

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00703

研究課題名(和文) Mapping Stellar Systems Birth and Death with NIR Polarized Imaging at AU scales.

研究課題名(英文) Mapping Stellar Systems Birth and Death with NIR Polarized Imaging at AU scales.

研究代表者

工藤 智幸 (Kudo, Tomoyuki)

国立天文台・ハワイ観測所・RCUH職員

研究者番号：80591495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,400,000円

研究成果の概要(和文)：すばる望遠鏡と極限補償光学装置「SCEXA0」を用いて、星の誕生と終焉に関わる星周ダストの詳細な分布と性質を探るべく、既存の近赤外線面分光装置「CHARIS」と、新規に設置した超高感度近赤外線高速撮像装置「C-RED-1」に偏光観測機能を搭載した。本研究における装置開発は、原始惑星系円盤中の惑星候補天体の検出にも繋がった。今後もすばる望遠鏡と本装置を用いた星・惑星系に対する研究の進展、そして将来建設予定である口径30mのTMT望遠鏡を用いた高精度偏光観測への応用へと期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

星の生と死に関わる情報を引き出すための「偏光観測機能」を、すばる望遠鏡に搭載された極限補償光学システム「SCEXA0」に追加することに成功した。若い恒星を取り巻く原始惑星系円盤や、年老いた晩期型星の質量放出現象の観測をより詳細に進めることができるようになり、星の進化の普遍性や多様性への解明が進むと期待できる。本研究の進展は、我々の太陽系の成り立ち(過去)と終焉(未来)の理解にも繋がる。また、これまでに実現できた偏光観測や解析のノウハウ、機械系のアップグレード、制御系アルゴリズムの実装等における技術的成果も、建設予定である30mTMT望遠鏡を用いた高精度偏光観測への実現に繋がる。

研究成果の概要(英文)：We have successfully developed two advanced near infrared polarimetric imaging capabilities on the existing SCEXA0 high contrast imaging instrument at the Subaru Telescope/NAOJ. In combination with existing half-waveplate and newly installed wollaston prism, CHARIS instrument became the high contrast polarization imaging detector with integral field spectrograph at near infrared wavelengths. In addition, newly installed C-RED-1 detector with a Ferroelectric Liquid Crystal (FLC) became the first near-IR instrument to allow fast (~1kHz) polarization observation on a large telescope. Our instrument upgrade serve as a technical and scientific precursor to polarimetric imaging of circumstellar materials with the Thirty Meter Telescope (TMT).

研究分野：天文学

キーワード：光赤外線天文学 補償光学 偏光 星・惑星系形成 晩期型星 装置開発

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

星の誕生と終焉に関わる物理現象を理解するには、星の周囲を取り巻くガスやダストの振る舞いを調査することが不可欠である。特に星周ダストにより散乱した中心星からの光は「偏光」した状態で我々の目に届く。つまり「偏光撮像観測」が捉えるダストの空間構造は、温度や密度を反映して変化するため、星の各進化段階における普遍性/多様性について直接調べることが可能である。

これまで、すばる望遠鏡では戦略枠観測「SEEDS プロジェクト」において偏光撮像観測を実施し多くの成功を納めてきた(Tamura 2009)。本研究をさらに発展させるには、従来よりも効率よくダストの性質を調査可能な多波長での偏光撮像と、より中心星の近くまで詳細に捉える高速偏光撮像装置が必要となっていた。そこで我々は大气のゆらぎを補正する素子数を大幅に増やし、性能が向上している極限補償光学系「SCExAO (Guyon et al. 2010; Jovanovic et al. 2015)」と組み合わせることで、より高感度高コントラストの近赤外線偏光撮像装置の開発に挑んだ。

2. 研究の目的

本研究の目的は、すばる望遠鏡に搭載されている極限補償光学装置 SCExAO をアップグレードし、高感度近赤外線偏光撮像観測を可能にすることである。制御系(ハードウェアとソフトウェア双方)の新規開発を進めると共に、効率的な偏光データの収集および解析手法の確立も目指す。SCExAO による高度な光波面制御技術を用いた高解像度観測と、新規開発の近赤外線偏光撮像能力の組み合わせを用いて、恒星の極近傍における塵から散乱光を高い感度で捉える。若い恒星の周囲を取り巻く原始惑星系円盤や形成途中の惑星の多様性、年老いた晩期型星の質量放出現象の解明を進め、星の生と死に関わる主要な物理過程を探っていくことが目的である。

3. 研究の方法

SCExAO に既に搭載されていた既存の近赤外線面分光装置「CHARIS」へ偏光機能を追加した。さらに超高感度近赤外線高速撮像装置「C-RED-1」も新たに設置した。CHARIS は一度に多波長で近赤外線撮像観測ができる特徴を持ち、C-RED-1 は近赤外線で 1 秒間に最大 3500 フレームの読み出しが可能な高感度、低ノイズの世界で唯一の検出器である。CHARIS による近赤外線面分光撮像を用いた散乱光によるダスト特性の解明、C-RED-1 を用いた中心部極近傍における星周構造および惑星の有無を探るといった双方の強みを生かした観測で、星周ダストの性質と空間分布のより詳細な理解を目指す。

4. 研究成果

近赤外線面分光撮像装置 CHARIS と、超高速近赤外線撮像装置 C-RED-1 への偏光機能の搭載に加え、各種光学素子のアップグレードや制御系の調整による観測効率の向上により、これまで主に以下の 3 つの新技术確立と科学成果の創出に成功した。

(1) 偏光面分光撮像観測の実現。

既存の波長板と、新たに設置した専用のウォラストンプリズムにより、CHARIS を用いて偏光差分撮像が可能となった。従来の装置では 1 回の露出で 1 波長分しかデータの取得ができなかったが、CHARIS では 1 度の露出で波長約 1 μ m から 2.2 μ m までの近赤外線領域を 22 チャンネルに細かく分解してデータを取得できるため「面分光偏光撮像」が実現できたことになる。ダストの形状や組成により、散乱する近赤外線には波長依存性があるため、本装置で若い恒星や惑星、年老いた恒星等を偏光観測することで、それぞれの星周構造の特徴を効率よく調査することが可能となった。

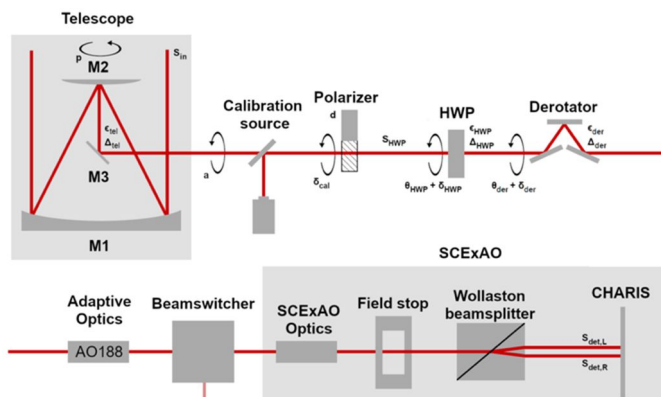


図 1: SCExAO/CHARIS を用いた面分光偏光撮像の概要 (t Hart J., et al. 2021)。

(2) 近赤外線による高速偏光差分撮像の実現。

前述のように、面分光装置 CHARIS に偏光観測機能をもたせることに成功してきた。しかし、データの読み出しが比較的遅く、未だ時間変化の影響を受けやすい上、明るい天体に対しては検出器の中心部が大きく飽和してしまいコロナグラフマスクの使用が必須であった。そこで次の段階として、高速 (1kHz 以上) で動作する C-RED-1 検出器と、強誘電性液晶(FLC)の組み合わせを用いた高速の偏光撮像機能を追加した。これにより、従来よりも時間変動の悪影響を受けにくい偏光データセットが取得でき、明るい天体に対してもマスクを使わず、中心部まで検出器を飽和させることなく撮像が可能となった。本装置の組み合わせは、よりコンパクトな原始惑星系円盤の形態や、これまで明るすぎてマスクなしでは観測不可能だった明るい晩期型における極近傍の質量放出現象の解明にむけた高精度高解像度偏光観測の実現に繋がる。

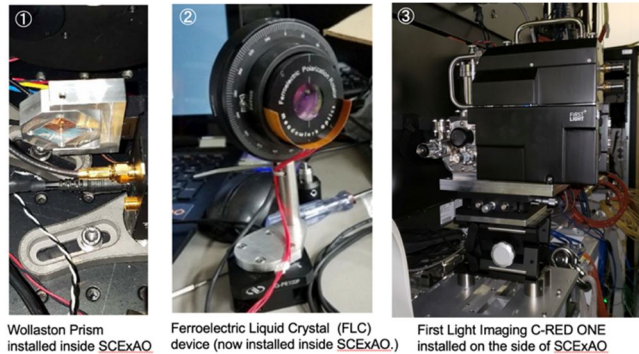


図 2: 高速偏光差分撮像用に新搭載した光学素子と検出器 (Lozi et al 2020; Kudo et al. 2022)。

(3) ガスや塵が降り積もりつつある「原始惑星」を初めて撮像。

一般的に、原始惑星系円盤に埋もれた惑星と、円盤本来の小さな構造を区別することは困難である。しかし、円盤からの光はダストによる散乱で「偏光」が生じるため、主星からの光を散乱して光る円盤と、自身で光を放つ惑星を区別することが可能である。我々は原始惑星系円盤を持つ若い天体「AB Aur」に対して偏光観測を行い、発見された明るい領域が円盤中の微細構造ではなく、惑星候補であることが確認した。主星の年齢は約 200 万年と非常に若く、この惑星候補のまわりにはまだ多量の物質が見られるため、本結果は今まさに生まれつつある惑星、いわゆる「原始惑星」の最初の例と考えられる。つまり、これまで AB Aur を取り巻いている原始惑星系円盤のギャップや渦巻などの構造は、惑星起因による円盤への影響が大きいと実証できたことになる。

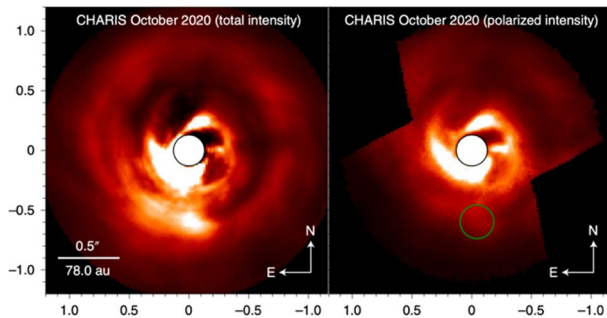


図 3: 原始惑星系円盤 AB Aur の近赤外線強度画像と偏光強度画像の比較。(Currie,T., et al. 2022)

以上、本研究で実証できた技術的/科学的成果は、今後すばる望遠鏡をもちいた星・惑星系の研究の進展はもとより、将来建設予定である口径 30m の TMT 望遠鏡を用いた高精度偏光観測への応用へと繋がることが期待される。

<引用文献>

- ① Tamura, M. 2009, American Institute of Physics Conference Series, 1158, 11
- ② Guyon, O., et al. 2010, Proc. SPIE, 7736, 24
- ③ Jovanovic, N., et al. 2015, PASP 127(955), 890.
- ④ 't Hart J., et al. 2021, Proc. SPIE 11833, Polarization Science and Remote Sensing X, 1183300
- ⑤ Lozi, J., et al. 2020, Proc. SPIE 11448, Adaptive Optics Systems VII
- ⑥ Kudo, T., et al. 2022, In the Spirit of Lyot, poster presentation.
- ⑦ Currie, T., et al. 2022, Nature Astronomy, 6, 751–759

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Currie, K. Lawson, G. Schneider, W. Lyra, C. Grady, O. Guyon, M. Tamura, T. Kotani, H. Kawahara, T. Brandt, T. Uyama, T. Muto, R. Dong, T. Kudo, J. Hashimoto, M. Fukagawa, K. Wagner, J. Lozi, et al.	4. 巻 6
2. 論文標題 Images of embedded Jovian planet formation at a wide separation around AB Aurigae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 751, 759
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-022-01634-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Julien Lozi, Olivier Guyon, Tomoyuki Kudo, Jin Zhang, Nemanja Jovanovic, Barnaby Norris, Marc-Antoine Martinod, Tyler D. Groff, Jeffrey Chilcote, Motohide Tamura, Steven Bos, Frans Snik, Sebastien Vievard, Ananya Sahoo, Vincent Deo, Frantz Martinache, Jeremy Kasdin	4. 巻 11448
2. 論文標題 New NIR spectro-polarimetric modes for the SCExAO instrument	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 114487C
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562792	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Currie T, Brandt G. M, Brandt T D., Lacy B, Burrows A, Guyon O, Tamura M, Liu R Y., Sagynbayeva S, Tobin T, Chilcote J, Groff T, Marois C, Thompson W, Murphy S J., Kuzuhara M, Lawson K, Lozi J, Deo V, Vievard S, Skaf N, Uyama T, Jovanovic N, Martinache F, Kasdin N. J, Kudo T, et al	4. 巻 380
2. 論文標題 Direct imaging and astrometric detection of a gas giant planet orbiting an accelerating star	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 198 ~ 203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abo6192	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Guyon Olivier, Ahn Kyohoon, Akiyama Masayuki, Currie Thayne, Deo Vincent, Hattori Takashi, Kudo Tomoyuki, Lozi Julien, Minowa Yosuke, Ono Yoshito .、Skaf Nour, Tamura Motohide, Vievard Sebastien	4. 巻 12185
2. 論文標題 High contrast and high angular imaging at Subaru Telescope	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 121856J
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2630534	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 't Hart Joost, van Holstein Rob G., Bos Steven, Ruigrok Jasper, Snik Frans, Lozi Julien, Guyon Olivier, Kudo Tomoyuki, et al.	4. 巻 11833
2. 論文標題 Full characterization of the instrumental polarization effects of the spectropolarimetric mode of SCEXAO/CHARIS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1183300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2602859	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 工藤智幸, Lozi Julien, Deo Vincent (国立天文台ハワイ観測所), Guyon Olivier (国立天文台ハワイ 観測所 / アリゾナ大学/ アストロバイオロジーセンター), Norris Barnaby (シドニー大学) ほか, Subaru/SCEXAO team.
2. 発表標題 すばる望遠鏡用極限補償光学装置SCEXAOによる高速偏光撮像モードの開発
3. 学会等名 日本天文学会 秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kudo, J. Lozi, V. Deo (Subaru/NAOJ), O. Guyon (Subaru/ABC/Univ. of Arizona), B. Norris (Univ. of Sydney), J. Hashimoto (ABC) and Subaru/SCEXAO team.
2. 発表標題 Fast NIR Polarimetric Differential Imaging modes on Subaru/SCEXAO.
3. 学会等名 In the Spirit of Lyot 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Guyon Olivier、Ahn Kyohoon、Akiyama Masayuki、Currie Thayne、Deo Vincent、Hattori Takashi、Kudo Tomoyuki、Lozi Julien、Minowa Yosuke、Ono Yoshito .、Skaf Nour、Tamura Motohide、Vievard Sebastien
2. 発表標題 High contrast and high angular imaging at Subaru Telescope
3. 学会等名 SPIE 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Julien Lozi, Olivier Guyon, Tomoyuki Kudo, Jin Zhang, Nemanja Jovanovic, Barnaby Norris, Marc- Antoine Martinod, Tyler D. Groff, Jeffrey Chilcote, Motohide Tamura, Steven Bos, Frans Snik, Sebastien Vievard, Ananya Sahoo, Vincent Deo, Frantz Martinache, Jeremy Kasdin
2. 発表標題 New NIR spectro-polarimetric modes for the SCExAO instrument
3. 学会等名 SPIE 2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics https://www.naoj.org/Projects/SCExAO/scexaoWEB/000home.web/indexm.html

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
研究分担者	Guyon Olivier (Guyon Olivier) (90399288)	国立天文台・ハワイ観測所・RCUH職員 (62616)	

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
研究分担者	Lozi Julien (Lozi Julien) (20806658)	国立天文台・ハワイ観測所・RCUH職員 (62616)	
研究分担者	橋本 淳 (Hashimoto Jun) (20588610)	大学共同利用機関法人自然科学研究機構（新分野創成センター、アストロバイオロジーセンター、生命創成探究・アストロバイオロジーセンター・特任助教 (82675)	

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			
オーストラリア	The Univ. of Sydney			
米国	Caltech	NASA Goddard Space Flight Ctr.	Princeton Univ.	他2機関
オランダ	Leiden Observatory			
フランス	Observatoire de la Cote d'Azur			
カナダ	University of Victoria			