

令和 6 年 4 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18637

研究課題名（和文）原始惑星系円盤の偏光観測による暗黒物質アクシオン探査

研究課題名（英文）Hunting Axion Dark Matter with Protoplanetary Disk Polarimetry

研究代表者

当真 賢二（Toma, Kenji）

東北大学・学際科学フロンティア研究所・教授

研究者番号：70729011

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：原始惑星系円盤は天体の中で最も単純な偏光構造を見せ、その観測手法も年々発展しているため、暗黒物質候補アクシオンが偏光に与える影響を捕えるために最適である。そこで近年アップグレードされたSubaru望遠鏡の高精度偏光観測装置SCEXAO fast-PDI+FLCによる原始惑星系円盤の偏光観測を図り、実施することができた。この装置では1天体の観測で100万枚以上の画像が得られるが、その中から偏光解析に使えるものを抽出する画像選別コードを開発した。fast-PDI+FLCの偏光解析パイプラインを独自に開発し、原始惑星系円盤SA0206462の偏光画像を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質は、宇宙の進化において不可欠と考えられているにもかかわらず、その正体は全く不明である。その有力候補であるアクシオンの兆候を捕えるため、原始惑星系円盤の偏光を使った独自の方法を実行する道筋を示すことができた。最高精度の偏光観測装置Subaru fast-PDI+FLCの解析パイプラインを世界に先駆けて開発することに成功した。

研究成果の概要（英文）：Protoplanetary disks are ideal for hunting the effects of dark matter candidate axions on polarization, since they show the simplest polarization structure among celestial objects and the observational techniques for them have been developed over the years. We have planned and carried out polarimetric observations of protoplanetary disks using Subaru SCEXAO fast-PDI+FLC, a high precision polarimetric instrument, which was recently upgraded. We developed an image selection code to extract images that can be used for polarimetric analysis from the more than one million images obtained by this instrument. We also developed a fast-PDI+FLC's polarimetric analysis pipeline, and succeeded in obtaining a polarimetric image of protoplanetary disk SA0206462.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：暗黒物質 アクシオン 原始惑星系円盤 偏光 赤外線

1. 研究開始当初の背景

暗黒物質は、宇宙の進化において不可欠と考えられているにもかかわらず、その正体は全く不明である。近年、素粒子論と宇宙構造形成論において最も活発に議論されている暗黒物質候補がアクシオンである。我々はアクシオンが光の偏光に影響することに着目し、原始惑星系円盤の偏光観測を用いてアクシオンを探索できるという全く新しい手法を 2019 年に提唱した。そして Subaru 望遠鏡で 2011 年に得られていた原始惑星系円盤 AB Aurigae の偏光データからアクシオンの存在に対しそれまでで最も厳しい制限を導いていた。さらに、別の理論研究者によって我々の手法が他の数々の探索法の中で最も高い感度を達成できることも示された。原始惑星系円盤の観測手法が著しく発展していることも我々のアクシオン探索手法の強みと考えられた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、2011 年以降の既存の良質な原始惑星系円盤の偏光観測データの解析やアップグレードされた Subaru 高精度偏光観測装置 SCEXAO fast-PDI+FLC による偏光観測を図り、アクシオンの存在への制限の更新あるいはアクシオンの兆候を捕えることである。

3. 研究の方法

(1) VLT 望遠鏡の偏光観測装置 SPHERE (第 3 世代の極限補償光学装置) によって得られている原始惑星系円盤 TW Hydrae の偏光データを利用し、統計誤差の評価を洗練させる。(2) 理論的に予想されるアクシオン効果による偏光角の振動の時間スケールと原始惑星系円盤の中心部の回転の時間スケールを比較し、円盤自体の影響を除く解析方法を確立する。(3) これらを踏まえて、第 3 世代からさらにグレードアップした偏光観測装置 Subaru SCEXAO fast-PDI+FLC による観測プロポーザルを申請し、観測を実行する。(4) Subaru SCEXAO fast-PDI+FLC の解析パイプラインを開発し、偏光画像を導出する。これらの観測と解析を複数回実行し、1 年程度の周期を持つアクシオン効果を探索する。

4. 研究成果

3. の研究方法の計画に沿って研究を進め、成果を得た。まず(1)については研究協力者の橋本氏が VLT/SPHERE によって得られた TW Hydrae のデータ解析を行った。その結果、統計誤差は予想以上に大きいことがわかった。

(2)については研究協力者の藤田氏、田崎氏との共著理論論文による計算からアクシオン効果による偏光角の振動時間スケールが 1 年程度であることがわかっていった。一方で、Subaru SCEXAO の観測ターゲットである原始惑星系円盤 TW Hydrae の中心部も同程度の時間スケールになる。中心部の偏光データを除いて、残りの部分のピクセルのデータだけを用いても Subaru SCEXAO による観測ならば十分アクシオン効果を探る統計を得られることを確認した。

これらを考慮して Subaru SCEXAO fast-PDI+FLC の観測プロポーザルを申請し、競争率の高い審査に残り、採択された((3))。2022 年 2 月と 4 月に 2 晩ずつ、TW Hydrae など複数の原始惑星系円盤の偏光観測を実施できた。観測プロポーザルはもう一度採択され、2023 年 1 月にも観測したが、その時は悪天候のために良いデータは取得できなかった。

(4)についてまず、Subaru SCEXAO の観測が 1 天体につき 100 万枚以上の画像が得られることに対処した。大量の画像の中には観測条件が悪く偏光観測に使用できないものが含まれる。本科研費で雇用した博士研究員が機械学習による画像選別プログラムを開発し、それによって偏光解析に使用できる画像を抽出することに成功した。図 1 は画像選別の結果であり、横軸が画像の点数 (高いほど状態が良く、偏光解析に耐えられる) であり、縦軸がそれに対応する画像枚数である。機械学習による選別で短時間で画像を振り分けられることがわかった。

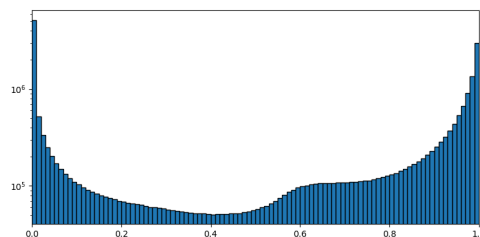


図 1

本研究の開始当初、我々は Subaru 望遠鏡の装置開発チームが偏光解析パイプラインを整備し、共有してくれるものと考えていたが、実際にはチームのマンパワーが足りず、ほとんど進まなかった。そのため、我々は計画を修正し、独自に過去の他の装置のパイプラインを参考にして Subaru SCEXAO fast-PDI+FLC の解析パイプラインの開発を進めた。最終的に、Subaru/CHARIS の PDI 解析用の IDL で書かれたパイプラインを Python で書き換え、Subaru/VAMPIRES の解析パイプラインを参考に FLC 解析コードを組み込むことで Subaru/fast-PDI+FLC の解析パイプライン解析に成功した。これには NASA Goddard の K. Lawson 氏や University of Hawaii の Miles Lucas 氏にも手助けしてもらった。その結果、比較的明るい原始惑星系円盤の SA0206462 の偏光

画像を導出することができた（図2）。

ただ、いまだ装置由来の偏光の補正はできておらず、装置開発チームによる光学特性データ取得が待たれる。また、SA0206462 以外の原始惑星系円盤、特に TW Hydrae からは偏光画像を得ることはできなかった。これは装置開発チームも予想していなかったことで、高度が低い天体に対して極限補償光学装置がうまく機能しなかったようだ。現在、センサーをアップグレードし補正素子数を増やすことが検討されている。

結果的に Subaru SCExAO で観測して得た偏光画像を使ってアクション探査を行うまで進めることはできなかったが、UCLA などの他の観測グループが未だパイプライン構築に手をつけられていない中で、Subaru/fast-PDI+FLC による偏光画像を導出したことは大きな成果となった。我々が開発した解析パイプラインは今後の Subaru 望遠鏡による原始惑星系円盤の観測に有用となる。

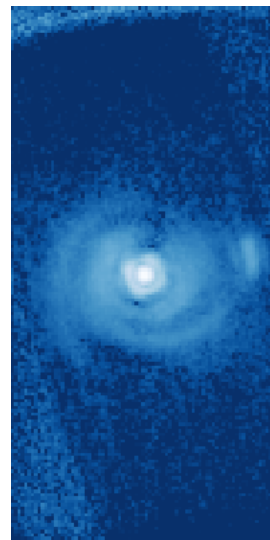


図2

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 藤田智弘
2. 発表標題 Polarimetric observation to hunt axion dark matter
3. 学会等名 Astrophysical Polarimetry in the Time-Domain Era (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田崎亮
2. 発表標題 Polarization of light scattered by large dust aggregates: Implications for optical and near-infrared scattered light observations of protoplanetary disks
3. 学会等名 NOVA2 Network meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田智弘
2. 発表標題 複屈折による暗黒物質アクシオン探査
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	藤田 智弘 (Fujita Tomohiro)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	田崎 亮 (Tazaki Ryo)		
研究協力者	橋本 淳 (Hashimoto Jun)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	NASA Goddard	Caltech	University of Hawaii	他1機関