

令和 3 年 4 月 25 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 2019

受付番号 201960050

氏 名

龜山 大智
(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： パサデナ （国名： アメリカ合衆国 ）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
直接撮像法を用いた非常に若い天体における系外惑星探索と特徴付け
3. 派遣期間：平成 31 年 4 月 1 日 ～ 令和 3 年 3 月 31 日
4. 受入機関名及び部局名
受入機関名： NASA ジェット推進研究所
部局名： NASA Exoplanet Science Institute
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)
(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

研究課題である直接撮像法を用いた非常に若い天体 (YSO: 100 万年~1000 万年) における系外惑星探索と特徴づけに際し、受け入れ研究者である Charles Beichman 氏 (NASA Exoplanet Science Institute、以下 NExScI) と、直接撮像観測に有用な高コントラストコロナグラフ観測装置 Keck/NIRC2 の PI である Dimitri Mawet 氏 (カリフォルニア工科大学、以下 Caltech) と共同で研究を進めている。具体的な研究の遂行状況及び成果について、以下に記述する。

・すばる望遠鏡を用いた直接撮像

1) すばる望遠鏡 (口径 8.2m、ハワイ) に搭載された最新の超補償光学装置 SCExAO を用いて、 κ Andromedae b (以下 κ And b) という伴星をすばる望遠鏡で追観測し、異なる波長 (Y-band: 0.957-1.120 μm) の測光結果と新たな公転中の位置情報を得た。この天体は YSO より少し年をとっている (約 2000-5000 万年) だが、太陽系と比べて十分に若く惑星形成・進化の議論を進める有望なターゲットである。発見の時から 7 年ほどの公転運動を元に κ And b の軌道を初めてフィッティングした (Currie, Brandt, Uyama et al. 2018, Uyama et al. 2020)。この結果から、離心率の比較的大きな楕円軌道が推測され、 κ And の惑星系の年齢 (約 4700 万年) までに複数惑星が存在し、その惑星らによる重力散乱によって軌道が大きく変化した可能性を示唆することができた。また、他の惑星がこの惑星系に存在する可能性を議論し、将来的な TMT 望遠鏡による追観測へと繋げた。更に、先行研究ではこの天体が木星型惑星

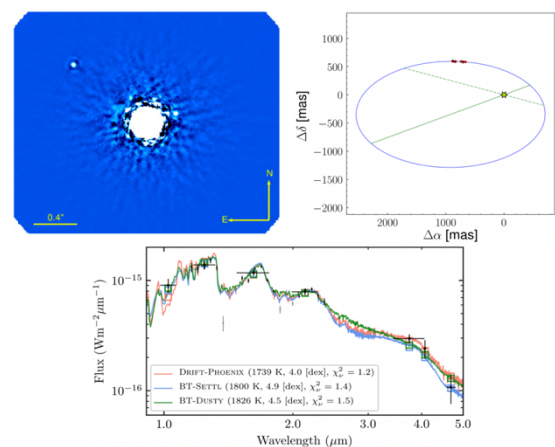


図 1: (上左): すばる望遠鏡の観測結果。主星はマスクされており、北東方向に κ And b が検出できている。(上右): κ And b の軌道フィッティング結果。星マークが主星、青が最もよくフィットされた軌道を示す。(下): 先行研究と今回の観測を合わせて大気モデルと比較し最適解を探した。

か、褐色矮星(木星型惑星より重く恒星より軽い、重水素の核融合反応が起きているとされる)どちらに分類されるかははっきりと決まっていなかったが、測光結果と先行研究の観測結果を組み合わせることで κ And b の表面重力や低質量天体の大気モデル・進化モデルと比較したところ、より惑星に近い特徴を持つことがわかった。(図 1: Uyama et al. 2020a, *Astronomical Journal* (AJ), 159, 40)。

2) SCEXAO に取り付けられているコロナグラフ金赤外面分光装置 CHARIS を用いて、HD 34700 周囲の原始惑星系円盤を観測した。Gemini 望遠鏡で観測されていた結果と同様の大きなギャップ構造や複雑なスパイラル構造を検出(図 2)、さらに面分光装置の特性を利用し複数波長における円盤表面からの散乱光を精密に計測、さらに円盤表面に存在するダストの物理パラメータに観測的な制限を与える事ができた。さらに、先行研究では円盤の構造から、リング構造において 50 木星質量程度の褐色矮星の存在可能性が示唆されていたが本研究においてこの可能性を棄却することができた。しかし、この観測だけではこれらの非対称構造がどのように形成されたかまだ確実なメカニズムは判明しておらず、惑星探査を含めた将来的な観測への新たなモチベーションへと繋がる(Uyama et al. 2020c, *Astrophysical Journal* (ApJ), 900, 135)。

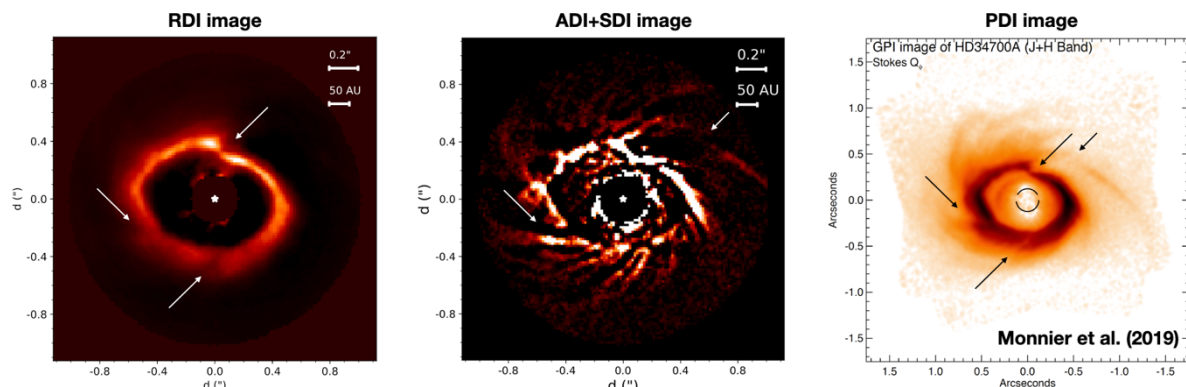


図 2: SCEXAO+CHARIS を用いて観測した HD 34700 周囲の原始惑星系円盤。リングを強調したデータ解析手法(左)と惑星探査・スパイラルを強調した観測手法(真ん中)それぞれにおいて、先行研究の Gemini 望遠鏡による観測結果(右)と同じ円盤構造を検出した。

3) CHARIS と独立して SCEXAO に取り付けられている可視光高コントラスト装置 VAMPIRES を用いて、惑星が形成する際に生じる水素輝線、特に $H\alpha$ 線を検出するための観測・データ解析を主導し、特にデータ解析パイプラインを主導した。その結果として、他の大型望遠鏡(VLT 望遠鏡、マゼラン望遠鏡共にチリ)と遜色ない感度を達成し、望遠鏡の位置の違いからターゲット選定における相補的な役割、更に将来的な水素輝線を用いた惑星探査と特徴付けによる惑星形成のより詳細な議論へと繋がる(Uyama et al. 2020d, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* (JATIS), SPIE, 6, 045004, 2020)。

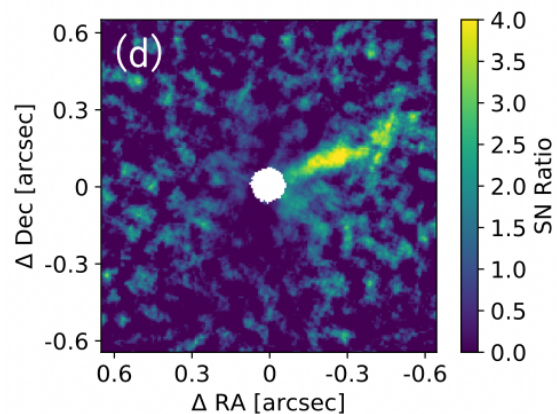


図 3: SCEXAO+VAMPIRES を用いた $H\alpha$ 輝線における直接撮像探査結果。右上方向に伸びている構造は、RY Tau という若い星から飛び出したジェットを捉えている。

・ケック望遠鏡を用いた直接撮像

1) 若い木星型惑星は近赤外線より波長の長いところで明るくなるスペクトルの特徴を持っており、ケック望遠鏡(口径 10m、ハワイ)の近赤外コロナグラフ装置 NIRC2 の L'-band($3.8 \mu\text{m}$)と Ms-band($4.7 \mu\text{m}$)を用いた観測は

Subaru/SCEXAO で主に使われている JHK-band($1.1\text{--}2.3 \mu\text{m}$)よりも惑星の検出に必要なコントラストが減り、検出可能性を高めることが期待される。Dimitri Mawet 氏はこの装置の PI としてサイエンスのための観測だけでなく、装置開発も同様に勤めており、彼と協力することで、安定して最新の観測データを取得することが可能となっている。実際に申請者は観測データを確認し、CQ Tau という YSO の持つ原始惑星系円盤において新たなスパイラル構造を発見した(図 4: Uyama et al. 2020, AJ, 159, 118)。さらに、この他にもいくつかの惑星候補天体を検出しており、Dimitri Mawet 氏の進める観測サーベイに CoI として関わりつつ、すばる望遠鏡・ケック望遠鏡に対して惑星であることを確認するための追観測を提案中である。

2) さらに、ケック望遠鏡の装置開発の発展により、他の望遠鏡に搭載されている補償光学装置よりも暗い天体までターゲットにすることが可能(Bond et al. 2018)で、これにより従来では直接撮像のターゲットにできなかった天体を今後観測し形成中の惑星を検出することが期待される。本研究ではこの技

術を利用し、これまでは観測性能が十分に発揮されなかった SR 21 という若い天体を観測し、円盤内部におけるスパイラル構造を確認した(図 5 参照)。更に、以前に観測された結果と比較したところ主星近傍においてノイズが大幅に削減されたことを示し、今後の直接撮像観測におけるターゲット選定を拡充できるだけでなく、惑星の直接撮像を目指す点において非常に有用な技術である事を証明した(Uyama et al. 2020e, AJ, 160, 283)。

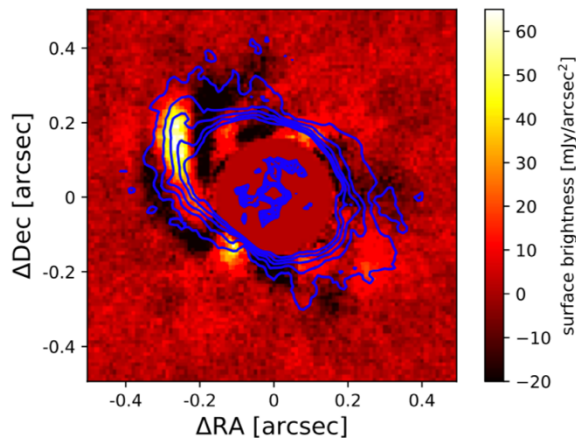


図 4: Keck/NIRC2 で観測された CQ Tau のスパイラル構造。Subaru/HiCIAO の偏光観測で得られた結果(青等高線)と比較したところ、同じ構造が見えていることを確認した。

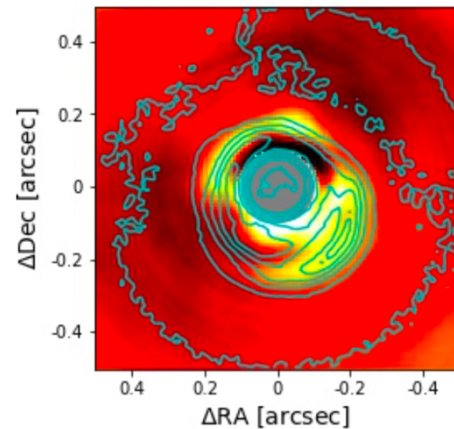


図 5: Keck/NIRC2 で観測された SR 21 の円盤構造。VLT/SPHERE の偏光観測で得られた結果(シアン等高線)と比較し、スパイラル構造を確認した。

3) 原始惑星系円盤内部において形成中の惑星には活発な質量降着現象を示す水素輝線が付随すると考え、水素輝線を用いた直接撮像観測を進めている。この観測から得られる情報は惑星形成の瞬間をリアルタイムに捉え、議論することが可能となる。しかし、前述の観測装置は若い惑星の連続スペクトルを得て物理的な特徴づけを目指す装置であり、水素輝線を元に質量降着現象の特徴づけを行うことはできない。そこで、申請者は Charles Beichman 氏等と協力して Keck/OSIRIS を用いた Pa β 輝線(1.28 μ m)の検出を目指し観測を行った(Uyama et al. 2021; RNAAS, 5, 9)。OSIRIS は輝線をスペクトル分解できる(R $\sim$ 2000)面分光装置であり、これを用いて主星から離れた(30~400 au)惑星質量天体の輝線の強度と広がり方を調べる。これらを元に、理論モデル(例: Aoyama et al. 2018, 2019)と比較することで質量降着がどのように起きているかを議論する。特に、水素ガスが磁気圏に捉えられて輝線が発生するのか、それとも粘性による影響を受けて加熱されて輝線が発生するのかを具体的に議論することができ、これまで観測的に全く制限できていなかった惑星形成の物理的現象そのものに対して制限を与える事が可能となる。

現在までに原始惑星系円盤内で形成中の惑星が確認されたのはほとんどなく、これらの惑星候補が実際に惑星であることが確認されると、非常に大きな成果となる。また、Charles Beichman 氏は JWST の装置開発に携わっており、今年打ち上げが予定されている JWST による系外惑星探査の観測計画や実際のデータ解析・議論に関連して活発な議論を進める事ができる。また、上記 2 名や NASA ジェット推進研究所(JPL)の研究者達に加わり、実際の系外惑星観測のデータ解析プログラムの開発にも関わる予定である (CoI として JPL プロポーザル採択済み)。この装置運用が可能となれば JWST 望遠鏡における系外惑星の直接撮像の価値が高まるだけでなく、今後非常に若い系外惑星の検出数を大きく伸ばし、惑星形成論を飛躍的に進めることが期待される。Dimitri 氏は将来的な望遠鏡 TMT の系外惑星観測のための装置 PI も務めている。現在は若い木星型惑星をターゲットにした近赤外線直接撮像が主流だが、TMT 望遠鏡では可視光による惑星の反射光を直接捉え、具体的な第二の地球でのアストロバイオロジーに繋げる事のできる方法である。今後の系外惑星の直接撮像を進める上においても、海外特別研究員として新たに築いたネットワークが大きく活きる事が期待される。