

氏 名 笠 嗣瑠

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2025 号

学位授与の日付 平成 30 年9月28日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Direct Imaging of Intermediate Mass Giants with RV Trends

論文審査委員 主 査 教授 大橋 永芳  
准教授 青木 和光  
助教 小谷 隆行  
教授 住 貴宏  
大阪大学 理学研究科  
准教授 生駒 大洋  
東京大学 理学系研究科

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏名：笠 嗣瑠

論文題目：Direct Imaging of Intermediate Mass Giants with RV Trends

Radial velocity (RV) technique is one of the most useful methods to detect exoplanets and has been used to discover over 700 planets in more than 500 systems in the last 20 years. This method has an advantage in detecting planets orbiting short distance from the host stars. However, it is less sensitive for wide-orbit planets with a semi-major axis a larger than 10 AU because it takes a long time to cover a full orbit of a such planet. The number of distant planets ( $a > 10$  AU) is still small and more discovery of distant planets is required to understand the formation of distant planets. We developed a method to tackle such an observational challenge.

The long-term RV trend of a host star is a clue to discover planetary companions in wide-orbits. A linear RV trend shown in 10 years of observations can be generated by an object at 10 AU. It could also be generated by a distant stellar companion or a brown dwarf companion in an even wide-orbit ( $> 100$  AU). Therefore, with the RV method alone we cannot distinguish between a planet and a stellar companion as a generator of the RV trend.

We chose direct-imaging technique which is to directly detect a companion, to uncover the nature of the RV trend generator (RVTG) through directly detecting a companion. Even with non-detection of any planetary/brown dwarf/stellar companions, the direct imaging data can constrain the range of the mass and the semi-major axis of the object that generates the RV trend. At Okayama Astrophysical Observatory (OAO), an RV survey targeting intermediate mass giants has been conducted for over a decade. Identifying the companions that generate the RV trends in this OAO survey can improve our knowledge of exoplanet populations for intermediate mass stars, which is not well understood compared with that of the solar type stars.

There are two formation theories of the giant gas planets. One is a core accretion model that can explain solar system formation, and the other is a gravitational instability in the protostellar disk. Which planetary formation theory matches the observational results of the exoplanets? Determining the occurrence rate of planets can be an important clue to understand the exoplanetary formation theory.

In this thesis, we aim to detect or put constraints on the objects responsible for the observed RV trends that indicate the presence of distant companions. We attempt to estimate the occurrence rate of distant planets around intermediate mass giants and compare it with that of a Sun-like star to put some constraints on planetary formation theory around intermediate mass stars.

With the above goal in mind, we conducted direct-imaging observations for thirty two intermediate mass giants with RV trends using the HiCIAO high-contrast camera on the 8.2m Subaru Telescope and the NESSI imager on the WIYN 3.5m telescope. We detected and confirmed three companions ( $\gamma$  Hya B, HD 5608 B, and HD 109272 B) and twelve targets with companion candidates. In contrast, we

were not able to detect any companion candidates towards seven targets observed with HiCIAO and ten targets observed with NESSI.

By combining direct-imaging observation results with RV trend data, we clarify and constrain the RVTGs. We conclude that our confirmed three companions are responsible for the observed RV trend in each star. In addition, we conclude that the companion candidates around eight stars are likely to be the RVTGs for the observed RV trends even if considering the possibility of a contamination of background stars. For other stars, we constrain the nature of the RVTGs and find that thirteen targets have possibilities of planetary ( $< 13 M_{\text{JUP}}$ ) RVTGs at  $a = 9\text{-}26$  AU, and/or sub-stellar ( $< 75 M_{\text{JUP}}$ ) RVTGs at  $a = 9\text{-}62$  AU.

Considering limitations caused by the RV trend detection efficiency, white dwarf contamination, and missing stellar companions, we made a rough estimate of an upper limit of occurrence rates of wide-orbit planets around intermediate mass giants and suggested that it is less than 20%. This is a first clue to understand distant planet formation around intermediate mass giants. When we consider that NESSI observations could overlook companions, an upper limit of distant planet occurrence rates around intermediate mass giants can be 10%. Our result could not distinguish between the core accretion and gravitational instability models for distant planet formation.

Based on our RVTG discussion of the eccentric systems, we suggest that Kozai mechanism is one of the likely origins of three eccentric planet systems in our sample,  $\iota$  Dra b, HD 5608 b, and HD 14067 b.

(備考)

- 1 用紙の大きさは、日本工業規格 (JIS) A4 縦型とする。
- 2 和文で作成する場合は 2,000 字~3,000 字、英文で作成する場合は 700 語~2,000 語程度とする。  
ただし、生命科学研究科に出願 (申請) する場合は、英文 700 語程度で作成すること。
- 3 1 行あたり 40 文字 (英文の場合は 80 文字)、1 ページ当たり 40 行で作成する。
- 4 上マージン、下マージン、右マージンは 2 cm、左マージンは 2.5 cm とする。
- 5 タイトルと本文の間は、1 行空ける。
- 6 片面印刷とし、ホチキス止めをしないこと。
- 7 別紙の添付は不可。
- 8 ページ番号は入れないこと、また改行を行わないこと。
- 9 図表を挿入する際は、白黒印刷でも判別できるように配慮すること。
- 10 論文審査に合格し、博士号が授与された場合は、本要旨を総合研究大学院大学リポジトリにおいて、インターネット公開する。

## 博士論文審査結果

Name in Full 氏名 笠 嗣瑠

Title 論文題目 Direct Imaging of Intermediate Mass Giants with RV Trends

1995 年の 51 Peg における最初の系外惑星の発見以来、系外惑星探査およびそのデータを用いた系外惑星形成の観測的研究は、21 世紀の現代天文学の大きなテーマの一つとなっている。系外惑星の検出方法の中でも、惑星による中心星の視線速度の変動を測定する、視線速度法は比較的小口径の望遠鏡でも観測が可能なることから、系外惑星探査の中でも最も一般的に用いられている方法である。視線速度法は中心星に比較的近い(太陽・地球間距離(AU)のおよそ 10 倍以内)惑星により感度があり、10 AU よりも外側の遠方惑星の検出には長期の観測(およそ 10 年以上)が要求される。また、長期の視線速度変動が観測されたとしても、中心星から 10 AU 程度に位置する惑星なのか、100 AU 以上遠方に位置する伴星なのか区別をすることが難しい。それに対して、惑星自体を直接探査する、直接撮像法は視線速度法に比べてより遠方の惑星に有効であるが、非常に高解像度・高感度の観測が要求されることから中大型の望遠鏡を用いて行われてきている。本論文は、国立天文台岡山天体物理観測所 188 cm 望遠鏡を用いて長年に渡って行われてきた、視線速度法による中質量巨星周囲の惑星探査のデータに着目し、ハワイ観測所の口径 8.2 m すばる望遠鏡を用いた直接撮像法による惑星探査データを加えることにより、中質量巨星周囲における遠方惑星の系統的探査を世界に先駆けて行ったものである。中質量星では太陽型星とは異なるメカニズムで惑星が形成される可能性があるため、これまで主に観測されてきた太陽型星に加え、中質量星まわりの遠方惑星の存在を調査することは惑星形成の理解のうえで大きな意義がある。

出願者はまずこれまでに岡山天体物理観測所 188 cm 望遠鏡を用いて取得された、中質量巨星 322 天体周囲の惑星探査のデータを調べ、遠方惑星が存在する可能性のある長周期視線速度トレンドを持つ 31 天体を選んだ。さらに、先行研究で長周期視線速度トレンドを持つことが知られている中質量巨星 1 天体も加えて、合計 32 天体を本論文のターゲットとした。

出願者は次にこれらの天体に対して直接撮像観測を行った。32 天体のうち 20 天体は、ハワイ観測所のすばる望遠鏡を用いて行われた。観測提案、観測、データ解析は全て出願者自身が行った。残りの 12 天体に関しては、フロリダ大学の Ma 博士との共同研究を通じて、WIYN 3.5 m 望遠鏡を用いて行われた。すばる望遠鏡を用いた観測からは、3 天体で伴星が新たに検出され(Ryu et al. 2016)、12 天体で伴星候補天体が同定された。一方、17 天体では伴星が検出されず、これらの天体では伴星が長周期視線速度トレンドを引き起こしている可能性が否定された。

出願者は次に伴星候補天体が見つかった星と伴星が検出されなかった星に関して、さらに詳細な解析を進め、長周期視線速度トレンドを引き起こしている原因を注意深く考察し、トレンドを引き起こしている原因天体の質量と軌道長半径に制限を与えた。その結果、13 天体では長周期視線速度トレンドを引き起こしている原因が惑星である可能性があることを見出した。さらにこの結果を用いて、出願者は中質量巨星周囲における遠方惑星の頻度に対して制限を与えようと試みている。頻度の推定に当たっては、遠方惑星があるにも関わらず長周期視線速度トレンドが観測感度の問題で検出されて

いない可能性やサンプルに白色矮星が混入している可能性も考慮し、遠方惑星の頻度の上限値をおおむね 20 %と推定した。中質量巨星周囲における遠方惑星の頻度に対して制限を与えたのはこれが最初であり、中質量星周囲での惑星系形成を理解する上で重要な知見を得ることができたという点で、高く評価できる。

本研究は発想から研究の立案、ターゲットの選定、すばる望遠鏡による観測とそのデータ解析、得られた結果に基づく考察に至るまで、論文の執筆も含めて出願者が主体的に行ったものであり、中質量星周囲での惑星系形成の理解に貢献をするものである。また、小口径の望遠鏡により得られた長周期視線速度トレンドの結果を、直接撮像によってフォローアップするという手法は、世界的に見ても稀で、しかもそれを系統的に行ったという点は、大いに評価される。従って、審査委員全員一致で博士論文として合格であると判断をした。

---

(備考)

1. 用紙の大きさは、日本工業規格 (JIS) A 4 縦型とする。
2. 1 行あたり 40 文字 (英文の場合は 80 文字)、1 ページ当たり 40 行で作成する。
3. 上マージン, 下マージン, 右マージンは 2 cm, 左マージンは 2.5 cm とする。
4. タイトルと本文の間は、1 行空ける。
5. ページ番号は入れない。
6. 出願者 (申請者) が論文審査に合格し、博士号が授与された場合は、本紙を総合研究大学院大学リポジトリにおいて、インターネット公開する。

Note:

1. The sheets must be Japanese Industrial Standard (JIS) A4 vertical.
2. Each line shall have approximately 40 characters in Japanese or 80 characters in English, and each page shall have 40 lines.
3. The top, bottom, and right margins must be 2 cm and the left one must be 2.5 cm.
4. Single spacing is required between the title and the text.
5. There must be no page numbers.
6. If the applicant is conferred a doctoral degree, this paper will be published on the SOKENDAI Repository.