

氏 名 渡辺 紀治

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2222 号

学位授与の日付 2021年3月 24日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Measurement of Spin-orbit Obliquity of WASP-33b by
Doppler Tomography and Transit Photometry

論文審査委員 主 査 藤井 友香
天文科学専攻 准教授
小久保 英一郎
天文科学専攻 教授
小谷 隆行
総合研究大学院大学 連携助教
佐藤 文衛
東京工業大学 理学院 准教授
長澤 真樹子
久留米大学 医学部 教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 渡辺 紀治

論文題目 : Measurement of Spin-orbit Obliquity of WASP-33b by Doppler Tomography and Transit Photometry

The first discovered extra-solar planet, also known as an exoplanet, surprised us because that was a Jupiter-like planet orbiting very close (about 4-day orbital period) to its host star: This type of planet is hot Jupiter. There are 4200 confirmed exoplanets: 500 of them are hot Jupiters. Hot Jupiters are uncommon planets for our solar system and difficult to be born in situ following the classical planet formation. Thus, new orbital evolution models to bring them near the host stars have been proposed.

There are three major orbital evolution models of hot Jupiter. One model drops a hot Jupiter near its host star by the gravitational interaction between the planet and the gas disk (planet-disk interactive model) and often aligns the orbit with the stellar spin. Another model scatters more than three hot Jupiters by their mutual interactions (planet-planet scattering model), and the stellar rotation axis is inclined easily to the planetary orbital axis. The other model oscillates the orbit of hot Jupiter by the Kozai effect (Kozai-Lidov mechanism) and tends to make the obliquity distribution more widely than one via the planet-planet scattering. While the first model stays an orbiting circular, the second and the third ones make an orbit elliptic. Especially, the eccentric orbit gets circular by tidal evolution keeping its misaligned orbit.

However, a solar-like star, whose effective temperature is less than 6250 K, is realigned with a planetary orbit because its thick convective has been affected by the tidal dissipation. On the other hand, a hot star, whose effective temperature is more than 7000 K, has no convective zones and hardly undergoes realignment. Thus, the spin-orbit obliquity of hot Jupiter around the hot star is the clue to understanding its origin.

Doppler tomography is a powerful method to meter the spin-orbit obliquity of hot Jupiters around hot stars by transit spectroscopy. Nevertheless, a single observation can only measure the projected one and never detect the real one. When a hot Jupiter revolves around a hot star in the misaligned orbit, the nodal precession occurs and moves the transit trajectory. This movement changes two orbital parameters, projected spin-orbit obliquity and impact parameter, then are available by more than one observation. Finally, we can meter the real spin-orbit obliquity by the two variations. In terms of measuring an impact parameter, transit photometry is also an essential method for the nodal precession.

WASP-33b, a hot Jupiter around a hot star, is the only planet that measured its real spin-orbital obliquity by the nodal precession. However, because the previous study metered it by only two-epoch Doppler tomographic datasets, it is not enough to confirm WASP-33b's nodal precession. Thus, I observed WASP-33b using HIgh Dispersion Echelle Spectrograph (HIDES) in 2019 by Doppler tomographic observation. I utilized this data from HIDES. I also analyzed Doppler tomographic data by High Dispersion Spectrograph (HDS) in 2011, and Robert G. Tull Coudé Spectrograph (TS23) in 2008, 2014, and 2016 to search the variations of its projected spin-orbit obliquity and its impact parameter. I also observed the hot Jupiter for adding data points of its impact parameters by Multicolor Simultaneous Camera for studying Atmospheres of Transiting exoplanets (MuSCAT) in 2017 and the second generation (MuSCAT2) in 2018. I calculated its real spin-orbit obliquity by MCMC with the time variation models of the two orbital parameters. Then, I obtained WASP-33b's real spin-orbit obliquity, $110^{+1.3}_{-1.4}$ deg, with more extended and more observations than the previous study. I independently found a possibility that WASP-33b has evolved with the planet-planet scattering or the Kozai migration. This research is the first step to make a histogram of the real spin-orbit obliquity by Doppler tomography and transit photometry. In the future, I will clarify how hot Jupiters have migrated by increasing the measured samples.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 渡辺 紀治

論文題目 Measurement of Spin-orbit Obliquity of WASP-33b by Doppler Tomography and Transit Photometry

本論文は、ホットジュピターの公転軸の主星自転軸に対する傾きを、ドップラー・トモグラフィ（DT）と呼ばれる手法やトランジット測光観測によって得られる軌道パラメータの長期的な変化から精密に測定したものである。ホットジュピターの公転軸の主星自転軸に対する傾きは、ホットジュピターが形成後どのようにして今の軌道に至ったのか、その機構を制限する指標になると考えられている。これまでに提唱されている軌道移動機構（円盤ガスとの相互作用・惑星同士の散乱・伴星の重力的摂動による古在機構）は、互いに異なる惑星軌道の傾きの分布を生じるからである。ただし、一度のトランジット観測で得られるデータからは通常、その傾きを天球面に射影した角度（ λ ）しか制限することができない。しかし、高速自転により扁平になっている高温星周りのホットジュピターでは、惑星軌道に歳差運動が起りやすく、その歳差から真の傾き（ ϕ ）を制限することが可能になる。

本論文では、WASP-33b という高温星周りのホットジュピターに注目し、2008年から2019年の間に得られたトランジットのデータに基づいて歳差運動を検出した。また、それによって惑星公転軸と主星自転軸との間の真の角度を $\phi = 110^{+1.3}_{-1.4}$ deg と制限した。使用したデータのうち、2019年の高分散分光のデータと2017年・2018年のトランジット測光観測のデータは、出願者自身がPIとして観測提案をし、解析したものである。また、前者の高分散分光のデータからDT法でトランジットパラメータ（ λ と衝突径数 b ）を制限する解析パイプラインも、先行研究を参考に本人が作成している。さらに、軌道歳差による λ や b の時間変化をフィットするための式は、先行研究よりも使いやすい独自のものを使用している。

ホットジュピターについて真の傾き ϕ が得られた例はまだ少ない。本論文を足がかりとして今後サンプル数を増やすことができれば、高温星周りのホットジュピターに対する ϕ の分布が明らかになり、ホットジュピターの起源についての理解が深まると期待される。

以上のように、本論文は、今後の展開が期待できる観測のフレームワークを確立していることから、学位の授与に値すると判断した。