な強度の偏光が出せること。
- ワイヤーの角度が変更可能であり、かつその角度が測定できること。
- 取り付け・取り外しが容易であること。

となる。このうち偏光の強度については、前述の通り一本あたりのワイヤーから出る偏光の強度が未知であるため、ワイヤー本数を変えて何種類か製作し、実機で評価する必要がある。

### 4.2.2 デザイン

図 4.3 に装置デザインを示す。今回製作した装置はワイヤーを張ったリングと、そのリングを望遠鏡の前に固定するための治具で構成される。ワイヤーを1本,5本,11本,33本張った4つのリングを製作し、

光の強度を調整できるようにした。リングは治具に取り付ける際、22.5度おきに回転させて取り付けることが可能な構造になっており、反射鏡が作る偏光の分離を可能にしている。取り付ける位置はミラーの奥、半波長板の手前であり、他の部品を外すことなく取り付け・取り外しを行うことができる。

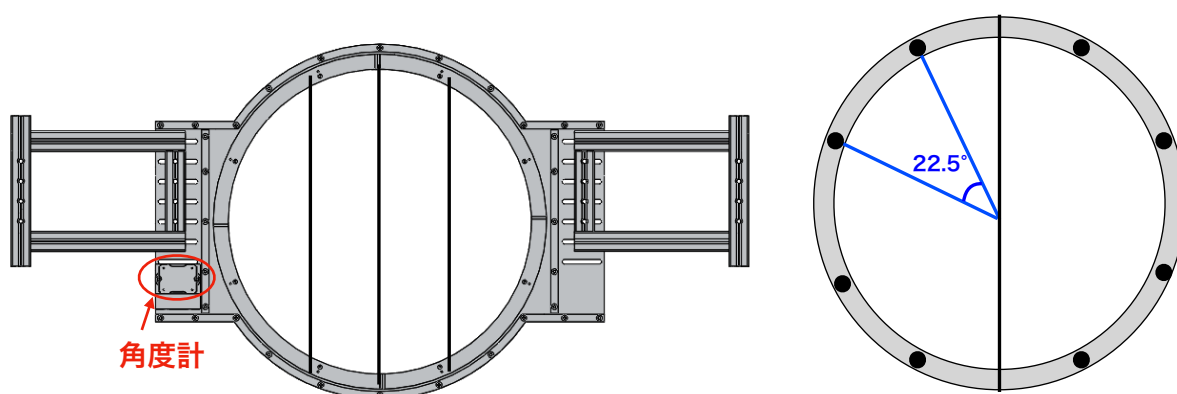


図 4.3 ワイヤグリッドのデザイン。ワイヤーを張る中央部のリングと、それを支える治具でできており、リングと治具は 22.5° おきにあいた穴に位置ぎめピンを差し込むことで取り付けるので、回転させて取り付けることができる。リングはワイヤー本数を変えて 4 種類製作する。

### 4.2.3 角度計

望遠鏡に取り付けた際のワイヤーの角度を測定するため、治具には Degi-pas の角度計 DWL-5000 XY<sup>[14]</sup>(図 4.4) を取り付ける。これは鉛直方向を基準とした角度を 0.03 度の精度で測る。治具およびリングの工作精度と合わせて、ワイヤーの張る角度を 0.05 度以内の精度で決定できる。



図 4.4 Digi-pas の角度計，DWL-5000 XY．ワイヤー治具の水平からの傾きを， $0.03^\circ$  の精度で測定する．

## 4.3 製作

### 4.3.1 フレーム

図 4.3 のように設計したフレームを，アルミニウムを用いて製作した．ワイヤーを張る位置に溝を彫り，ワイヤーの角度精度を高めている．製作後，3次元測定器を用いて，フレームの工作精度を測定した．測定した項目は，

- ワイヤー位置に彫った溝の底面と，角度計のベース（角度計の水平の基準となる）との垂直
- 溝の側面と，角度計のベースとの垂直
- フレーム面の，フレームの両端での平行（たわんでいないか）

の3点である．フレームの製作および精度の測定は株式会社常盤<sup>[13]</sup>に依頼して行った．測定の結果を表 4.1 にまとめる．この結果から，角度計の水平方向とワイヤーの張る向きの垂直からのずれは $0.02^\circ$ 未満であるといえる．

表 4.1 較正装置フレームの工作精度測定結果

測定項目	測定値 (誤差)
溝底面と角度計ベース	0.0015°
溝側面と角度計ベース	0.0164°
フレーム平面両端の平行	0.0032°

### 4.3.2 ワイヤー張り

製作したフレームの、ワイヤーリングに自分達でワイヤーを張る。ワイヤーはタングステン製で、0.1mm 径の単線を用いた。ワイヤーがたわまずに張れるよう、図 4.5 に示すように両端に 100g 程度の重りを用いて張力を保ったまま接着した。エポキシ樹脂接着剤を用いてリングに彫った溝を埋めるように接着し (図 4.6)、接着剤が完全に固まるまで 1 時間ほど重りを吊るしたまま固定した (図 4.7)。ワイヤーが抜けないよう、カプトンテープをワイヤー端に貼り付けた。この工程を、全てのワイヤーリングに対しそれぞれ行った。

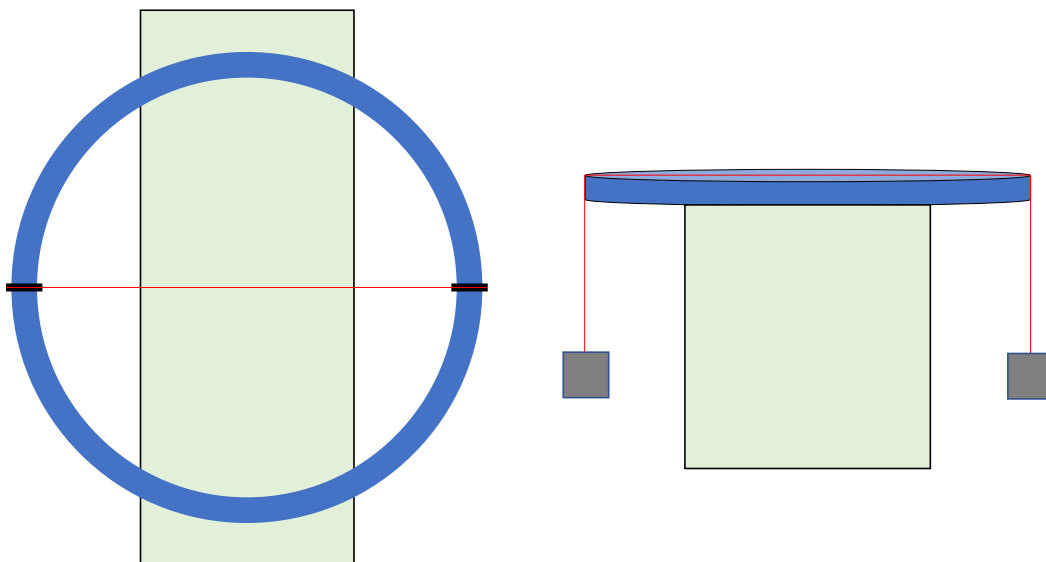


図 4.5 ワイヤ張りの作業工程. ワイヤリングを水平な台に載せ、彫ってある溝に合わせてワイヤを張った. 一定の張力を保つため, ワイヤの両端に 100g 程度の重りを吊るした状態で, 樹脂接着剤とカプトンテープで接着した.

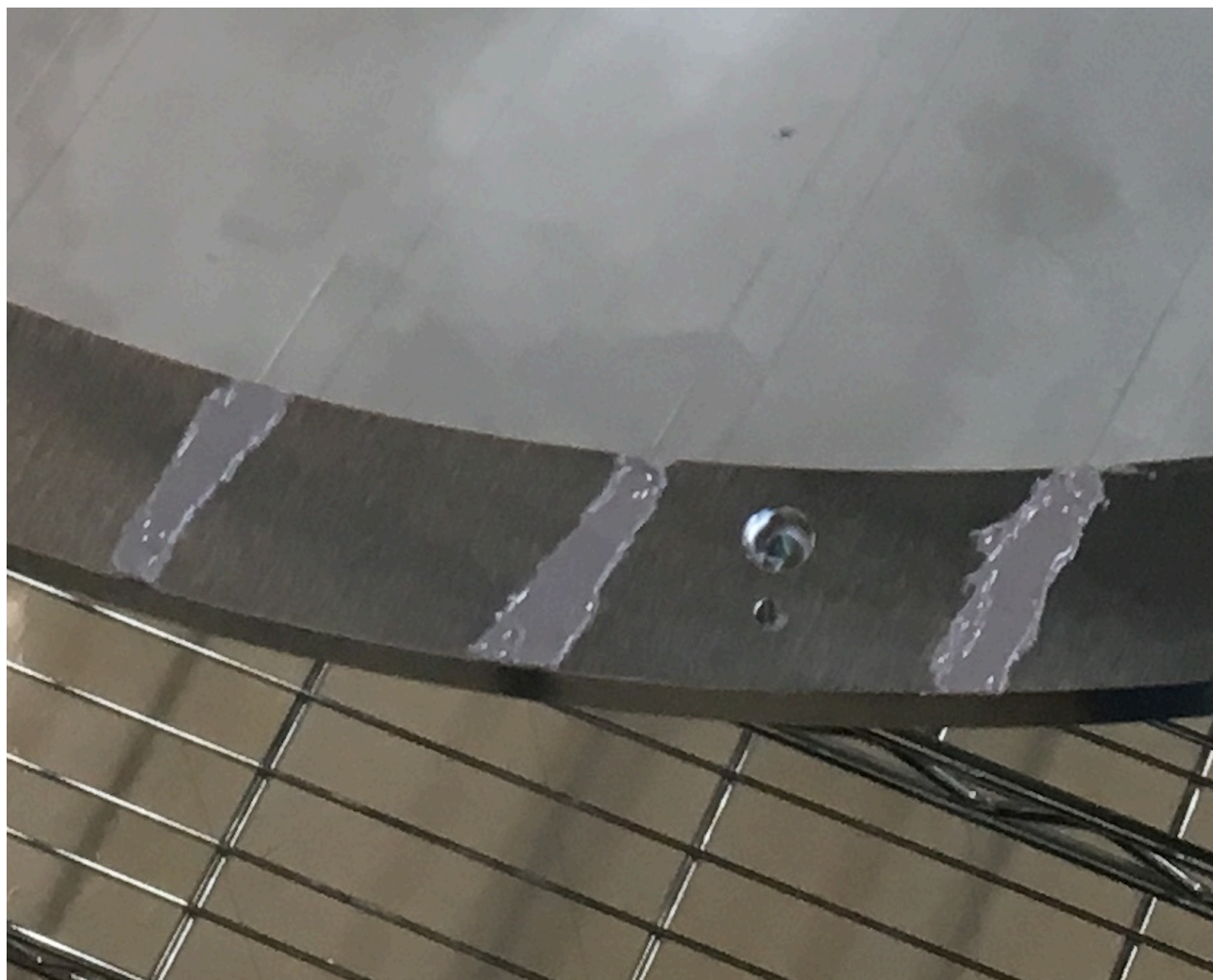


図 4.6 ワイヤの接着部. 溝に合わせてワイヤを張り, 重りで張力を保ちながら, 溝を埋めるようにして樹脂接着剤で貼り付ける.



図 4.7 ワイヤー張りの作業。写真下部の小さな金属杭が重りであり、約 100g である。樹脂が固まるまで重りを吊るしたまま固定した。

### 4.3.3 完成品

実際に製作したのが図 4.8,4.9 である。製作した較正装置の仕様を表 4.2 にまとめる。

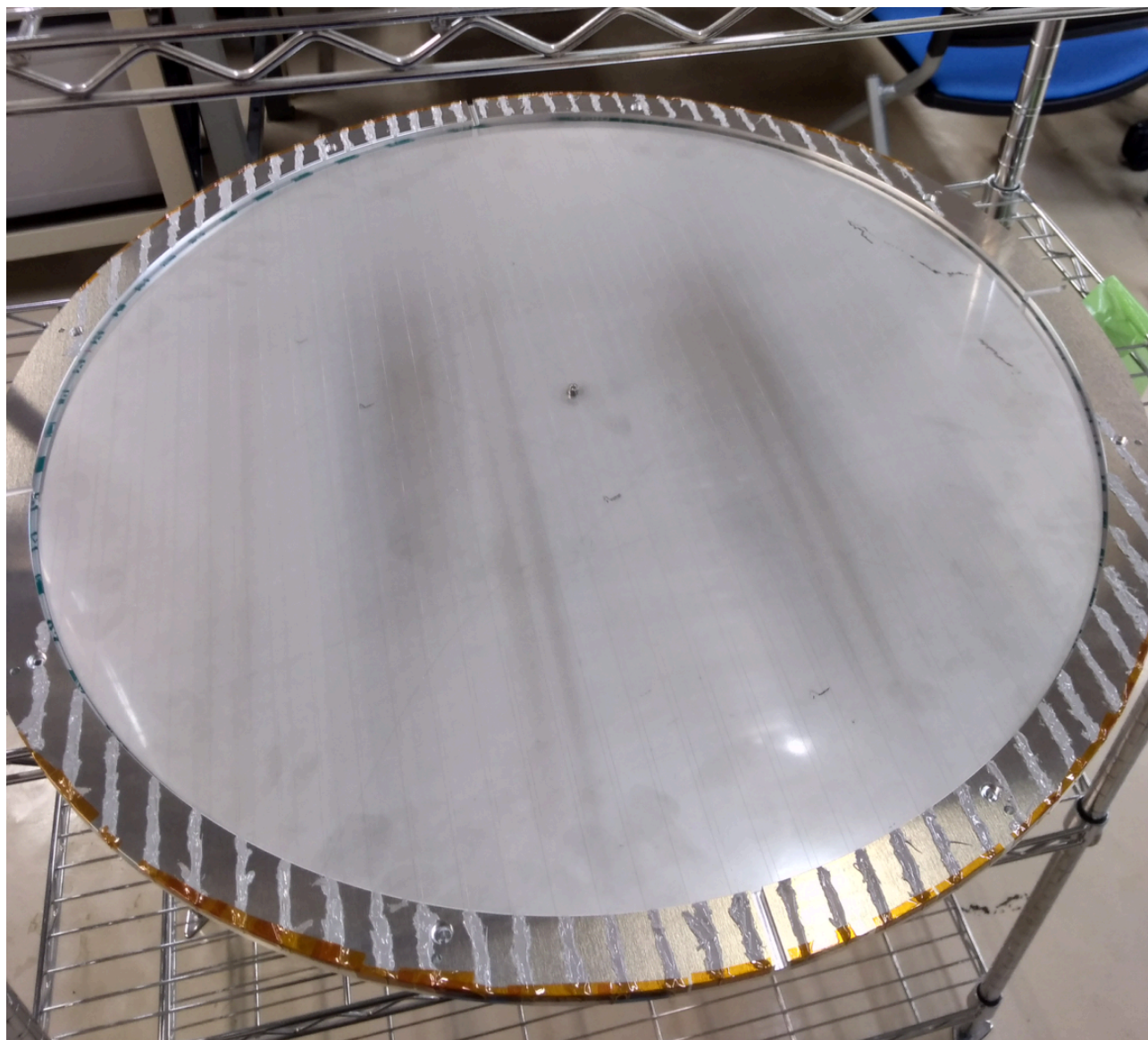


図 4.8 ワイヤーリング. 33本のワイヤーを張ったもの. 各ワイヤーを張る位置には溝を彫っており, 角度精度を高めている. ワイヤーには0.1mm径のタングステンを用いた. ワイヤーはエポキシ樹脂接着剤とカプトンテープで貼り付けている.





図 4.9 ワイヤーリングを望遠鏡の視野に固定する治具。リングとは位置ぎめピンによって組み合わされ、その際リングを回転させてつけることが可能になっている。

表 4.2 較正装置の仕様

ワイヤー材質	タングステン
ワイヤー直径	0.1mm
ワイヤーの可変角度	22.5° ごと
ワイヤー本数	1,5,11,33 本
フレーム材質	アルミニウム
ワイヤーリング内径	608.60mm
ワイヤー角度の測定精度	0.05°

## 第5章 PB2a を利用した較正の原理検証

この章では、製作した較正装置を使って行った、PB2a による較正原理の検証について述べる。

### 5.1 データ取得

PB2a は現在テスト観測段階にあり、2020 年 1 月現在、半波長板はまだ望遠鏡上に実装されていない。本研究で開発した較正装置の精密評価は、半波長板なしには行えない。そこで、今現在でできることとして、手でワイヤーを回転させることで、較正信号が観測できることの実証を行った。

#### 5.1.1 検証の概要

半波長板が実装されていない現状では、3 章に示したような偏光変調は起こらず、設計通りにワイヤーグリッドを設置してもワイヤーが作る偏光は無偏光信号と区別がつかなくなってしまう。そこでワイヤー自体を回転させることで、偏光信号に変調を生じさせる。受信機内のある一つの検出器が感じるワイヤー由来の電場強度  $I$  は、

$$I \propto \cos^2(\theta_w - \theta_a) \quad (5.1)$$

となる。ここで、 $\theta_w$  はワイヤーの角度、 $\theta_a$  はアンテナの角度である。

#### 5.1.2 検証の方法

以下の手順に沿って、ワイヤーグリッドの原理検証を行った。(図 5.1)

1. 望遠鏡は空の一点、星などを見ないような角度に向けて静止させておく。
2. ワイヤーリングを手で持ち、望遠鏡入射窓の前にかざす。
3. ワイヤーを垂直方向から  $\pm 45^\circ$  の範囲で回転させる。5.2 この時、回転の速度は 1Hz 程度とする。
4. ワイヤーの本数を 11 本、33 本と変えて、1-3 の行程を 2 度行う。

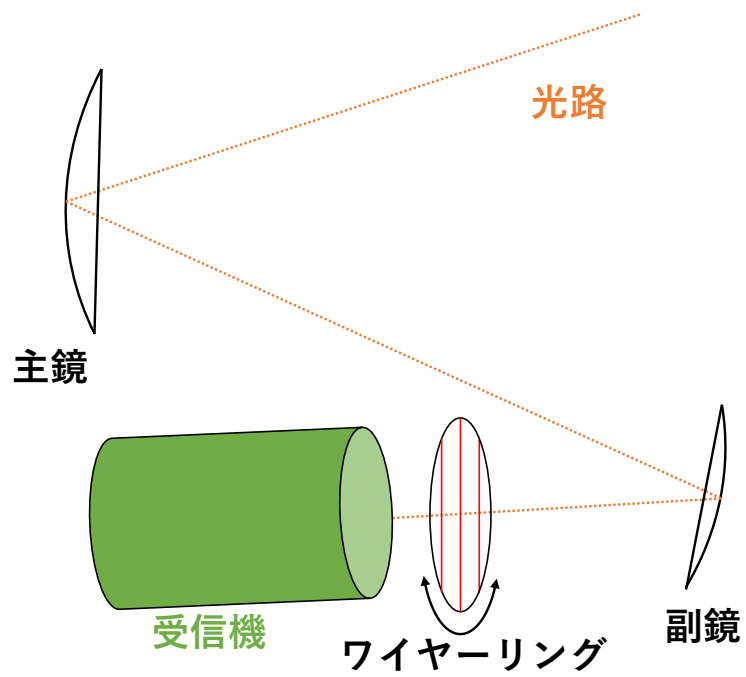


図 5.1 ワイヤーグリッド試験の模式図. 望遠鏡の受信機前に掲げたワイヤーリングを手で回転させ, 偏光信号の変調をみる.



図 5.2 ワイヤを望遠鏡の眼前で回す。手などがある程度望遠鏡の視界に映り込むが、このノイズは無偏光の熱放射であるので、回転で変動する偏光信号と見分けることができる。

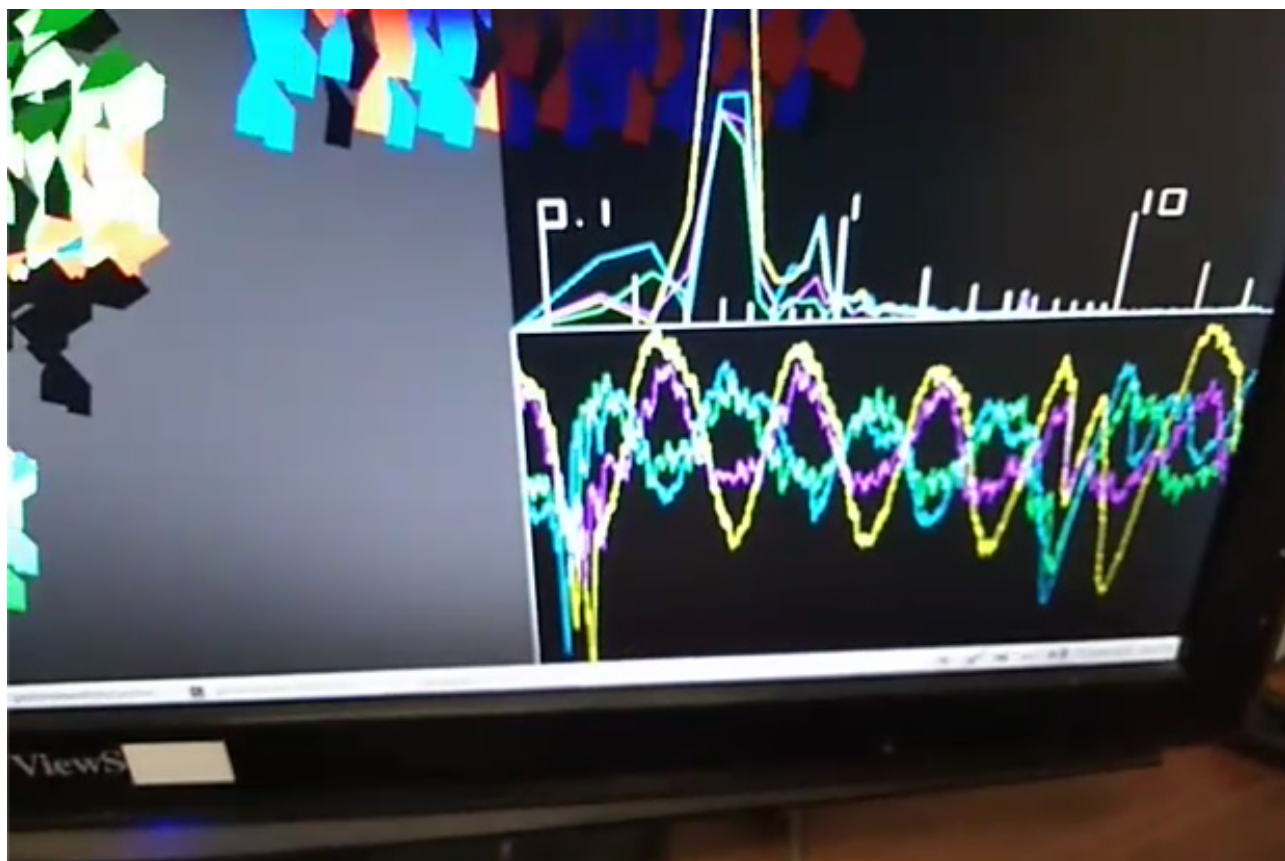


図 5.3 観測サイトのイベントディスプレイで確認した，ワイヤー回転による信号の変動．  
検出器ごとのアンテナ角度の違いが振動の位相の違いとして見えている．

## 5.2 想定される信号

今回の検証内容では，ワイヤーは連続的に回転させたのではなく， $\pm 45^\circ$  の範囲を往復させたので，信号強度の時間変化は正弦波になるとは限らない．図 5.4 に，いくつかのアンテナ角度に対応して予想される信号の形を示す．実際に得た時系列データがこのような変化をしていれば，ワイヤーの偏光は検出器に見えていることが確認できる．

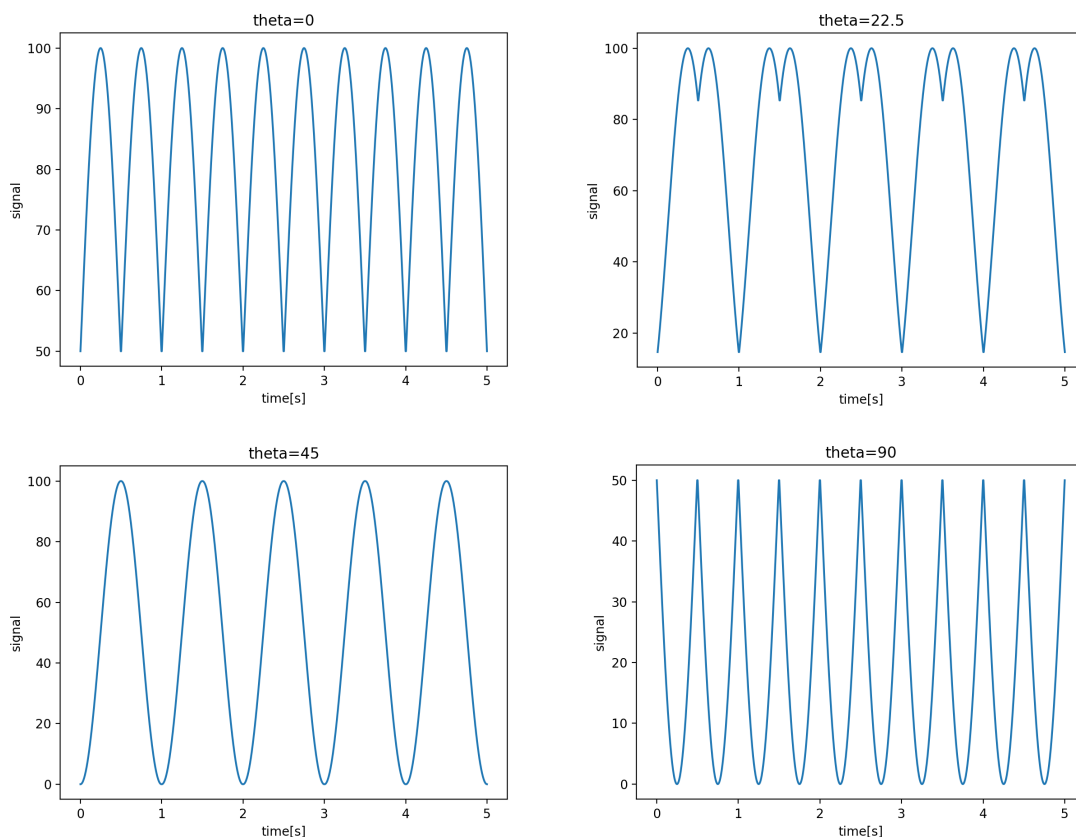


図 5.4 アンテナ角度が垂直から 0, 22.5, 45, 90 度であった場合について、この実験で想定される偏光信号の時間変化のシミュレーション。ワイヤー角度を一定区間で振動させたので、信号は正弦波を途中で折り返した形になる。アンテナ角度が  $\pm 45$  度の場合にはちょうどよく正弦波の形として見える。

### 5.3 解析

解析は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の計算機, KEK-CC 上で行なった。SA では, 多重読み出し系の回路は McGill 大学を中心に開発されている [15]。読み出し系の制御, およびデータ取得や解析を行うためのソフトウェアが回路とともに実装されており, PB2a の観測データはこのソフトウェアが定める形のデータ, 3G ファイルとして取得・保存される。[16] 3 G ファイルという名前は, 同じく McGill 大学が DAQ を担当する南極の CMB 実験 SPT-3G と統一されたデータフォーマットであることに由来する。このファイルを読み込んで解析するため, KEK-CC 内で SA コラボレーターに使われているライブラリを用いた。各ボロメータごとの測定値と, 時間情報を観測データから読み込み, ボロメータの時系列データをプロットした。なお, 時間情報を読み込む際, 時刻の値は 10ns を 1 とする unixtime で保存されており, UTC に変換するために  $10^8$  で割ってやる必要があった。

得られた時系列データを図 5.5 に示す。y 軸の arb. unit は ADC カウントに相当する量である。振動

する信号が見えていることから、ワイヤーグリッドが偏光を発生し、検出器にそれが見えていることがわかる。また、信号の変動が1Hz程度であることや図5.4の形と見比べて、この検出器のアンテナ角度は垂直から $22.5^\circ$ に近いと考えられる。ワイヤーの偏光の強度は、33本のワイヤーで95Hz帯において約1300mKであることが別途行った測定データによってわかった。3章で述べた通り、偏光強度が100mK以上あれば短い時間での較正が可能であるので、要求する角度較正精度を達成するには3本以上のワイヤーを張る必要があり、その実現は容易であることを実証した。

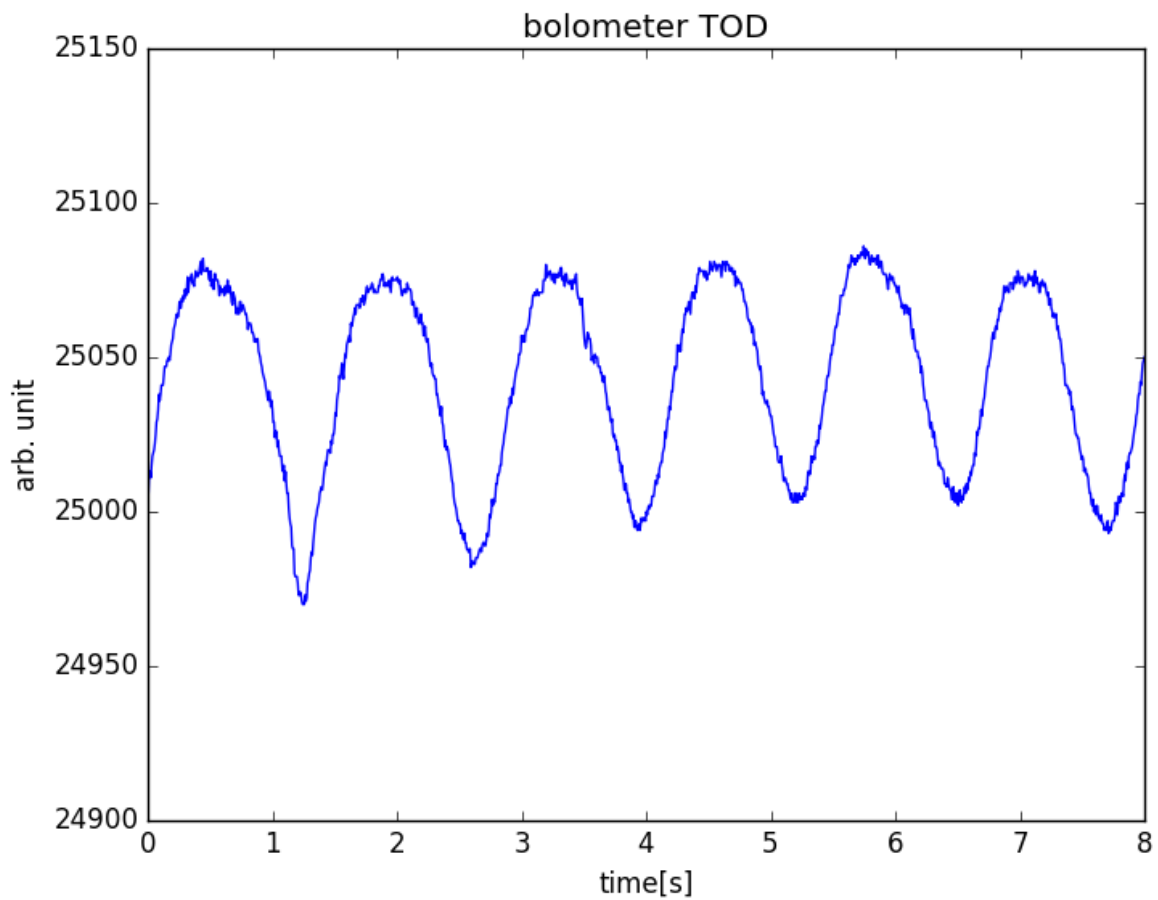


図 5.5 ワイヤー 11 本で行った Run の、あるボロメータの時系列データ。約 1Hz で振動する、ワイヤーによる偏光信号が見えている。

## 第6章 まとめ

CMBの偏光観測は、原始重力波の観測によるインフレーション理論の検証、重力レンズ効果の精密観測によるニュートリノ質量和の測定など、様々な新物理を探る強力なプローブであり、現在、多くのプロジェクトが高性能な望遠鏡を用いたCMB偏光観測に乗り出している。

新物理が最も期待されるのは、空間反対称な偏光パターンのBモードであるが、空間対称なパターンであるEモードや無偏光信号のゆらぎに比べて非常に弱い信号であるため、Bモードでない信号をBモードと見誤るクロストークを最大限取り除く必要がある。とくに大口径CMB望遠鏡においては、

- 検出器のアンテナ角度の較正精度。
- 反射鏡の反射率が100%でないことに起因する無偏光 → 偏光のクロストークの較正精度

が重要である。

本研究ではワイヤーを偏光源として用いて、偏光の角度較正を行う較正装置「ワイヤーグリッド」を開発した。この装置は、ワイヤーの設置角度を可変とすることで反射鏡の偽偏光を分離でき、そして設置角を精密に測定してアンテナ角度を高い精度で較正できる。まず、モンテカルロシミュレーションによって較正信号の強度と較正精度の関係を調べた。そしてアンテナ偏光角の較正精度  $\Delta\theta < 0.1^\circ$  を達成するにはワイヤーの偏光信号強度が100mK以上という要求を明らかにした。

ワイヤーが作る偏光の強度などの未知のパラメータを調べるため、また実際に角度較正を行なって角度較正の精度を確かめるために、テスト観測段階にあるSimons Array望遠鏡のための較正装置を製作した。ワイヤー偏光強度が未知であることに対応するため、張るワイヤーの本数を変えたものを4パターン(1本, 5本, 11本, 33本)製作した。

ただしSimons Arrayは、偏光変調機である半波長板が実装される前段階にあった。そこで半波長板がなくとも行える性能試験として、望遠鏡の眼前でワイヤーを手動で回転させることで偏光源としての機能を検証する試験をチリ・アタカマ高地の観測サイトにて行った。

結果、製作したワイヤーグリッドは最大1K以上の強度の偏光を発生し、1分程度の短時間の観測で偏光角度の較正を行うには、ワイヤー本数3本以上のワイヤーグリッドで要求する性能をみたすことを確認した。



## 謝辞

2年間研究を行う上で、多くの方のお世話になりました。この場を借りてお礼を申し上げます。

指導教員である田島治准教授には、このテーマで研究を行う機会をいただき、研究を進めるにあたってあらゆる場面で多くの助言をしていただいたのみならず、修論執筆が遅々とする自分を絶えず叱咤激励していただきました。自分のいい加減さで迷惑や心配をかけ、申し訳なく思うことも多くありましたが、根気強く指導してくださったおかげで修士論文を書き上げることができました。

ポストクの安達俊介さんには、装置のデザイン・製作からチリでのデータ取得まで、多くの場面で一緒に議論や作業をしていただき、解析で詰まった時にはアドバイスもいただきました。

Simons Array コラボレーションの皆様にはミーティングやチリでの生活でお世話になりました。PB2aの望遠鏡にHWPが実装され、このワイヤーグリッドが日の目を見るのを祈っています。

京都大学高エネルギー物理学研究室の皆様にも大変お世話になりました。コロキウムでの議論からコーヒブレイクでの雑談まで、実験の垣根を超えて刺激し合いつつ、のびのびと研究に向かえる居心地のよい環境に恵まれたと実感しています。中家剛教授をはじめとする教員の皆様には、学部生の頃から授業やゼミ、実験で物理学の基礎を教えてくださいました。ポストク・学生の先輩方には種々の装置の使い方や研究の心構えを教えてください、また学会発表などに際してはスライドや原稿にアドバイスをいただきました。同期の池満くん、小田川くん、栗林くん、田島くん、羽田野くん、三野くんとは下らない話をすることも多かったですが、おかげで楽しい2年間でした。

CMBグループの鈴木さん、本多さん、小峯さん、大塚くん、末野くんにはグループミーティングで研究の相談に乗っていただき、また宇宙論ゼミでの議論を通して、CMB観測への理解を深めることができました。

高エネルギー加速器研究機構が行うOzaki Exchange Programの支援を受けて、Lawrence Berkeley National Laboratoryにて3ヶ月間、CMBグループの研究に参加し、貴重な経験をさせていただきました。supervisorであった日下暁人准教授や研究員のPeter Ashton氏をはじめとして、LBNL CMBグループの皆様には不慣れな地での研究でたくさんの指導と手助けをいただきました。Berkeleyでの生活では、先輩研究者である茅根さん、高取さんに食事やイベントに連れて行っていただき、充実した日々を過ごすことができました。

皆様の支えのおかげで研究を楽しく進め、修士論文という形にまとめることができました。ありがとうございました。

最後に、生活を経済的に支え、よくわからないであろう研究を暖かく見守ってくれた両親に感謝しています。

## 参考文献

- [1] Planck collaboration. Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck. arXiv:1807.06205. 2018 <https://arxiv.org/abs/1807.06205>
- [2] K. Sato, First-order phase transition of a vacuum and the expansion of the Universe. Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 195, 467. 1981.
- [3] Planck collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. arXiv:1807.06209. 2018 <https://arxiv.org/abs/1807.06209>
- [4] Keck Array, BICEP2 Collaborations. Constraints on Primordial Gravitational Waves Using Planck, WMAP, and New BICEP2/Keck Observations through the 2015 Season. Phys.Rev.Lett.121, 221301 (2018).
- [5] 小峯 順太. CMB 偏光観測実験 GroundBIRD で用いる真空窓の開発研究. 2018
- [6] S.Takakura . Characterization of a continuous polarization modulator using a half-wave plate for measurements of degree-scale cosmic microwave background with the POLARBEAR experiment. 2017 <https://doi.org/10.18910/67054>
- [7] Y.Inoue *et al.* POLARBEAR-2: an instrument for CMB polarization measurements, arXiv:1608.03025v1, 2016 <https://arxiv.org/abs/1608.03025v1>
- [8] A.Suzuki *et al.* The POLARBEAR-2 and the Simons Array Experiment. arXiv:1512.07299, 2015 <https://arxiv.org/abs/1512.07299v1>
- [9] D. Barron. Development and characterization of the readout system for POLARBEAR-2. Proc. SPIE 9153 (915335), 2014 <https://arxiv.org/abs/1410.7488v2>
- [10] K.Hattori. 宇宙マイクロ波背景放射観測実験 POLARBEAR-2 のための TES ボロメータアレイ読み出しの開発. 2014 <https://doi.org/10.2221/jcsj.49.417>
- [11] C.A.Hill *et al.* A large-diameter cryogenic rotation stage for half-wave plate polarization modulation on the POLARBEAR-2 experiment. arXiv:1805.10403v1. 2018 <https://arxiv.org/abs/1805.10403>

- [12] M.Hasegawa, O.Tajima *et al.* Calibration System with Cryogenically-Cooled Loads for CMB Polarization Detectors. arXiv:1102.4956, 2011 <https://arxiv.org/abs/1102.4956v3>
- [13] 株式会社常盤. <https://tokiwa1983.co.jp/>
- [14] Degi-pas. 角度計 DWL-5000 XY <http://www.digipas.co.jp/product/2-axis-inclination-sensor-module/dwl-5000.php>
- [15] Amy N. Bender *et al.* Digital frequency domain multiplexing readout electronics for the next generation of millimeter telescopes. arXiv:1407.3161. 2014 <https://arxiv.org/abs/1407.3161>
- [16] Reference of SPT3G software. [http://bolo.berkeley.edu/nwhitehorn/spt3g\\_docs/index.html](http://bolo.berkeley.edu/nwhitehorn/spt3g_docs/index.html)

## 付録A Simons Observatory 望遠鏡の半波長板システムの製作

ここでは、SA に続く次世代実験、Simons Observatory 望遠鏡の一つ、SAT-2 のための半波長板システムに関して行った製作について紹介する。SAT-2 の半波長板の回転システムは基本的に、2章で紹介した PB2b,c と同様である。2章で述べたように、半波長板を載せる Rotor は超伝導転移温度まで冷却することで、浮遊および軸受を可能にしている。しかし、冷却前の Rotor は常伝導状態であり、その間は機械的な支えによって Rotor の位置を Stator からわずかに浮いたところに留めておき、かつ転移温度まで冷却したのちにその支えを外してやる必要がある。これを実現するのが、"gripper" と呼ばれる機構である。図 A.1 に示すように、Rotor を定位置に固定するための治具を、低温槽の外部、常温部にある動力によって制御する。この常温の動力と治具をつなぐ部品を作成した。断熱性の樹脂でできた円筒と、力を滑らかに伝えるための蝶番関節を、樹脂接着剤で接続した。樹脂の円筒は真空中に配置されるため、内部を密閉しないよう穴を開けてある。作成したものを図 A.2 に示す。この後、円筒側面に熱放射の反射材テープを貼り付けた。

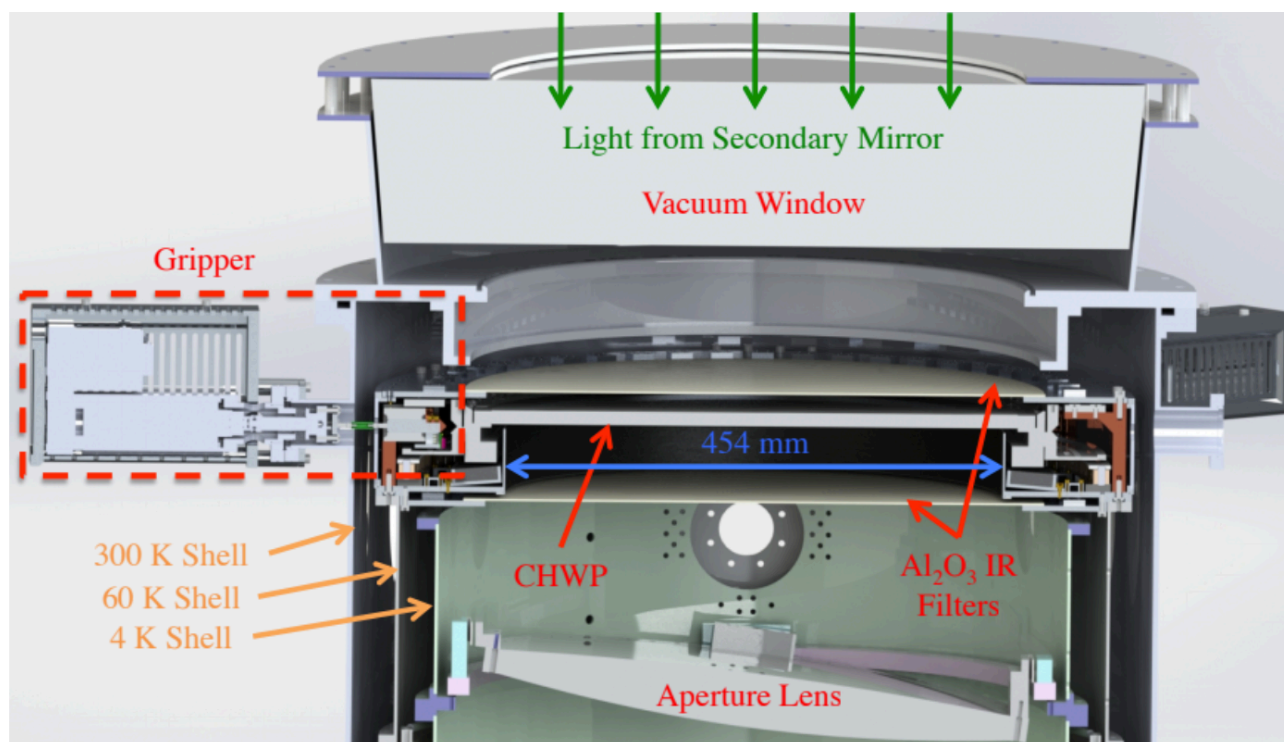


図 A.1 gripper の構造図。常温部にある動力と治具をつなぐ腕を作成した。



図 A.2 作成した部品. 断熱性の樹脂でできた円筒と, 力を滑らかに伝えるための蝶番関節を, 樹脂接着剤で接続した.