

修士論文

Simons Observatory 実験で用いる偏光角較正装置の
系統誤差に関する研究

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
星野 大輝

2024年12月27日

概要

目次

第 1 章	CMB	1
第 2 章	Simons Observatory 実験	2
2.1	Simons Observatory 実験	2
2.2	Large Aperture Telescope (LAT)	2
2.3	Small Aperture Telescope (SAT)	2
2.3.1	TES 検出器	2
2.3.2	極低温連続回転式半波長板 (HWP)	2
第 3 章	スパースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置	4
3.1	概要	4
3.2	スパースワイヤーグリッド	4
3.3	偏光信号の生成原理	4
3.4	偏光角較正の原理	4
3.5	設計	4
3.6	4
第 4 章	角度計	5
第 5 章	wiresag	6
第 6 章	今後の展望	7
第 7 章	結論	8
	表目次	9
	図目次	11

第1章 CMB

CMB について述べるよ

第 2 章 Simons Observatory 実験

2.1 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

$$\Omega = \frac{\lambda^2}{A} \quad (2.1)$$

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。

2.2 Large Aperture Telescope (LAT)

2.3 Small Aperture Telescope (SAT)

2.3.1 TES 検出器

2.3.2 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。[1]

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

$$E_1 = E_1 \quad (2.2)$$

$$E_2 = -E_2 \quad (2.3)$$

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 2.1) 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

$$d_m(t) = I_{\text{in}}(t) + \varepsilon \operatorname{Re} [(Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)) \exp(-i4\chi)] \quad (2.4)$$

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 ω_{HWP} とすると、 $\chi = \omega_{\text{HWP}} t$ と表され、出力信号は

$$d_m(t) = I_{\text{in}}(t) + \varepsilon \operatorname{Re} [(Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)) \exp(-i4\omega_{\text{HWP}} t)] \quad (2.5)$$

となる。検出器はある偏光角方向 θ_{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

$$d_{m,\text{det}}(t) = I_{\text{in}}(t) + \varepsilon \operatorname{Re} [(Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)) \exp \{-i(4\omega_{\text{HWP}} t - 2\theta_{\text{det}})\}] \quad (2.6)$$

となる。この信号のフーリエ変換は

$$\begin{aligned} \tilde{d}_{m,\text{det}}(\Omega) &= \tilde{I}_{\text{in}}(\Omega) \\ &+ \frac{\varepsilon}{2} \left[\left\{ \tilde{Q}_{\text{in}}(\Omega + 4\omega_{\text{HWP}}) + i\tilde{U}_{\text{in}}(\Omega + 4\omega_{\text{HWP}}) \right\} \exp(i2\theta_{\text{det}}) \right] \\ &+ \frac{\varepsilon}{2} \left[\left\{ \tilde{Q}_{\text{in}}(\Omega - 4\omega_{\text{HWP}}) - i\tilde{U}_{\text{in}}(\Omega - 4\omega_{\text{HWP}}) \right\} \exp(i2\theta_{\text{det}}) \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

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}^{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

$$d_{d,\text{det}}(t) = \mathcal{F}^{\text{BPF}}[d_{m,\text{det}}(t)] \times 2 \exp(i4\omega_{\text{HWP}} t) \quad (2.8)$$

$$= \varepsilon [Q_{\text{in}}(t) + iU_{\text{in}}(t)] \quad (2.9)$$

となっている。

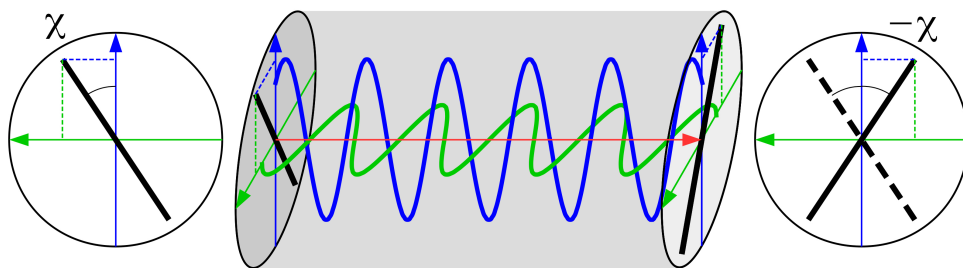


図 2.1: HWP を通過することで、偏光角が変化することを示した概念図。青い軸が 1 軸、緑の軸が 2 軸に対応する。入射した直線偏光の偏光角が 1 軸に対して χ であり、複屈折によって -2χ だけ変化する。

第3章 スパースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置

3.1 概要

スパースワイヤーグリッドの外観を図??に示す。これは金属製のワイヤーを、入射光よりも十分長い間隔で平行に張ったものであり、ワイヤー軸に沿った偏光を生成する。Simons Observatory 実験では、検出器の偏光角較正のために、人工偏光光源としてスパースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置を使用する。

3.2 スパースワイヤーグリッド

これはアルミニウム製の直径 830mm の円環に、直径 0.1mm のタングステンワイヤーを 20mm 間隔で張り巡らせたものである。

3.3 偏光信号の生成原理

金属製のワイヤーが、周囲から来た入射光を反射することを考える。入射光の波長がワイヤーの直径よりも十分に長い場合、ワイヤー中の自由電子はワイヤーに沿う方向のみに動くと思えることができ、ワイヤーは自身の軸に沿った偏光状態を持つ光のみを反射する。このようなワイヤーを望遠鏡の視野に置くと、ワイヤーは周囲の環境から来る熱放射を反射し、ワイヤー軸と同じ方向に偏光した光を望遠鏡に送り込む。実際には望遠鏡は空も視野に含み、無偏光な大気放射、ワイヤーからの偏光信号の重ね合わせが見える。後述する回転半波長板という光学素子を用いることで、無偏光な大気放射を取り除き、ワイヤーからの偏光信号のみを抽出して偏光角較正に用いる。また、ワイヤー間隔を調整することで実行的な放射温度を調整し、CMB 望遠鏡の検出器に入射する偏光光の強度を調整することができる。

3.4 偏光角較正の原理

3.5 設計

3.6

第 4 章 角度計

角度計について書こうね。

第5章 wiresag

wiresag についてのべるよ

第6章 今後の展望

希望ある将来について書こうね。

第 7 章 結論

謝辞

Thank you!

表 目 次

図 目 次

- 2.1 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。 3

参考文献

- [1] K. Yamada et al. “The Simons Observatory: Cryogenic half wave plate rotation mechanism for the small aperture telescopes”. In: Review of Scientific Instruments 95.2 (Feb. 2024). DOI: 10.1063/5.0178066. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=Hz0xMe3b&scp=85185746530&origin=inward>.