

氏 名 鬼塚 昌宏

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1903 号

学位授与の日付 平成29年3月24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 A Study of the Transit-Like Phenomena around a T-Tauri
Star

論文審査委員 主 査 教授 福島 登志夫
教授 竝木 則行
教授 渡邊 鉄哉
准教授 佐藤 文衛 東京工業大学
特任助教 堀 安範 自然科学研究機構

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

How do planets form and evolve? — This question has been mainly considered from a theoretical perspective since early times; it is only recently that we have acquired the ability to observe planets outside our solar system (exoplanets) and the scenes of planetary formation, such as protoplanetary disks and debris disks. To understand planet formation, it is essential to study young systems rather than evolved/aged systems. Among several detection methods for exoplanets, the direct imaging method has been successful to detect young (age \leq Gyrs) gas giants. Other methods are mostly suitable for detecting older planets. From the direct imaging method, one can obtain certain planetary parameters such as temperatures immediately, but derivations of masses and radii have some model dependence. Additionally, detectable planetary orbits via direct imaging are currently longer than ~ 10 AU, and determination of orbital parameters typically requires several years.

In contrast, detection of such young planetary systems by the transit method is very limited. However, transit observations can directly derive the ratio of planetary and stellar radii. Furthermore, orbital parameters can be obtained by a relatively short series of observations.

The first candidate transiting young gas giant CVSO 30 (PTFO 8-8695) was reported by van Eyken et al. (2012). CVSO 30 is an M3 weak-line T-Tauri star in the Orion OB1a region at a distance of 323 pc with a mass of $0.44 M_{\odot}$ (using the Baraffe et al. (1998) model), a radius of $1.39 R_{\odot}$, and an effective temperature of 3470 K (Bricenõ et al., 2005).

The candidate planet has an orbital period of 0.448413 days, which is comparable to the rotational period of the host star, a mass of $M_p \leq 5.5 M_{\text{Jup}}$, a radius of $1.91 R_{\text{Jup}}$, and an orbital semi-major axis of 0.00838 AU (van Eyken et al., 2012). Note that the observed light curves show large variations of fading depth and duration with time. Barnes et al. (2013) explained these in terms of a combination of the precession of the ascending node planetary orbit and the stellar gravity darkening effect, assuming synchronization of the stellar rotation and planetary orbital motion. Conversely, Yu et al. (2015) argued that the transit-like events were unlikely to be caused by a giant planet but rather caused by either starspots near the rotational pole, circumstellar dust clump transit, or occultation of accretion hotspots. Furthermore, the wavelength dependence of fading events obtained using multiband simultaneous photometry by Yu et al. (2015) and Raetz et al. (2016) are inconsistent.

As described above, little is known about planets and their orbits for any young stellar objects (YSOs) yet. CVSO 30 is, in fact, the only young transiting planet candidate so far. Hence, a detailed study of even this one object is important for a

general understanding of what occurs around YSOs.

In this thesis, we present optical three-band simultaneous observations and long-term infrared observations of CVSO 30, the youngest object that is a candidate transiting planet. The data were obtained with the Multicolor Simultaneous Camera for studying Atmospheres of Transiting exoplanets (MuSCAT) and the near-infrared imaging and spectroscopic instrument (ISLE) on the 188-cm telescope at Okayama Astrophysical Observatory in Japan.

For the multiband observations, we first observed the fading event in three colors (g'_{2-} , r'_{2-} , and $z_{s,2-}$ bands) simultaneously. As a result, we found a significant wavelength dependence for fading depths of approximately 3.1%, 1.7%, and 1.0% for the g'_{2-} , r'_{2-} , and $z_{s,2-}$ bands, respectively. This wavelength dependence includes the degeneracy between the planetary-to-stellar radius ratio R_p/R_s and the transit impact parameter b owing to the obtained grazing orbit. We confirm that R_p/R_s has a wavelength dependence for any b .

For the long-term observations, we observed 12 fading events over the four seasons. Most observations used ISLE with the J -band filter. Such long-term observations in infrared have to date not been carried out. We observed double fading events in certain cases. To analyze these double fadings, we fitted the light curves to transit models for the first and second fadings. As a result, we found that both R_p/R_s and b vary in the orbital epoch.

Finally, we discuss the origin of fading of the CVSO 30 based on our new observations and the previous results. A cloudless H/He-dominant atmosphere of a hot Jupiter cannot explain this large wavelength dependence. We also rule out the scenario of occultation by the gravity-darkened host star. For these reasons, the scenario of gas giant origin is ignored.

Transit timing analysis shows that the first fading events are more periodic than the second fading events in double fading events. The first fading timing shows no evidence of orbital decay, which is presented by Yu et al. (2015) and Raetz et al. (2016). Previous studies could have confused the timing of second fading events with an orbital decay. The absence of orbital decay is inconsistent with the calculation of tidal dissipation assuming a gas giant by Kamiaka et al. (2015).

Furthermore, a starspot is an unlikely cause of fading events because it is difficult for the spot to exist near the pole at all times. Thus, all our results are in favor of such potential fading origins as circumstellar dust clumps or the occultation of an accretion hotspot.

Future transit survey projects have the potential to discover other periodic fading events, and studies on multiple young objects with transit-like events will also be important.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

16世紀にジョルダノ・ブルーノが唱えたように、太陽系以外の恒星にも惑星（系外惑星と呼ぶ）は多数存在する。1995年にジュネーブ天文台のマイヨールらによってペガサス座51番星に木星サイズの惑星が発見された後、現在に至るまで、およそ2500個の恒星系に約3500個の惑星が確認されている。

このような状況下において、出願者は、多数観測された系外惑星の軌道半径と質量の関係が、既存の惑星形成理論と矛盾する点に着目し、もし系外惑星があるとするならば形成時の名残りとどめていられると思われる若い恒星 CVSO 30 の観測を、国立天文台岡山天体物理観測所の188cm望遠鏡に搭載した三色同時測光観測装置 MuSCAT と近赤外撮像分光装置 ISLE により実施した。

惑星もしくはダスト雲が、偶然、視線方向上で主星を横切る軌道にあるとすると、金星や水星の太陽面通過のような食現象を起こす。つまり、惑星が通過(transit)時に主星からの光を遮ることによって、主星の明るさが長期間にわたり規則的に不連続な明暗を繰り返すことになる。出願者が採用した観測手法はトランジット法（あるいは食観測法）と呼ばれるもので、主星の長期かつ規則的な減光現象から惑星の半径、軌道周期などを割り出す方法である。ただし、減光そのものは主星の黒点や脈動から生じる可能性があり、また、主星の光を遮る天体が惑星であるという保証は必ずしもない。

これらの疑問点を解決するために、出願者は、緑、赤、赤外の精密三色同時測光を実行し、得られた測光データを綿密に解析することにより、減光現象の同時性・波長依存性などを吟味した。現象が惑星によるものと仮定して、得られた観測データに食観測モデルをあてはめ、モデルに含まれる惑星の半径、公転周期などのパラメータを推定したところ、決定パラメータ等に有意な波長依存性が認められた。確認された波長依存性はかなり大きく、惑星が巨大ガス惑星であり、その大気による減光である可能性や、重力減光と呼ばれる主星の高速自転による縁での減光効果だけでは説明しきれない。

一方、出願者は長期間にわたる多数（3年間に11回）の近赤外観測データを用いて、減光現象の継続性・周期性などを検証し、まず減光の継続性から主星の黒点である可能性を除去した。この過程で、2014年以降の特定の観測データ中に、同一周回で二回減光が起きる奇妙な現象(double fading)を世界で初めて発見した。この現象自体は大変、示唆に富むものであり、複数の周回惑星あるいはダスト雲、惑星とその噴出物など様々な想像を掻き立てる。また、減光現象の周期性についても、double fadingのどちらを規則的周回天体による事象と考えるかによって微妙な違いが生じ、実際、他の観測者によって報告されている軌道半径の減衰現象も見せかけである可能性がある。

出願者は、上記の観測事実を総合して、先行研究によって惑星が存在するとされていた CVSO 30 の減光現象が、実は周回惑星による食現象ではないことを明快に示した。残る可能性の一つは、主星の潮汐力によって崩壊する途中にある惑星の名残り、もしくはそれ自体は見えない惑星から放出されるダスト雲などによる食現象であるが、この仮説を確認するためには、近赤外域での高精度分光測光観測が必要であると、結論付けている。

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

本研究は、(1)多波長同時測光観測を実施することにより、系外惑星の探索及び確認において標準的手法の一つとされている単波長測光観測によるトランジット法に潜むあいまいさを明確に指摘するとともに、(2)double fading という非常に興味深い事象を発見した。従来の系外惑星観測とその解析法に対して、大きな問題提起を投げかけたという意味で重要な研究である。

これらのことから、審査委員は全員一致で、提出論文が博士論文として合格であると判定した。