

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25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	今後の展望	5
第5章	結論	6
	表目次	7
	図目次	9

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。

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

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

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

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

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

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

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。

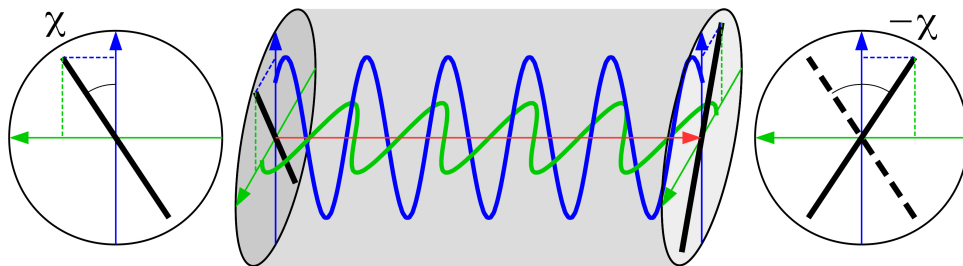


図 2.1: HWP を通過することで、偏光角が変化することを示した概念図。青い軸が 1 軸、緑の軸が 2 軸に対応する。入射した直線偏光の偏光角が 1 軸に対して χ であり、複屈折によって -2χ だけ変化する。

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 今後の展望

希望ある将来について書こうね。

第 5 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] W. Pauli, "Dear radioactive ladies and gentlemen", Phys. Today 31N9, 27 (1978).
- [2] F. Reines, C. L. Cowan et al., "Detection of the Free Antineutrino", Phys. Rev. 117, 159 (1960)
- [3] G. Danby et al., "Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos", Phys. Rev. Lett. 9, 36 (1962)
- [4] D. Decamp et al.(ALEPH Collaboration), "Determination of the Number of Light Neutrino Species.", Phys. Lett. B 231, 519 – 529 (1989).
- [5] K. Kodama et al.(DONUT Collaboration), "Observation of Tau Neutrino Interactions", Phys. Lett. B, 504(3), 218-224 (2001).
- [6] Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata, "Remarks on the Unified Model of Elementary Particles", Prog. Theor. Phys. 28, 870-880 (1962)
- [7] Y. Fukuda et al.(Super-Kamiokande Collaboration), "Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos", Phys. Rev. Lett. 81, 1562 (1998).
- [8] L. Wolfenstein, "Neutrino Oscillations in Matter", Phys. Rev. D 17, 2369 – 2374 (1978).
- [9] S. P. Mikheyev and A. Yu. Smirnov, "Resonance Amplification of Oscillations in Matter and Spectroscopy of Solar Neutrinos", Sov. J. Nucl. Phys. 42, 913 – 917 (1985).
- [10] R. Davis, Jr., D. S. Harmer, and K. C. Hoffman, "Search for Neutrinos from the Sun", Phys. Rev. Lett. 20, 1205 – 1209 (1968).
- [11] K. S. Hirata et al., "Observation of ^8B Solar Neutrinos in the Kamiokande-II Detector", Phys. Rev. Lett. 63, 16 (1989).
- [12] A. I. Abazov et al., "Search for Neutrinos from the Sun Using the Reaction $^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-)^{71}\text{Ge}$ ", Phys. Rev. Lett. 67, 3332 – 3335 (1991).
- [13] P. Anselmann et al. (GALLEX Collaboration), "Solar Neutrinos Observed by GALLEX at Gran Sasso", Phys. Lett. B 285, 376 – 389 (1992).
- [14] Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration), "Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory", Phys. Rev. Lett. 89, 011301 (2002).
- [15] F. Capozzi et al., "Unfinished Fabric of the Three Neutrino Paradigm", Phys. Rev. D 104, 083031 (2021).

-
- [16] K.Abe et al. (T2K Collaboration), "Measurements of Neutrino Oscillation Parameters from the T2K Experiment using 3.6×10^{21} protons on target", *Eur. Phys. J. C* 83, 782 (2023).
 - [17] A.D. Sakharov, "Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe", *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 5, 32-35 (1967).
 - [18] ZZ. Xing, ZH. Zhao, "A Review of $\mu - \tau$ Flavor Symmetry in Neutrino Physics", *Rep Prog Phys.* 79(7), 076201 (2016).
 - [19] K. Abe et al.(T2K Collaboration), "The T2K Experiment", *Nucl. Instrum. Meth. A* 659, 1 (2011).
 - [20] <https://t2k-experiment.org/ja/about-t2k/>
 - [21] <https://j-parc.jp/Acc/ja/index.html>
 - [22] K. Abe et al.(T2K Collaboration), "Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam", *Phys. Rev. D* 88, 032002 (2013).
 - [23] K.Matsuoka et al., "Design and Performance of the Muon Monitor for the T2K Neutrino Oscillation Experiment", *Nucl. Instrum. Meth. A* 624, 591-600 (2010).