

審査の結果の要旨

氏名 山田 恭平

本論文は、本文 6 章、および補遺 3 章からなる。第 1 章は、イントロダクションであり、ミリ波の観測において、精密な偏光観測の重要性が述べられている。特に、宇宙背景放射 (CMB) において、初期宇宙におけるインフレーション過程の存在を裏付けると考えられている B-mode の偏光の観測に関して議論がおこなわれ、本論文の主題であるミリ波での精密偏光観測の意義が述べられている。

第 2 章は、CMB の偏光観測のレビュー、特に申請者が主体的に関わってきた Simons Observatory、Polarbear の概要が説明され、それらを構成する望遠鏡の構成、光学系を構成する要素が説明されている。特に、本研究で開発を進めた偏光変調のためのシステムの詳細が述べられている。

第 3 章は、申請者が新たに開発した極低温で動作する大型偏光変調器の詳細が述べられている。精密な偏光状態を測定するためには、低周波数での大きな揺らぎ成分を避けるために信号に変調をかけ、検出後に復調して信号を取り出す。その際に、入射してきたミリ波に精密な偏光変調を施すため、直径 50 cm のサファイア製半波長板 (20 kg) を正確な周期 (2 Hz) で回転させる方式の変調を開発した。しかも、装置は熱揺らぎを避けるため極低温で動作するので波長板の回転機構もその温度で安定に動作しなければならない。そのため、超伝導を利用した磁気浮揚システム、さらに回転の安定化を実現するメカニズムを開発した。小さい発熱で効率的に動作 ($< 1.6 \text{ W}$)、回転角読み取り精度 $< 0.07 \mu\text{rad} \sqrt{\text{s}}$ 、磁気浮揚した半波長板をあらゆる観測条件で十分な精度で中心に維持 ($< 4.5 \text{ mm}$) など、これまでに類を見ない性能の装置が完成し、実際の Simons Observatory 望遠鏡への組み込みが開始されていることが述べられている。

第 4 章では、偏光計測によるダークマター探索の可能性が検討され、その候補である超軽量ダークマター、特に axion または axion-like particle (ALP) と呼ばれるものが議論されている。ALP とは、QCD axion と同様に標準粒子と結合する、より一般的な粒子で、弦理論で予言されるものである。質量や結合定数の範囲が広く、たとえば質量では 10^{-22} eV から 10^{-2} eV という極めて広い範囲の可能性が議論されている。そして、その存在により伝搬する電磁波の偏光に変調を与えることが予言されており、本研究で開発を進めた偏光状態の精密計測により検出できる可能性があることが議論されている。

第 5 章では、その存在を Polarbear によるかに星雲の偏光データを用いて探索するという提案が説明され、そのデータ解析の手法の詳細が述べられている。かに星雲からの電磁波は偏光成分があり、それを利用して検出器の較正を行っている。Polarbear では、そのデータがあり、今回そのデータを再解析することで、ALP の検出を目指した。そのた

めに、まず様々な系統誤差の解析、データ選別の手法の検討を行っている。そして、その解析結果が示され、かに星雲を光源とした観測においては、これまでで最高の検出限界を実現した。そして、実際に 61.4 日または 52.1 日の周期に対して 2.5σ の信号が得られた。そのため、その周期の信号付近で現れそうな系統誤差に関する再検討を重ねたが、この大きさのものは見つからなかった。しかし、この結果をすべて ALP によるものと結論づけるにはまだ検証が不十分であり、これまでの観測結果との関係などが議論されている。また、これまで一定と考えられていたかに星雲からの偏光の揺らぎによるものか、もしくは、かに星雲に関しての新しい知見となる可能性も示唆されている。

第 6 章では、本論文の全体の成果として

- 装置開発と物理解析の両面でミリ波偏光観測による基礎物理の進展に貢献した
- CMB 偏光観測によるインフレーション探索に重要な世界最大の偏光変調器を開発した
- Polarbear 実験によるかに星雲のミリ波偏光振動観測により ALP 探索を行ったようにまとめられている。

上記の成果は、宇宙物理学に対して新しい知見をもたらし、その進展に大きな寄与をするものと判断した。なお、本論文第 3 章は Simons Observatory のプロジェクト、第 5 章は Polarbear 実験での研究で、非常に多くの人員がかかわった共同研究であるが、論文提出者が主体となって、装置製作、分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。