

高速自転星と超短周期惑星からなる系の角運動量の力学進化

上赤 翔也 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

近年数多く観測されているホットジュピターの形成過程を明らかにする際に有用なのが、主星の自転軸と惑星の公転軸の傾き ψ の測定である。PTFO 8-8695 系は主星の自転軸と惑星の公転軸が 1 年程度の周期で互いに歳差運動している系であり、それに起因する複雑なトランジット光度曲線が観測されている。Barnes et al. (2013) はこの歳差運動をモデル化し、 ψ を含む系の様々なパラメータを決定しているが、その中では主星の自転周期と惑星の公転周期の同期という強い仮定が課されている。本研究では、その仮定を必要としない、より一般的な歳差モデルを作成し、主星の自転周期が光度曲線の形状に大きく影響することを見出した。ここから、?の仮定を廃した上で観測データを解析した場合、 ψ を含む系のパラメータは Barnes et al. (2013) のものと大きく異なる値となる可能性が示唆される。

1 導入・背景

1995 年の最初の発見 (Mayor and Queloz (1995)) 以降太陽系外惑星は数多く発見されており、その数は合計 1700 個以上、候補天体まで含めれば 5000 個以上にもなる。この中で、0.05AU 程度という主星に極めて近い軌道を公転する木星サイズの巨大ガス惑星 (ホットジュピター) が数多く発見されてきた。しかし、従来の惑星形成理論ではこれらホットジュピターを観測された位置で形成するのは困難であるため、ホットジュピターは一旦原始惑星系円盤内の雪線 (円盤内のダストが凝縮する温度に対応する軌道半径で、太陽系では 2.7AU 程度) の外側で形成され、その後何らかの軌道進化を経ることで内側に落下してきたとする説が主流となっている (Ida and Lin (2004))。この軌道落下の原因として、(1) 円盤との相互作用により惑星が角運動量を失い主星近傍に落下する機構 (Lin et al. (1996)) (図 1) や、(2) 惑星同士の重力散乱などが惑星の離心率を励起し、その後の主星との潮汐作用によって惑星が主星近傍に落ち込む機構 (Nagasawa and Ida (2011)) (図 2) などいくつかの有力なモデルが提示されているが、未だ完全な解明には至っていない。(1) は主星の自転軸と惑星の公転軸が揃い、それらのなす角 (spin-orbit angle; ψ) がほぼ 0 の状態を予言する一方 (図 1)、(2) は ψ が大きくばらついて分布する状態を予言する (図 2)。従って観測から ψ を測定し統計を増やすことで、巨

大ガス惑星の軌道落下における主要な機構が (1)、(2) のどちらであるか、系によって異なるのならば何がそれを決定するのかを判別でき、惑星形成理論の拡充が期待できる。

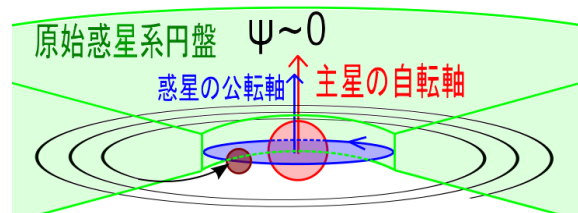


図 1: 巨大ガス惑星の円盤落下モデル

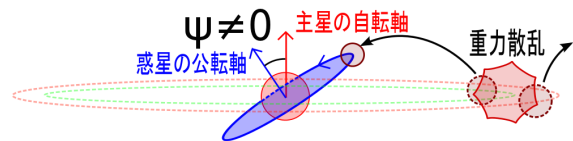


図 2: 巨大ガス惑星の重力散乱モデル

本研究では ψ を測定する対象として、高速自転する T タウリ型星とそれを公転するホットジュピターからなる PTFO 8-8695 系に注目した (Briceño et al. (2005), van Eyken et al. (2012))。主星は高速自転 (周期 0.672 日以下) により赤道方向に膨張し、赤道付近の光度が極付近に比べ低下している (重力減光)。また、トランジット周期、つまり惑星の公転周期も 0.488

日と極めて短く、それに対応して惑星は主星の極めて近傍 (2 恒星半径以下) を公転している。この系に対しては 2009 年と 2010 年の 2 回トランジット (惑星による主星の食) が観測されているが、それらの光度曲線の形状は互いに大きく異なっていた (図 3)。これは、主星が扁平である (球対称でない) こと

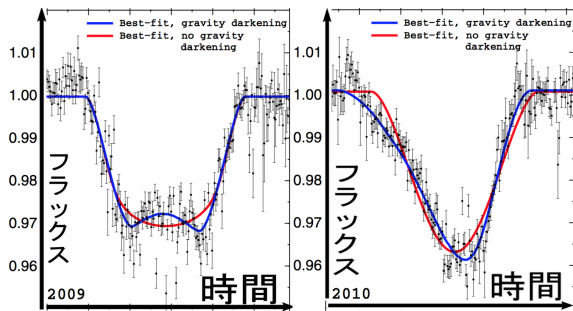


図 3: 2009 年 (左図) と 2010 年 (右図) のトランジット光度曲線。青線が重力減光を考慮したフィットである。2009 年: 極→赤道→極の順に惑星が通過するため、角が 2 つ突き出たような光度曲線になる。2010 年: 赤道→極の順に惑星が通過するため、大きな左右非対称性を持った光度曲線となる。

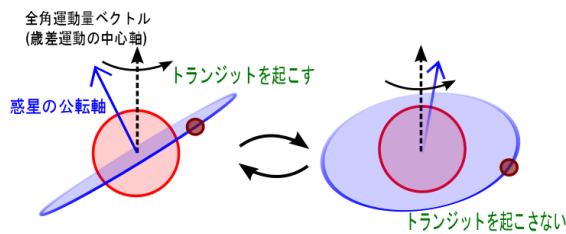


図 4: 歳差運動の概念図。時期によってはトランジットを起こさなくなる。

と、惑星が主星の極めて近傍を公転していることから主星-惑星間に強いトルクが働き、主星の自転軸と惑星の公転軸が互いに 1 年程度の周期で歳差運動していることに起因する (図 4)。歳差運動により、天球面上で、惑星が緯度に応じて光度の異なる主星の表面を時間によって様々な方向から通過すれば (図 5)、それに応じて光度曲線の形状も時間変化する。時期によっては、トランジットを起こさなくなることもあり得る (図 4)。Barnes et al. (2013) はこの歳差運動をモデル化し、歳差運動に起因してトランジッ

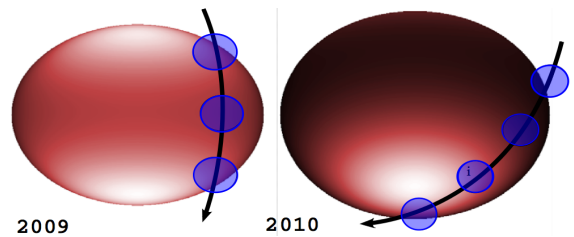


図 5: 2009 年 (左図)、2010 年 (右図) の主星の自転軸の傾きと惑星のトランジット経路。歳差運動に起因して、主星が我々に向けている面も、惑星の軌道も 1 年間で大きく変化している。

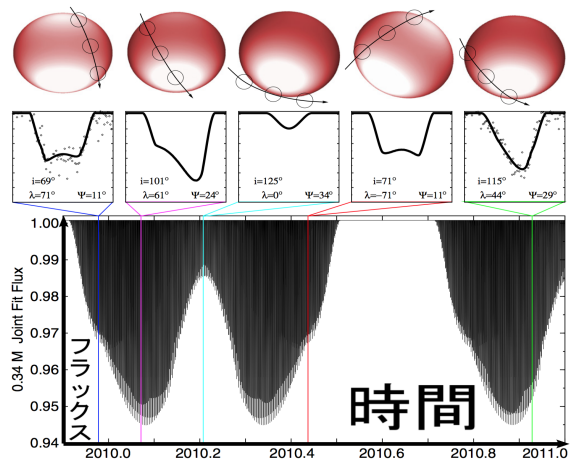


図 6: 下図: Barnes et al. (2013) によるトランジット光度曲線の減光率の時間変化。上図: それぞれの時刻で拡大された光度曲線に対応する惑星の軌跡。時期によっては、完全にトランジットを起こさなくなる。

ト光度曲線がどのように時間変化するかを計算した (図 6)。その上で、2009 年と 2010 年の 2 回のトランジット観測データを最もよく再現するような PTFO 8-8695 系のパラメータ (惑星の質量、軌道要素など) を決定している。更に、歳差周期が 2 つの角運動量ベクトルのなす角 (つまり ψ) に応じて大きく変化する事実をもとに、 $\psi \simeq 70^\circ$ を得ている。但し、この歳差モデルは **主星の自転周期と惑星の公転周期の同期** という物理的に強い仮定の元で立式されている。一般に主星-近接惑星間には潮汐作用が働き、 ψ は 0 に向かい、主星の自転と惑星の公転は同期する方向に進化する。しかし $\psi \simeq 70^\circ$ は 0 から大きく外れた値であり、系は自公転の同期に至る前の状態にあると

考えられるため、同期の仮定は必ずしも適切であるとは限らない。このうち惑星の公転周期はトランジット周期から同定できるので、以降主星の自転周期を追加パラメータとして扱う必要性が生じる。そこで本研究では、前述の仮定を必要としない、より一般的な系に適用可能な歳差モデルを作成し、Barnes et al. (2013) で扱われているパラメータのみならず、主星の自転周期に応じて実際のトランジット光度曲線がどのように変化するかを確かめた。

2 歳差モデル

高速自転星の周りを惑星がニュートン重力に従い公転する系のハミルトニアンは以下で与えられる。添字の 0 は主星、1 は惑星の物理量を表す。

$$H = \frac{\mathbf{p}^2}{2\beta} - \frac{Gm_0m_1}{r} \left(1 - J_2 \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 P_2(\hat{\mathbf{r}} \cdot \hat{\mathbf{S}}_0) \right) + \frac{\mathbf{S}_0^2}{2C_0} + \frac{\mathbf{S}_1^2}{2C_1}$$

右辺第一項は公転する惑星の運動エネルギーを表し (\mathbf{p} は主星から見た惑星の相対運動量、 β は換算質量)、第二項は系の重力ポテンシャルエネルギーの球対称成分 (第一項) と非球対称成分 (第二項; 主星の変形に起因する) に対応する (J_2 は主星の変形の度合いを表す重力係数、 R_0 は主星の赤道半径、 P_2 は 2 次のルジャンドル多項式)。第三、第四項は主星と惑星の回転エネルギーである (\mathbf{S} 、 C はそれぞれ角運動量ベクトル、回転軸に沿った慣性モーメント)。

ハミルトン方程式より得られる、惑星の相対座標 \mathbf{r} 、相対運動量 \mathbf{p} 、主星の自転角運動量ベクトル \mathbf{S}_0 に関する運動方程式を数値積分することで系の力学進化を追跡する。この方程式群は、主星の自転周期 ($\omega_0 = |\mathbf{S}_0|/(C_0M_0R_0^2)$) と惑星の公転周期 ($P = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM_0}}$) を独立に変数とすることができる、Barnes et al. (2013) と比べより一般性の高いモデルである。

3 トランジット光度曲線の作成

観測データは光度曲線であるため、観測データと比較・検討して歳差モデルのパラメータ (主星の自転

周期、惑星の軌道要素等) を制限するには、歳差モデルの計算結果から光度曲線を作成する必要がある。ただしトランジット光度曲線を正確に作成するには、惑星の位置を時間の関数として計算するのみでは不十分である。前述の通り主星は球対称ではなく、かつ緯度によって光度が異なる。つまり主星の扁平度と、各時刻において主星が我々にどの面を向けているか (=主星の自転軸の向きの時間進化) についての情報を取り込まねばならない (図 7)。それらを加味し

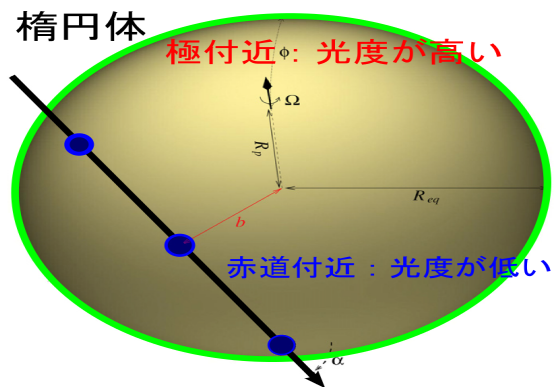


図 7: トランジットによる減光率の計算の概念図。主星は球対称ではなく、また緯度によって光度が異なるため、惑星の位置のみならず主星の自転軸の向きの情報も必要となる。

た上で、主星からの規格化されたフラックスを時間の関数として以下のように与える (Barnes (2009))。

$$F(t) = \frac{F_0 - F_{\text{blocked}}}{F_0}$$

$$F_0 = \int_0^{R_{\text{eq}}} \int_0^{2\pi} I(r, \theta) d\theta dr$$

$$F_{\text{blocked}} = \int_0^{R_{\text{eq}}} \int_0^{2\pi} \Gamma(r, \theta, t) I(r, \theta) d\theta dr$$

F_0 はトランジットしていないときの主星のフラックスで、主星のインテンシティー $I(r, \theta)$ を主星表面で面積分したものである (緯度によって光度が異なるため、インテンシティーは r のみならず角度 θ にも依存する)。一方 F_{blocked} はトランジット中に惑星が覆っている部分の主星のフラックスで、惑星が時間 t に座標 (r, θ) にあれば $\Gamma(r, \theta, t) = 1$ 、そうでなければ 0 である (トランジットを起こしていない場合は、当然 $F(t) = 1$ となる)。

4 結果

本モデルが Barnes et al. (2013) の予言するトランジット光度曲線の時間変化 (図 6) を再現できることを確認した上で、この光度曲線の、主星の自転周期依存性を確認する。分光観測に基づく視線速度の決定により、主星の自転周期には 0.672 日以下という制限が付けられている。図 8 は、主星の自転周期をこの範囲内で変化させた際の光度曲線の変化をまとめたものであり、大局的な変化として、**主星の自転周期が長いと、歳差周期が有意に短く、またトランジット減効率が有意に小さくなる**傾向が見て取れる。

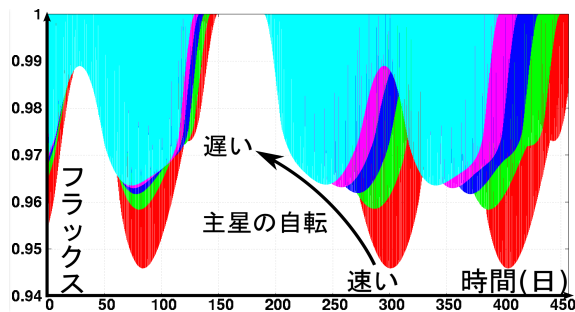


図 8: トランジット光度曲線の、主星の自転周期依存性。赤→緑→青→マゼンタ→シアンの順に主星の自転が遅くなる。それにつれて、歳差周期が短くなり、トランジットによる減光率が小さくなる傾向が確認できる。

5 結論・今後の展望

本研究では、主星の自転周期というパラメータが観測されるトランジット光度曲線に大きく影響することを見出した。これは、Barnes et al. (2013) の”主星の自転と惑星の公転の同期”という、主星の自転周期を 1 つに固定してしまう仮定の下では、PTFO 8-8695 系のパラメータは真値から大きく外れた値として求まってしまう可能性が大きいことを意味する。今後の展望としては、主星の自転周期も独立なパラメータとした上で、本モデルと公開観測データを用いて PTFO 8-8695 系の best-fit パラメータを決定することを目指す。さらに、Barnes et al. (2013) が予

言する 1 年程度という系の歳差周期は、一般に進化のタイムスケールが数万年、数億年と極めて長いものが多い天体现象の中で抜きん出て短く、PTFO 8-8695 系は我々が数年間隔でトランジットを観測することで系の進化にアプローチできる数少ない系の一つであり、理想的な観測対象である。この事実に基づき、研究の次の段階として、すばる望遠鏡や岡山天体物理観測所に観測提案を申請し、新たな観測データを取得する。過去の観測データと新規の観測データを組み合わせることで、Barnes et al. (2013) と比べ高い精度で系のパラメータ、特に ψ を推定することを目指す。

Acknowledgement

本研究を行うにあたり、歳差モデルのコード作成にご協力頂いた Yuxin Xue 氏、光度曲線のモデル作成を担当してくださった増田賢人氏、及び全体の進行に関し適宜適切なアドバイスをくださった須藤靖先生にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

Reference

- Mayor, M., and Queloz, D. 1995, *Nature*, 378, 355
- Ida, S., and Lin, D. N. C. 2004, *ApJ*, 604, 388
- Lin, D. N. C., et al. 1996, *Nature*, 380, 606
- Nagasawa, M., and Ida, S. 2011, *ApJ*, 742, 72
- Briceño, C., et al. 2005, *AJ*, 129, 907B
- van Eyken, J. C., et al. 2012, *ApJ*, 755, 42V
- Barnes, J. W. 2009, *ApJ*, 705, 683B
- Barnes, J. W., et al. 2011, *ApJS*, 197, 10B
- Barnes, J. W., et al. 2013, *ApJ*, 774, 53
- Boué, G., and Laskar, J. 2006, *Icar*, 185, 312B
- Correia, A. C. M., et al. 2011, *CeMDA*, 111, 105