

# 高速自転星と超短周期惑星からなる系外惑星系 PTFO 8-8695 の光度曲線の解析

上赤 翔也 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

系外惑星系 PTFO 8-8695 は T タウリ型星と近接巨大ガス惑星からなる系である。この系に関して、2009 年と 2010 年に 2 回観測されているトランジットの際の光度曲線の形状が大きく異なるという特異性が指摘されている。この光度曲線の時間変化は、主星の高速自転と惑星の超短周期軌道に起因した、主星の自転軸と惑星の公転軸の歳差運動によるものと考えられている。Barnes et al. (2013) では、歳差運動の力学モデルを通して惑星の半径や質量、軌道傾斜角などといった系のパラメータを決定しているが、ここでは“主星の自転周期が惑星の公転周期と等しい”という、この系においては非自明な仮定が課されている。そこで本研究では、その仮定を除いた上でより広いパラメータ範囲に対してデータを再解析した結果、歳差運動の周期がそれぞれおよそ 200 日、500 日、800 日に対応する 3 つの解が存在することを発見した。加えて我々は、2014-15 年にかけて京都産業大学・神山天文台においてこの系の追観測を行い、そのデータを解析することで真の解は 200 日の歳差周期に対応する解に近いという予備的な結果を得た。

## 1 Introduction

PTFO 8-8695 は年齢が 300 万年ほどの T タウリ型星であり、近年の観測によって周囲を近接巨大ガス惑星が公転していることがわかっている。この系のトランジット (惑星による主星の食) 観測はパロマー天文台において 2009 年 12 月 1 日から 2010 年 1 月 15 日にかけて (以降、09 年観測)、及び 2010 年 12 月 8 日から 17 日にかけて (以降、10 年観測) 行われた。それぞれの観測から 11 個、及び 6 個の光度曲線が得られ、トランジット周期  $P_{\text{orb}}$  は 0.448413 日と決定された (van Eyken et al. 2012)。特筆すべきことに、09 年から 10 年にかけて光度曲線の形状の変化が確認された (図 1)。これは通常の光度曲線には見られない特徴である。Barnes et al. (2013)(以下 B13) はこの光度曲線の非自明な時間変化を主星の重力減光と、主星の自転軸及び惑星の公転軸の歳差運動によって説明した。

分光観測によりこの系の主星は周期  $P_s$  が 0.671 日以下という高速自転を示すことが分かっており、これに起因する強い遠心力によって赤道方向に大きく膨張していると考えられている。このような主星の変形は、“重力減光”と呼ばれる主星表面の光度の非

一様性を引き起こす。つまりこの下では、赤道付近の光度が極付近に比べ低下している。加えて、このような主星の非球対称性から、主星の自転軸と惑星の公転軸は互いに歳差運動するようになる。

B13 はこの物理モデルの下で系の光度曲線を解析し、系の様々なパラメータ (主星の半径、惑星の半径・質量、主星の自転軸と惑星の公転軸のなす角; スピン軌道傾斜角  $\phi \sim 70^\circ$  など) を決定している。ここで問題なのが、彼らが解析を通して仮定した、“主星の自転周期が惑星の公転周期と同期している”という単純化である。後者はトランジット観測から精度よく決定されている ( $P_{\text{orb}} = 0.448413$  日) 一方、前者は上限しか得ていない ( $P_s < 0.671$  日)。van Eyken et al. (2012) は主星の自転と惑星の公転は同期していると結論しており ( $P_s = P_{\text{orb}}$ )、これに基づいて B13 は解析の中でこの仮定を採用している。系がこのような自公転同期に至るプロセスとして有力なのが主星と惑星の間に働く潮汐力であるが、現在広く受け入れられている平衡潮汐モデルに基づけば、主星の自転と惑星の公転は同期する方向に進化するとともに、同じ時間スケールで自公転軸も揃う ( $\phi \rightarrow 0^\circ$ ) とされる。ゆえに  $\phi \sim 70^\circ$  を結論した B13 の解析において、この仮定は系の潮汐進化という力学的観点から

は支持されない。この疑問に基づき、本研究ではこの仮定を課さずに系の観測データを再解析し、結果として得られる系のパラメータが仮定の有無によってどの程度影響されるのかを調べた。

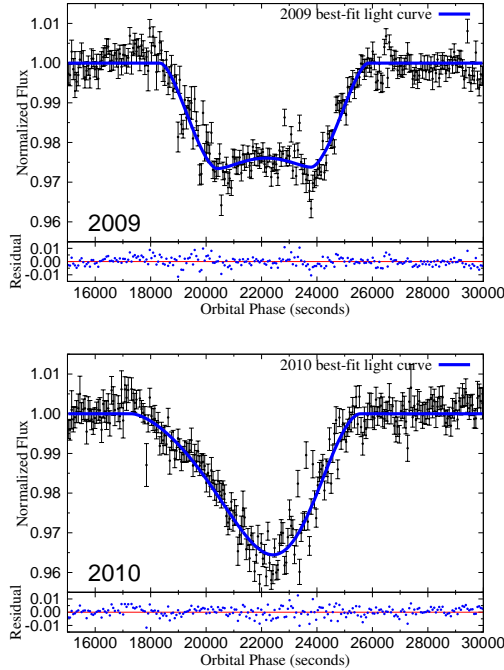


図 1: 2009 年 (上) と 2010 年 (下) に得られた光度曲線を同じ位相で重ねたデータ点 (黒点) およびベストフィット光度曲線 (青線)。

## 2 Basic equations

主星の自転角運動量、惑星の公転角運動量、及び系の全角運動量のベクトルをそれぞれ  $S$ 、 $L$ 、 $J = S + L$  で表す (今回は惑星の自転は無視する)。それぞれの単位ベクトル及びノルムを  $s$ 、 $l$ 、 $j$  及び  $S$ 、 $L$ 、 $J$  で与える。この下でスピン軌道傾斜角は  $\phi = \cos^{-1}(s \cdot l)$  と与えられる。

主星のフラックスは主星の輻射強度  $B_\lambda(T) \times I(\mu)$  を天球面上での主星表面全体で数値積分することによって計算する。ここで  $B_\lambda(T)$  は波長  $\lambda$  におけるプランク関数であり、 $I(\mu)$  は周辺減光を記述する関数である。今回は周辺減光の影響を 2 次まで考慮し、 $I(\mu) = 1 - u_1(1 - \mu) - u_2(1 - \mu)^2$  とおく。ここで  $u_1$ 、 $u_2$  は 2 次の周辺減光係数、 $\mu$  は主星の法線ベクトルと視線方向の余弦である。重力減光に起因する主

星表面の有効温度  $T$  の分布は Zeipel の法則により、主星の表面重力  $g$  を用いて

$$\frac{T}{T_{\text{pol}}} = \left( \frac{g}{g_{\text{pol}}} \right)^\beta, \quad (1)$$

と書ける。ここで  $T_{\text{pol}}$ 、 $g_{\text{pol}}$  は極での有効温度、表面重力である。 $\beta$  は重力減光係数と呼ばれ、極から赤道にかけての表面温度の勾配を表す。

主星の自転軸と惑星の公転軸の時間進化を表す運動方程式は  $p = \frac{3}{2} \frac{GM_p}{a^3(1-e^2)^{3/2}} J_2 M_s R_s^2 (s \cdot l)$  を用いて

$$\dot{s} = -\frac{p}{S} l \times s, \quad \dot{l} = -\frac{p}{L} s \times l \quad (2)$$

で与えられる。ここで  $G$ 、 $M_p$ 、 $a$ 、 $e$ 、 $J_2$ 、 $M_s$ 、 $R_s$  はそれぞれ万有引力定数、惑星質量、軌道長半径、軌道離心率、主星の 2 次の重力係数、主星質量及び主星半径である。簡単な計算により、この歳差運動の周期は、円軌道 ( $e = 0$ ) の場合

$$\dot{\Omega} = -n \cos \phi \frac{3}{2} J_2 \left( \frac{R_s}{a} \right)^2 \sqrt{\left( \frac{L}{S} + \cos \phi \right)^2 + \sin^2 \phi} \quad (3)$$

とわかる。ここで  $n = \sqrt{G(M_s + M_p)/a^3}$  は惑星の公転周波数である。

## 3 Data analysis: methods and results

前章で与えた主星表面の輻射強度分布及び歳差モデルを用いて光度曲線の時間進化を計算し、実際のデータと比較する。理論とデータの整合度を  $\chi^2 = \sum_i (\text{flux}_{\text{data},i} - \text{flux}_{\text{model},i})^2 / \sigma_{\text{data},i}^2$  (添字  $i$  は時刻  $t_i$  での値を表す) を用いて評価し、Levenberg-Marquardt 法を元に  $\chi^2$  を最小化するパラメータセットを見積もる。図 2 に  $P_s - M_p/M_s$  平面で見た  $\chi^2$  の等高図を与える。B13 の解析は  $P_s = 0.448413$  日の線に対応し、彼らの  $M_s = 0.34$  及び  $0.44M_\odot$  の場合の解は図中でそれぞれ丸及び三角で示されている。図 2 より、自公転同期の外側で、B13 よりも観測とよく合致する解が得られていることが確認できる (図の左上の領域)。それらの解はより速い主星の自転と、より大きな惑星質量を支持するものである。これら

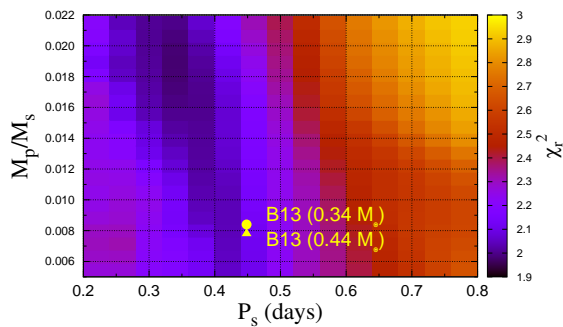


図 2: 様々な  $P_s$ (横軸) 及び  $M_p/M_s$ (縦軸) に対する  $\chi^2$  の値。B13 における 2 つの解は丸と三角で与えられている。色の暗い領域ほど観測とより整合的な解を表す。

の結果より、自公転同期の仮定は系のパラメータを必要以上に制限してしまうことがわかった。

図 3 は  $\chi^2$  の値を、歳差周期  $P_{\dot{\Omega}} = 2\pi/\dot{\Omega}$  に対してプロットしたものである。図より、 $\chi^2$  の値は歳差周期に大きく依存し、かつ観測と整合的な解は  $P_{\dot{\Omega}} = 199, 475,$  及び  $827$  日の周りに存在することがわかる。それらの 3 つのベストフィットパラメータを表 1 に与える。

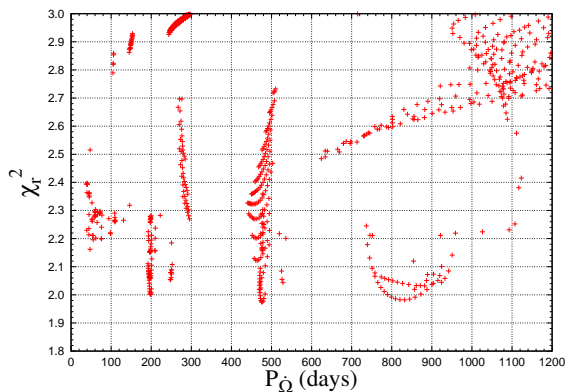


図 3:  $\chi^2$  の歳差周期依存性。

これら 3 つの解から計算されるトランジット光度曲線の 09-10 年にかけての時間進化を図 4 に与える。赤、緑、青がそれぞれ短、中、長周期解に対応する。下図が 09 年から 10 年の観測時期に渡る光度曲線の時間進化を表し、上図は下図の 5 本の黒線の観測時期に対応する光度曲線の拡大図である。3 つの解は

すべて 09 年と 10 年の観測データをよく再現する一方、観測されていない時期は形状が互いに大きく異なることが確認できる。この性質を利用し、この系を継続的に観測することで、真の解の判別と、系のパラメータのより精密な推定が可能となる。

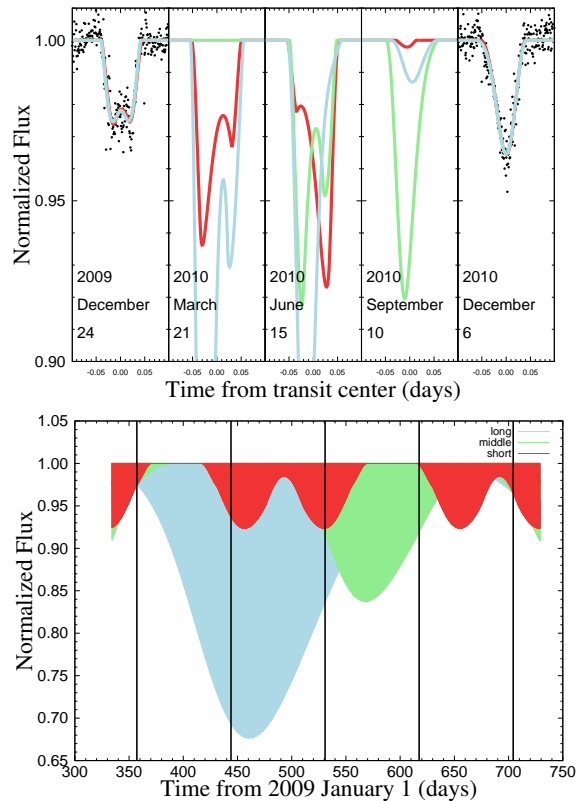


図 4: 得られた解から計算されるトランジット光度曲線の 09-10 年にかけての時間進化。赤、緑、青がそれぞれ短、中、長周期解に対応する。下図に 5 本ある黒線のうち左端、右端がそれぞれ 09 年、10 年の観測時期を表す。5 本の黒線に対応する時期の光度曲線の予測が上図に与えられており、最左図と最右図には観測データも示されている。

我々は京都産業大学の神山天文台・荒木望遠鏡を用いて 2014 年 11 月 23 日、27 日、12 月 2 日、23 日及び 2015 年 1 月 10 日に PTFO 8-8695 系の追観測を行った。図 5 はその結果を示し、上図の黒点が上記の 5 日間の観測データである。この時期のトランジットの深さは短周期解で 1% 以下と予測される一方、中・長周期解では 10% 以上になると見積られる。観測データの数%の誤差レベルを超えたトランジットの

表 1: 得られた 3 つの解及び B13 のベストフィットパラメータ。

パラメータ	短周期解	中周期解	長周期解	B13 ( $M_s=0.34M_\odot$ )	B13 ( $M_s=0.44M_\odot$ )
$P_s$ (日)	$0.390 \pm 0.008$	$0.367 \pm 0.006$	$0.331 \pm 0.008$	0.448410	0.448413
$M_p/M_s$	$0.0129 \pm 0.0014$	$0.0178 \pm 0.0009$	$0.0199 \pm 0.0008$	$0.0084 \pm 0.0006$	$0.0078 \pm 0.0007$
$\phi$ (°)	$75.3 \pm 2.5$	$85.8 \pm 1.8$	$92.3 \pm 1.6$	$69 \pm 3$	$73.1 \pm 0.6$
$P_\Omega$ (日)	$198.7 \pm 15.6$	$474.6 \pm 21.1$	$826.9 \pm 53.3$	292.6	581.2

シグナルは確認できないため、追観測データは(予備的な結果ではあるものの)短周期解を支持する。

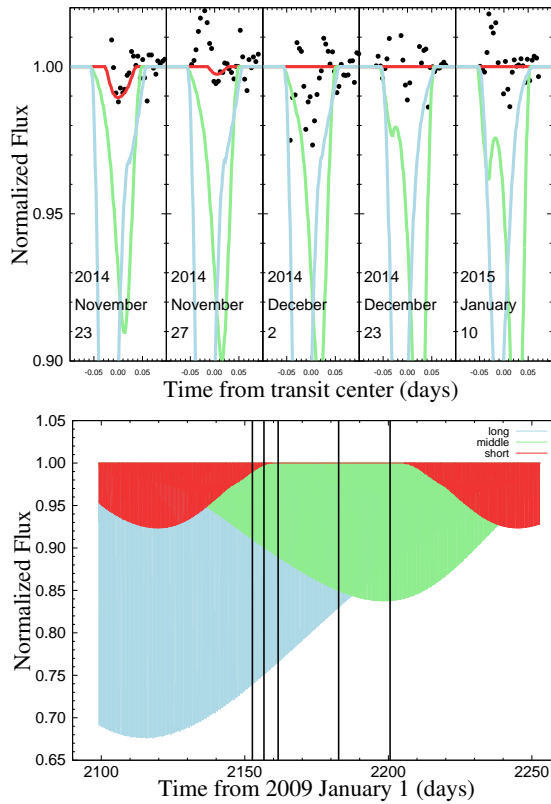


図 5: 図 4 を、京都産業大学における観測期間である 2014 年 11 月-2015 年 1 月に対して描いたもの。

## 4 Summary and discussion

本研究では重力減光とスピン軌道歳差運動を示す系外惑星系 PTFO 8-8695 のトランジット光度曲線を、先行研究 B13 で課されている主星と惑星の自公

転同期の仮定を取り除いて再解析した。その結果歳差周期が  $199 \pm 16$ 、 $475 \pm 21$ 、 $827 \pm 53$  日に対応する 3 つの解が、B13 よりも観測とよく合致することを発見した。それらは 09 年と 10 年の観測データを等しく再現する一方、それ以外の時期では形状の大きく異なる光度曲線を与えると予想される。その違いを活用し、継続的な観測と合わせて解を判別、ひいてはより精密な解の決定が可能となる。この考えに基づき我々は京都産業大学・神山天文台にてこの系の追観測を行い、199 日の周期に対応する解が支持されるという予備的な結果を得た。我々は今年度以降も観測の継続を予定しており、系のパラメータのより強い制限を目指す。

## Acknowledgement

本研究を始めるにあたり、快く観測データを提供いただいた Julian van Eyken 氏、生駒大洋氏、及び PTFO 8-8695 系へのきっかけを与えていただいた鬼塚昌宏氏に感謝致します。また研究を進める中でご助力いただいた共同研究者の皆様にお礼申し上げます。本研究は、国立天文台の計算サーバの利用及び日本天文学会早川幸男基金の助成を受けたものです。

## Reference

- van Eyken, J. C., Ciardi, D. R., von Braun, K., et al. 2012, ApJ, 755, 42
- Barnes, J. W., van Eyken, J. C., Jackson, B. K., Ciardi, D. R., & Fortney, J. J. 2013, ApJ, 774, 53
- Kamiaka, S., Masuda, K., Xue, Y., et al. 2015, PASJ, in press