

# 第1章 Simons Observatory 実験

## 1.1 Simons Observatory 実験

Simons Observatory 実験 (以後、SO と呼ぶ) は、チリのアタカマ砂漠を拠点とする史上最大規模の地上 CMB 観測実験である。現在、口径 0.5 m の小口径望遠鏡 (Small Aperture Telescope, SAT) 3 台と、口径 6 m の大口径望遠鏡 (Large Aperture Telescope, LAT) 1 台を用いた観測が進められている。[so:current`status] 検出器としては TES (Transition Edge Sensor) 検出器を採用しており、SAT にはそれぞれ約 1 万個ずつ、LAT には約 3 万個の検出器が搭載されている。合計約 6 万個もの検出器を通して CMB の変更を高精度で測定し、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、ニュートリノ質量和の測定を目指す。[so:science`forecast]

立体角  $\Omega$ 、開口面積  $A$ 、観測波長  $\lambda$  について、回折限界の関係式

$$\Omega = \frac{\lambda^2}{A} \quad (1.1)$$

を考えると、より大きな口径  $A$  を持つ望遠鏡ほどより高い角度分解能を有し、小角度の相関を観測するのに適していることがわかる。その一方で、大口径の望遠鏡は一度に観測できる範囲も小さくなるため、大角度の相関を観測するのに時間を要し、大気揺らぎの影響を受けやすくなってしまふ。以上の理由から、小口径で大角度相関を調べる SAT と、大口径で小角度相関を調べる LAT を組み合わせることで、CMB のより精密な測定を実現する。

## 1.2 Large Aperture Telescope (LAT)

## 1.3 Small Aperture Telescope (SAT)

### 1.3.1 TES 検出器

### 1.3.2 極低温連続回転式半波長板 (HWP)

大気による熱放射は常に揺らいでいる。これは大気による  $1/f$  ノイズとして知られ、CMB 偏光観測実験においては、このノイズと CMB 偏光信号を分離することが重要である。Simons Observatory では、この大気による熱放射を取り除くために、極低温連続回転式半波長板 (cryogenic continuously rotating Half-Wave Plate, 以後、単に CHWP と呼ぶ) を用いる。[so:hwp`yamada]

一般に、HWP は複屈折の特性を持つ素材からなり、素子中のある決まった軸に対して電場成分を反転させる。すなわち、HWP に入射する光の電場  $E$  は HWP を通過することで

$$E_1 = E_1 \quad (1.2)$$

$$E_2 = -E_2 \quad (1.3)$$

となる。ここで、1, 2 はそれぞれ HWP の光学軸を表し、1 軸に対して電場成分が反転している。入射光として偏光角が HWP の 1 軸から測って  $\chi$  であるような直線偏光した光を考える。HWP

を通過した後の偏光角は  $-\chi$  となり、偏光が1軸対称に反転、つまり  $-2\chi$  だけ変化する。(図 1.1) この性質により、入力信号のストークスパラメータがそれぞれ  $I_{\text{in}}(t), Q_{\text{in}}(t), U_{\text{in}}(t)$  であるとき、出力信号  $d_m(t)$  は

$$d_m(t) = I_{\text{in}}(t) + \varepsilon \operatorname{Re} [(Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)) \exp(-i4\chi)] \quad (1.4)$$

となる。ここで、 $\varepsilon$  は変調効率である。SO では、HWP を 2 Hz で回転させることで、連続的に入射する直線偏光による信号を 8 Hz に変調して出力する。HWP の角振動数を  $\omega_{\text{HWP}}$  とすると、 $\chi = \omega_{\text{HWP}} t$  と表され、出力信号は

$$d_m(t) = I_{\text{in}}(t) + \varepsilon \operatorname{Re} [(Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)) \exp(-i4\omega_{\text{HWP}} t)] \quad (1.5)$$

となる。検出器はある偏光角方向  $\theta_{\text{det}}$  にのみ感度を持つため、最終的に検出器が読み出す信号  $d_{m,\text{det}}$  は

$$d_{m,\text{det}}(t) = I_{\text{in}}(t) + \varepsilon \operatorname{Re} [(Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)) \exp \{-i(4\omega_{\text{HWP}} t - 2\theta_{\text{det}})\}] \quad (1.6)$$

となる。この信号のフーリエ変換は

$$\begin{aligned} \tilde{d}_{m,\text{det}}(\Omega) &= \tilde{I}_{\text{in}}(\Omega) \\ &+ \frac{\varepsilon}{2} \left[ \left\{ \tilde{Q}_{\text{in}}(\Omega + 4\omega_{\text{HWP}}) + i\tilde{U}_{\text{in}}(\Omega + 4\omega_{\text{HWP}}) \right\} \exp(i2\theta_{\text{det}}) \right] \\ &+ \frac{\varepsilon}{2} \left[ \left\{ \tilde{Q}_{\text{in}}(\Omega - 4\omega_{\text{HWP}}) - i\tilde{U}_{\text{in}}(\Omega - 4\omega_{\text{HWP}}) \right\} \exp(i2\theta_{\text{det}}) \right] \end{aligned} \quad (1.7)$$

である。この式はほとんど時間変化しない信号 ( $\Omega \sim 0$ ) が HWP を通過することで、周波数  $\pm 4\omega_{\text{HWP}}$  のところに移ることを示している。このようにして、元々  $1/f$  ノイズが大きかった低周波帯の信号を、ノイズの少ない高周波帯に変換できる。 $Q_{\text{in}} + iU_{\text{in}}$  を得るためには、 $+4\omega_{\text{HWP}}$  のまわりのみを通すバンドパスフィルタ  $\mathcal{F}^{\text{BPF}}$  を通した後、2 倍して位相を元に戻せば良い。つまり、復調後に得られる信号  $d_{d,\text{det}}$  は

$$d_{d,\text{det}}(t) = \mathcal{F}^{\text{BPF}}[d_{m,\text{det}}(t)] \times 2 \exp(i4\omega_{\text{HWP}} t) \quad (1.8)$$

$$= \varepsilon [Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)] \exp[i2\theta_{\text{det}}] \quad (1.9)$$

となっている。

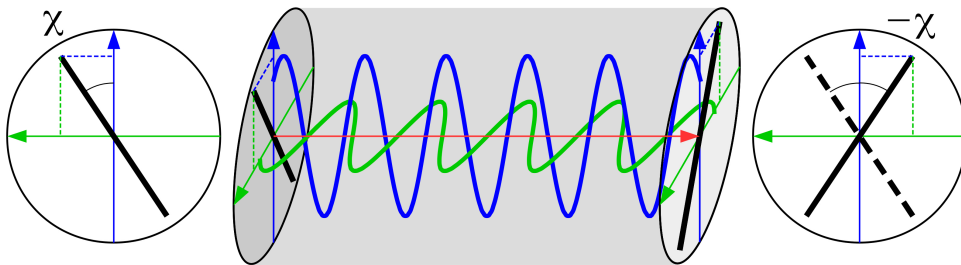


図 1.1: HWP を通過することで、偏光角が変化することを示した概念図。青い軸が 1 軸、緑の軸が 2 軸に対応する。入射した直線偏光の偏光角が 1 軸に対して  $\chi$  であり、複屈折によって  $-2\chi$  だけ変化する。

## 1.4 偏光角較正の重要性とその手法

CMB 偏光観測実験での B-mode 観測において、検出器の偏光角を精度よく知ることは極めて重要である。本節では、偏光角の誤較正が観測された B-mode 偏光にどのような影響を及ぼすかを説明し、CMB 偏光観測実験においてどのような偏光角較正手法が歴史的に取られてきたかについて述べる。

### 1.4.1 偏光角の誤較正に伴う偏光の漏れ込み

今、すべての検出器における偏光角を  $\delta\theta$  だけ誤って較正してしまったとすると、観測されるストークスパラメータ  $Q_{\text{obs}}, U_{\text{obs}}$  は真のストークスパラメータ  $Q, U$  に対して

$$Q_{\text{obs}} \pm iU_{\text{obs}} = e^{\pm i2\delta\theta} (Q \pm iU) \quad (1.10)$$

$$= e^{\pm i2\delta\theta} \sum_{l=2} \sum_{m=-l}^l \pm 2a_{lm} \pm 2Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (1.11)$$

と表される。[so:Keeting'2023][so:Kaufman'2014] E モード、B モード偏光を表現する係数  $a_{lm}^E, a_{lm}^B$  を用いると、スピン 2 の球面調和関数で展開する際の係数  $\pm 2a_{lm}$  は

$$\pm 2a_{lm} = -(a_{lm}^E \pm ia_{lm}^B) \quad (1.12)$$

であるから

$$Q_{\text{obs}} \pm iU_{\text{obs}} = \sum_{l=2} \sum_{m=-l}^l [-(a_{lm}^E \pm ia_{lm}^B)] e^{\pm i2\delta\theta} \pm 2Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (1.13)$$

$$= \sum_{l=2} \sum_{m=-l}^l [-(a_{lm, \text{obs}}^E \pm ia_{lm, \text{obs}}^B)] \pm 2Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (1.14)$$

が観測されることとなる。したがって、パワースペクトル

$$C_l^{XX'} = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l \langle (a_{lm}^X)^* a_{lm}^{X'} \rangle \quad (1.15)$$

は、偏光角の誤較正によって

$$\begin{pmatrix} C_{\text{obs}, l}^{TT} \\ C_{\text{obs}, l}^{TE} \\ C_{\text{obs}, l}^{TB} \\ C_{\text{obs}, l}^{EE} \\ C_{\text{obs}, l}^{BB} \\ C_{\text{obs}, l}^{EB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\delta\theta) & 0 & -\sin(2\delta\theta) & 0 & 0 \\ 0 & \sin(2\delta\theta) & 0 & \cos(2\delta\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos^2(2\delta\theta) & \sin^2(2\delta\theta) & -\sin(4\delta\theta) \\ 0 & 0 & 0 & \sin^2(2\delta\theta) & \cos^2(2\delta\theta) & \sin(4\delta\theta) \\ 0 & 0 & 0 & \sin(4\delta\theta)/2 & -\sin(4\delta\theta)/2 & \cos(4\delta\theta)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_l^{TT} \\ C_l^{TE} \\ C_l^{TB} \\ C_l^{EE} \\ C_l^{BB} \\ C_l^{EB} \end{pmatrix} \quad (1.16)$$

となる。標準宇宙モデルが正しく、原始密度ゆらぎがパリティ不変だった場合であっても  $C_l^{TB} = C_l^{EB} = 0$  であるが、偏光角の誤較正は  $C_l^{EE}$  から  $C_l^{BB}$  への漏れ込みを引き起こす

$$C_{\text{obs}, l}^{BB} = \sin^2(2\delta\theta) C_l^{EE} + \cos^2(2\delta\theta) C_l^{BB}. \quad (1.17)$$

式 (1.17) に基づき、偏光角の誤較正が  $C_l^{EE}$  から  $C_{\text{obs},l}^{BB}$  への漏れ込みとして及ぼす影響を図?? に示す。誤較正の目安として、 $\delta\theta = 10, 1, 0.1$  deg の場合をプロットした。

偏光角較正の要求精度は望遠鏡の感度や delensing の能率、ノイズなどによって変化する。SO においては、delensing の能率を 50% とし、ノイズとして最も悲観的な場合を考えた場合においても、 $\delta\theta \leq 0.1$  deg であればこの漏れ込みが生む  $r$  への系統誤差は無視できるほどに小さくなる。[so:Bryan'2018] 以上の理由から、SO での偏光角較正の要求精度を  $\delta\theta \leq 0.1$  deg と定める。

図 1.2: LAMBDA

を使って作成した EtoB leakage の図と、Lyth bound を示す図を載せる予定。

## 1.4.2 偏光角較正手法

### 1.4.2.1 牡牛座かに星雲 (Tau A)

Tau A は強い直線偏光性を持つ光を放射する超新星残骸である。その光の偏光角は観測周波数に依存している可能性が指摘されており、さらに高分解能望遠鏡による観測ではその構造が見えるため、偏光角を一意に決定することが難しいという課題がある。また、偏光角は他の実験の観測結果にも依存しており、これらが潜在的な系統誤差として考慮される必要がある。

### 1.4.2.2 月

月はその表面で反射された光が月の中心から放射状に広がった偏光信号となる。月の観測も Tau A と同じく構造による偏光角の違いが問題となり、ポインティング精度由来の系統誤差を生じる。また、月は非常に明るいため TES 検出器のダイナミックレンジを超えてしまい、SAT では観測が困難である。

### 1.4.2.3 誘電体シート

誘電体シートとは、膜状に張られたポリマーによって環境熱放射を反射させ、直線偏光を作り出す装置である。望遠鏡の視野をすべて覆うためには装置が大型化する傾向にあ

### 1.4.2.4 デンスワイヤーグリッド

### 1.4.2.5 スパースワイヤーグリッド