

第1章 まとめと今後の展望

1.1 まとめ

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度揺らぎは、我々に Λ CDM モデルという宇宙の進化を記述するモデルを与えた。さらなる宇宙論の発展として、ビッグバンよりも以前に空間の指数関数的膨張が起こったとするインフレーションモデルが存在する。CMB の偏光パターンを精査し、原始重力波由来の B モード偏光パターンを発見することは、インフレーションの直接的証拠となる。

地上 CMB 偏光観測実験である Simons Observatory 実験は、この B モードをテンソルスカラー比にして $\sigma(r) = 0.003$ の精度で観測することを目指している。この精度を達成するためには、検出器の応答偏光方向 (偏光角) を $\delta\theta < 0.1^\circ$ という精度で較正する必要がある。そのために使用されるのが、スパスワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置である。スパスワイヤーグリッドは金属ワイヤーが周囲の熱放射を反射することで人工的にワイヤー方向に沿った直線偏光を作り出す装置である。この直線偏光を検出器で見ることによって偏光角を較正する。

偏光角を高精度に較正するためには、ワイヤーの角度に関する系統誤差を抑える必要がある。本研究では、先行研究での知見をもとに、本研究ではワイヤーの天球座標で対応する角度を知るための重力参照計の精度と、ワイヤーのたわみの評価を行い、それらの系統誤差の抑制を試みた。

絶対角度較正のためにより高精度な 2 軸 (X 軸, Y 軸) の重力参照計を導入し、その精度を長期間の出力安定性という点と、 $-20^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ の温度変化に対する出力安定性という点において評価した。その結果、重力参照計の X 軸の出力角度 θ_X の精度が $\delta\theta_X < 0.04$ であると結論づけられた。Y 軸の出力については温度変化に対して $\delta\theta_Y > 1^\circ$ もの変動が見られたが、これは初期不良によるものとわかった。現在、メーカーにより重力参照計の修理が行われており、この不良が治れば θ_Y は θ_X と同程度の性能は持つだろうと仮定し、 $\delta\theta_Y < 0.04^\circ$ を見込んでいる。また、これらの重力参照計の精度を偏光角較正の精度に焼き直すと、望遠鏡が較正を行う基本姿勢 $\text{elevation} = 50^\circ$, $\text{boresight} = 0^\circ$ では $< 0.06^\circ$ と評価された。

先行研究ではワイヤーのたわみは、大きな系統誤差の 1 つであった。というのも、先行研究ではすべての評価を人力で行っており、多大な労力がかかっていたとともにその評価結果に人依存のバイアスやふらつきを含む可能性があったからである。この現状を受け、本研究ではワイヤーのたわみを自動で評価する装置を開発した。たわみの長さが既知のワイヤーを測定することで評価精度として $< 50\ \mu\text{m}$ を得た。これは装置の光学系を考えた際に得る誤差とよく一致する。さらに、この評価装置を用いて、実際に使用されるスパスワイヤーグリッドのたわみを評価した。その評価結果はたわみによる偏光角への影響 θ_{sag} にして、 $\theta_{\text{sag}} < 0.03^\circ$ であった。

表 1.1 に、本研究で評価した系統誤差の値を更新した、スパスワイヤーグリッドの装置由来の系統誤差をまとめる。偏光角較正の合計の系統誤差 $\delta\theta$ は $\delta\theta < 0.09^\circ$ であった。これは Simons Observatory における要求精度 $\delta\theta < 0.1^\circ$ を満たしている。

表 1.1: 本論文で得た評価値を更新したスパースワイヤーグリッドの系統誤差のまとめ。

系統誤差要因	評価値
ワイヤー設置精度	$< 0.02^\circ$
エンコーダ精度	$< 0.03^\circ$
エンコーダ零点	$< 0.04^\circ$
重力参照計 ^{*1*2}	$< 0.06^\circ$
ワイヤーのたわみ	$< 0.03^\circ$
合計	$< 0.09^\circ$

1.2 今後の展望

今後の展望として、まず第一に初期不良で正常に動作していなかった重力参照計の Y 軸の再評価が予定されている。この評価によりその誤差が $\delta\theta_Y < 0.04^\circ$ であることが実証されれば、偏光角較正の装置に起因する系統誤差は疑い用もなく要求値である $\delta\theta < 0.1^\circ$ を満たすこととなる。

本論文で開発したワイヤーのたわみの自動評価装置の結果によれば、ワイヤーのたわみ量にはワイヤーの張る順番に起因すると思われる傾向が存在していた。この系統誤差として懸念すべき量ではないものの、今後さらなる系統誤差の削減が必要になった場合にはワイヤーの張り方というところから改善する必要がある。また、本装置は自動でたわみ量の評価が可能であるため、観測サイトにてスパースワイヤーグリッドのたわみを定期的に評価し、その品質を維持するということも可能である。

Simons Observatory では現在稼働している 3 台の SAT に加え、日本による LF 帯を観測する SAT(JSAT) の建設が予定されている。現在稼働中の 3 台の SAT には既にスパースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置が搭載されているが、そこで使用されている重力参照計を今回評価した新しいものと交換し、スパースワイヤーグリッドの部分を本研究で開発したワイヤーのたわみの自動評価装置を用いて評価されたたわみの小さいものに交換すれば、高精度な偏光角較正を実現できる。また、追加される JSAT においてもスパースワイヤーグリッドが開発され、導入される予定である。本論文にて得られた系統誤差の知見を活かし、偏光角較正精度 $\delta\theta < 0.1^\circ$ を満たす較正が見込まれる。

以上のまとめをもって、Simons Observatory は検出器の偏光角を $\delta\theta < 0.1^\circ$ で較正し、前人未到の原始重力波由来の B モード偏光観測を目指す。

^{*1} X 軸の精度が $\delta\theta < 0.04^\circ$ と評価値であるのに対し、Y 軸の精度は見込み精度として $\delta\theta_Y < 0.04^\circ$ ととったことに注意。

^{*2} 望遠鏡が基本姿勢 elevation = 50° , boresight = 0° をとっているときの値であることに注意。