

# ホットジュピターの最期を追った掩蔽観測

河合 優 悟

〈東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

e-mail: yugo6581@g.ecc.u-tokyo.ac.jp



トランジット法による系外惑星の観測の利点の一つは、惑星の公転周期を非常に高い精度で決定できることである。仮に周期性に乱れが見られれば、そこから惑星のケプラー運動に摂動をもたらす第二の惑星の存在や、潮汐散逸の効率などを推定できる。これまで後者については、期待される公転周期の減衰が観測スパンに対して小さいという問題があった。しかし系外惑星の発見から30年が経ち、いくつかの惑星でこの検出が可能になるようとしている。本稿では、軌道減衰の検出2例目を目指し、すばる望遠鏡MOIRCSを用いて追観測を行った短周期巨大ガス惑星（ホットジュピター）WTS-2bについて報告する。末尾には「すばる学生観測支援プログラム」でのすばる来訪記を記した。

## 潮汐による惑星の軌道減衰

月が引き起こす潮汐によって地球の自転は年々遅くなり、月は我々から遠ざかっている。これは、地球の自転が月の公転より速いからである。これによって月の潮汐力による地球の表面の膨らみ（潮汐バルジ）の最高点が常に月より先行するため、バルジが月を引っ張るようにトルク（潮汐トルク）が働く。これが月を加速し、その軌道を外側へ押し広げる [1]\*1。

自転と公転の速度の関係によっては逆のことが起こる。例えば恒星とそれを数日という短周期で公転する惑星では、多くの場合惑星の公転の方が恒星の自転より速い。すると今度は惑星が恒星の潮汐バルジを常に先行し、惑星がこれを引きずる格好になる。この時、惑星の公転から主星の自転へと角運動量が輸送され、惑星の軌道は内側へ移動（軌道減衰）する [3]。

このような軌道減衰がどのくらい効率的に起こるかは、恒星内部での潮汐摩擦によるエネルギーの散逸（潮汐散逸）効率による。逆にいえば、軌道減衰を直接検出し、この効率を制約することは、恒星の内部構造を理解する一つの手がかりとなる。さらには、軌道減衰の制約を用いて時間を巻き戻すことで、軌道減衰前（すなわち惑星形成・移動\*2完了時）の惑星がどの位置に存在していたかの情報も得ることができる。このような研究の可能性は以前から指摘され、観測も多く行われてきたが、期待される軌道減衰の程度が、観測スパンに対して小さいことが問題であった [4]。

しかし、太陽以外の恒星を公転する太陽系外惑星の発見から30年が経ち、一部においてこの検出が現実的になりつつある。2019年には短周期の巨大ガス惑星（ホットジュピター）WASP-12bの公転周期が一年で約30ミリ秒減少していることが発見された [5, 6]。加えて、ホットジュピ

\*1 このことを初めて提唱したジョージ・ダーウィンは、あのチャールズ・ダーウィンの息子である。定性的にはそれ以前、1754年に哲学者カントが同じ主張をしていた [2]。月の軌道の拡大はアポロ計画によって実証された。

\*2 後述の通り、惑星は原始惑星系円盤で形成された後、（軌道減衰以前にも）様々な機構によって移動する。

ターの軌道減衰を間接的に示唆する観測的証拠もいくつか存在している。例えば、ホットジュピターの存在確率は恒星の年齢とともに減少することが知られている [7, 8]。これは軌道減衰によって惑星が主星に飲み込まれた結果と解釈できる。一方で、これらの直接的な証拠と間接的な証拠からそれぞれ制約された潮汐散逸の効率には一桁の不一致がある。軌道減衰の検出例は現在 WASP-12b の一例のみであり、今後より多くの惑星についての検出からこの不一致の原因が解明されることも期待される。

## ホットジュピターのトランジット観測

我々は現在、この軌道減衰の検出2例目を目指し、さまざまなホットジュピターのトランジット観測を行っている。トランジットとは、我々の視線上で、惑星が公転する恒星（以下、主星）の前面を通過する現象である。トランジットは一周期に一度起こるため、その時刻は惑星の公転周期を記録する高精度の「時計」に相当する。これを用いてわずかな周期性からの逸脱を検出できれば、軌道減衰の存在を示す重要な手がかりとなりうる。

潮汐トルクは軌道距離の $-6$ 乗と惑星質量の $2$ 乗に比例するため、短周期で大質量のホットジュピターは絶好の観測ターゲットである。その中でも、今回紹介する WTS-2b<sup>\*3</sup> は2007年の初観測から20年近くが経過したK型星周りのホットジュピターである [9]。公転周期は約1日で、惑星が主星の重力によって潮汐崩壊してしまうロッシュ限界のすぐ外側に存在している。この事実は、軌道減衰を検出する可能性を高めるうえで重要である。

なぜ重要であるかには、ホットジュピターの形成過程が関係している。ホットジュピターはその

大きさから、現在の位置よりも外側の軌道で形成されたのち、内側へと移動することで生まれると考えられている。移動の有力なシナリオの一つは、伴星や他の惑星による重力的摂動によって軌道離心率（以下、離心率）が大きく励起される高離心率移動（high-eccentricity migration）と呼ばれるものである [10]。高離心率によって近点付近で惑星は主星に接近し、その際の潮汐散逸によって軌道が徐々に円形化しながら縮小する。

重要なのは、このような移動では離心率最大時の近点距離が、惑星が潮汐破壊されてしまうロッシュ限界を下回ってはいけないという点である。これに加えて、移動完了時の軌道長半径は高離心率時の近点距離の約2倍になることが角運動量保存から知られている [11]。結果として、図1に示すように、高離心率移動完了時の軌道長半径はロッシュ半径の2倍より大きくなければならない。すると WTS-2b のような現在ロッシュ限界のすぐ外側に存在しているような惑星は、高離心率移動のみでは説明できない。高離心率移動完了後に、更なる軌道減衰によって現在の位置に到達させる必要がある<sup>\*4</sup>。

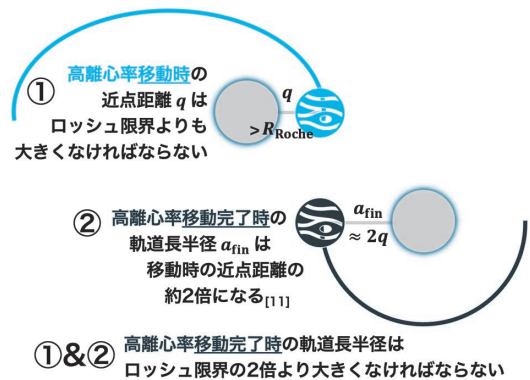


図1 高離心率移動で達成可能な最小の軌道長半径がロッシュ限界の約2倍となることを示す概念図。

<sup>\*3</sup> WTSは惑星を発見した WFCAM Transit Survey の略で、WFCAMはイギリス赤外線望遠鏡に設置された Wide Field CAMera の略である。

<sup>\*4</sup> ほかによりスムーズに円盤内を移動して形成されたという可能性もある。

このことから、我々はWTS-2bの軌道減衰を検出できる可能性が高いと考えた。そして、岡山、テネリフェ、ハワイに設置されている多色測光カメラのMuSCATシリーズ [12]\*5を使い2年間にわたりこのホットジュピターのトランジット時刻を測定してきた。このターゲットは比較的暗く、トランジットのSN比を高くするためには露光時間を伸ばさなければいけない。その結果、一般的な観測装置ではトランジット時刻を地上から高い精度で決定することが難しい。一方で、

MuSCATシリーズは3-4色の異なる波長帯で同時に撮像するため、露光時間を伸ばしながらも高い時間分解能での観測が可能である\*6。例えば、WTS-2bのトランジット時刻は10秒程度の精度で決定できる。

図2は、発見に用いられたプロジェクトや観測装置であるWTSに加え、Zwicky Transient Facility (ZTF), Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), MuSCATの観測からそれぞれ求めたWTS-2bの公転周期を示している。発見当時と見比べると、公転周期が200ミリ秒ほど短くなっている。この変動が軌道減衰によるものであれば、主星のWTS-2における潮汐散逸はWASP-12同様の証拠からの示唆より1桁以上効率的であることになる。この場合、我々は惑星が潮汐破壊に至る直前の極めて限られた瞬間を偶然観測しているということになる。

この真偽を確かめるためには、軌道減衰以外の原因によるトランジット時刻の変化も検討する必要がある。そのような偽陽性の要因の代表例が、惑星の近点歳差である\*7。惑星が楕円軌道にあるとき、ケプラー運動に小さな摂動が加わると惑星の近点は歳差することが知られている [13]。図3に示すように、近点が歳差する惑星系ではトランジットが発生する位相が回を追うごとに変化して

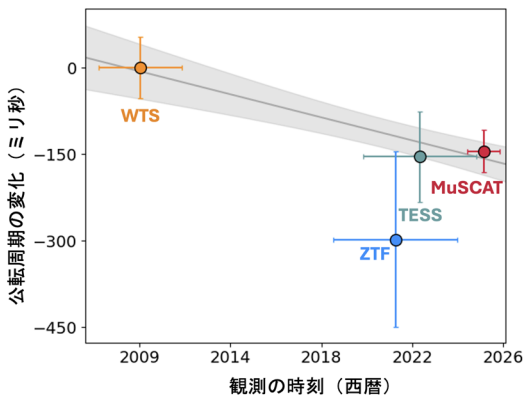


図2 各望遠鏡によるトランジットの観測データから求めたWTS-2bの公転周期の変化。各点の横軸の広がり観測スパンに対応している。灰色の直線と帯で、各点への線形回帰の結果を示した。

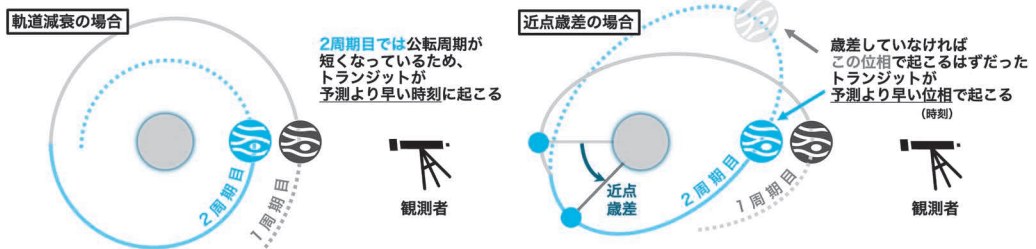


図3 軌道減衰と近点歳差それぞれの場合でトランジット時刻が変化することを示した図。

\*5 MuSCATシリーズについては2025年9月の成田憲保氏による天文月報記事をご覧ください [14].  
 \*6 この利点を活かし、ほかにもロッシュ限界のすぐ近くを公転する、暗いターゲットに焦点を当て観測を行っている。  
 \*7 第二の惑星の重力相互作用によるトランジット時刻の変化は、軌道減衰による変化に比べてタイムスケールが大幅に短いため、ここでは考慮しない。

いく。またケプラーの第二法則に従って、楕円軌道上の惑星の公転速度は位相に応じて変化する。結果的に、歳差する惑星のトランジット時刻は歳差周期に従って変化していく<sup>\*8</sup>。

そしてこの変化は、離心率が地球程度（ $\sim 0.01$ ）のわずかな値でも発生するため、安易に見逃すことができない。このことから、軌道減衰と近点歳差を見分けるためにはまず、惑星の離心率を高い精度で決定しなければならない。そのためにはトランジットだけでなく二次食、すなわち惑星が恒星の裏側に隠れるタイミングを知る必要がある。

## 近点歳差との縮退とすばるでの観測

完全な円軌道の惑星であれば、二次食はトランジットから公転周期のちょうど二分の一の時間が経過した時点で起こる。一方で離心率をもった惑星であれば、近点が我々の視線にある限られた場合を除いて、二次食のタイミングは円軌道の場合と異なる。例えば、我々が観測していたトランジット時刻の変化を楕円軌道と近点歳差で説明する場合、WTS-2bの二次食は円軌道の場合に比べて5分から数十分程度遅れて発生すると予想された。これを検出するためには、少なくとも数分の精度で二次食の時刻を決定する必要がある。

これを達成するため、我々はすばる望遠鏡に搭載されたMulti-Object InfraRed Camera and Spectrograph (MOIRCS) の測光モードを使った観測を昨年6月に行った。二次食で主星が掩蔽するのは主星の放射光に比べて微小な惑星の放射光である。主星に熱され表面温度が2000 Kほどと想定されるホットジュピターと、5000 KほどのK型星のコントラストは近赤外のKバンド領域で最大化され、0.2%程度となる。すなわち、近赤外カメラのMOIRCSはこの観測を行うのに最適の装置である。一方で、MOIRCSの検出器が2015年に刷新されて以来初の

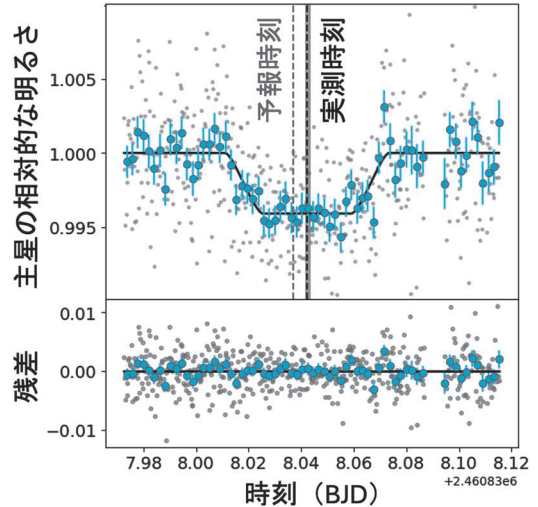


図4 MOIRCSで観測されたWTS-2 bの二次食の光度曲線とそのモデル。灰色の点が実際の観測で、青色はそれを3分間隔でビンニングしたものの、黒線がモデルである。縦の点線は灰色が円軌道時の二次食予報時刻、黒色が実測時刻を示している。

0.2%の相対測光精度を目指した観測となった。

100%曇天の予報通り雲に覆われ続けた夜だったにもかかわらず、二次食直前に途端雲が立ち消え、快晴のまま観測は成功した<sup>\*9</sup>。図4に示すように、この観測から二次食の検出に成功した。実際に検出された二次食は0.5%程で想定より深く、これは2200 K相当の放射に相当する。3分間隔でビンニングした相対測光精度は約0.1%でMOIRCSの観測性能を実証する結果にもなった。特筆すべきは、円軌道から予想される二次食の時刻と実測時刻の約7分のズレ（ $5\sigma$ の有意性）である。これは、WTS-2bが0.01程度の離心率をもった楕円軌道のホットジュピターであることを意味している。

## 物理的示唆と今後の観測の展望

近点歳差がトランジット時刻を変化させようと

\*8 この時軌道減衰と異なり、公転周期は見かけ上しか変化していない。

\*9 同行していただいた私の指導教員の成田憲保氏は超がつくほどの晴れ男として知られている。

はいえ、公転周期がこれほど短いホットジュピターが楕円軌道にあることは我々の想定外であった。角運動量が保存される条件下で、惑星系が取りうる運動エネルギーの最小状態は円軌道である。そのため、主星に限りなく近いホットジュピターは、惑星内部の潮汐散逸によってすべて円軌道へ進化することが想定されている [20]。そして、典型的な軌道の円形化のタイムスケールは大多数のホットジュピターの年齢（数十億歳）に対してずっと短い [21]。例えば高離心率移動で WTS-2b が形成されたとしても、移動が完了した現在まで離心率が残存することは考えづらい\*10。調べてみると、これまでに発見された 500 以上のホットジュピターのうち、今回検出された 0.01 程度の離心率を持つものは現時点で HAT-P-13b, WASP-14b, WASP-18b の 3 つのみである [22–24]\*11。このうち HAT-P-13b の離心率は約 1 AU の距離に存在する褐色矮星によるものと考えられている [22]。一方、WASP-14b と WASP-18b はそれぞれは数百から数千 AU の距離に M 型の伴星を持ち、興味深いことに、これは WTS-2b も全く同じである [9, 25, 26]\*12。しかしいずれの場合においても、これほど離れた伴星がホットジュピターの離心率を説明しうるか自明ではない。楕円軌道がどのように維持されるかは、ホットジュピターの形成と軌道進化における新しい課題であると筆者は考える。WTS-2b はこの謎を解明する貴重なサンプルである。

離心率について少々脱線してしまったが、当初

の観測の目的は公転周期の変化の要因を解明することであった。楕円軌道であると判明した今、物理的に一番自然な説明は近点歳差であるように思える。先に述べたように、惑星の近点歳差は、ケプラー運動に加わる微小な摂動によって生じる。この摂動の要因の一つが、主星ではなく惑星に生じる潮汐バルジによる重力ポテンシャルの非球対称性である\*13。よって近点歳差の速度から、惑星が潮汐によってどの程度変形しているかを制約することができる。この変形の程度は、惑星の密度分布によって決まり、これはラブ数 (Love number) と呼ばれる量によって表される。0 は質量が一点に集中した剛体、最大値の 1.5 は密度分布が一様な自己重力で支えられた完全流体に対応する。探査機ジュノーの観測から木星のラブ数は 0.5 程度であると知られている [27]。

トランジット時刻の変化が近点歳差によるものだとすれば、WTS-2b のラブ数は 0.2 程度となる。これは WTS-2b は木星より質量がよりコア付近に集中していることを示唆する\*14。半径と質量に加えて、密度分布の情報であるラブ数が制限されれば、モデル計算から惑星のコア質量を推定できる [28–30]。例えば、先述の HAT-P-13b はラブ数が 0.3 程度と推定されており、この値からコア質量が 25 地球質量以下であると制限されている [22]。またこれらの理論研究では惑星の金属量や内部温度を仮定しているため、これらが観測的に制限できれば、より正確に内部構造を制限で

\*10 一方で、高離心率移動が惑星形成直後に開始する必然性はないため、WTS-2b が年齢に対して比較的最近現在の軌道に到達した可能性も考えられる。ただこの場合も、離心率 0.01 という移動の最終盤を偶然観測する可能性は限りなく低い。

\*11 XO-3b と CoRoT-16b ではそれぞれ 0.3 と 0.4 と逆に一桁大きい離心率が検出されており、これらの惑星は現在高離心率移動の終盤にある可能性がある [15, 16]。KOI-13b と WASP-19b では 0.001 程度のさらに一桁小さい離心率が検出されている [17, 18]。

\*12 そのような共通点がある一方、WTS-2b が約 1 木星質量であることに対し、WASP-14b と WASP-18b はそれぞれ惑星質量が 7.7 と 10 木星質量程度と格段と重い。さらに主星はどちらも F 型星である (WTS-2 は K 型星)。

\*13 ほかに相対論効果、主星の潮汐バルジ、惑星の自転による扁平などもあるが、いずれも公転周期 1 日のホットジュピターの近点歳差への寄与は、惑星の潮汐バルジによるものに比べて数桁小さい [19]。

\*14 現時点で WTS-2b のコアが木星に比べて大きいかどうかは、ラブ数のみからは自明ではない。ホットジュピターは主星からの強い輻射を受け半径が膨張しているため、エンベロープの密度が木星より低いことでも相対的にコア方向に質量が集中し、ラブ数が小さくなる [29]。そのため後述のコア質量の制限には惑星の内部温度などの仮定が必要である。

きる。この文脈において、今後はWTS-2bの大気観測も重要であるといえる。

一方で、軌道減衰と近点歳差は両立しうる現象である。ロッシュ限界のすぐ外側に存在していることを踏まえると、先述の通りWTS-2bは軌道減衰によって現在の位置に移動してきた可能性も排除できない。両方の現象が寄与している場合、近点歳差の速度が実際はより小さく、その分をより弱い軌道減衰が補うという解も考えられる<sup>\*15</sup>。

このようなさらに細かい縮退を解くためには、引き続きのトランジット及び二次食の観測が重要となる。軌道減衰は今後もトランジット時刻を常に早めるが、近点歳差は歳差周期の三分の四を過ぎると今度はトランジット時刻を遅らせるようになる。現在計算中の結果が正しければ、今年を境に二つのモデルによるトランジットおよび二次食の予報時刻は開き始めるはずである。この天体は公転周期がほぼ一日であるため、シーズン中決まった時期に毎日観測することができる。今シーズンの観測が楽しみである。

## すばる学生観測支援プログラム

なお、今回の観測は「すばる学生観測支援プログラム」による助成をいただき、実際に現地を訪れ行うことができた。このような貴重な機会を提供していただいたことに改めて感謝を申し上げるとともに、現地での経験を振り返りたい。

## すばる来訪記

三密回避、ステイホームの最盛期、我が家ではよく天体観測をしていた。天体観測といってもハワイの星空カメラをテレビで映し、部屋を暗くして流れ星を探すというものである。当時は大学院の受験勉強の真っ最中でもあり、画面の星空を眺めながらいつか研究で現地に行きたいと思っていた。

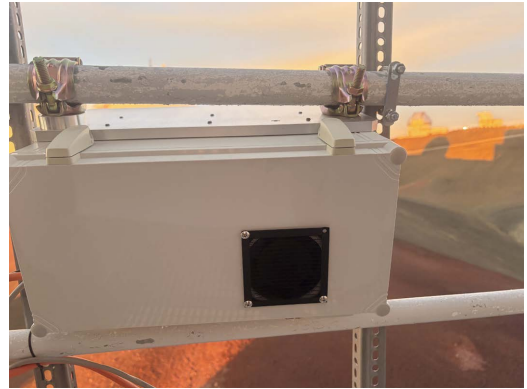


図5 すばるのキャットウォークに設置されたライブカメラ。奥に見えるのがジェミニ北望遠鏡。

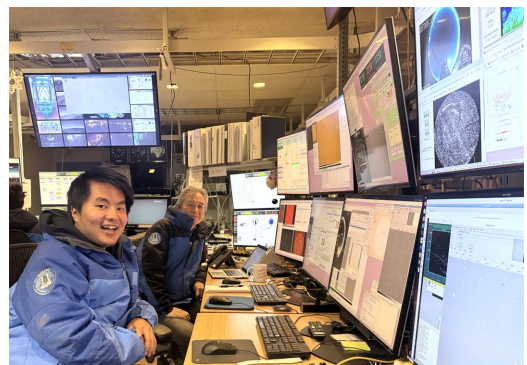


図6 すばる観測室にて。

5年経った昨年6月、プロポーザルが採択され、すばる望遠鏡で観測するという一つの夢が叶った。標高4,000 mともなれば真夏でも寒空である。すばるのキャットウォークから眺める夕日は、初日の出のように神々しく思えた。

キャットウォークをもう少し進むと、我々を挟んだジェミニ北望遠鏡側の稜線にもそれを拝もうとたくさんの人と車影を作っている。同時に、我々の前方の手すりに取り付けられた制御板のようなものが目に入った。

サポートアストロノマー (Support Astronomer; SA) の田中壱さんが、それは数年前にアウトリー

<sup>\*15</sup> しかし、近点歳差の寄与をゼロとすると、これは惑星が潮汐力によって全く変形していないことを意味する。ガス惑星においてそれは非現実的であると筆者は考えている。

チ用に設置した星空のライブカメラだと教えてくださった。まさかと思ひ尋ねると、やはり我が家で“天体観測”に使っていたあのカメラである。それは8 m望遠鏡の肩にちょこんと乗った小さな箱だった。

受験期を思い出しながら観測室に戻ると、この星空カメラがスカイモニターとして使われていた。両手でも数えきれないモニターの中、観測中眺めていたのは、奇しくもあの日と全く同じ画面の星空だった。夜通し曇天の予報だったが、後半夜が始まると雲は綺麗さっぱりなくなった。

観測が落ち着いた頃、合間を縫って星空を見に外へ出た。月が明るいからか酸素が薄いからか、想像していたほどの満天の星空とまではいかなかったのが印象的だった。指導教員の成田先生が隣で赤外線ゴーグルを使い「これならよく見える」と言っていたが、それはズルだろうと思った。

そんなやりとりの最中も、壁の向こうのすばるは私の観測ターゲットを向いている。スノーストームの雹による打痕に覆われたドームを見上げると、それは小平桂一先生の「宇宙の果てまで」に描かれたすばるの完成までの道のりを感じさせた。

観測が終わると、朝焼けの雲海にマウナケアが大きな影を作っていた。まだ誰もいないジェミニ望遠鏡側の稜線からそれを望んだ。観測も成功し、とても清々しく、どこか誇らしい気持ちで下山した。

画面の向こう側に人がいるというのは本当である。受験生の時に眺めていた画面の星空にも、数えきれない観測制御用のモニターの一つ一つにも、たくさんの人の想いと時間が注がれている。そのすべての人の肩にちょこんと乗せてもらえた気のする夜だった。

今回は月のない夜に、たっぷりと酸素を吸って観測に向かおうと思う。

## 謝 辞

本稿の科学的な内容の詳細については、現在論文を準備中である。出版時にはぜひそちらをご覧ください。

いただきたい。今回の成果は、MuSCATシリーズのPI、指導教員である成田憲保氏、測光観測とデータ解析の基礎を教えていただいた福井暁彦氏、MOIRCSのSAの田中壺氏をはじめとした、共同研究者の皆様のサポートによるものである。また、田中氏には本稿執筆の機会を与えていただいたこと、コロナ禍の家を明るくしてくれた星空カメラをすばるに設置してくださったことについてもこの場をお借りして感謝を申し上げたい。

## 参考文献

- [1] Darwin, G. H., 1880, *Philosophical Transactions* 171, 713
- [2] Wuerth, J., 2021, *The Cambridge Kant Lexicon* (Cambridge University Press, New York)
- [3] Murray, C. D., & Dermott, S. F., 2000, *Solar System Dynamics* (Cambridge University Press)
- [4] Sasselov, D. D., 2003, *ApJ*, 596, 1327
- [5] Patra, K. C., et al., 2017, *AJ*, 154, 4
- [6] Yee, S. W., et al., 2019, *ApJL*, 888, L5
- [7] Miyazaki, S., & Masuda, K., 2023, *AJ*, 166, 209
- [8] Chen, D.-C., et al., 2025, *Nat. Astron.* 10, 92
- [9] Birkby, J. L., et al., 2014, *MNRAS*, 440, 1470
- [10] Wu, Y., & Murray, N., 2003, *ApJ*, 589, 605
- [11] Ford, E. B., & Rasio, F. A., 2006, *ApJ*, 638, L45
- [12] Narita, N., et al., 2015, *JATIS*, 1, 045001
- [13] Tremaine, S., 2023, *Dynamics of Planetary Systems* (Princeton University Press)
- [14] 成田憲保, 2025, *天文月報*, 118, 9
- [15] Johns-Krull, C. M., et al., 2008, *ApJ*, 677, 657
- [16] Ollivier, M., et al., 2012, *A&A*, 541, A149
- [17] Esteves, L. J., et al., 2015, *ApJ*, 804, 150
- [18] Bernabò, L. M., et al., 2024, *A&A*, 684, A78
- [19] Ragozzine, D., & Wolf, A. S., 2009, *ApJ*, 698, 1778
- [20] Damiani, C., & Lanza, A. F., 2015, *A&A*, 574, A39
- [21] Kawai, Y., et al., 2025, *AJ*, 170, 299
- [22] Buhler, P. B., et al., 2016, *ApJ*, 821, 26
- [23] Joshi, Y. C., et al., 2009, *MNRAS*, 392, 1532
- [24] Deline, A., et al., 2025, *A&A*, 699, A150
- [25] Ngo, H., et al., 2015, *ApJ*, 800, 138
- [26] Csizmadia, S., et al., 2019, *A&A*, 623, A45
- [27] Durante, D., et al., 2020, *Geophysical Research Lett.*, 47, article id. e86572
- [28] Kramm, U., et al., 2012, *A&A*, 538, A146
- [29] Wahl, S. M., et al., 2021, *ApJ*, 921, 105
- [30] van Dijk, E. A., & Miguel, Y., 2025, *MNRAS*, 540, 1544

## Chasing the Demise of a Hot Jupiter with Transits and Occultations

Yugo KAWAI

*The University of Tokyo, Graduate School of Arts and Sciences, 3-8-1 Komabata, Meguro-Ku, Tokyo 153-8902, Japan*

Abstract: Transit observations of planets provide extremely precise measurements of their orbital periods. Any deviation from strict periodicity we detect then becomes a direct probe of external perturbations to the Keplerian potential. Now that more than three decades have passed since the discovery of the first exoplanet, sufficiently long time baselines exist to detect minute deviations, such as ones caused by orbital decay of the planet due to tidal interactions with the host star. In this article, we report our attempt at just the second detection of such orbital decay of a short period gas giant (hot Jupiter) WTS-2b, using the MOIRCS instrument installed on Subaru Telescope.