### 修士論文

## CMB 偏光の精密観測にむけた遠隔較正システム Sparse Wire Grid Calibrator の開発研究

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二分野 高エネルギー物理学研究室

中田 嘉信

2022年1月26日



宇宙マイクロ波背景放射(CMB)には、宇宙創成から現在に至るまでの非常に多くの物理 の痕跡が残されている。全天におけるその強度の角度相関の分析により、宇宙の70%が未解 明のダークエネルギーで満たされ、さらに25%もの正体不明の物質ダークマターがある事が 明らかになった。そして、CMB 偏光の大角度相関の精密観測によって、私たちはインフレー ションという宇宙初期の加速膨張の謎に迫ろうとしている。Simons Observatory 実験は海 抜 5200 m のチリ・アタカマ高地において、2023年から CMB 観測を開始するプロジェクト である。複数台の望遠鏡を用いて世界最高感度での CMB 偏光観測を行う。そこで用いる3 台の小口径望遠鏡は、大角度スケールの CMB 観測に最適化しており、各々の焦点面に約一 万個もの超伝導検出器 TES を搭載する。インフレーション宇宙の検証のためには、検出器に 搭載されるアンテナの向き=偏光に感度のある方向(偏光角)を0.1°度以下という高精度で 較正しなければならない。この要求を達成するために、検出器の偏光角応答を較正する装置 Sparse Wire Grid Calibrator の開発を行った。

Sparse Wire Grid Calibrator は複数のワイヤーによって周辺からの熱放射の光を反射さ せることで、人工的に偏光信号を作り出す。金属ワイヤーの張られている方向が偏光方向に なる。系統誤差の低減のためには、全てのワイヤー角方向に対する検出器の応答を理解する 必要がある。直径1mのリング上にワイヤーを平行に張り、リングの外周の位置を25µmと いう非常に高い精度でモニターするエンコーダシステムを構築し、0.003°精度でワイヤーの 方向を把握できる制御系を実現した。さらに、較正を効率的に行うためにワイヤーグリッド の方向を1°精度で回転制御するシステムも開発した。

高い頻度で較正を行うことで、時間変動しうる系統誤差も抑制できる。高頻度で較正する ためには較正時と CMB 観測時で Sparse Wire Grid の位置を変える(望遠鏡から出し入れ する)動作を自動で迅速におこなう必要がある。そのために遠隔操作で Sparse Wire Grid を 出し入れできるロボット機構を開発した。また観測サイトであるアタカマ高地は、極めて乾 燥している上に、大きな気温変化(-20°C~20°C)と強い紫外線という極限状態に晒されて いる。そこで耐候性に優れた機器を選定した。構築した装置とそのコントロールソフトウェ アを統合した実験室試験を行った結果、Sparse Wire Grid の出し入れにかかる時間は3分程 度と評価できた。これにより、CMB 観測時間を大幅に損なうことなく、高頻度で較正が行え ることを確認した。

現在、本観測に用いられる受信機の性能試験が米国で実施されている。本研究で開発した Sparse Wire Grid Calibrator を用いてその偏光応答性能の評価試験を行った。そして、その 遠隔制御によって、検出器応答の時系列データとワイヤー角の情報から検出器の偏光角を較 正できることを確認した。

# 目次

<b>第</b> 1章	CMB <mark>偏光観測</mark>	3
1.1	ACDM 標準宇宙モデルとインフレーション宇宙	4
1.2	CMB パワースペクトル	7
1.3	本論文の構成...................................	12
<b>第</b> 2章	Simons Observatory 実験と原始重力波検出に向けた課題	14
2.1	Simons Observatory 実験	14
2.2	Small Aperture Telescopse (SAT)	15
2.3	原始重力波検出に向けた課題	18
2.4	偏光角の較正手法	19
<b>第</b> 3章	Sparse Wire Grid Calibrator による偏光応答の較正原理と要求	23
3.1	偏光信号の生成原理	23
3.2	偏光角較正の原理	23
3.3	Sparse Wire Grid Calibrator の概要	28
3.4	角度制御にかかる要求	30
第4章	ワイヤーグリッドの回転制御	35
4.1	ワイヤーの回転角モニタ	35
4.2	回転の Feedback 制御	40
第5章	観測と較正を切り替えるロボット機構の開発	44
5.1	CMB 観測モードと望遠鏡の較正モードの切り替え	44
5.2	Grid Loader の機械的特性	46
5.3	Grid Loader の耐荷重試験	49
5.4	制御ソフトウェア開発	51
5.5	ロボット機構の統合試験.................................	52
第6章	CMB 受信機との統合試験	55
6.1	シカゴ大学での光学試験セットアップ...............	55
6.2	データ解析	56

第7章	まとめと観測にむけた展望	59
参考文献		61
付録 A	ストークスパラメータ	64

### 第1章

## CMB 偏光観測

宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background, CMB)の周波数スペクトルは 黒体放射の理論モデルで非常にうまく説明できる(図 1.1)。CMB は理論的にその存在が確 立するのと時を同じくして 1964 年のベル研究所で偶然観測された。発見者の Arno Penzias と Robert W. Wilson はこの功績を讃えられ、二人にはノーベル物理学賞が与えられた。そ の後、CMB は数多くの地上実験・衛星実験によってその詳細が調べられ、現在ではその偏光 の模様からインフレーション宇宙の様子さえわかると期待されている。本論文は、CMB 偏 光観測によってインフレーション期の宇宙像を知ろうという野心的な研究目標の達成に向け た、較正装置の開発について記述する。



図 1.1: COBE 衛星に搭載された FIRAS という分光計によって測定さ れた CMB の強度の周波数分布 [1]。各曲線は黒体放射の理論曲線を表 し、2.725 K の黒体放射がよくデータを説明していることが見てとれる。 データ点にのっているエラーバーは 100 倍に拡張してある。

### 1.1 ACDM 標準宇宙モデルとインフレーション宇宙

CMB の説明に入る前にまず、現在の標準宇宙モデルとして ACDM モデルを取り上げる。 一様等方宇宙において Einstein 方程式は以下の Friedmann 方程式に書き下すことができる。

$$H^{2} \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^{2} = \frac{8\pi G}{3} \sum_{\alpha} \rho_{\alpha} + \frac{\Lambda}{3} - \frac{K}{a^{2}}$$
(1.1.1)

aはスケール因子で宇宙の大きさを表し、 $H = \dot{a}/a$ は Hubble 定数、 $\Lambda$ は宇宙定数、Kは宇宙の曲率を表す。また  $\alpha$ は物質の各成分(主な興味の対象として暗黒物質、バリオン、光子、 ニュートリノがある)を示し  $\rho_{\alpha}$ が各成分のエネルギー密度である。Friedmann 方程式は臨



図 1.2: Planck 衛星によって得られた宇宙のエネルギー組成。身の回り にある 5 %の物質を除いて、宇宙はそのほとんどが正体の解明されてい ないもので占められている。

界密度  $\rho_c = 3H^2/8\pi G$  で規格化することで各成分に対する宇宙のエネルギーシェアを与える (図 1.2)。

$$1 = \Omega_{\rm CDM} + \Omega_{\rm B} + \Omega_{\gamma} + \Omega_{\nu} + \Omega_{\Lambda} + \Omega_K \tag{1.1.2}$$

これまでの観測結果から [2]、宇宙は平坦(K=0)である考えられている。

ACDM モデルには 3 つの大きな未解決課題がある。まず、なぜ CMB はどの方向を向い ても 1 mK もの精度で黒体放射の分布と一致しているのか、という点である。初期宇宙にお いて、因果関係を持たなくなった方向から届く放射が非常に高い精度で一致するという最も 大きな謎である。次に、現在の宇宙はその曲率がゼロに近い、つまり限りなく平坦に見える 点である。初めから宇宙というものが平坦であったのかもしれないが、宇宙の揺らぎの成長 スピードと同程度で発展してきたとすると、微調整されすぎているように思えるわけである。 最後は、磁気単極子(モノポール)が私の身の回りでは観測されていない、という点である。 素粒子の標準模型を超える理論モデルはしばしば磁気モノポールの存在を予測するが、現在 の観測においてその確固たる証拠は見つかっていない。それぞれ宇宙論における「地平線問 題」「平坦性問題」「モノポールの観測問題」と呼ばれている。これらを解決する有力な理論模 型がインフレーションである。インフレーションは小さな空間を非常に大きなスケールに引 き伸ばすことによって、因果構造の保てる範囲を広げ、限りなく空間を平らにし、モノポー ルの濃度を薄めることができる。

インフレーションモデルにもポテンシャルの形やそれを駆動する場の種類によって様々 なバリエーションがある [3]。インフレーションを駆動する場として最も単純な仮定は、宇 宙初期におけるインフラトンと呼ばれる単一のスカラー場  $\phi$  を導入することである。こ こでは多くのモデルが共通してもつスローロールによって予言されるインフレーションポ テンシャルの性質を観測可能量に照らし合わせて概観する。インフラトンの運動方程式は  $\mathcal{L} = -(\phi_{,\mu}\phi^{,\mu})/2 - V(\phi)$ より Euler-Lagrange 力学に従って

$$\Box \phi - \partial_{\phi} V = -\ddot{\phi} - 3H\dot{\phi} + \nabla^2 \phi - \partial_{\phi} V = 0$$
(1.1.3)

とかける。ここで、インフレーション期の宇宙が一様等方かつ桁違いに大きく膨張し続け る条件として、ポテンシャル V(φ) の時間的変化が十分に小さいという仮定(スローロール 条件)

$$\left|\frac{\dot{\phi}^2}{V}\right| \ll 1, \quad \left|\frac{\ddot{\phi}}{H\dot{\phi}}\right| \ll 1 \tag{1.1.4}$$

を置くことにする(また空間的変化についても十分に小さいと仮定する)。スカラー場が支配 的である時、Friedmann 方程式(1.1.1)とスケール因子の時間発展は

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho_\phi \approx \frac{8\pi G}{3}V(\phi) \tag{1.1.5}$$

$$\dot{H} = -4\pi G \left(\rho + p\right) = -4\pi G \dot{\phi}^2 \tag{1.1.6}$$

となり、これらよりインフレーションによる指数膨張の肩が

$$a \propto e^{\mathcal{N}}$$
 (1.1.7)

$$\mathcal{N} \equiv \int_{t_i}^{t_f} H \mathrm{d}t \approx -\frac{8\pi}{m_{pl}^2} \int \frac{V}{\partial_{\phi} V} \mathrm{d}\phi \qquad (1.1.8)$$

と評価できる  $(m_{pl}^2 \equiv G)$ 。宇宙の熱史によって  $\mathcal{N}$  は様々な値をとるが、典型的には 50  $\leq \mathcal{N} \leq 60$  であるとされている。インフレーション理論は初期宇宙の揺らぎの生成と成長 に対し観測可能な予言を与える。このインフレーション中におけるテンソル型の摂動  $\mathcal{P}_T$  が まさしく原始重力波である。テンソル・スカラー比の他にも、スカラー型の揺らぎによる角 度相関の周波数依存性  $\mathcal{P}_S \propto k^{n_S}$  の指数  $n_S$  に対する予言も合わせ、インフレーション理論 は多くのモデルを精査することが可能である。

特に数多くの CMB 観測実験が、インフレーション中におけるテンソル型の摂動とスカ

ラー型の摂動の比 [tensor-to-scalar ratio, 式 (1.1.9)]の精密測定を目指している\*1

$$r \equiv \frac{\mathcal{P}_T}{\mathcal{P}_S} \sim 10^{12} \frac{V(\phi)}{m_{pl}^4} r_{0.002} < 0.032 \ (95\% \text{ C.L.}).$$
(1.1.9)

ここで  $\mathcal{P}_S \approx 16 H^2 / (r \times m_{pl}) \sim 10^{10} \,\mu\text{K}^2$ を用い、また 2022 年現在のテンソル・スカラー 比 r に対する上限も併記した [4]。図 1.3 に Planck 衛星および BICEP/Keck2 実験等の観測 結果を統合した  $n_S - r$  平面内での制限をのせておく [5]。



図 1.3: Planck 衛星、BICEP/Keck2 およびバリオン音響共鳴の観測に よるパラメータ n<sub>S</sub>, r への制限 [5]。指数膨張の指数 N については典型 的に 50 から 60 と仮定されている。いくつかある楕円は解析に用いら れたデータの違いを表し、楕円の外が棄却域である。その他にもモデル によってパラメータを調整することでカバーできる領域が図示されてい る。

有限の r の値は、インフレーション中に生じた原始重力波の確固たる証拠となりうる。つ まり、私たちはゼロでないテンソル・スカラー比を検出することによって、インフレーショ ンの検証と模型の選別を行う。

<sup>&</sup>lt;sup>\*1</sup> r の添字の 0.002 は揺らぎのスケールと対応し、r<sub>0.002</sub> は揺らぎが成長時期に対応するテンソル・スカラー比 である。0.002 ↔ *l* = 27 である。

### 1.2 CMB パワースペクトル

宇宙で起こった物理現象は、その影響する大きさが全天における角度スケールに対応する と考えられる。そのため、CMB のパワースペクトル(例えば強度揺らぎ  $\Delta T/T$  の球面展開 の係数  $\Theta_{\ell}^{*2}$ に対する 2 点角度相関,  $C_{\ell}^{TT} \propto \langle |\Theta_{\ell}|^2 \rangle$ )を分析することで、宇宙を研究する。 CMB のパワースペクトルの概形は初期宇宙の重力ポテンシャルによって生成される光子の 赤方(青方)偏移 [Sachs-Wolfe effect] と小スケールにおける光子・バリオン流体中の光子拡 散による減衰 [Silk damping]、そしてバリオン集団と共に光子がポテンシャルに落ち込むこ とで生じる共鳴のピーク [Acoustic Peaks] によって理解できる(図 1.4)。



図 1.4: CMB の温度(強度)スペクトルの概形。一定のシフトを生む Sachs-Wolfe effect と光子拡散による Silk damping、そして光子・バリ オン流体の粘性による Acoustic Peaks によって大雑把に理解できる。

この際に生まれる温度分布の四重極異方性はトムソン散乱による散乱角の異方性と相まって、CMBの偏光成分を生む。電磁気学に従うと、x軸・y軸に沿って原点付近にある電子集

\*2  $\ell$  は見込み角のスケール  $\Omega[\deg]$  とおおよそ  $\Omega = 180^{\circ}/\ell$  と対応する。

団に入射した光は観測者の視線方向に垂直な偏光のみを生む

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = \frac{3\sigma_T}{16\pi} \left(1 + \cos^2\theta\right). \tag{1.2.1}$$

*θ* は xz 平面での z からの開き角である。従って、z 軸手前側にいる観測者にとって見えるの は xy 平面内の偏光だけである。この式に含まれる cos<sup>2</sup> *θ* 及び電子に散乱される光が最初か ら持っている四重極の異方性によって、CMB のスペクトルには強弱に差が生じる。

図 1.5 には四重極の温度異方性が散乱によって観測者のいる方向に直線偏光を生じさせる 様子を示している。z 軸手前にいる観測者の知ることができる偏光方向は xy 平面内に限られ る。この図の場合は y 軸方向の電場強度が強いので、観測者は y 軸方向の直線偏光を観測す ることになる。CMB 偏光観測では、望遠鏡を用いて天球面上の各点から届く CMB の偏光 軸の向きと強度を観測し、それを球面上に射影し、マッピングした強度分布からその角度相 関を分析する事である。



図 1.5: 四重極の温度異方性によって生成される直線偏光。高温領域 (赤)と低温領域(青)のそれぞれから到来する光が無偏光であっても、 異方性によって散乱された光には直線偏光が生じる。観測者は z 軸方向 の手前側に位置し、xy 平面内の偏光のみを見ることができる。

#### 1.2.1 スカラー揺らぎが作る偏光パターン

インフラトン場の作る揺らぎの中で最も寄与が大きなスカラー揺らぎは、疎密波として解 釈できる。この疎密波の存在は「E モード」と呼ばれる偏光パターンを生み出す。図 1.6 で は鉛直上方向(紙面上方向)に疎密波が伝わることを想定している。この疎密波によって伝 わる波は観測者が 45 度向きを変えても偏光パターンは変わることはなく、また空間反転に対 し対称なままである。また図の配置の場合、天頂に向かって偏光信号が弱くなり、天頂でゼ ロになってしまうことが見込んでいる異方性がなくなるからだと解釈できる。



図 1.6: スカラー型の揺らぎで生成される偏光パターン。到来する光の 強度を線分の大きさで表している。観測者に対する向きによらず偏光パ ターンは空間反転対称である。ここでは散乱する電子集団の周りにのみ 密度揺らぎを赤と青の濃淡で表現しているが、実際には、空間全体に連 続した疎密の構造が広がっている。右の2図は空における偏光パターン のイメージである。

#### 1.2.2 テンソル揺らぎ(原始重力波)がつくる偏光パターン

スカラー揺らぎの次に大きな寄与を及ぼすのが、テンソル揺らぎであり、これが原始重力 波と解釈される。原始重力波の伝搬は、一般的な重力波と同じように説明ができる。背景時 空に対して十分に小さな揺らぎを時空計量に与えると  $g_{\mu\nu} = g^{(0)}_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ 、その揺らぎは波動 方程式

$$\left[\partial_{\tau}^{2} + 3H\partial_{\tau} - \nabla^{2}\right]h_{ij} = 0 \qquad (1.2.2)$$

に従う2種類の直交する成分 [+モードと×モード、 $h_{kij} = h_{k}^{(+)}e_{ij}^{(+)} + h_{k}^{(\times)}e_{ij}^{(\times)}$ ] として伝搬 する。



図 1.7: 重力波の伝搬モード。+モード(上)と×モード(下)

この重力波の伝搬に伴う四重極の異方性は、初期宇宙において「B モード」と呼ばれる偏 光パターンを作り出す。特に初期宇宙においては原始重力波のみによって B モードが作られ るというのが重要である。重力波が鉛直上向きに伝搬する様子を考えると、重力波の持つ+ モードと×モードの違いによって、観測者の向きが 45 度ズレると見える偏光パターンも変わ る。これは空間反転非対称な B モードの特徴である。重力波由来の偏光信号は、重力波によ る異方性を最も見込む天頂付近で信号が最大となることがわかる。



図 1.8: テンソル型の揺らぎで生成される偏光パターン。紙面上方向に 伝播する重力波のイメージを重ねてある。同じ重力波モードでも観測者 に対する向きによって異なるパターンを作り出す。空間反転非対称。

#### 1.2.3 弱重力レンズ効果がつくる偏光パターン

宇宙初期を離れると原始重力波による B モードの他にも、弱い重力レンズ効果が作り出す B モードが CMB のパワースペクトルには含まれる。Einstein の一般相対性理論の予言に従 えば、大質量の背後にある天体からの光は曲げられたり、引き伸ばされたりと凸レンズを通 したように像が歪められる。これは重力レンズ効果と呼ばれる。この効果によって、到来す る光が実際に散乱された位置は、観測した方向の単なる延長上ではなくなるため、信号の角 度スケールが混ざってしまう。

具体的には、信号の偏光度合いを表すストークスパラメータ*Q*,*U*(付録 A)に対し、レン ズポテンシャルの勾配  $\nabla \psi$ が  $(Q^{\text{obs}} \pm i U^{\text{obs}})(\theta) = (Q \pm i U)(\theta + \nabla \psi)$ と作用する。この効 果をそれぞれ E モードと B モードに反映させると、小角度スケールでは Fourier 変換による 展開のもとで

$$E_{\ell}^{\text{obs}} = E_{\ell} + \int \frac{\mathrm{d}^{2}\ell'}{(2\pi)^{2}} \ell' \cdot (\ell' - \ell) \psi_{\ell - \ell'} \\ \times \{ E_{\ell'} \cos \left[ 2(\phi_{\ell'} - \phi_{\ell}) \right] - B_{\ell'} \sin \left[ 2(\phi_{\ell'} - \phi_{\ell}) \right] \}$$
(1.2.3)

$$B_{\ell}^{\text{obs}} = B_{\ell} + \int \frac{\mathrm{d}^{2}\ell'}{(2\pi)^{2}} \ell' \cdot (\ell' - \ell) \psi_{\ell - \ell'} \\ \times \{ B_{\ell'} \cos \left[ 2(\phi_{\ell'} - \phi_{\ell}) \right] + E_{\ell'} \sin \left[ 2(\phi_{\ell'} - \phi_{\ell}) \right] \}$$
(1.2.4)

となり、このことから E モードは重力レンズ効果を通して一部、B モードへと姿を変えるこ とがわかる。私たちは原始重力波に由来するテンソル型 B モードと重力レンズ効果を受けた スカラー型 E モード(レンズ B モード)の重ね合わせを観測する。図 1.9 は 2 章で紹介する 望遠鏡 SAT の観測帯域を CMB の温度および偏光のパワースペクトルと共に描いたもので ある<sup>\*3</sup>。ここでテンソル・スカラー比は *r* = 0.01 と仮定した。

<sup>\*&</sup>lt;sup>3</sup> パワースペクトルの数値シミュレーションには CLASS [https://lesgourg.github.io/class\_public/ class.html] を使用した



図 1.9: 期待される CMB の偏光パワースペクトルと後述する望遠鏡 SAT の観測帯域。原始重力波由来の B モード偏光の信号ピークを幅広 く包含している。原始重力波の B モードは r = 0.01 を仮定している。 なお、Delensing と呼ばれる手法により、重力レンズ効果の B モードと 原始重力波の B モードを  $r \simeq 10^{-4}$  程度の残差で分離出来る [6]。

重力レンズ効果によって混合されたパワースペクトルは周波数空間で強い相関を示す。こ のことを逆に用いて小角度スケールで測定されたパワースペクトルからレンズポテンシャル ψを推定し、重力レンズ効果のみを精度良く差し引いてあげることができる。例えば先行の シミュレーション研究(delensing[6])によって、差し引いた残差を r ~ 10<sup>-4</sup> 程度にできる ことが示されている。

#### 1.3 本論**文の**構成

本論文では、続く2章で Simons Observatory 実験の概要を説明し、原始重力波の検出に 向けて3台の小口径望遠鏡を用いた観測を行うこと、そこには0.1°度以下という精度で検出 器の偏光角を調べなければならないことを説明する。3章では目標とする0.1°での検出器較 正に向け、Sparse Wire Grid を用いた較正原理とその操作精度に関する要求をまとめる。そ して4章では、その操作を実現するシステムの構築と要求精度が達成できていることを述べ る。5章では、較正の効率化に向け、CMB 観測時は Sparse Wire Grid を望遠鏡の視野から 隠し、較正時には視野内に設置する、という動作を遠隔で行えるロボット機構の開発と性能 評価について述べる。6章では、CMB 受信機に搭載された超伝導検出器 TES で実際に、較 正装置による信号とその解析の様子を紹介する。そして、7章に本論文のまとめを記述する。

### 第2章

# Simons Observatory 実験と 原始重力波検出に向けた課題

CMB 偏光観測実験にはチリや南極など地上から CMB を観測しようというものと、衛星 を打ち上げて宇宙から観測しようというものがあり、多くの研究機関が究極の物理像を解明 しようと凌ぎを削っている。ここでは私が参画している Simons Observatory 実験(図 2.1) と種々の偏光を較正する手法を確認する。



図 2.1: 観測サイト(アタカマ高地)における Simons Observatory 実験の望遠鏡イメージ。

### 2.1 Simons Observatory 実験

Simons Observatory 実験(以下、SO と呼ぶ)はチリ・アタカマ高地(海抜 5200 m)に おいて 2023 年からの観測を予定している CMB の地上観測実験である。図 2.2 に示すよう に、SO では口径 0.5 m の望遠鏡 (Small Aperture Telescope, SAT)3 台と口径 6.0 m の望遠 鏡 (Large Aperture Telescope, LAT)1 台の計 4 台の望遠鏡群に超伝導検出器を約 6 万個を 搭載し、CMB 偏光を高精度で測定することで、インフレーションに由来する原始重力波の検 出やニュートリノの有効世代数、ニュートリノの質量和の測定を目指している [7]。

立体角  $\Omega$ 、有効開口面積 A、観測波長  $\lambda$  の間における回折限界の関係式 [8]

$$\Omega = \lambda^2 / A \tag{2.1.1}$$

より、空の同じ領域を同じ周波数帯で観測する場合、大きな口径 A をもつ望遠鏡ほど角度分 解能において優れていることがわかる。ただ、大口径を持つ望遠鏡は細かな角度相関を分析 できる一方、視野角も小さくなる。そのため大角度の相関を観測するには、長時間かかって しまい大気揺らぎの影響を受けすぎてしまう。このことから SO においても、1°より小さな スケールの観測においては主に LAT が、それよりも大きい角度スケールの CMB パワースペ クトルを見る際には SAT が、それぞれ適していることがわかる。表 2.1 に SAT と LAT の 観測帯域と分解能の違いをまとめた。

	FWH	M(')
Freq. [GHz]	SATs	LAT
27	91	7.4
39	63	5.1
93	30	2.2
145	17	1.4
225	11	1.0
280	9	0.9

表 2.1: SAT 及び LAT の分解能(Beam の半値全幅の値) [7]

### 2.2 Small Aperture Telescopse (SAT)

前述のように口径の小さい望遠鏡は大角度スケールの観測に向いているため、SAT は CMB の大角度相関を高統計で観測する役目を担っている。ただし、電波による宇宙観測に は、前景放射と呼ばれる銀河による放射の影響が常に含まれる。前景放射は CMB と周波数 依存性が異なるため、複数帯域で観測を行うことで両者を分離する。図 2.3 に SAT の観測領 域および観測帯域における前景放射と CMB との比較をあげた。観測領域にはノイズ源とな る銀河の前景放射が比較的少なく、また先行研究とのクロスチェックが可能な領域が含まれ ているのが見てとれる。図の右には、銀河ダストなどとの CMB 信号の比較に加え、SAT の 観測帯域が示されている。SAT は 27 GHz、39 GHz、93 GHz、145 GHz、225 GHz、280 GHz の 6 帯域にわたって観測することで、CMB が黒体放射に従っていることを確認でき、前景 放射と CMB を r = 0.0016 まで分離する [7]。



図 2.2: (上)小口径望遠鏡 SAT における冷凍機付き受信装置。SO では SAT3 台 に合計 3 万個の超伝導検出器 TES ボロメータを搭載する。(下)大口径望遠鏡 LAT とその受信装置。LAT は SAT と違い、途中ミラーにより 2 回信号を反射して受信 機へと導く光学設計となっている。観測開始時、LAT1 台には 7 本の光学筒と計 3 万個の TES が搭載される。



図 2.3: (左)全天マップにおける観測領域の比較。明るい領域が SO で 観測する領域。破線で囲われた領域は先行研究によるもの。(右)各周 波数帯域における CMB 信号強度とノイズであるシンクロトロン放射、 銀河ダストの強度の比較。SO SAT bands が実際に SO で観測する周 波数領域である [7]。

図 2.4 は SAT の受信機部の断面図である。空からの光は真空窓を透過後、偏光変調器を通 り、光学筒のレンズで集光され、焦点面に導入される。光学筒には 3 枚のシリコンレンズと、 意図しない光学パスを通って入ってきた迷光を遮断するために 3D プリント黒体が設置され ている [9]。焦点面は 100 mK に冷却され、TES ボロメータと呼ばれる超伝導検出器が多数 配置されている。これにより超低ノイズの観測が実現される。この検出器に取り付けられた アンテナによって、私たちは受光した信号の偏光角を知る。

本研究の主題であるワイヤーグリッド較正装置は空から検出器へ向かう光路の先頭に配置 される。そのため、望遠鏡の光学系を通して生じるあらゆる系統誤差を一度に評価し、検出 器の偏光角応答を較正することができる。



図 2.4: SAT の希釈冷凍機システムと光学系の断面。図の上方向から 到来した光は連続回転式半波長板 (Continuous Rotating Half Wave Plate, CRHWP) で変調され、3 層のシリコンレンズを搭載した光学筒 を通過し、超伝導検出器の待つ焦点面へと導かれる。スパースワイヤー グリッドは較正時のみ半波長板より前に光路を遮る形で配置される。

### 2.3 原始重力波検出に向けた課題

CMB のパワースペクトルに含まれる B モード信号の主成分である重力レンズ B モード は、delensing によって、テンソル・スカラー比に対するノイズの大きさとして 4 × 10<sup>-6</sup> μK<sup>2</sup> 程度まで、その効果を取り除くことができる [7]。また、前景放射に関しても *O*(10<sup>-4</sup>)μK 程 度まで、その影響を減らすことができるため、観測上もっとも憂慮すべき背景事象は次に述 べる偏光信号の判定ミスが生み出す偽の B モードとなる。これは私たちが検出器の偏光応答 の向き(以後、偏光角と呼ぶ)を正しく理解していないと生じる。例えば全ての検出器の偏 光角を δθ 誤ってしまうと、偏光信号の判定ミスはストークスパラメータ全体の回転として捉 えられる。

$$Q^{\text{obs}} \pm i U^{\text{obs}} = e^{\pm i 2\delta\theta} \left( Q \pm i U \right) \tag{2.3.1}$$

$$= e^{\pm i2\delta\theta} \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \left[ -\left(E_{\ell m} \pm iB_{\ell m}\right) \right]_{\pm 2} Y_{\ell}^{m}$$
(2.3.2)

$$= \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \left[ - \left( E_{\ell m}^{\text{obs}} \pm i B_{\ell m}^{\text{obs}} \right) \right]_{\pm 2} Y_{\ell}^{m}$$
(2.3.3)

この E、B への影響を観測される各パワースペクトル $C_{\ell,{\rm obs}}^{XY}$ に焼き直すと、以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} C_{\ell, \text{ obs}}^{TT} \\ C_{\ell, \text{ obs}}^{TE} \\ C_{\ell, \text{ obs}}^{EE} \\ C_{\ell, \text{ obs}}^{B} \\ C_{\ell, \text{ obs}}^{B} \\ C_{\ell, \text{ obs}}^{EB} \\ C_{\ell, \text{ obs}}^{EB} \\ C_{\ell, \text{ obs}}^{BB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & & & \\ \cos(2\delta\theta) & -\sin(2\delta\theta) & & \\ \cos(2\delta\theta) & & -\sin(4\delta\theta) & \sin^2(2\delta\theta) \\ \sin(2\delta\theta) & \cos(2\delta\theta) & & \\ \sin(4\delta\theta)/2 & \cos(4\delta\theta)/2 & -\sin(4\delta\theta)/2 \\ & & \sin^2(2\delta\theta) & \sin(4\delta\theta) & \cos^2(2\delta\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{\ell}^{TT} \\ C_{\ell}^{EE} \\ C_{\ell}^{EB} \\ C_{\ell}^{EB} \\ C_{\ell}^{BB} \end{pmatrix}$$

これは仮に標準宇宙モデル ( $C_{\ell}^{TB} = 0, C_{\ell}^{EB} = 0$ ) が正しかったとしても、検出器の偏光応 答性を見誤ると、E モードが B モードとして間違って観測されてしまうことを意味する

$$C_{\ell, \text{ obs}}^{BB} = \cos^2(2\delta\theta) \ C_{\ell}^{BB} + \sin^2(2\delta\theta) \ C_{\ell}^{EE}.$$
(2.3.4)

図 2.5 に原始重力波 B モードと、偏光角を見誤ることによって E モードから漏れ込んでくる 偽の B モードの強度比較を示す。偽の B モードの原因は、私たちが検出器の偏光角を正しく 理解していないために生じる。つまり、原始重力波由来の B モード信号を高確度で発見する ためには、検出器の偏光角応答を精度良く決定する必要がある。また、その目標精度は、0.1° 程度であることが図 2.5 から確認できる。

### 2.4 偏光角の較正手法

この節では、CMB 偏光観測において主に用いられてきた天体・人工偏光源・解析的偏光較 正という3つの主な較正手法を整理し、本論文の主題であるワイヤーグリッドがどういう位 置づけかを確認する。



図 2.5: 偏光較正のエラーによる E モード偏光の漏れ込みとテンソル型 B モード偏光を重ね書きした図。B モード偏光については理論的に自然 な解釈の与えられる限界とされる Lyth Bound から現在、BICEP/Keck グループによって与えられている上限値までを描いた [4]。

表 2.2 にあるように、天体較正源には「かに星雲の Taurus A(通称:Tau A)」や「月」が、 人工較正源として「ワイヤーグリッド」や「誘電体シート」が、解析的手法として「自己較 正」と呼ばれる 5 つの較正方法が存在する。

- Tau A 強い直線偏光性を持つ光を発する天体である Tau A を用いた較正手法は、偏光角が 観測周波数に依らないか、高い分解能による観測では構造による偏光角のバラツキが 生じないか、といった潜在的な系統誤差がある。また、観測できる時期・時間帯が限 られており、望遠鏡の視野の一部しか覆えないため、全ての検出器を一度に較正する ことは難しい。
- 月 月はその表面で垂直に反射された光が月の中心から放射状に伸びる偏光信号となる。 月は Tau A よりもさらに構造の影響を受けやすく、測定箇所の少しの違いで簡単に較 正角度を見誤る可能性も高い。また、明るすぎる較正源は TES 検出器のダイナミック

$\delta \theta$	Band[GHz]	Experiment	Method
0.2°	150	POLARBEAR[10]	Self-Cal.
$0.4^{\circ}$	$26 \sim 36$	DASI[ <b>11</b> ]	Moon, Wire Grid
$0.43^{\circ}$	150	POLARBEAR[10]	Tau A
$0.7^{\circ}$	100,150,220	BICEP[12]	dielectric sheet
$1^{\circ}$	150	BICEP2[13]	Self-Cal.
$1^{\circ}(1.5^{\circ})$	150 (95)	SPTpol[14, 15]	Wire Grid
$1.5^{\circ}$	40,  90	CAPMAP[16]	Moon
$1.5^{\circ}$	$23 \sim 94$	WMAP[ <b>17</b> ]	Tau A
$1.6^{\circ}$	145	ABS[ <mark>18</mark> ]	Tau A & Self-Cal.
$1.7^{\circ}$	40,  90	QUIET[ <mark>19</mark> ]	Tau A, Moon
$2^{\circ}$	97,148	$\operatorname{ACTpol}[20]$	Pol. Grid
$2^{\circ}$	100,  150	QUaD[21]	Wire Grid
$2^{\circ}$	$26 \sim 36$	$\operatorname{COMPASS}[22]$	Tau A
$2^{\circ}$	$90 \sim 420$	$\operatorname{BOOMERanG}[23]$	Wire Grid
3°	40,  90	QUIET[ <mark>19</mark> ]	Moon, Wire Grid

表 2.2: 較正手法と偏光角の決定精度

レンジを超えるため、SAT では使用できない較正手法である。

- 誘電体シート 引き伸ばされたポリエチレンシートによって、環境熱放射を反射させ偏光を 作り出す装置である。誘電体シートは、全ての検出器を較正する際に望遠鏡の視野を 全て覆わないといけないため、必然的に大型化してしまう扱いの難しさがある一方、 較正源の明るさの調整が用意である。ただし、ポリエチレンシートは周波数ごとに旋 光特性が違うため、偏光角較正に用いるためには、較正に必要な周波数全てにわたっ てその旋光性を正確に理解していなければならない。
- 自己較正 C<sup>EB</sup><sub>ℓ</sub> = 0 とおく較正手法である。全ての角度スケールでパワースペクトルを較正 できる強力な手法であるが、空間反転非対称な物理に対する感度を放棄することにな る。つまり、究極の較正手法にはなり得ない。

SAT ではワイヤーグリッドを用いて偏光角の較正を行う。ワイヤーグリッドも環境熱放射 を反射して偏光信号を生成する。ワイヤーグリッドを使う利点は、金属ワイヤーの伸びる方 向のみに偏光信号が生成されるため、Tau A やポリエチレンシートのように周波数特性を 気にしなくて済むことである。本論文で後述するように、重力方向を参照することと、ワイ ヤーの向きを遠隔操作で変えられる機能を実装することで、δθ = 0.1°を実現する。また、図 2.6 に示すように、CMB 観測時はワイヤーグリッドを望遠鏡の視線外の箱(図中では見やす さのため透過してある)に収納し、較正時には視野全体を覆って全ての検出器に偏光信号を 見せる機能も実装する。本研究で実現する較正装置とそのリモートコントロール化が、系統 誤差との戦いである原始重力波の検出実現の要となる。



図 2.6: SAT に搭載された偏光角較正装置 Sparse Wire Grid Calibrator のイメー ジ。装置はワイヤーグリッドを出し入れする機構 (Grid Loader) とワイヤーグリッ ド自体の回転機構からなる。Sparse Wire Grid Calibrator は SAT の姿勢に関係な く、較正用のワイヤーグリッドを出し入れし、また回転させるという、一連の動作 を全て遠隔で行うことができる。そのため従来の手動較正よりも高頻度で検出器の 較正ができる。

### 第3章

# Sparse Wire Grid Calibrator による 偏光応答の較正原理と要求

#### 3.1 偏光信号の生成原理

地上から空を眺めた時、雲などでの散乱を除けば大気放射は無偏光である<sup>\*1</sup>。大気と望遠 鏡の間に偏光信号を作り出す装置を配置できれば、望遠鏡の視野の中には CMB と大気放射 に加えて偏光信号の重ね合わせが見える。金属ワイヤーの自由電子はワイヤーに沿った方向 にのみ振動するとみなせ、このことからワイヤーはその軸と同方向に振動する電磁波にのみ 応答する(図 3.1)。また、ワイヤー間隔を十分に空けることで、実効的な放射温度を 1 K 程 度に調整でき、CMB 望遠鏡の較正に程よい強度となる。本研究は、この原理に基づいた較正 装置 Sparse Wire Grid Calibrator を開発する。

### 3.2 偏光角較正の原理

大気は常に揺らいでいるため、空の一点を見ていたとしても放射の強度が時々刻々と変化 する。これは大気による 1/f ノイズとして知られており、何かしらの方法で CMB 偏光の 信号と大気揺らぎを分離してあげる仕組みが求められる。SO で大気揺らぎと信号を分離す るために用いられるのが連続回転式半波長板(Continuously Rotating Half-Wave Plate, 以 下、後半のみをとって HWP と略す)である。HWP はサファイアの持つ複屈折という性質 を利用して入力信号の偏光方向に回転変調を加える装置である。解析において、その回転に 同期した信号を取り出す(復調する)ことで、揺らぎと信号の分離を行う [24]。

HWP に入射する光は電場 E に対する特性を以下のように書き表すことができる。ここで x 軸方向の屈折率は  $n_e$ 、 y 軸方向の屈折率は  $n_o$ 、  $\theta_p$  が偏光軸の向きである。

$$\vec{E}(z) = E_0 \cos \theta_p \exp\left(-i2\pi n_e z/\lambda\right) \vec{e}_x + E_0 \sin \theta_p \exp\left(-i2\pi n_o z/\lambda\right) \vec{e}_y \tag{3.2.1}$$

<sup>\*1</sup> SAT の観測帯域に対する大気由来のノイズ温度は 9K~35K 程度である。https://almascience.eso. org/proposing/sensitivity-calculator



図 3.1: (a) ワイヤーに沿った偏光成分のみが反射・散乱される様子。 (b) ワイヤーを用いた偏光角較正のイメージ。無偏光の空に対して十分 に高温とみなせる周囲の環境温度からの熱放射のうち、ワイヤーに沿っ た方向の光が反射されることで、較正に必要な偏光信号を生成する。実 際の SAT では図 2.6 にあげたように較正装置と望遠鏡が一体となって いる。

それぞれ z = 0 における値と  $z = \Delta$ ,  $(|n_e - n_o|\Delta \equiv \lambda/2)$  進んだ場所での値を比較すると以下のようになる。

$$\vec{E}(0) = E_0 \left( \cos \theta_p \vec{e}_x + \sin \theta_p \vec{e}_y \right) \tag{3.2.2}$$

$$\dot{E}(\Delta) = E_0 \left[ \cos(-\theta_p) \ \vec{e_x} + \sin(-\theta_p) \ \vec{e_y} \right] \exp\left(-i\pi n_e / |n_e - n_o|\right)$$
(3.2.3)

このように入射光がその波長の半分となる光路距離だけ進んだ時、出力光の偏光角は入射光の2 倍になって出てくる(図 3.2)。



図 3.2: HWP を通過することで偏元用が変わる。 同と縁の両軸はサ ファイアの持つ光学軸を表しており、入力された直線偏光の光学軸に対 する角度が  $\chi$  である。サファイアの複屈折性によって  $-2\chi$  だけ変化さ れた直線偏光が出力される。HWP では、さらにサファイアを回転させ ることで出力信号を回転させる [24]。

この事を踏まえると、入射する偏光信号に対して複屈折の軸が回転している場合は、その回 転の4倍周期に同期した変調信号を検出することになる。したがって、検出器の時系列信号 データ(以下、TOD と呼ぶ)は以下のように表せる。

$$d_m(t) = I_{in}(t) + \varepsilon_{mod} \operatorname{Re} \left\{ [Q_{in}(t) \pm iU_{in}(t)] \exp 2i \left[ \mp 2\chi(t) \pm \theta_{det} \right] \right\}$$
(3.2.4)  
$$Q_{in}(t) \pm iU_{in}(t) = \exp[\pm 2i\theta_{\mathrm{WG}}]$$
(3.2.5)

ここで、 $I_{in}$ ,  $Q_{in}$ ,  $U_{in}$ ,  $\varepsilon_{mod}$ ,  $\theta_{det}$ ,  $\theta_{WG}$  はそれぞれ信号強度、ストークスパラメータ Q, U、 変調効率、検出器およびワイヤーの偏光角である。 $\chi(t)$  は HWP による変調角で、HWP の 回転角速度  $\omega_{HWP}$  を用いて  $\chi(t) = \omega_{HWP}t$  と表すことができる(SAT では  $\omega_{HWP} \simeq 2$  Hz で ある)。HWP による周期性に対し、検出器の偏光応答角  $\theta_{det}$  に加え、入射するワイヤーの較 正信号による偏光の向き  $\theta_{WG}$  が位相オフセットとなることがわかる(図 3.3)。



図 3.3: 理想的な時系列データ TOD のイメージ。ワイヤーによる信号 の強度は振幅として、またワイヤーと検出器の偏光角は位相のズレと して現れる。色の違いはそれぞれのワイヤーの角度に応じた TOD を表 す。

TOD を Fourier 変換することで、HWP の回転に同期した周波数  $\Omega \pm 4\omega_{HWP}$  において

$$d_m(\Omega \pm 4\omega_{\rm HWP}) = \text{const.} + \frac{\varepsilon_{mod}}{2} \exp\left[\pm 2i(\theta_{\rm det} + \theta_{\rm WG})\right]$$
(3.2.6)

のように偏光情報を取り出すことができる。ワイヤーの角度に応じて、一つの TOD から振幅と位相が決まるので、ワイヤー角を変えることで複素平面上に較正用の円を描くことができる(図 3.4)。これを以降、"較正円"と呼ぶ。較正の際、ワイヤーを重力に対して鉛直方向に向けた時に、ストークスパラメータ +Q が最大となるとして、検出器アンテナの偏光角を知る。付録 A に比べパラメータ ±Q が傾いているのは、検出器の偏光応答角が重力方向に対して傾いているからである。

CMB のパワースペクトルに含まれる偏光情報はストークスパラメータ *Q*, *U* によって知ることができる。そこで実際の CMB 解析ではこの較正によって得られた *θ*<sub>det</sub> を用いて以下のようにストークスパラメータを同定する(*F*<sup>BPF</sup> はバンドパスフィルタ)

$$Q_{\rm obs}(t) + iU_{\rm obs}(t) \equiv \mathcal{F}^{\rm BPF}\left[d_m(t)\right] \times 2\exp\left(i4\theta_{\rm HWP} - i2\theta_{\rm det}\right)$$
(3.2.7)

$$\approx Q_{\rm CMB}(t) + i U_{\rm CMB}(t). \tag{3.2.8}$$



図 3.4: 変調して得られたワイヤーと検出器の偏光角を複素平面に投影 した図。理想的にはワイヤーの角度を変えることで1周に渡って円周上 の信号が得られる。

現実には、HWP の理想状態からのズレやノイズなども偏光強度に偏りを生じる要因となる ため、中心が原点にある真円となる保障はない(図 3.5)。そこで較正データの解析時には中 心位置が原点から離れた楕円としてモデリングする。つまり、ワイヤー角を 360° にわたって 飛び飛びに較正のデータ点を打つことによって円の形を求め、 $\theta_{det}$ を測定するここでの注意 は、HWP によって偏光信号の角度  $\theta_{WG}$  は、実際の 2 倍となることである。そのため、ちょ うど 2 倍の関係にあるワイヤーグリッドの偏光角は、較正円上では同じ点での信号となる。



図 3.5: (左)望遠鏡の光学系の不完全性がもたらす偽偏光などは微弱 なオフセット信号として見える。そのため、較正時に原点がズレたよう に見える。(右)環境放射に極端な偏りがある場合は、ワイヤーの角度 に応じてある軸方向の偏光強度が変化する可能性もある。

### 3.3 Sparse Wire Grid Calibrator の概要

Sparse Wire Grid Calibrator に用いるワイヤーの径と間隔は、観測・較正に使用する電磁 波の波長や必要とする信号ノイズ比によって要求が決まる。先行研究 [25] においては、33 本 のワイヤー線で十分な信号強度が得られることが実測されている。本研究においてもその結 果を踏襲し、ワイヤー径 0.1 mm のタングステンワイヤー 39 本を 20 mm 間隔でアルミ性の リングに張ることにした(図 3.6)。ワイヤーをリングに刻んだ溝に沿って張ることで、ワイ ヤーの間隔精度 ±0.1 mm を保障している。また、ワイヤーの取り付け誤差として、平行度と たわみ角それぞれに対し 0.02°、0.05° が見積もられている [26]。

図 3.7 に示すように Sparse Wire Grid Calibrator では、ワイヤーを張ったリングはベア リング上に固定された DC モータによって回転でき、回転角度もエンコーダで 0.04°の精度 でモニター出来る(次章で詳しく述べる)。これにより遠隔操作が可能になるため、較正に かかる時間と労力を大幅に削減するとともに、高頻度で較正が行えるようになる。また望遠 鏡に対する装置全体の傾きについても、重力参照計 DWL-5000XY(Digi-Pas) によってワイ ヤーの向きを 0.03°の精度でモニターする。以上より、ワイヤーの角度に対する機械精度は、 合計して 0.07°である。これは 2 章での要求を満たす。



図 3.6: ワイヤーを張る共同研究者の飯島氏。中央でのワイヤーのたわ みを考慮して左右からそれぞれ 230gの工具を吊すことでワイヤーを 張っている。



図 3.7: 回転する Sparse Wire Grid。右下にあるモータの回転を外側の ベルトに伝達し、ワイヤーグリッドを回転させる。リングにはもう一 つ、磁気を帯びたベルトが巻かれており、エンコーダによってその上の 位置を知る。

較正時には、リングを回転制御して何箇所かの向きでデータを取得する。角度制御の目的 は、第一に複素平面上で偏光信号の作る円を精度良く求めるためで、第二に効率よく偏光角 較正を行い観測時間を犠牲にしないためである。ワイヤーグリッドの回転には DC モータを 用いた。DC モータに比べ、ステッピングモータの方が精度良く回転を制御できるが、鋭い立 ち上がり立ち下がりを伴うパルス制御によって、電気系統を通じて検出器データに大きなノ イズを生んでしまう、という懸念がある。そのため単純な電流制御で回転速度を決める DC モータを選定した。

### 3.4 角度制御にかかる要求

ワイヤーリングの角度制御に対する要求値をモンテカルロシミュレーションにより評価した。各パラメータの定義は図 3.5 に準拠する。先行研究 [25] を受け、モデルを表 3.1 のように設定した。円の半径はワイヤーによる偏光信号の大きさに対応する。検出器のノイズが無視できるレベルを NET 換算で約 10 nK√sec と仮定した。NET とは雑音等価温度(Noise Equivalent Temperature)のことで、測定のノイズレベルを表す指標である。実際の超伝導検出器の NET が典型的には 500 µK√sec であることを考えると、十分小さいという仮定は満たされている。*N*<sub>ctrl</sub> はワイヤー角の制御精度で、エンコーダの分解能と違い偏光角較正の直接的な誤差ではないが、サンプルにおけるデータ点が均等にバラけているかの指標になる。

表 3.1: MC モデルパラメータ

parameters	order[K]
R (radius)	$\sim 1$
w, h	$1\pm \mathcal{O}(10^{-4})$
$\delta x,  \delta y$	$\mathcal{O}(10^{-5})$
$N_{ m det}$	$\mathcal{O}(10^{-8})$
$N_{ m ctrl}$	$0.01^\circ \sim$ at random

シミュレーションでは、一つのワイヤー角の制御精度、あるいは一つの較正円上のデータ 点数に対し、1000 モデル、100 サンプル/モデルを生成した。作られた各サンプルに対し、最 小2 乗法を用いて楕円でフィットすることで、以下に示す結果が得られた。

図 3.5 に挙げたように較正データの解析は、中心点のズレと扁平、回転の 5 つのパラメー タを決定することである。そのためデータ点が 4 点以下だと円の形が定まらない。図 3.8 に は較正箇所の数に対する較正精度の変化を示す。較正箇所を多く取るほど、較正円の形がよ り良く決まるので、偏光角についても特定精度が向上しているが、較正箇所に対し偏光角の 決定精度が比例して良くなるわけではない。一方、回転制御にかかる時間は較正箇所の数に 比例するため、CMB の観測時間を損なわないためにはできるだけ少ないデータ点数から精 度良く較正を行いたい。この較正精度と CMB 観測時間への負荷とのバランスを考慮して、1 周あたり 8 つの較正箇所で偏光信号を取得するという戦略をとることとした。



図 3.8: 較正箇所を増やすことに伴うフィット精度の変化。角度の制 御精度は 1°と仮定した。検出器の偏光角  $\theta_{det}$ に対して MC のモデ ルに用いた真の値とフィット結果との差をモデルごとに平均してある  $(\delta\theta = \theta_{ft} - \theta_{truth})$ 。



図 3.9: ノイズが無視できる場合のワイヤー角を制御することによる フィット精度の違い。全く制御しない場合に比べてワイヤー角を制御す るほどフィット精度が向上することがわかる。

較正箇所を増やす際には、ワイヤーの角度方向を効率良く分散させる必要があり、ワイヤー グリッドの回転角の制御精度が重要になる。この制御精度に対して検出器の偏光角がどれだ けの精度で決まるかについては図 3.9 に示した。回転角の制御精度とともに偏光角の決定精 度も上がることがわかるが、制御精度が 1°以下では偏光角精度はあまり変わらないことか ら、おおよそ 1°をワイヤー角制御の目標に定めた。

θ<sub>det</sub> 以外のパラメータのフィット精度も図 3.10 にあげておく。偏光角以外のパラメータに 関しては角度のコントロール精度による大きな差は見られない。



図 3.10: 中心位置のズレ *δx*, *δy*、円の幅 *w*、高さ *h* に対するフィット 精度をそれぞれプロットした。これらは 0.1°~10° の制御の精度によっ て大きく結果は変わらないことがわかる。

検出器のノイズに対して  $\delta\theta$  の標準偏差がどのように変わるかを示したものが図 3.11 であ る。N 個の検出器である値を測定した際、個々の較正精度が  $\sigma_t$  であったとしても、測定値 にかかるトータルの誤差は  $\sigma/\sqrt{N}$  と評価できる<sup>\*2</sup>。1 台の SAT には約 10,000 個の検出器が のっていることから、検出器一つあたりの較正精度が 4° ほどであったとしても、焦点面全体 での偏光角決定精度は  $4/\sqrt{10000} \approx 0.04$  となることがわかる。これはワイヤー自体の位置精 度 0.07°[26] と組み合わされたとしても  $\sqrt{0.07^2 + 0.04^2} \approx 0.08^\circ < 0.1^\circ$ と目標を満たしてい ることがわかる。

<sup>\*2</sup> また信号強度に対する揺らぎの影響は測定時間 t の平方根に対しても反比例して小さくなるので、個々の精度 もそれに応じて向上する ( $\sigma_t \propto \sigma/\sqrt{t}$ )。



図 3.11: 1 sec で各較正点を回ったときに、一つの検出器に対し一回の 較正で得られる較正精度。ワイヤー角の制御精度を 1°、8 箇所の較正点 を回るとして計算した。

### 第4章

## ワイヤーグリッドの回転制御

図 4.1 に示すようにワイヤーグリッドの回転制御は、ワイヤーグリッドを回転させるモー タとそれを駆動する安定化電源、ワイヤー角度を読み出すエンコーダ、後段の mini PC のロ ジックへと変換する回路、エンコーダのパルスを処理する mini PC、そしてデータ取得を統 括するホスト PC で構成される。従来の手動較正とは異なり [25]、これらの統合的に制御す ることが本研究では重要となる。



図 4.1: モータによる Sparse Wire Grid の回転とエンコーダによる回 転角の取得。

### 4.1 ワイヤーの回転角モニタ

較正のためには、ワイヤーグリッドの回転角を正確に知る必要がある。そこで私たちは、 RENISHAW 社製の LM15IC エンコーダを用いて回転角を読み出す。エンコーダの仕組み はホール素子による磁場の計測と同じで、ワイヤーの張られたリングに磁気を帯びたベルト を巻き、そのベルト上の NS の変化をパルス電圧として読み出すことでベルト上の位置の変 化を知る(図 4.2)。このエンコーダは最小の位置分解能が 25 µm(回転角に換算して 0.003°) と、ワイヤー角の記録に関して十分に目標とする精度を保証できる。



図 4.2: エンコーダの原理説明。磁気式エンコーダはホール効果によっ て、電圧の変化からベルト上の磁場の変化を読み取る。ベルトの磁気変 化が等間隔に刻まれており、その細かさがエンコーダの分解能を決め る。

このエンコーダには3種類のメインパルス [パルス A, パルス B, パルス Z (図 4.3)]が存 在する(図 4.3)。エンコーダはパルス A とパルス B によってその進行方向を判定する。例え ば、パルス A の立ち上がり [図中 I](立ち下がり [図中 II])時にパルス B が High(Low)に いる時を正の進行方向とすると、その逆でパルス A の立ち上がり(立ち下がり)時にパルス B が Low(High)にいる時が負方向となる。またベルト1周に1ヶ所だけ刻まれたパルス Z によってリングが1周したことを知ることができる。



図 4.3: エンコーダの信号の種類と相対関係。図中の矢印の向きが本文 の正方向に対応する。1 周するごとにパルス Z を受け取る。

3 種類のパルスはエンコーダヘッドで読み取られてから、ケーブルを伝って記録デバイス に至るまで様々な外乱の影響を受ける。そのため、エンコーダの各パルスはそれぞれ 1 対の 差動信号となっており、記録する直前で単線の信号に直す必要がある。以上の要求を満たす ために製作した回路を図 4.4 にのせる。エンコーダから届く 5V の差動信号を後段の mini PC (BeagleBone、図 4.1 の右上) でのロジックレベルに合わせるレベル変換と単線信号に 直す処理が行われている。差動信号の足し合わせには Texas Instruments 社製の AM26C31 Differential Line Reciever IC を用いた。BeagleBone は、マイクロコントローラーとして PRU (Programable Realtime Unit) を搭載した小型 PC である。PRU は 200 MHz のク ロックによってリアルタイム処理が行える I/O システムで、この PRU によって高速なパル ス応答が実現される。



図 4.4: 制作した回路と信号変換の概念図。差動信号を単線のパルス信号へ変換し、後段の mini PC のロジックレベルに合わせて  $5V \rightarrow 3.3V$ のレベル変換を行う。

回路上の抵抗によって出力信号はなまってしまうため、パルスの立ち上がりには  $O(10^2)$  ns ほどの遅延が生じる。これは実際の運用ではワイヤーを一定角ごとに停止させるため問題に はならないが、ワイヤーグリッド を連続回転させる際は、ケーブルによる信号の遅延と合わ せてこの影響を考慮しなければならない(図 4.5)。



図 4.5: 取り出された信号のなまり。入力信号を実際の運用より速い 300 kHz を例にすると duty 比も 46% ほどに下がってしまっているのが わかる。

各パルスは絶対位置を返してくれるわけでないので、このエンコーダから送られてくる信 号を少なくとも較正時はずっと処理・記録し続けるだけの性能が求められる。エンコーダの 読み出し速度にかかる上限から、パルスの最大読み出し速度にして 25 kHz(パルス A,B に対 して) 以上がエレクトロニクス (mini PC) に対する要求値となる。

後段の mini PC によるデータ取得が要求を満たすか確認するために、実際のパルス A、B、 Z を模倣し (図 4.6)、mini PC で読み出す試験を行った。テスト用のパルス生成には、アナ ログデジタルコンバータ ADC とデジダルアナログコンバータ DAC を内蔵した簡易計測モ ジュールである ADALM2000 のファンクションジェネレータ機能を用いた。結果、100 kHz という速さであっても信号ロスのないことが確認された(図 4.7 には実際の制御の際に得ら れた信号の時間間隔をあげる)。



図 4.6: ADALM2000 を用いて実際にエンコーダから送られてくるパル ス信号を模倣し、オシロスコープで読み出した図。パルスの形や速さを 自在にプログラムできるため、mini PC の信号処理能力を評価する際に 使用した。(A:100 kHz、B も同様、Z:1 kHz)



図 4.7: mini PC で取得し、DAQ PC で記録したエンコーダ信号の時 間差。パルス A の記録をまとめて 0.5 sec おきにデータパケットとして 送信している。処理のタイミングでほんの僅かに遅れるものがあるが、 1 msec 経ってしまいパケットが丸々ロスしてしまうものはない。

以上のパーツを組み合わせてエンコーダのモニタ用エレクトロニクスを構築した(図 4.8)。 エンコーダの信号処理系には、エンコーダから戻ってきた信号を単線に直し mini PC へと届 ける役割の他、エンコーダへの電力供給のための配線がなされている。

ここで説明したエレクトロニクス(信号変換回路、信号処理用の mini PC、回転制御のための安定化電源)が全て 5 章で紹介する Sparse Wire Grid Calibrator の全体のエレクトロ ニクスボックスに搭載される。



図 4.8: 作成したエンコーダの信号処理系。エンコーダから返ってきた パルスを処理する回路がアルミケース内に入っている。アルミケースの 上には 3 種類のパルスを処理・記録するための mini PC(BeagleBone) が乗っている。

#### 4.2 回転の Feedback 制御

Sparse Wire Grid Calibrator においては、3.4 節で確認したワイヤーグリッドの回転角制 御の要求精度 1°を達成するために、取得した位置情報を元に次の較正点までのワイヤー角の 変化量を調整する Feedback 制御を実装した。ワイヤーグリッドの回転角は、DC モータを用 いて同じ時間間隔で制御したとしても、その大きさにふらつきがある。コンピュータの処理 による時間差とベルトとワイヤーグリッド間の摩擦が、その主な要因である。これにより短 時間のモータ駆動によるワイヤーリングの回転角は Poisson 分布に従い、駆動時間が長くな るほどその尾が長くなる(もちろん一定速度になるまで駆動させてしまえばテイルの長さに は上限に達する)。確率分布  $P(k) = \lambda^k \exp(\lambda)/k!$ の単純な重ね合わせだと、平均の期待値も その和になってしまう。つまり、一回のモータ駆動操作で達成できる回転制御の精度には限 界がある。



図 4.9: フィードバック制御の概念図。左図は上から下にかけて 4step で止まるサンプル(青)と 1step で止まるサンプル(薄い橙色)を比べ て停止位置での分散を表している。右図はフィードバック制御のシミュ レーションで、一度での制御に比べて到達点までの位置から次の動作量 を制限してあげることで、到達点での分散が小さくなることを図示して いる。また一回の制御ではポアソン分布を仮定している。

そこで、目標とする角度までの回転を短時間で小さな角度制御に分け、途中の停止位置で は残りの必要回転角を確認し、次の回転の量(=回転させる時間)を調整することで、最終的 に目標角度付近での分散を小さくすることができる。つまり、図 4.9 に示すように一度に大 きな角度を動かすよりも、エンコーダで得られた角度情報を利用することが高い精度でワイ ヤー角を制御することにつながる。これを Feedback 制御と呼ぶ。この Feedback 制御による 角度の制御精度の向上は実際の測定でも確かめることができた(図 4.10)。図では Feedback 制御しない時に比べ、5 回の制御によって分散が 1/5 に減っていることがわかる。



図 4.10: 22.5° ずつ回転させた時に、Feedback 制御によって最高で約 ±0.6° の精度で各点を周回できることを確認した。

このワイヤー角制御は実際の観測と同じ傾いた姿勢でも動作に狂いが生じることはなかった(図 4.11 と図 4.12)。ここでも 8 箇所で較正点が打てるよう 22.5° おきにワイヤー角を制御した。22.5° おきという較正点の間隔は、ワイヤー角の制御精度と較正にかけられる時間のバランスを見て、より細かく(荒く)することができる。図 4.12 において目標角度よりも手前で停止している点が多く見られるのは、モータを一方向にしか制御せず、また 1° 以下の制御精度を目標としないため、1° の範囲に収まった時点で目標角度に達したとみなして制御しているためである。



図 4.11: 横軸を目標とする停止角度、縦軸を実際に止まった角度とする Feedback 制御の記録。各目標位置に 100 点、合計 100 周分のデータで ある。



図 4.12:目的位置を横軸、実際の停止位置と目的位置との差を縦軸に とった時の 100 周分の制御記録。右図はそれをヒストグラムに直したも の。ほぼ全てが想定位置から ±1°以内に収まっているのがわかる。目 標位置同士の間の制御精度も 22.5 ± 0.8° であった。

### 第5章

# 観測と較正を切り替える ロボット機構の開発

望遠鏡の較正を行うためには、望遠鏡の視野を Sparse Wire Grid で覆わないとならない。 ただし、CMB 観測時にはワイヤーの作る信号が検出器に達しないよう、望遠鏡の視線軸から 外れた位置まで Sparse Wire Grid を遠ざけなければならない。

本研究では、CMB の観測時と望遠鏡の較正時で Sparse Wire Grid の位置を変えるための 機構として、アクチュエータによるロボット制御系を構築した。本観測において SO 実験全 体で用いるソフトウェア制御フォーマット(OCS)への統合も行い、それらを実際に用いて リモート制御により較正時の全ての動作を確認した。

### 5.1 CMB 観測モードと望遠鏡の較正モードの切り替え

本較正装置は、SAT がどの姿勢を向いていたとしても検出器の偏光応答を較正できること が望ましい。観測サイトに人を派遣して較正装置をつけ外しする方法もあるが\*1、観測と並 行して常に較正を行えるわけでもなければ、災害や昨今であれば COVID-19 の影響などでそ もそも観測サイトに人を派遣できないなど、多くの環境要因によって較正が行えるか否かが 左右されてしまう。SO では観測モードと較正モードを遠隔制御で切り替えることで、この困 難を回避すると共に時間的な効率化を計る(図 2.6)。

本研究では原理検証も兼ねて Sparse Wire Grid を出し入れするロボット機構 Grid Loader を構築した。Grid Loader は金属レールとステッピングモータによる 2 本のアクチュエータ を搭載している。これは金属レール上にタイヤを取り付けた台を乗せて、その台をベルトと モータで行き来させることで Sparse Wire Grid 本体を運ぶ(図 5.1)。また図 5.2 に示すよ うに SAT の仰角は 45° から 60° まで変化する。そこで望遠鏡の姿勢に依存することなく較 正モードと CMB 観測モードの切り替えるには、アクチュエータのみによって Sparse Wire Grid の全重量 23 kg を支え、持ち上げる必要がある。

<sup>\*1</sup> 実際、Simons Array 実験ではそのように較正装置を脱着している。



図 5.1: Sparse Wire Grid を支え較正の ON/OFF を切り替える Grid Loader の片側。モータでベルトを回転させることでタイヤ (wheels) で 支持されている金属板を動かす。



図 5.2: CMB 観測時の仰角(Elevation, el)の変化。Grid Loader は図 の中央に位置している。観測時 SAT の Elevation は 45 度~60 度まで 変化するが、上を見上げるほど Grid Loader にかかる負荷は小さくな る。観測シミュレーションにおいて el = 55 deg が較正時の姿勢とされ ている。

#### 5.2 Grid Loader の機械的特性

Grid Loader は、望遠鏡の視野を Sparse Wire Grid で覆い、また視野からそれを取り除 く役目を担う。そのため左右に1つずつある2つのアクチュエータで Sparse Wire Grid の 全荷重を支え、SAT の姿勢に関係なくその較正装置を望遠鏡の視線軸にかざす機能が要求さ れる。



図 5.3: アクチュエータテンショナとベルトのジャンピング(本文参照) を防止するためのアイドラ。ベルトを引き伸ばしテンションをかけるた めのボルトが両側に備わっている。アイドラはベルトとプーリとを挟み こむように押さえつけてベルト送りを補助するものである。

Grid Loader の開発初期には、モータの軸についているプーリ(モータープーリ)がベル トの上を滑ってギアの歯を飛ばしてしまうという問題が存在した。この問題はジャンピング と呼ばれ、ベルトとモータープーリが十分に噛み合っていないために起こる。ジャンピング が起こることで装置の落下に繋がる危険性がある。このジャンピングに対する防止策は主に 2 つある。一つはモータープーリの径を大きくしてベルトとの接触面を増やしてあげること で、もう一つはベルトに強い張力をかけることである。Sparse Wire Grid の動作はベルトに 伝わるモータの力(=トルク/プーリ径)で決まるため、プーリ径を大きくするとモータの力 が弱まってしまう。モータの力不足による落下を防ぐためにも、後者の対策を講じることに した。具体的には、レールに対しモータ軸を引き離すことができるテンショナー機構と、ギ アの歯が飛ばないようベルトを横から押さえつけ、ベルト送りを補助するアイドラ (Idler)を 組み付けた(図 5.3)。さらに、ベルトが装置を支える台から外れてしまわないよう、ベルト の歯に合わせた可動パーツの製作を行った(図 5.4)。

モータおよびアクチュエータのコントローラーについては、垂直方向にワイヤーグリッド を動かすとしても安全率が最低 2 を満たすように選定を行った。Sparse Wire Grid の位置 を望遠鏡の視線軸中央に的確に合わせるため、モータにはステッピングモータを用いている。



図 5.4: Sparse Wire Grid を支え、アクチュエータの動力を伝えるため のアルミ板。レールの上を滑らかに移動するために前後に4つずつコマ がついている。間にはベルトの凹凸に合わせた溝が掘られており、上か らもう一枚のアルミ板でベルトを挟み込むことで、ベルトが装置を支え る板から外れないようになっている。

較正データの取得時には後述する、ストッパーによって Sparse Wire Grid を支えることで モータの稼働を停止させることができるため、ノイズに懸念はない。このステッピングモー タには特性上、早い動作速度ほどトルクが減少してしまうという問題がある。そこで観測 モードと較正モードの切り替えのために許容される時間の上限を片道 3 min と定め、Sparse Wire Grid の荷重 23 kg を持ち上げるのに必要なトルク 2.5 N・m 以上を有するモータを選択 した。またパルスの仕様には、2 相式と呼ばれる 2 対の信号線でモータを動作させるものと、 3 相式と呼ばれる 3 対の信号線で動作させるものがあるが、断線による動作不良のリスクを 避けるため 2 相式のモータを使うこととなった。必要トルクから絞られた 3 つのモータの候 補 (PKP264D28A2、PKP2913D45A、PK269JDA)のうち、動作速度が他と比べ 20 倍以 上遅くなる PKP264D28A2 を除き、コントローラによる供給可能な電流の上限値 3 A を超 えないことを確認した結果、PK269JDA というモータのみが要求を満たすことを確認した。

以上をもとに開発したのが、Sparse Wire Grid Calibrator の制御用ハードウェア(5.5)と エレクトロニクス(図 5.6)である。ソレノイド式のストッパーは、観測・較正どちらの状況 にあっても Sparse Wire Grid の位置を mm 精度で固定して動かないようにするために用い ている。



図 5.5: Sparse Wire Grid の出し入れ制御用ハードウェア。リミットス イッチとストッパーは装置の出し入れする際、制御の助けをするために 入れてある。

実際に Sparse Wire Grid を支え動作させることができるかは、アクチュエータに用いる モータとベルトの特性によって決まる。観測サイトであるアタカマ高地は海抜 5200 m にあ り、装置は –20 °C から 20 °C という気温変化に加え、強い紫外線と乾燥という極限状況にさ らされる。特にギアが筐体で覆われているモータに比べ、ベルトは常に外気にさらされた状 態となる。そこで前述のモータ PK269JDA と組み合わせるベルトとして、EV5GT という ベルト (ベルト幅は 9 mm)を用いた。このベルトはグラスファイバーコードの心線をハイモ ジュラスゴムで挟み込むことで、耐候性と高効率なトルク伝達を実現し、また大きなベルト の歯によってジャンピングが起こりにくいという特徴がある。



図 5.6: Sparse Wire Grid Calibrator の制御用エレキ。上半分が回転の 制御、読み出しに関わる機器。左下がアクチュエータを制御する機器。 右下には諸々の電源がある。これらを制御するコードも白眉特定助教の 安達氏ととも開発し、SO 全体の制御系 OCS に統合した(後述)。

#### 5.3 Grid Loader の耐荷重試験

Grid Loader には Sparse Wire Grid 全体を動かし支え、保持するだけの強力なトルクが 求められる。これを実際の試験によって保証した。試験には、Sparse Wire Grid Calibrator 全体を支え、また取り付け角度を変えることができるアルミフレームの土台を用意した (図 5.7)。土台を傾けて模擬的に SAT の仰角変化を再現することができる。この試験では、 Sparse Wire Grid の代わりとなる重りを Grid Loader に積載し、一定速度で動作させた時 に、どこまでの荷重に対し Grid Loader が耐えられるかを確かめた。その結果は、概ねモー タのスペック通りで、運用時の傾斜 55° でワイヤーグリッドの約 3.9 倍の重量を動かせると 見積もられた (図 5.8)。観測と較正の切り替えの早さに関しても片道 90 sec と目標値「3 分 未満」より十分に早い。



図 5.7: 耐荷重試験に用いた Sparse Wire Grid Calibrator を支えるフ レーム。間にあるアルミフレームのカゴに重りを乗せる。



図 5.8: モータ PK269JDA のスペックシートから見積もった動作ス ピードに対する耐荷重のグラフと耐荷重試験から推定された最大許容荷 重(黒点)。実際の較正は仰角 55° に対応する傾斜でしか行わないので、 Sparse Wire Grid の重さ 23 kg(緑点線)×  $\sin(35°) = 13.2$  kg が必要 な耐荷重(赤点線)となる。

以上をもとに構築したシステムの写真を 5.9 に示す。較正装置本体を囲うアルミフレーム の枠は実際の観測と同じく較正装置を傾けてワイヤーグリッドを挿入・抜去するためにシス テム全体の支えとなる。



図 5.9: 左から共同研究者の村田氏、Sparse Wire Grid Calibrator、筆

者、そして制御用のエレキがある。

### 5.4 制御ソフトウェア開発

Sparse Wire Grid Calibrator の制御系は、いくつものデバイスが複雑に連携し合うため、 開発段階では間違った手順で装置を動作させないよう細心の注意が必要である。そこで誰も がどこからでも安全に較正を行えるよう、コマンド一つで観測と較正を切り替え、ワイヤー リングを回転する制御ソフトウェアを開発した。

SO ではいくつかのオープンソース (Docker、crossbar、Influxdb、Grafana) を統合した 観測制御システム (Observatory Control System、OCS) というものを独自に開発して用い ている<sup>\*2</sup>。OCS では制御 PC 上に立てられた Docker コンテナ (狭義の "OCS Agent") を crossbar によって結びつけることで一つの望遠鏡の制御と DAQ を行う (図 5.10)。OCS 最 大のメリットは、crossbar によって望遠鏡の一連の制御とモニターが単一のシステムによっ て扱えることである。さらに Docker システムによる仮想 OS の中だけで完結した DAQ シ ステムを構築できるため、既に開発された OCS イメージをそのままダウンロードしてくるだ

<sup>\*2</sup> https://ocs.readthedocs.io/en/latest/?badge=latest

けで、本体の環境依存なく誰でも簡単に測定用のソフトウェアセットアップが組むことがで きるという特徴もあわせ持つ。本研究でもエンコーダ、回転モータ、アクチュエータを制御 する汎用の OCS Agent をそれぞれ開発した。



図 5.10: OCS のシステム概念図。Docker System 以外に Host Machine に特別な環境構築を必要としないため、Lab・観測サイトいずれにおいて も制御系の構築が容易になる。図中央に位置する crossbar・Aggregator コンテナイメージ(あるいは Agent)により制御用のスクリプト・デー タ蓄積用のサービス(InfluxDB)・web モニター (Grafana) が連携する 仕組みになっている。

各ハードウェアによって取得されたデータは記録される際、InfluxDB によって取得日時ご とにまとめて対応づけされるため、特定の日時の各デバイスデータに即座にアクセスするこ とができる。これは長期間にわたって TOD の取得を行う私たちにとっても都合が良い。ま た Grafana に連携することでリアルタイムモニターとしての機能も併せ持つ。本研究におい て開発した制御ソフトウェアも全て OCS に統合した。図 5.11 は、OCS によって傾いた姿勢 で Sparse Wire Grid Calibrator を動作させた時のログ画面をキャプチャしたものである。

### 5.5 ロボット機構の統合試験

全てのパーツ・エレクトロニクス・ソフトウェアを統合した装置を構築し、図 5.12 のよう に統合試験を行なった。傾斜角度 55° で Sparse Wire Grid Calibrator の動作とそのリモー

Browser									
-Connection ✓ [hide]					-Op Session Wind	dow			
WAMP und	we://localbort:9001/we			a l					
WAMP realm:	test realm								
Agent address	observatory woencoder			- 1					
Operation name:	observatory.ingencoder								
Feed sub:	WGEncoder rough		•						
				_					
Agents				101					
observatory.aggregato	r		+7						
observatory.influxage	nt		+*		Feed: observato	ry.wgencoder.feed	ls.WGEncoder_rou	gh	
observatory.registry			+*		observatory.wgend	oder.feeds.WGEncod	er_rough @ 2022-01-	09 11:01:51	
observatory.wgactuator	r		+1		[{"WGEncoder_roug	h":{"block_name":"	WGEncoder_rough","o	lata":{"quadra	ature":[1,1,1,1,1,1,1
observatory.wgencoder			++		1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	.,1,1,1,1,1],"pru_c 71000151 650827810	lock":[650827309995 20299 6508279100043	93,6508274099 0 65082801000	99741,65082750999872, 9578 65082811000709 6
observatory, wakikusui			+1		821000857,6508283	1000988,6508284100	1136,65082851001267	,650828610014	15,65082871001546,65
observatory, wasynacc			++	4	81001694,65082891	001825,65082901001	973,65082911002104,	6508292100225	2,65082931002383,650
Interface				1.200	5923076923078,200	.85923076923078,20	0.85923076923078,200.8	0.85923076923	200.859230769230769230
Processos					00.85923076923078	,200.8592307692307	8,200.8592307692307	8,200.8592307	76923078,200.85923076
Processes			n mai na	.	78,200.8592307692 923078,200.859230	:3078,200.859230769 176923078,200.85923	23078,200.85923076 376923078,200.85923	23078,200.855	23076923078,200.8592 8.859230769230781."er
Tasks			Funiting	'	r":[0,0,0,0,0,0,0	,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0	,0,0,0,0,0,0],"roto	tion_speed":[	0,
Feeds					0,0,0,0,0,0,0,0,0,0	1,0]},"timestamps": 135 1641726110 654	[1641726110.5062504 5502 1641726110 895	,1641726110.5	506871,1641726110.554
WGEncoder rough					1432,1641726110.8	962874,1641726110.	9043314,1641726110.	9546793,16417	26111.0564106,164172
					1.0570374,1641726	111.1046147,164172	6111.154644,1641726	111.2043104,1	1641726111.254678,164
With proder tull					1111 1046001 16411	1/1/1 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/			
WGEncoder_full					111.3046093,16417 {"agent_address":	26111.3543558,1641 "observatory.waence	oder","aaa_params":	{"frame_lengt	:h":60}."feed_name":"
WGEncoder_full heartbeat				h	111.3046093,16417 {"agent_address": coder_rough","add	26111.3543558,1641 "observatory.wgence iness":"observatory	oder","agg_params": wgencoder.feeds.W(	{"frame_lengt Encoder_rough	:h":60},"feed_name":" ","record":true,"ses
WGEncoder_full heartbeat				4	111.304603,16417 {"ogent_address" coder_rough", "add	26111.3543558,1641 "observatory.wgenc: iress": "observatory	/2011.4040053.104. Joder", "agg_params" .wgencoder.feeds.W	Encoder_rough	<pre>(*,10472011:0004513 hi:68); ffeed_name": ","record":true,"ses</pre>
With Coder_full heartbeat col Log [show] Wire-grid Angle		400*			11.394693,1641 {"agent_address" coder_rough","add	Rotation Encode	Zoll: veneoc3.prome? wgencoder.feeds.W	{"frame_lengt Encoder_rough	h'i (6), 'feed_mame': ", "record":true, "ses
With coder_full heartbeat		400 *			11.346693,1647 (agent_address': coder_rough","add coder_rough","add	Zol11.354558,1641 Göbervatory, agenc ress": "öbservatory	2011. venedos3, Joy der, " ogg. parane", "gencoder, feeds. W	{"frame_lengt Encoder_rough	it": (2), "fead donta" ", "record": true, "ses
With Coder_full heartbeat		400*			11.346693,1647 ("agent_address": coder_rough", "od mistrationary"	Coll1.354558,164 Gobervatory, Agence Tress : dobervatory	r	(frame_lengt	(h <sup>+</sup> :69), "feed.nome";" ", "record":true, "ses
Withcoder_tuil heartbeat		400 *			111.394695.1647 (* ogent_oddress * Control (* oddress * (* ********************************	Rotation Encode	Colline werdendog prome ? were college and the second sec	("frane_leng	(h <sup>+</sup> ):69), "feed.neme";" ", "record":true, "ses 0.80
Wencoder_full heartbeat al Log [show] Wire-grid Angle Vire-grid Angle		400 * 300 *			11.394683.1947 Codent cognition	Rotation Encode	r	(Coline, Speed	(i <sup>+</sup> ): 69), "feed nome": " ", "record": true, "ses 0.80 0.60
Wite-grid Angle		400 * 300 *			11.394695.1647 ("agent_address": Control of the second sec	Rotation Encode	r	(*frane_leg)	(h <sup>+</sup> ):69)."Feed.nome":" ","record":true,"ses 0.86
Wire-grid Angle	1669	400 * 300 * 200 *		*	11.3946683.1947 Coder cogi	Rotation Encode	r	("frame_length	(1 <sup>+</sup> ): 69), "feed none": " ", "record": true, "ses 0.80 0.60
Withcoder_full heartbeat al Log [show] Wire-grid Angle	e (dec)	400 * 300 * 200 *			11.394695.1647 ("agent_address": Craft_address": In an angle address ("agent_address") In an angle address ("agent_address")	Rotation Encode	r	(*fram_lengt	(1 <sup>+</sup> ):69)"feed.nom":"- ",""record":true,"ses 0.80 0.60 0.40
Withcoder_tull heartbeat al Log [show] Wire-grid Angle	ange tees	400 * 300 * 200 *			11.9446833.1547 Coder Cody	Rotation Encode	der*, *ogsoros*	(*from Leng	(1 <sup>+</sup> ):69), "feed_nome": ","record":true,"ses 0.80 0.60 0.40
Wichcoder_full heartbeat at Log [show] Wire-grid Angle	Tools for the second	400 * 300 * 200 * 100 *			111.394695.1647 (* opent.address : creations) - creations - creati	Rotation Encode	r	(*fram.leng	(1 <sup>+</sup> ): 69) Feed nome : 1 ", "record" : true, "ses 0.86 0.86 0.46 0.40
Withcoder_full heartbeat al Log [show] Wire-grid Angle Vire-grid Angle	Copiest of the second sec	400 ° 300 ° 200 °		,, , , ,	11.0946083.1947	Rotation Encode	der*,*ogsorme*	("frome_length	(1 <sup>+</sup> ):69), "Feed none": ","Record":true, "sets 0.86 0.66 0.46 0.20
Wichcoder_full heartbeat al Log [show] Wire-grid Angle Vire-grid Angle	o O	400 * 300 * 200 * 100 *		, r	111.394695.1647 (* opent.add) Grant and the second se	Rotation Encode	r	("frome_length	(1)"; (3), "feed none"; " ", "record"; true, "ses 0,80 0,80 0,40 0,40

図 5.11: OCS によるモニター画像。(上)各 OCS Agent の制御コマン ドを表示する ocs-web。Aggregator あるいは InfluxDB に Agent が正 しく認識されないと表示されない。(下)Feedback 制御の際の Grafana view。Encoder の制御 OCS agent のデータを表しており、回転角度を 表示している。約 22.5° ステップで回転が停止しているのが見てとれ る。

ト制御を確認した。Sparse Wire Grid を出し入れする観測・較正の切り替えが片道 90 sec、 (22.5° おきに 10 sec ずつ停止させる) ワイヤーリングの回転が 4 min 20 sec で完了すること を確認した。よって、較正全体で 7 min20 sec となり、十分実用上の問題がない時間で構成が できることが確認できた。ワイヤーリングの回転は 1 ステップあたり約 6 sec で角度制御で きており、従来の手動による角度調整より十分に高速である。なお、図 5.12 にある QR コー ドから実験時のムービーが閲覧可能である。



図 5.12: 傾斜角度 55°で挿入動作時の Sparse Wire Grid。前節の OCS システムによって遠隔制御されている。リングの両側には黒いアクチュ エータレール、その下端には回転部等を持ち上げるための一対のモータ が備わっている。システムの中央下部には制御用のケーブルがまとめら ているのがわかる。バッフル (Baffle) は望遠鏡の視線方向以外から入っ てくる迷光を遮断するためのもので、その内側に望遠鏡の窓および視線 中心がくる。

### 第6章

## CMB 受信機との統合試験

### 6.1 シカゴ大学での光学試験セットアップ

望遠鏡の受信機は屋内の実験室において性能を確認した後、チリの海抜 5200 m にある観 測サイトへと送られる。この性能試験においても Sparse Wire Grid Calibrator は活躍して いる。最初の性能試験(厳密には LAT に搭載する受信機の一部の性能試験)が、シカゴ大学 にて行われている(図 6.1。ここでのセットアップには SAT の本観測とは異なり、HWP が 備わっていない。そのため、3 章で紹介した本観測と同じ手法では、検出器の偏光応答を評価 できない。そこで、この性能試験ではワイヤーグリッドを連続回転する事で、偏光信号を変 調し、偏光応答性が較正できることを確認した。



図 6.1: シカゴ大学にあるテスト用 CMB 受信機に置かれた Sparse Wire Grid。受信機の窓は図の上方向を向いており、ワイヤーグリッド がその窓全体を覆っている。

### 6.2 データ解析

図 6.2 に示す時系列データ(TOD)には Sparse Wire Grid を連続回転させたことで得ら れた偏光信号の変調変化が確認できる。回転速度は約 0.3 Hz である。Sparse Wire Grid の 回転と同期する検出器の応答が見てとれる。TOD には制御デバイスの電源による高周波ノ イズや、環境の大気揺らぎなどによるゆったりと変化するノイズ、さらには信号のオフセット などが乗っており、それは時間とともに緩やかにドリフトする。そこで Sparse Wire Grid と 同期していると思われる信号範囲を周波数フィルターによって取り出す。周波数フィルター には利用頻度の高い 4 次の Butterworth フィルターを用いた。図 6.3 に示すように、フィル ターのカットオフは低周波数側が 0.1 Hz、高周波数側が 1 Hz である。周波数範囲は信号オフ セットや電源に伴う 60 Hz の高周波揺らぎをカットするように選んでいる。



図 6.2: ある一つの検出器の TOD。エンコーダの参照角度(橙色)は 360° 回転する毎にカウントがゼロに戻る。縦軸は検出器の応答(青)に 対するもの。



図 6.3: 実際の TOD を周波数フィルターを通して変換する様子。ノイ ズを多く含む右上の応答信号の振幅と周期が、右中央のバンドパスフィ ルタによって、右下では整えられていることがわかる。

TOD には何周期にもわたる信号が見られるので、エンコーダによる Sparse Wire Grid の 回転周期ごとに信号を取り出し重ね合わせたものが図 6.4 である。ここでは 2 つの異なる検 出器のデータを並べて示す。データ点はおよそ 12°毎に binning してある。検出器ごとにゲ インと位相が違う(つまり偏光角が違う)ことがハッキリとわかる。つまり、検出器の偏光 角応答が較正できることが確認できた。



図 6.4: Sparse Wire Grid を連続回転させた際に得られたワイヤーによ る偏光信号を、バンドパスフィルターを通し、一定幅で binning した後 にフィットした例。青色の分布がフィルターを通してみた検出器の応 答信号。橙色の線がフィット結果を表す。上の図が TOD と同じ検出器 チャンネル。

### 第7章

## まとめと観測にむけた展望

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の強度相関を測定することで、人類は宇宙の 95 %が未 解明であることを突き止めた。次なる目標として、私たちは、CMB 偏光の大角度相関を精密 に観測することで、インフレーションが起こった時代の宇宙像を知ろうとしている。Simons Observatory 実験はアタカマ高地(海抜 5200 m)において、複数台の望遠鏡を運用し、世 界最高精度で CMB 偏光の測定を目指す地上観測実験である。3 台の小口径望遠鏡 SAT に は、合計で約 3 万個もの超伝導検出器 TES を搭載する。SAT はインフレーションに由来す る原始重力波が作り出す B モードと呼ばれる微弱な偏光信号を捉えようとしている。高い確 度で B モードを捉えるためには、0.1°以下という精度での検出器アンテナの向き(偏光角) を較正しなければならない。本研究では、上記の目標を達成するために Sparse Wire Grid Calibrator と呼ばれる較正装置を開発し、その性能を確認した。

較正装置は、周囲の熱放射を金属ワイヤーによって反射させることで、較正に必要な偏光 信号を作り出す装置である。光学系の系統誤差を評価するためには、全てのワイヤー角方向 に対する検出器の応答を理解する必要があった。そこで高い分解能を持つエンコーダを含む 読み出し回路によって 0.003°以下でのワイヤー角モニターと、回転制御機構を構築した。ま た、ワイヤー角の変化を見逃さないよう、小型のファンクションジェネレータを用いてエン コーダ波形を模した信号を作り出し、信号処理速度を評価した。その結果、回転角の読み出し にはエンコーダの読み出し上限以上のパルス速度であっても信号ロスがないことを確認した。

時間経過による系統誤差の低減に向けて、観測時と較正時を効率良く切り替えるロボット 機構を開発した。高負荷での動作保証によって運用上の安全性を担保するベルト及びモータ 等の部品を選定した。さらに、ベルトに高い張力がかけられるようアクチュエータを改良し、 ベルトが滑ることで装置が落下してしまうことの対策を施した。その結果、運用上の荷重に 比べ 3.9 倍の重さまで耐えられることを確認した。本研究により、従来よりも高頻度かつ高 精度な偏光角較正が行えるシステムが完成した。

本研究で開発した較正装置は、シカゴ大学における光学評価によって、その性能が実証さ れた。今後の展望として、連続回転式半波長板 HWP が搭載された SAT 受信機との統合試 験を控えている。この受信機は UCSD での試験を終えた後、9 月にはチリの観測サイトに送 られ、2023 年から世界最高感度と世界最良の較正精度を兼ね備えた CMB 観測が始まる。

## 謝辞

本修士論文の執筆に際し、多くの方々にお世話になりました。数多くのサポートをしてく ださった全ての方々に、この場を借りてお礼を申し上げます。2年間、非常に多くの制限と障 壁がある中、ノビノビと研究をさせていただいたことに感謝しています。

指導教員である田島治准教授には、較正装置のスローコントロールという CMB 観測実験 の基盤とも言える研究に誘っていただきました。自由気ままな私に的確なタイミングでアド バイスしていただいたおかげで、コツコツと研究を進めることができました。色々と節目の 重なる本年度であるにも関わらず、修士論文の構成に多くの労力をかけていただき、また細 かな表現に至るまで適切な助言をいただきました。

鈴木惇也助教と白眉特定助教の安達俊介氏には、機器の制御や CAD の扱いに始まり、問題の打開策に繋がるヒントまで数多くサポートしていただきました。まだ実践にうつせてないところも多くありますが、大事な研究姿勢を教わりました。鈴木さん、安達さんのように知識も技術も並外れた研究者が身近にいることをこの上なく幸運だと思います。

Simons Observatory 実験の皆様にも感謝申し上げます。特に村田雅彬氏と飯島健五氏に は、較正装置の開発研究を通じて多くのコミュニケーションと議論を交わしていただきまし た。二人がいなけばこうして修論をまとめることは叶わなかったと、改めて感じました。東 大の日下暁人准教授と木内健司助教、JAXA の松田 Frederick 特任助教、本学ポスドクの清 野結大氏には、ミーティング等で私の些細な疑問にも丁寧に答えていただきました。シカゴ 大学の Katie Harrington さん、Rain Naylor さん、UCSD の Grant Teply さん、Nicholas Galitzki さん、Michael Randall さんには装置の輸出入や光学試験のセットアップに多くの 時間を割いていただきました。

京都高エネと CMB グループの方々にも改めて感謝申し上げます。同期の樫野幸将君、川 上将輝君、小高駿平君、佐野高嶺君、吉村宣倖君にはそれぞれが取り組んでいる研究の話題な どから良い刺激をもらいました。D1 の末野慶徳氏、M1 の武市宗一郎君、藤中崚君には、装 置のセットアップを手伝ってもらうなどお世話になりました。また工作室の道下人支氏と田 尾彩乃さんには、パーツ製作のための技術的なアドバイスを多くいただきました。関口晴美 さん、佐々木真奈さんをはじめ実験秘書の皆様にも事務手続きで色々とお世話になりました。

最後に私を温かく見守り、支えてくれた祖母と両親、妹たち、そしてそらから見守ってく れている曽祖母と祖父に感謝を述べたいと思います。ありがとうございました。

COVID-19と戦う全ての医療従事者の方々にも感謝を込めて

## 参考文献

- D. J. Fixsen, E. S. Cheng, J. M. Gales, J. C. Mather, R. A. Shafer, and E. L. Wright. The cosmic microwave background spectrum from the FullCOBEFIRAS data set. *The Astrophysical Journal*, 473(2):576–587, dec 1996.
- [2] C. L. Bennett et al. First-year wilkinson microwave anisotropy probe(wmap) observations: Preliminary maps and basic results. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 148(1):1–27, sep 2003.
- [3] Jérôme Martin, Christophe Ringeval, and Vincent Vennin. Encyclopædia inflationaris. *Physics of the Dark Universe*, 5-6:75–235, 2014. Hunt for Dark Matter.
- [4] M.Tristram et al. [2112.07961] improved limits on the tensor-to-scalar ratio using bicep and planck. https://arxiv.org/abs/2112.07961?context=astro-ph, 12 2021. (Accessed on 01/16/2022).
- [5] Planck Collaboration Y. Akrami et al. Planck 2018 results. x. constraints on inflation. 2018.
- [6] Lloyd Knox and Yong-Seon Song. Limit on the detectability of the energy scale of inflation. *Phys. Rev. Lett.*, 89:011303, Jun 2002.
- [7] Peter Ade et al. The simons observatory: science goals and forecasts. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2019(02):056–056, feb 2019.
- [8] Thomas L. WilsonKristen RohlfsSusanne Hüttemeister. Tools of Radio Astronomy. Springer, 2013.
- [9] S. Adachi, M. Hattori, F. Kanno, K. Kiuchi, T. Okada, and O. Tajima. Production method of millimeter-wave absorber with 3d-printed mold. *Review of Scientific Instruments*, 91(1):016103, 2020.
- [10] The Polarbear Collaboration: P. A. R. Ade et al. A MEASUREMENT OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUNDB-MODE POLARIZATION POWER SPECTRUM AT SUB-DEGREE SCALES WITH POLARBEAR. *The Astrophysi*cal Journal, 794(2):171, oct 2014.
- [11] E. M. Leitch et al. Measurement of polarization with the degree angular scale interferometer. *Nature*, 420:763 771, 2002.
- [12] Yuki D. Takahashi et al. CMB polarimetry with BICEP: instrument characterization, calibration, and performance. In William D. Duncan, Wayne S. Holland,

Stafford Withington, and Jonas Zmuidzinas, editors, *Millimeter and Submillimeter Detectors and Instrumentation for Astronomy IV*, volume 7020, pages 373 – 384. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2008.

- [13] P. A. R. Ade et al. BICEP2. II. EXPERIMENT AND THREE-YEAR DATA SET. The Astrophysical Journal, 792(1):62, aug 2014.
- [14] D. Hanson et al. Detection of b-mode polarization in the cosmic microwave background with data from the south pole telescope. *Phys. Rev. Lett.*, 111:141301, Sep 2013.
- [15] J. J. McMahon et al. Sptpol: an instrument for cmb polarization. AIP Conference Proceedings, 1185(1):511–514, 2009.
- [16] C. Bischoff et al. New measurements of fine-scale CMB polarization power spectra from CAPMAP at both 40 and 90 GHz. *The Astrophysical Journal*, 684(2):771–789, sep 2008.
- [17] J. L. Weiland et al. SEVEN-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP) OBSERVATIONS: PLANETS AND CELESTIAL CALIBRA-TION SOURCES. The Astrophysical Journal Supplement Series, 192(2):19, jan 2011.
- [18] Akito Kusaka et al. Results from the atacama b-mode search (ABS) experiment. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2018(09):005–005, sep 2018.
- [19] QUIET Collaboration: C. Bischoff et al. FIRST SEASON QUIET OBSERVA-TIONS: MEASUREMENTS OF COSMIC MICROWAVE BACKGROUND PO-LARIZATION POWER SPECTRA AT 43 GHz IN THE MULTIPOLE RANGE 25 ≤ \$\ell\$ ≤ 475. The Astrophysical Journal, 741(2):111, oct 2011.
- [20] Brian Koopman et al. Optical modeling and polarization calibration for CMB measurements with ACTPol and Advanced ACTPol. In Wayne S. Holland and Jonas Zmuidzinas, editors, *Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VIII*, volume 9914, pages 687 698. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2016.
- [21] J. R. Hinderks et al. QUaD: A HIGH-RESOLUTION COSMIC MICROWAVE BACKGROUND POLARIMETER. The Astrophysical Journal, 692(2):1221–1246, feb 2009.
- [22] Philip C. Farese et al. COMPASS: An upper limit on cosmic microwave background polarization at an angular scale of 20'. The Astrophysical Journal, 610(2):625–634, aug 2004.
- [23] T. E. Montroy et al. A measurement of the CMB < EE > spectrum from the 2003 flight of BOOMERANG. The Astrophysical Journal, 647(2):813–822, aug 2006.
- [24] 高倉理. Characterization of a continuous polarization modulator using a half-wave plate for measurements of degree-scale cosmic microwave background with the po-

larbear experiment. 2017.

- [25] 阿部倫史. [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, 2019.
- [26] 村田雅彬. [修士論文]simons observatory 実験のためのスパースワイヤーグリッドを用 いた偏光較正装置の開発 (development of the sparse wire grid polarization calibrator for simons observatory experiment), 2021.

## 付録A

## ストークスパラメータ

電波源からの光の持つ偏光を測定する際、その電場がどのように変化するかを知る必要が ある<sup>\*1</sup>。例えば、z 軸方向に進行する振動数 ω の平面波

$$\boldsymbol{E} = \operatorname{Re}\left[ (E_1 e^{i\delta_x} \boldsymbol{e}_x + E_2 e^{i\delta_y} \boldsymbol{e}_y) e^{i(\omega t - kz)} \right]$$
(A.0.1)

を考えると、それぞれのストークスパラメータ(図 A.1)の定義は以下で与えられる。

$$I = \left(E_1^2 + E_2^2\right) / Z_0 \tag{A.0.2}$$

$$I = (E_1 + E_2) / Z_0$$
(A.0.2)  

$$Q = (E_1^2 - E_2^2) / Z_0$$
(A.0.3)

$$U = 2E_1 E_2 \cos \delta / Z_0 \tag{A.0.4}$$

$$V = 2E_1 E_2 \sin \delta / Z_0. \tag{A.0.5}$$

 $E_1, E_2$ はそれぞれ x,y 軸方向の電場の振幅を、 $\delta_x, \delta_y$ はそれぞれの位相を表す。また  $Z_0$  は 真空のインピーダンス(およそ 376 Ω)である。このことから、ストークスパラメータがわか れば、入射光がどの方向に偏光しているか、がわかる。例えば、x 軸に対してそれぞれ角度 φ = 0°, 45°, 90°, 135° だけ傾いているアンテナで、ある完全直線偏波を測定した時、ストー クスパラメータ I, Q, U と各アンテナの応答強度 S(0), S(45), S(90), S(135) の間には

$$I = S(0) + S(90) = S(45) + S(135)$$
(A.0.6)

$$Q = S(0) - S(90) \tag{A.0.7}$$

$$U = S(45) - S(135) \tag{A.0.8}$$

という関係が成り立つ。このように検出器アンテナの角度を正確に把握することは、ストー クスパラメータを正しく特定するために必須である。

<sup>\*1</sup> ここで notation は中井直正他「宇宙の観測 2 電波天文学」(日本評論社)に従う。



与え、QとUが直線偏光を、Vが円変更を記述するのに用いられる。