

スペクトル線の歪みの直接検出による中心星自転軸と惑星公転軸の関係の測定

上赤 翔也 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

近接惑星に対する中心星の自転軸と惑星の軌道公転軸のなす角 λ の測定は、未だ謎が多い惑星の軌道進化の過程を観測的に制限するうえで極めて有効な手法である。これまで λ の測定は、惑星がトランジットする際に中心星の自転によって生じるスペクトル線の歪みをドップラーシフトとして検出することで行われてきたが、近年ではスペクトル線の歪みの時間変化を直接解析して λ を決定するという新しい手法が用いられつつある。この手法は従来のものと異なりヨードセルを必要とせず、また半径の小さな惑星に対しても感度を有するなど数多くの利点をもつ。そこで本講演では、主に Albrecht S. et al. (2013) に基づいてこの手法を紹介し、その有用性を実際の解析例とともに示す。今回紹介する手法は、単なる λ の精密測定に留まらず、これまで λ の測定が困難だった半径の小さな惑星に対する適用や、中心星の差動回転の検出など幅広い応用の可能性を有するものである。

1 イントロダクション

最初の系外惑星の発見以来、中心星近傍を公転する巨大ガス惑星(ホットジュピター;HJ)が数多く発見されてきたが、既存の惑星形成理論ではこれらを観測された位置で形成するのは困難である。それゆえ、HJ はまず原始惑星系円盤の雪線(ダストが凝縮する温度に対応する軌道半径)の外側で形成され、その後何らかの機構によって現在の位置に移動したと考えられている。この軌道進化の要因として、円盤との相互作用や惑星同士の重力散乱などいくつかの可能性が議論されているが、未だ理論的な解明には至っていない。これらの機構を観測的に制限する手法として、ロシター・マクローリン (RM) 効果を用いた中心星の自転軸と惑星の公転軸の傾き λ の測定がある。例えば軌道進化が円盤との相互作用によるものであれば λ は常に小さくなるのに対し、惑星間の重力相互作用によるものであれば大きくばらつくことが予想されている。従来の RM 効果の測定は、トランジット(惑星による恒星の食)の際に、惑星が自転している中心星の観測者に近づく側(=青い側)と遠ざかる側(=赤い側)を順に隠すことによって生じるスペクトル線の歪みをドップラーシフトとして検出することで行われてきた。ところが、近年ではトランジットによって生じるスペクトル線の歪みを直接検出し、その時間変化を解析することで λ を求めるという新しい手法が用いられつつある(Cameron A. C. et al. (2010a), Cameron A. C. et al. (2010b))。

この手法は、従来の手法で波長の精密較正に用いていたヨードセルを必要としないため、スペクトルの広い領域を用いた解析が可能である、半径の小さな惑星に対する信号の減衰の度合いが小さいといった利点をもつ。そこで本講演では、この手法を複数惑星系における λ の測定に初めて適用した Albrecht S. et al. (2013) に基づき、手法の解説とその応用可能性について議論する。

2 Albrecht S. et al. (2013) のレビュー

上記の動機のもと、このセクションでは Albrecht S. et al. (2013) の内容をまとめる。

2.1 イントロダクション

これまで数多くの HJ に対して RM 効果を用いて λ が測定され、その値は幅広く分布していることが明らかになってきた。これらのサンプルから(軌道進化が起こった後に)中心星との潮汐相互作用によって λ が揃ったと考えられるものを除くと、HJ が形成された時点での λ の分布はランダムであったことが予想され、そのばらつきは軌道進化の結果であると考えられている。一方で、こうしたランダムな λ の分布は HJ に固有のものではなく、惑星系一般に共通

の特徴である可能性も残されている。例えば、中心星の自転軸が自発的に傾くような機構が存在する場合 (Rogers T. M. et al. 2012)、惑星の軌道進化とは無関係に λ がばらつくことになる。

このような可能性を検証する手段として、複数トランジット惑星系において λ を測定することが挙げられる。複数の惑星がトランジットを起こす系においては、惑星の軌道面は同一平面内に揃っている可能性が高いため、それらは元の原始惑星系円盤をトレースしていると考えられる。この仮定の下、

- 複数トランジット惑星系の λ がいずれも小さい場合、 λ のばらつきが惑星系一般に共通の特徴であるという可能性は排除され、HJ におけるばらつきは軌道進化によるものである可能性が高まる。
- 複数トランジット惑星系の λ がランダムに分布している場合、 λ のばらつきは HJ に特有の性質ではなかったことになる。

そこで、この論文では以下に紹介する 2 つの方法を用いて、KOI-94 と Kepler-25 という 2 つの複数トランジット惑星系の λ を測定する。

2.2 観測

分光観測はすべて Keck I 望遠鏡と、その High Resolution Spectrograph (HIRES) を用いて行われた。一方、測光データはケプラー宇宙望遠鏡で得られたものを用いた。KOI-94 に対しては、2012/8/9~10 にかけての KOI-94.01 によるトランジットを観測し、Kepler-25 においては、Kepler-25 c による 2011/7/18~19 と 2012/5/31~6/1 の二晩のトランジットを観測した。

2.3 解析方法

2.3.1 ARV 法

トランジットの際、中心星の自転の効果によって生じるスペクトル線の歪みをドップラーシフトとして観測する。例えば λ が小さい惑星の場合、惑星はまず自転する中心星の近づく側 (= 青い側) を隠し、次に遠ざかる側 (= 赤い側) を隠すため、全体としてスペクトルは赤い側から青い側へと変化する。これを視線速度に直すと、中心星はまず見かけ上遠ざかり、その後近づいて見えることになる。これが従来

用いられてきた anomalous radial velocity (ARV) 法である。

2.3.2 LD 法

Line-profile distortion (LD) 法とは、トランジットによって生じるスペクトル線の歪みを直接検出し、その時間変化を解析することで λ を求めるという新しい方法である (Cameron A. C. et al. (2010a), Cameron A. C. et al. (2010b))。具体的な手順は以下に示す。

まずは、中心星の有効温度や表面重力の値をもとに、Vienna Atomic Line Database (VALD) を参照して現れるべき吸収線の位置と深さをデルタ関数の集合で表す (これを template という)。次に、この template と畳み込んだ際に、観測されたスペクトルを最も良く再現するような関数 (kernel) を求める。kernel は、中心星の自転や光球内の速度場などによるスペクトル線の広がりを表しており、トランジット外においては一定の形状をもつ。一方でトランジットの最中においては、惑星が中心星の自転速度の異なる部分を順に隠すことで自転によるスペクトル線の広がり具合が僅かに変化し、kernel の形状が時間変化する。この歪みの時間変化の様子は中心星の自転速度と λ の値によって異なるので、観測された歪みを理論的なモデルと比較することで λ が求まる (Albrecht S. et al. 2007)。

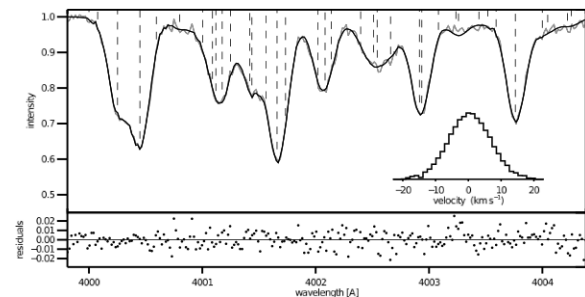


図 1: Kepler-25 の規格化されたスペクトルの一部。グレーの実線が実際に観測されたスペクトルであり、黒の実線は template と kernel の畳み込んだ結果を表す。kernel の形状は図の右下に示されている。

LD 法のテストケースとして、まずシグナルの強い HAT-P-2 で解析を行った。LD 法を用いた場合の結果 $\lambda = 7.6 \pm 0.5 \text{ deg}$ は ARV 法での結果 $\lambda = 9 \pm 5 \text{ deg}$ と一致しており、かつより高い精度で求まっている。図 2 は惑星によって生じた kernel の歪みを影で表したものである (Doppler shadow)。

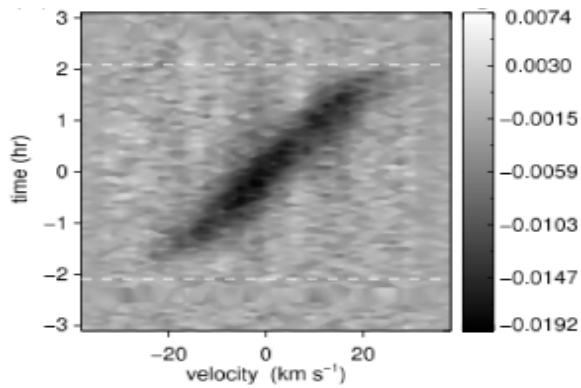


図 2: HAT-P-2 の Doppler shadow。暗い影は惑星によって生じた kernel の歪みを表す。縦軸は時間で、横軸は惑星により隠されている部分の持つ光の波長を、視線速度に直したものである。

2.4 観測結果

2.4.1 KOI-94

ARV 法を用いた解析の結果、KOI-94.01 について $\lambda = -11 \pm 11 \text{ deg}$ を得た。これは Hirano et al. (2011) の結果と一致しており、やはり中心星の自転軸と惑星の公転軸は揃っていることが結論された。実際に検出された視線速度の変化を図 3 に示す。

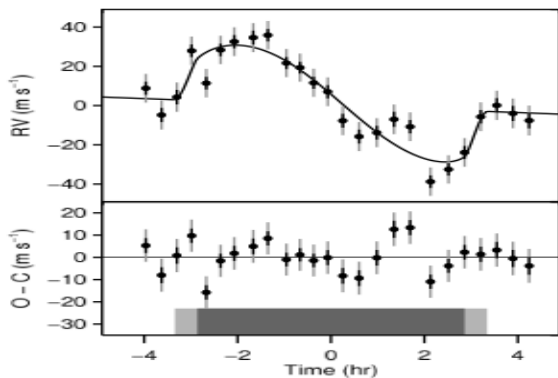


図 3: KOI-94.01 による RM 効果。横軸が時間、縦軸が RM 効果によって生じた視線速度の見かけの変化を表す。

2.4.2 Kepler-25

ARV 法を用いた場合、 $\lambda = 5 \pm 8 \text{ deg}$ となり、中心星の自転軸と Kepler-25 c の公転軸は揃っていると

いう結果が得られた。図 4 は Kepler-25 c の RM 効果による視線速度の変化を表す。

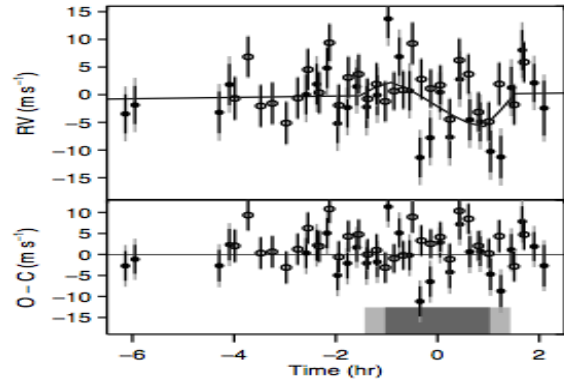


図 4: Kepler-25 における RM 効果。図 3 と同様。

今回のケースでは、ARV の振幅が $\sim 4 \text{ m/s}$ と小さく、RM 効果は KOI-94.01 の場合ほど明らかではない。そこで、LD 法により、ARV 法とは異なる波長域のスペクトル線を用いて独立な解析を行った結果、 $\lambda = -0.5 \pm 5.7 \text{ deg}$ となり ARV 法の値と一致した。図 5 は Kepler-25 の Doppler shadow である。HAT-P-2 の場合と比べ惑星半径が小さいため、影の現れ方も小さくなっている。

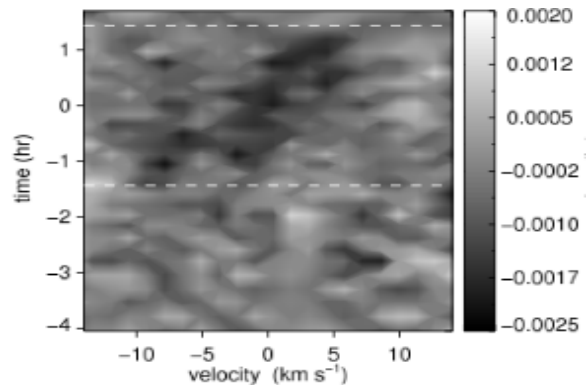


図 5: Kepler-25 の Doppler shadow (図 2 と同様)。中央上部に見られるのがシグナルである。

ここで、LD 法で解析した場合の λ の誤差は、ARV 法で解析した場合の誤差に比べ小さくなっている。この理由としては以下の 2 つが考えられる：

- 測光観測のトランジットによる減光量は惑星と中心星の半径比の 2 乗に従うのに対し、LD 法の場合、分光観測のデータは特定の波長のみについて減光を取り出すので、その大きさは惑星

と恒星の半径比そのものになり、より高いコントラストで信号を検出できる。

- ARV 法の場合、 λ は視線速度の振幅といったパラメータと同時に決定されるため、その不定性が λ に伝播するのに対し、LD 法ではそもそもこうしたパラメータを決定する必要が無い。

2.5 統計的解析

図 6 は、これまで多数の HJ と (上記 2 つを含む) 5 つの複数惑星系で観測された中心星の自転軸と惑星の公転軸の関係を、潮汐相互作用の働く時間スケールを横軸にとってプロットしたものであり、上側ほど 2 つの軸がばらついていることを表す。

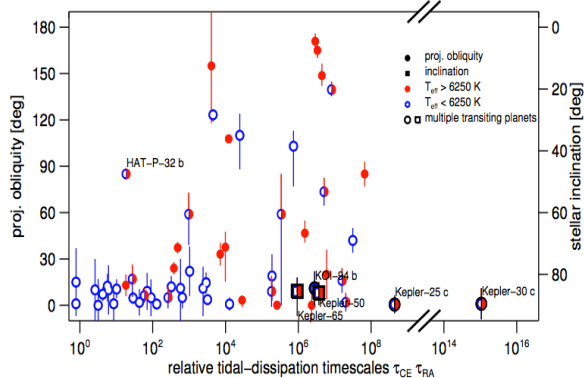


図 6: λ (縦軸左) および中心星の自転軸の視線方向に対する傾き i_* (縦軸右) と潮汐相互作用の働く時間スケール (横軸) の関係。点の色は恒星の表面温度の高低を表す。太枠で囲まれた点が複数惑星系のデータを表し、丸い点は λ を、四角の点は i_* が観測されていることを表す。

この図から、HJ の λ は広く分布しているのに対し、複数惑星系では観測された 5 つ全てにおいて自転軸と公転軸がほとんど一致していることが見て取れる。実際、Kolmogorov-Smirnov (K-S) テストを用いて解析を行うと、惑星の軌道の傾きをランダムに配置した場合に 5 つの複数惑星系でこのような分布が実現する確率はわずか 0.0003 % となり、偶然では説明できない結果となっている。一方で、潮汐相互作用が顕著ではない (相互作用の時間スケールがある程度長い) HJ を対象にこのテストを行うと 61 % という値になり、 λ がランダムに分布しているという仮定と無矛盾である。

この結果と、複数惑星系において潮汐相互作用の影響が小さいという観測結果 (図 6) を踏まえると、2.1 で述べた通り、HJ における λ のばらつきは軌道進化の結果であり、惑星系一般の性質ではないという結論が支持される。なお、今回の解析に用いた複数惑星系は 5 つと少ないが、今後より多くの同様な系で λ を測定することにより、さらに信頼性の高い統計的議論が可能になると考えられる。

3 独自の见解・自分の研究との関連

今回紹介した λ の測定手法では、コードセルを必要としない分従来の手法よりも広いスペクトル領域を利用できるため、より多くのスペクトル線を解析することができる。さらに、従来の方法では信号の大きさが惑星と中心星の半径比の 2 乗に比例するのに対し、この方法では 1 乗に比例する。これらの利点により、今回の方法では従来よりも高い精度で λ を測定することが可能となる。実際、今回レビューした Albrecht S. et al. (2013) においては、信号の小さな Kepler-25 c の λ を ARV 法よりも高い精度で検出することに成功している。このような特性は、HJ を含まない複数惑星系に対しても λ の測定を可能とするため、今後複数惑星系における λ の統計を増やし、それらの軌道進化の過程を HJ との差異も含めて理解するうえで極めて有用であると考えられる。

こうした動機に基づき、自身の研究においては、LD 法を用いた λ の解析ルーチンを作成し、テストケースとして XO-3 という惑星系での解析を行っている。さらに、上記のような λ の精密測定に加え、Doppler shadow の折れ曲がりを用いた差動回転の検出可能性も検討しており、既にすばる望遠鏡の S13B 期サービス観測にプロポーザルを提出している。この検出に成功すれば、太陽以外で差動回転を明確に検出した初めての例となる。

Reference

- Cameron A. C. et al. 2010. MNRAS, 403, 151
 Cameron A. C. et al. 2010. MNRAS, 407, 507
 Albrecht S. et al. 2013. arXiv:1302.4443v2 [astro-ph.SR]
 Rogers T. M. et al. 2012. ApJ, 758, L6
 Albrecht S. et al. 2007. A & A, 474, 565
 Hirano T. et al. 2011. ApJ, 742, 69