第1章　Simons Observatory 実験

1.1　Simons Observatory 実験

Simons Observatory 実験 (以後、SO と呼ぶ) は、史上最大規模の地上 CMB 観測実験である。チリのアタカマ砂漠を拠点とし、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。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、LAT には約 3 万個の検出器が搭載されている。

立体角 Ω 、開口面積 A、観測波長 λ について、回折限界の関係式

$$\Omega = \frac{\lambda^2}{A} \tag{1.1}$$

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う。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。[?]

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 $\boldsymbol{E}$ は HWP を通過することで

$$E_1 = E_1 \tag{1.2}$$

$$E_2 = -E_2 \tag{1.3}$$

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 χ 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 -2χ 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 $I_{\rm in}(t), Q_{\rm in}(t), U_{\rm in}(t)$ であるとき、出力信号 $d_m(t)$ は

$$d_{\rm m}(t) = I_{\rm in}(t) + \varepsilon\,{\rm Re}\left[(Q_{\rm in}(t) + iU_{\rm in}(t))\exp(-i4\chi)\right] \tag{1.4}$$

となる。ここで、ε 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 $\omega_{\rm HWP}$ とすると、$\chi = \omega_{\rm HWP}t$ と表され、出力信号は

$$d_{\rm m}(t) = I_{\rm in}(t) + \varepsilon\,{\rm Re}\left[(Q_{\rm in}(t) + iU_{\rm in}(t))\exp(-i4\omega_{\rm HWP}t)\right] \tag{1.5}$$

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

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

となる。この信号のフーリエ変換は

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

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 $\pm 4\omega_{\rm HWP}$ 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。$Q_{\rm in} + iU_{\rm in}$ を得るためには、$+4\omega_{\rm HWP}$ のまわりのみを通すバンドパスフィルタ $\mathcal{F}^{\rm BPF}$ 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 $d_{\rm d,det}$ は

$$\begin{aligned} d_{\rm d,det}(t) &= \mathcal{F}^{\rm BPF}[d_{\rm m,det}(t)] \times 2\exp\left(i4\omega_{\rm HWP}t\right) \quad (1.8)\\ &= \varepsilon[Q_{\rm in}(t) + iU_{\rm in}(t)] \quad (1.9)\end{aligned}$$

となっている。

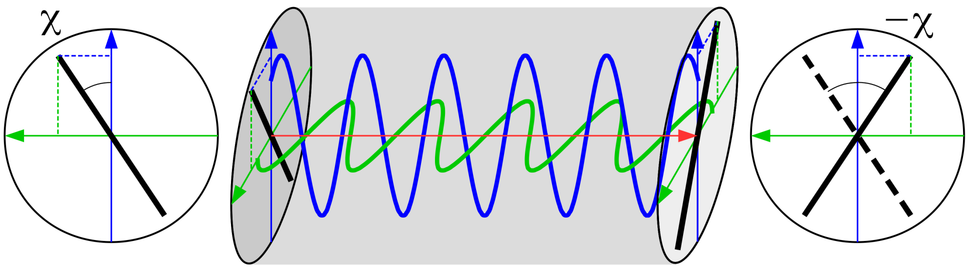

図 1.1: HWP を通過することで、偏光角が変化することを示した概念図。青い軸が 1 軸、緑の軸が 2 軸に対応する。入射した直線偏光の偏光角が 1 軸に対して χ であり、複屈折によって -2χ だけ変化する。