

平成 31 年 3 月 28 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 平成 29 年度

受付番号 441

氏 名 平野 照幸

(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: ホノルル (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。

近赤外観測による太陽系外惑星の多様性とその起源の解明

3. 派遣期間: 平成 30 年 2 月 25 日 ~ 平成 31 年 3 月 18 日

4. 受入機関名及び部局名

Institute for Astronomy, University of Hawaii

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。

【研究目的】

近年地上・宇宙からの精力的な観測によって多くの太陽系外惑星(以下、系外惑星)が発見されている。特に2009年に打ち上げられたケプラー宇宙望遠鏡は約4年にわたる15万個以上の恒星のモニター観測で恒星の前を惑星が通過する現象(トランジット)を捉え、5000個以上の惑星とその候補を発見した。その大半が4地球半径以下の小型惑星であり、その中にはハビタブルゾーン(以下HZ)付近に存在する地球型惑星も含まれている。

系外惑星の発見は惑星系の多様性・普遍性を詳細に明らかにした一方、惑星系の形成・進化について多くの謎が残した。例えば、中心星近傍を公転する巨大惑星(ホットジュピターやホットネプチューンと呼ばれる)や、スーパーアースやミニネプチューンと呼ばれる太陽系にはない地球の1.5倍~3倍程度の短周期惑星の存在である。これらは系外惑星が見つかる以前は惑星形成理論においてあまり想定されていなかったもので、現在もその起源に関して活発な議論が展開されている。現在見つかった系外惑星の多様性や特徴を説明する理論モデルは数多く存在するが、短周期巨大惑星の起源に限ってもこれまでの観測事実全てを合理的に説明する決定的なモデルは存在しない。

これまで系外惑星の約90%以上は表面温度や質量が太陽に似た恒星(以下、太陽型星と呼ぶ)の周りで見つかっており、惑星の形成進化モデルに関する議論は太陽型星周りの惑星を中心に行われてきた。一方、我々の銀河系にはM型矮星と呼ばれる太陽よりも低温度・低質量の恒星がより多く存在しているが、M型矮星は一般に可視光で暗いためこれまであまり惑星探査が進んでいなかった。M型矮星は中心星の放射特性が太陽型星と大きく異なるため、その周りの惑星の分布・特徴を理解

することは惑星の形成進化モデルを検証する上で極めて重要となる。

こうした背景を踏まえ、本研究では「形成環境の違いが与える惑星の性質の違いと、惑星系の多様性の起源を解明すること」を目的に系外惑星系の観測に取り組んでいる。この目的のため、(1) *K2* で観測された低質量星まわりのトランジット惑星の検出と地上追観測による確認、(2) トランジット惑星を持つ低質量星追観測のための近赤外ドップラー法の開発、(3) 低質量星周りのトランジット惑星の特徴付け、という3つのサブテーマに分けて研究を遂行した。

【研究実施状況・成果】

本研究の3つのサブテーマについて、以下で具体的にその研究実施状況を記す。

(1) *K2*で観測された低質量星まわりのトランジット惑星の検出と地上追観測による確認

2013年にケプラー望遠鏡は姿勢制御装置の故障により観測を中断したが、その後黄道面に沿った領域を約80日間ずつモニター観測する「*K2*ミッション」(以下*K2*)として復活し、最終的に燃料が枯渇した2018年10月まで観測を継続した。*K2*は複数の探査領域を順次観測したため従来のケプラーミッションに比べて「明るい」恒星まわりで惑星候補を多く検出しており、これまで惑星大気等の特徴付けに適した明るい天体($V < 12$ 等)を公転する惑星を多く発見している。*K2*では画像データのみが公開され、それらを解析してデータの中から惑星候補を検出する公式チームは存在しない。そこで世界のいくつかの拠点の研究者とともに国際研究チーム"KESPRINT"を立ち上げ、公開データを独自に解析して惑星候補を持つ天体を探し出すとともにそれらを地上から組織的に追観測する体制を整えている。2018年に*TESS*によるサーベイが開始された後は、KESPRINTは*TESS*チームにより公開される全フレーム画像 (FFI) の解析により独自の惑星候補の検出を目指す体制となっている(*TESS*公式チームにより一部の特定のターゲットに対する惑星候補の検出と公開がなされるが、FFIの解析は各チームに任されている)。本研究では、主に*K2*ミッションで得られたデータから低質量星(M型矮星)周りのトランジット惑星候補を検出し、さらに地上望遠鏡を用いた追観測によってその発見確認を行った。*K2*ミッションは2018年10月に最後の観測キャンペーン(領域19)が終了し、2019年始めの時点で領域18までの較正済みデータが公開されている。我々は2018年2月から2019年2月の1年間で領域13から領域18までの公開データを解析し、各領域で5~19個程度の低質量星周りのトランジット惑星「候補」を検出した。一般にトランジットサーベイでは惑星を模した食連星等の「偽検出」が多く見られるため、それらを排除するため惑星候補を持つ恒星に対して追観測を実施することが惑星発見の最も基本的なステップとなる。追観測には、(1) 天球面上でターゲット星の近くに伴星や背景星がないかどうかを確かめる高分解能撮像、(2) ターゲット星の恒星パラメータ推定と近接連星シナリオ制限のための高分散分光観測等が含まれ、これら追観測データを精査することによって偽検出シナリオを排除し惑星として確認する。派遣先のハワイ大学はハワイ島マウナケア山の望遠鏡群全てにアクセスがあり、すばる望遠鏡等の8-10mクラスの大型望遠鏡に加えてUH88等の小中口径の望遠鏡も積極的に活用した。昨年1年間で、本プロジェクトのためにすばる望遠鏡で3夜、ケックII望遠鏡で1夜、UH88で3夜観測を実施し、天候で一部の時間を失ったもののまずまずのデータが得られた。現在取得したデータの解析を継続中であるが、いくつかの惑星候補は食連星のブレンディングによる偽検出の可能性が明らかになった一方、80%以上の惑星候補が本物のトランジット惑星であることが確認された(研究発表(1)2, 3, 5, 7, 11-13, 16)。

(2) トランジット惑星を持つ低質量星追観測のための近赤外ドップラー法の開発

低質量星周りのトランジット惑星の発見・確認と並行し、こうしたターゲットの視線速度観測による特徴付けを見据えた近赤外ドップラー法の開発を行った。低質量星は可視光で暗く、従来の可視光ドップラー法で低質量星周りの小型惑星の質量を決めるのは困難であるが、近赤外域(900-1600nm)では相対的に明るくなるため高い視線速度精度が期待できる。トランジット惑星系の近赤外分光観測によりトランジット惑星の質量が測定できる(トランジットから惑星半径がわかるのでこれらを組み合わせると惑星の密度が分かる)他、トランジット分光により惑星の軌道や大気の情報を得ることが可能である。

2017年にすばる望遠鏡に搭載された近赤外高分散分光器「IRD」はそうした低質量星周りの惑星探査に特化した装置であり、IRDを用いた視線速度法による低質量星周りの惑星探査サーベイも最近開始されている。本研究では、IRDで取得されたデータを解析し近赤外での視線速度測定を可能にする解析パイプラインの構築に多くの時間を費やした。IRD

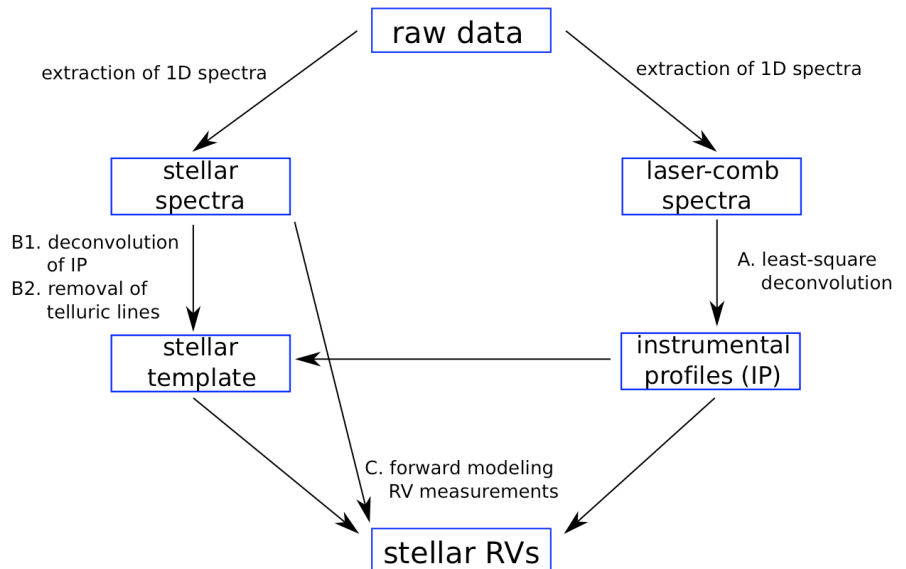


図 1: IRD データの視線速度解析パイプラインの概念図

による視線速度測定の問題点として、1) 分光器の温度がそれほど安定でなく視線速度に直して1晩で最大200m/s程度の絶対ドリフト(分光器の点揺がり関数=器械広がり=不安定性)が存在する、2) 近赤外では地球大気の透過吸収が強く、さらにそれら地球大気吸収線が時間的に変化する、といった問題点がある。そこで本研究では、天体スペクトルと同時に取得されるレーザー周波数コム(コム)のスペクトルから正確に分光器の瞬間的器械広がりを取り出す方法論を開拓(具体的にはガウス過程と呼ばれる手法を用いてノイズを増幅しないデコンボリューション法を開発)し、さらに順モデル法によって天体スペクトルのドップラー偏移と地球大気の吸収を同時にモデル化する手法を開発して上記2つの問題をクリアした。図1に開発したIRDデータの解析パイプラインのフローチャートを示す。

2018年はIRDの性能評価のための試験観測にも積極的に観測に参加し、多くのデータを取得した上で上記パイプラインを用いて解析した。試験観測では視線速度標準星と考えられているいくつかの低質量星・太陽型星を観測し、得られた視線速度の標準偏差からIRDがほぼ期待通りの性能を発揮できていること(数ヶ月に渡って視線速度精度 $\sim 2\text{m/s}$ 以下)を確認した。この他、既知の惑星を持つ低質量星・太陽型星(GJ 436や51 Pegasi)もIRDで観測し、文献で報告されている惑星による視線速度変化を再現できることを確認した(研究発表(1)14, 15)。

(3) 低質量星周りのトランジット惑星の特徴付け

研究(2)がある程度進行した時点で、IRDを用いた低質量星周りのトランジット惑星の特徴付けを提案・実施した。低質量星周りの惑星系の特徴付けの一つとして、トランジット惑星系のロシター効果と呼ばれる現象に着目した。ロシター効果とは、惑星がトランジットによって自転している恒星の一部分を隠すことにより恒星スペクトル線が歪む現象を指し、視線速度変化を調べることでトランジット中に特徴的なアノマリーが観測される。トランジット中の視線速度アノマリーの時間変化は自転している恒星面を惑星がどのように通過するかに依存するため、ロシター効果の観測（トランジット中の視線速度測定）によって惑星の軌道公転軸と中心星の自転軸の（天球面上で）なす角度（軌道傾斜角と呼ぶ）を制限することが可能である。惑星の軌道傾斜角は惑星系がどのように形成され軌道進化してきたかを探る重要な鍵となる。

ロシター効果はこれまで多くのトランジット惑星系で観測がなされてきたが、その検出のほとんどは太陽型星に対してのみであった。可視光で暗く、自転速度の小さい低質量星は一般にロシター効果の検出が難しく、これまで低質量星周りの惑星の軌道傾斜角はよくわかっていなかった。そこで本研究では、(2)で開発したIRDを用いて近赤外観測によるロシター効果の観測を試みた。2018年8月には、トランジット惑星を持つ恒星の中で最も低温・低質量の晩期M型矮星TRAPPIST-1に対してすばる/IRDを用いてロシター効果の観測を実施し、図2に示しているように初めて晩期M型星に対してロシター効果を検出した（平野ら、論文準備中）。観測の結果、軌道傾斜角は太陽系と同様に比較的小さいことが示唆されたが、これはよく分かってない晩期型星周りの惑星の形成進化を議論する上での貴重な観測的制約となる。

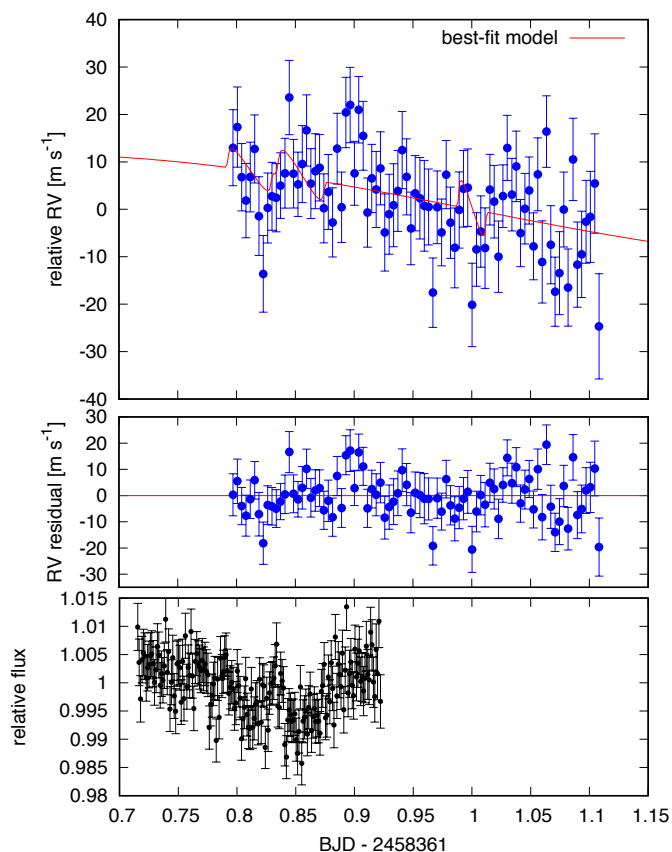


図 2: (上) IRD で取得された TRAPPIST-1 の視線速度変化 (2018 年 8 月 30 日観測)。1 晩に 3 つの惑星がトランジットを起こしており、視線速度変アノマリーが見える。赤線は最適モデル。(中) 観測値と最適モデルの残差。(下) 別の望遠鏡で同時に取得された TRAPPIST-1 の光度曲線。