

トランジット惑星を用いた惑星の 軌道傾斜角の測定と惑星移動理論

平野 照 幸

〈東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 〒133-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: hirano@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp



中心星近傍を公転する巨大ガス惑星（ホット・ジュピター）の存在は、太陽系外惑星が発見された当初から大きな謎とされてきた。この謎を観測的にひも解く一つの手段としてわれわれが着目しているのが、トランジット惑星系のロシター効果などを用いた惑星の軌道傾斜角の測定である。最近では惑星の軌道傾斜角分布の中心星依存性（星の有効温度、年齢など）も議論されつつあり惑星の移動理論との比較も定量的に進みつつある。本稿ではそれら最新の研究成果を報告する。

1. はじめに

1995年に発見された最初の太陽系外惑星ペガサス座51番星は、太陽系の惑星とは全く異なる姿をしていた。現在ホット・ジュピターと言われているような木星質量程度の巨大惑星が、中心星から約0.05天文単位(AU)の軌道を4.2日という短い周期で公転していたのである。その後も多くの星の周りに似たようなホット・ジュピターは見つかり、その起源が何なのかが大きな問題となった。それまでの太陽系形成理論では、地球サイズの岩石惑星であれば太陽に比較的近いところでも形成するのに対し、木星サイズの巨大惑星は中心星から数AU離れた、材料となる氷などが豊富に存在する場所でしか形成されないとされていたからである。そこで登場したのが惑星の移動仮説である。これは、巨大惑星はやはり中心星から数AU離れた場所でしか形成しにくいので、それを作った後に中心星近傍まで移動させようというシナリオである。現在ではこのシナリオが系外惑星の起源を議論するうえでの標準的な考え方となっている。本稿では、これらの惑星の起源とそれを観測的にどのように検証するのかを中心に、最新のトラン

ジット太陽系外惑星研究の話題を紹介したい。

2. 惑星の移動理論

惑星を移動させるにはどのようなプロセスが考えられるであろうか。ここではいくつかの有力な惑星移動プロセスとその特徴について紹介する。

(1) 惑星と原始惑星系円盤の相互作用

ホット・ジュピターが発見されて間もなく提唱され、その後も有力視されているのが、惑星と原始惑星系円盤との相互作用である。惑星が原始惑星系円盤内で円盤中のガスやダストと重力的、流体的に相互作用しながら徐々に中心星近傍に落ちてきたというモデルである¹⁾。惑星の質量と円盤内のガスの密度によってこの円盤との相互作用はいくつかのタイプに分けられ、タイプI、タイプII、タイプIIIといったものがある。これら円盤との相互作用による惑星移動の証拠として、平均軌道共鳴にある惑星系の存在が観測的に見つかったことなどが挙げられる。これらの系は複数の惑星が円盤内を中心星に向かって移動していく過程で、軌道共鳴となった際に捕捉されて形成されたものと考えられる。

(2) 惑星同士の重力散乱

次にホット・ジュピターの形成に関して最近注目を集め特に重要だと考えられるのが、惑星同士の重力散乱である。原始惑星系円盤で複数の巨大惑星（2個以上）が形成された場合、円盤が消失した後、これらの惑星同士が重力的に相互作用をして、場合によっては軌道交差が起こる。その結果巨大惑星が系外にはじき飛ばされたり、残された惑星も非常に大きな離心率をもってしまふ可能性があることが数値シミュレーションからわかっている^{2),3)}。ただし、このままではエネルギー保存則からホット・ジュピターのように軌道長半径の小さい巨大惑星を作ることはできない。そこで重要になってくるのが中心星と惑星との潮汐相互作用である。重力散乱の結果、仮にある巨大惑星の離心率が1に非常に近くまで上げられたとしよう。その結果惑星の近日点は中心星に非常に近くなる（例えば ~ 0.05 AU以下）。すると今度は、惑星は中心星からの潮汐力によってエネルギーが散逸し、近日点距離をほぼ保ったまま惑星の軌道長半径と離心率は徐々に減少する。最終的には離心率がほぼ0となるまで減少し、結果軌道長半径が0.05 AU以下のホット・ジュピターが形成されるというのである。このように惑星の重力散乱とその後の中心星との潮汐相互作用によって中心星近傍に惑星を作るモデルは「スリング・ショットモデル」と呼ばれている。

(3) 古在効果

その他、(2)の惑星同士の重力散乱に似た惑星移動を引き起こすプロセスとして古在効果が挙げられる。古在効果とは、ある惑星系の周りに伴星または巨大ガス惑星が存在した場合、それらの重力的な摂動によって内側の惑星の軌道離心率と軌道傾斜角が振動する現象である。このプロセスもエネルギー保存則から内側の惑星の軌道長半径は変化させないが、離心率の増加によって前述の惑星散乱同様、近日点が中心星に非常に近づくことがある。その後は(2)と同様に中心星との潮汐相

互作用によってエネルギー散逸が起こりホット・ジュピターが形成される、というのである⁴⁾。

では、上に述べたような惑星移動のプロセスをどのような方法で観測的に確かめることができるだろうか。一つには見つかった太陽系外惑星系の離心率を見ることである。惑星移動の帰結として、(1)の惑星と原始惑星系円盤の相互作用では惑星の軌道離心率や軌道傾斜角（この場合もとの円盤の角運動量の向きと惑星の軌道公転軸のなす角度）は小さいままであることが予想される。一方、(2)や(3)による惑星移動では惑星の離心率や軌道傾斜角が動力的な過程によって引き上げられることが前提になっているため、潮汐相互作用によって軌道が完全に円軌道化するまでは離心率は0でないことが予想される。現在までの観測で多くの惑星系で有意に0から外れた軌道離心率が観測されており、これは動力的な惑星移動が引き起こしたものではないかと推測されている。

一方で、離心率を見るだけでは必ずしも惑星移動プロセスを観測的に区別することはできない。その理由の一つとして軌道が円軌道化するタイムスケールがある。中心星と惑星の潮汐相互作用についてはまだわかっていない部分も大きいですが、大離心率惑星の円軌道化には一般に1から10億年かかると考えられている。すると、現在観測されている年齢がそのタイムスケール以上の系では、かつて軌道離心率が大きかったとしても現在までに円軌道化され、円盤との相互作用によって移動したのか惑星散乱（あるいは古在効果）によって移動したのかを区別する事は難しい。そのため、惑星の軌道進化を議論するにあたってはもう一つ別の観測量が必要となる。

次の節で紹介するロシター効果は、惑星の軌道公転軸と中心星の自転軸の関係を明らかにし、求める軌道傾斜角の分布は惑星移動プロセスを議論するうえで軌道離心率以上に重要な指標となる。

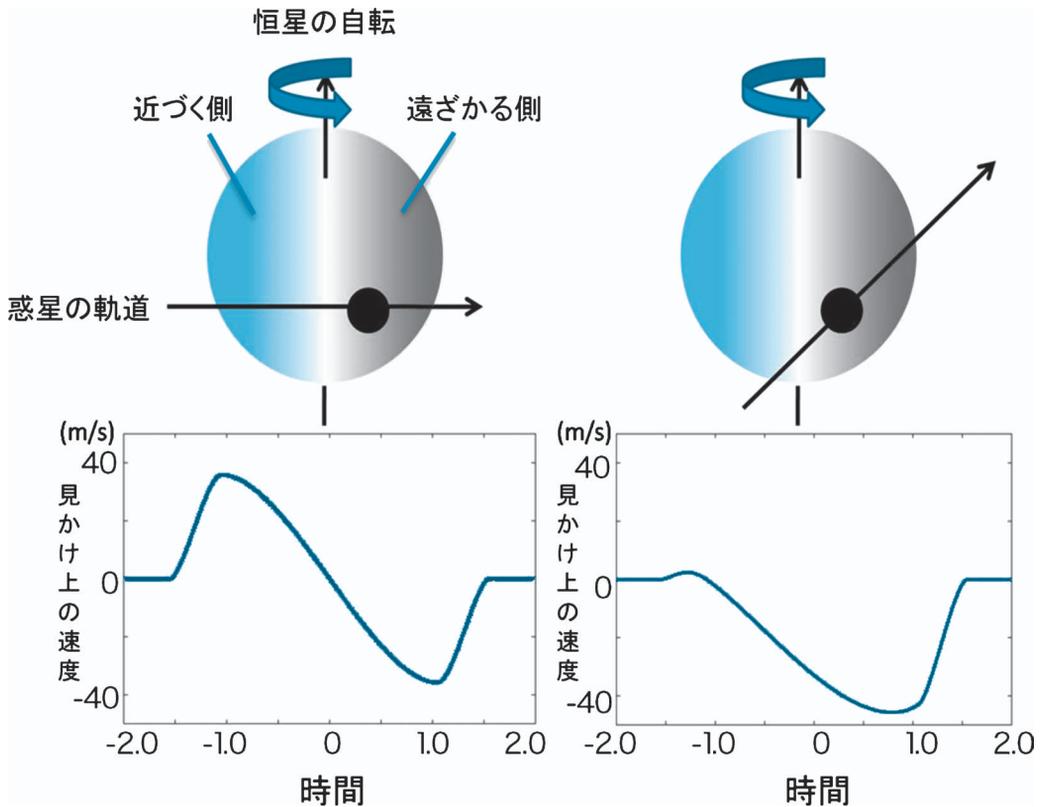


図1 ロシター効果の概念図. 左が $\lambda=0$ の場合, 右が $\lambda=50$ の場合の, 惑星のトランジットとそのときの視線速度の変動.

3. ロシター効果とその観測

3.1 ロシター効果とは

トランジット惑星系では, トランジット中に星の視線速度を測定すると, 惑星の存在によるケプラー運動に加えて, 見かけ上視線速度に変則的なパターン(ずれ)が見られる. これは星が自転していることによる見かけ上の現象であり, 発見者にちなんでロシター・マクラフリン効果(the Rossiter-McLaughlin effect)と呼ばれている*¹(ここでは単にロシター効果と呼ぶ). 元は食連星において食が起こっている最中に分光観測を行うとスペクトルの吸収線が歪む現象を指すが, 惑星のトランジットの場合吸収線の歪みは非常に小さいため一

般には検出が難しく, その歪みは視線速度を測定した際に視線速度の微小な測定的な変化として観測される⁵⁾⁻⁸⁾.

では具体的にロシター効果を図1を使って説明しよう. 一般に恒星は自転をしているため恒星面は相対的に近づく側と遠ざかる側に二分される. 図では恒星面の左側が近づく側, 右側が遠ざかる側である. 惑星がトランジットすると恒星面の一部が隠されるが, この隠されている部分が近づく側であるとき星の視線速度はその成分が一部遮られてしまうため, 見かけ上遠ざかって観測される. 逆に, 惑星が隠す部分が恒星面上の遠ざかる側であるとする, 視線速度は見かけ上近づいて観測される. これがトランジット中に視線速度の

*¹ イギリス英語での発音はロシター・「マクローリン」効果に近い. なお効果の発見に関して, 実際には1893年の時点でH. R. Holtによってその存在は予言され, 1910年にF. Schlesingerによって吸収線の歪みは観測された.

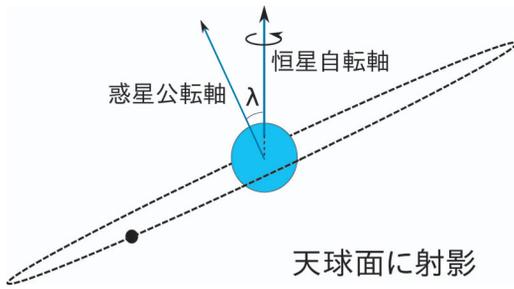


図2 λ の定義.

変動が現れる原因である。重要なのは、この視線速度の変動の時間変化が、惑星が恒星面上をどのように横切ったかに依存している点である。ここでは惑星の軌道を特徴づける量として λ を用いる。これは図2に示したように、惑星の軌道公転軸と中心星の自転軸が天球面上でなす角度である。図1の左側の配置は $\lambda=0^\circ$ の場合を表しており、その際の視線速度の変動はトランジットの中心時刻に関して対称な形となる。一方、図1の右側の配置では $\lambda\sim 50$ の場合の視線速度の変動が示されており、トランジットのほとんどの時間で星は見かけ上近づいて観測される。したがって逆に、この効果を調べることによって中心星の自転軸と惑星の軌道公転軸の関係を調べることが可能となるのである。

この λ という角度は上述した惑星の軌道傾斜角を天球面に射影したものとなっている。太陽系では太陽の自転軸と惑星の軌道公転軸はよくそろっている(約 7°)。では、系外惑星はどうだろうか。次の小節ではロシター効果の観測結果を紹介したい。

3.2 観測結果

ロシター効果の観測は世界でいくつかのグループが進めており、日本のグループも主にすばる望遠鏡を用いて観測を行ってきた。具体的には、高分散分光器(すばるの場合High Dispersion Spectrograph (HDS))を用いてトランジット中の星のスペクトルを時系列に取得し、星の視線速度の変動を検出することによってその時間変化から λ を

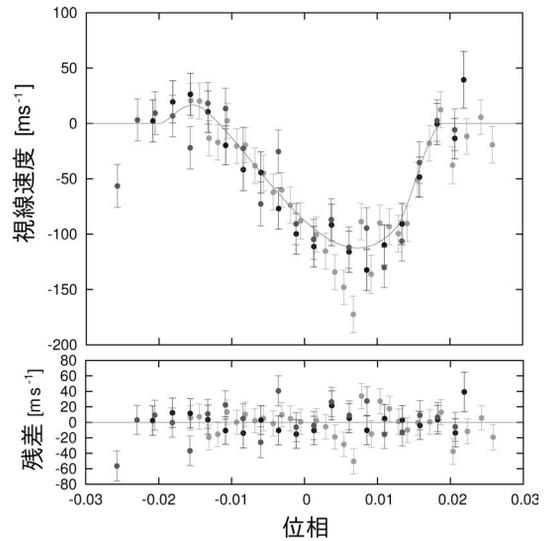


図3 XO-3のトランジット中の視線速度変動. 下のパネルはフィットした曲線からの残差¹¹⁾.

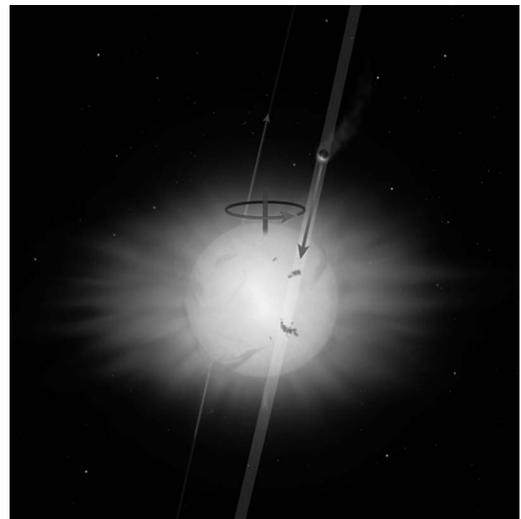


図4 海王星型惑星HAT-P-11bの軌道の概念図.

推定するという作業である。

2009年くらいまで、ロシター効果の観測されたほとんどの系で λ は 0° 付近であった。ところが近年になって急に、図3に示したXO-3のように、 λ が 0° から有意にずれているような系が報告され始めた。特に日本のグループによるすばる望遠鏡を用いた観測では、逆行惑星系($|\lambda|$ が 90° 以上で少なくとも天球面で逆行して見える系)であ

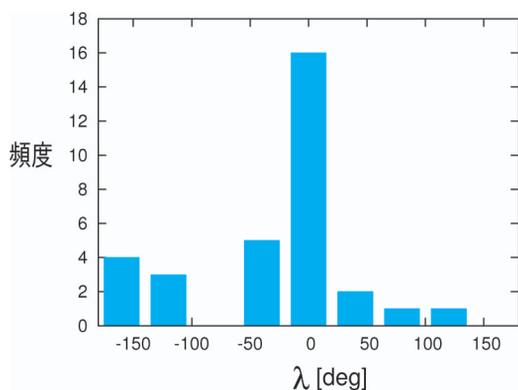


図5 これまで観測された λ のヒストグラム。

る HAT-P-7を含む、多くの系で星の自転軸と惑星公転軸の有意なずれを発見したほか⁹⁾、世界に先駆けて海王星サイズの惑星(HAT-P-11b)に対してロシター効果を検出するなど¹⁰⁾、大口径望遠鏡の利点を最大限生かした観測を行ってきた。

これまでの観測結果をまとめると図5に示したような分布となる。やはり公転軸と中心星自転軸が揃っているものが最多であるが、一方で、ずれている系は幅広い値の分布となっていることがわかる。最初に述べた惑星移動理論との比較をするなら、円盤と惑星との相互作用だけでこのような幅広い λ の分布を説明するのは不可能であり、やはり2章で述べた(2)や(3)のプロセスが必要となってくる。一方で、 λ の統計的な議論から惑星移動のプロセスを有意に区別するにはまだ観測データが不足しており、今後ロシター効果の継続した観測が期待される。

興味深いことに、特に中心星の有効温度が高い系の周りで惑星の軌道傾斜角が大きいことが観測的に明らかになった。この原因は明らかにされていないが、一つの可能性としてWinnら(2010)は次のような仮説を唱えている。まず、ホット・ジュピターの形成には惑星同士の重力散乱のような動力学的な過程が支配的であるとする。すると、まずは中心星のタイプによらず惑星はさまざまな値の軌道傾斜角をもつようになる。ところが

中心星の有効温度が低い星では対流層が発達しており、対流層が星の非常に近傍を回っている惑星と潮汐相互作用を起こし、場合によっては星の自転軸のほうに惑星の公転軸の向きと再びそろえる可能性がある、としているのである¹²⁾。これを実際に起こすには潮汐相互作用に関するさまざまな条件をクリアしなければならないが、仮説としてはたいへん興味深い。

中心星の有効温度に加えて、惑星系の年齢と軌道傾斜角の相関も指摘されている¹³⁾。Triard(2011)は λ の測定結果と中心星の年齢の関係をプロットし、年齢が約25億年以下の星の周りでのみ $\lambda=0^\circ$ から有意に外れた惑星の軌道傾斜角が見られ、年齢25億年以上の系ではほとんど惑星軌道公転軸と中心星の自転軸はそろっていることを示した。この相関は時間とともに惑星の軌道傾斜角(中心星の自転軸)が進化する可能性があるということを表しており、Winnら(2010)の仮説とも整合する。

4. ケプラー測光を用いた星の自転傾斜角測定

ロシター効果の観測は、惑星の移動理論を検証・制限するうえで重要な事実を明らかにしたが、どのような系に対しても必ずしも適用できるわけではない。例えば、小さな惑星をもつような系に対してはロシター効果の検出は非常に困難となる。ロシター効果による視線速度の変動の大きさは一般に惑星と中心星のサイズの比にほぼ比例し、地球型惑星のように惑星のサイズが小さいとロシター効果のシグナルは現在の検出限界以下になってしまう。一方で、惑星の形成・移動やその後の潮汐進化をより正確に把握するためには、星の自転軸と惑星の公転軸の関係をより小さな惑星系に対してまで調べることは不可欠である。

そこで現在われわれは、より小さな惑星をもつ惑星系に対して惑星の公転軸と中心星の自転軸の関係を調べるために、ケプラー宇宙望遠鏡の高精

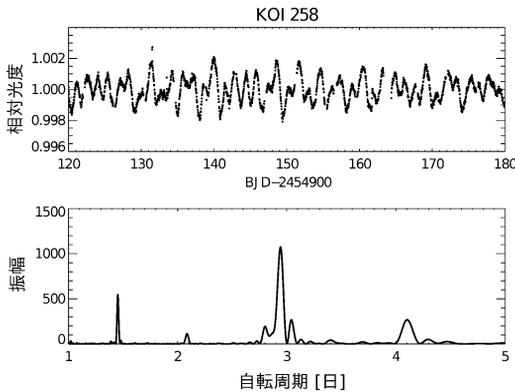


図6 (上) ケプラーのによって観測された KOI-258 の光度曲線。(下) ピリオドグラム (周期解析の結果)。

度測光データに着目している。ケプラーはトランジット探査専用の宇宙望遠鏡として2009年に打ち上げられ、現在までに1,000個以上の系で惑星候補天体を発見している。その中には地球クラスのサイズの岩石惑星も含まれていると考えられており、今後候補天体に対して惑星の存在の確認が進められることが期待される。

ケプラーによって検出された惑星系候補天体の中には、図6の上のパネルに示したように光度曲線に周期的な変動が見られるものも少なくない。これは恒星の表面にある黒点が恒星の自転に同期して動いていることによる変動であると考えられる。この光度曲線を周期解析してみると、図6の下に示したように周期約2.9日のところにピークが現れる。これは恒星の自転周期を反映していると考えられる。

恒星の自転周期 P_s がわかると、実は恒星の自転軸がわれわれの視線方向に対してどのように傾いているのかを推定することが可能となる。一般に、分光観測を行うことによって吸収線の幅から星の射影自転速度($V \sin I_s$)_{obs}を求めることが可能である。ここで I_s は恒星の自転軸とわれわれの視線方向のなす角度(自転傾斜角)である。ケプラーの測光データから恒星の自転周期 P_s が求まれば、以下の関係式によって恒星の自転傾斜角 I_s

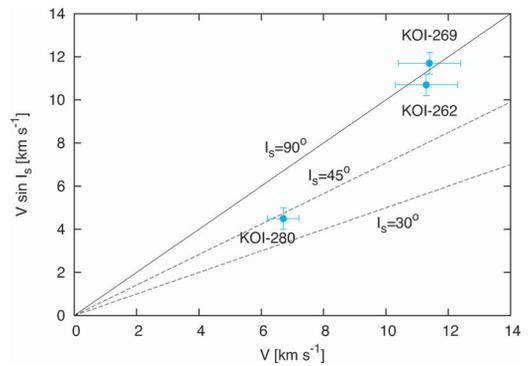


図7 星の自転速度 V と射影自転速度 $V \sin I_s$ の関係。実線は $I_s = 90^\circ$ の場合、破線は $I_s = 45^\circ$ と $I_s = 30^\circ$ のときの関係を表している。

を求めることができる。

$$I_s = \arcsin \left\{ \frac{P_s \cdot (V \sin I_s)_{\text{obs}}}{2\pi R_s} \right\} \quad (1)$$

ここで R_s は星の半径を表す。すなわち、ケプラーの測光データと新たに行う分光観測によって星の自転周期と射影自転速度が求まれば、恒星の自転軸がわれわれに対してどの程度傾いているかを推定することが可能となるのである。一方トランジット惑星系では、トランジットが起こるという条件から惑星の軌道公転軸はわれわれの視線方向とはほぼ垂直(90°)となる。したがって、もし $I_s = 90^\circ$ という観測結果が得られれば、トランジット惑星の軌道公転軸は中心星の自転軸とそろっていることが予想され、もし $I_s = 90^\circ$ から有意に外れた観測結果が得られれば、それは惑星公転軸と中心星自転軸がそろっていないことを示唆する。このような解析は惑星のサイズにかかわらず行うことが可能であるという点がロシター効果による λ の測定とは異なる。

では最後に、これまでに解析したデータを少し紹介したい。図7は、ケプラーの測光データから求めた中心星の自転周期とすばる望遠鏡の観測を通して得られた分光データの解析をもとに、三つの系に対して星の自転速度 V と射影自転速度 $V \sin I_s$ を計算してプロットしたものである。実

線は $V = V \sin I_s$ ($I_s = 90^\circ$) となる場合を表しており、この実線よりも下にくるにつれて星の自転軸と惑星の軌道公転軸がずれていることが示唆される。これら三つの系のうち KOI-262 と KOI-269 では誤差の範囲内で $I_s = 90^\circ$ となるのに対し、KOI-280 に関しては有意に $I_s = 90^\circ$ から外れており恒星自転軸と惑星の公転軸がずれていることが示唆される。今後このような観測を継続して行って、惑星の軌道傾斜角の中心星依存性などを統計的に議論していくことが重要である。

5. 今後の展望

本稿ではトランジット惑星系の観測によって惑星の軌道傾斜角が測定でき、その統計的な分布が惑星の移動理論を調べるうえで重要であると述べた。特に最近知られるようになった軌道傾斜角の中心星依存性（有効温度や年齢など）をより詳しく調べ、さまざまなパラメーターとの相関を見ていくことによって真の惑星の形成・移動プロセスが明らかになるはずである。

ロシター効果の観測に関しては、前述のように視線速度の変動の大きさが惑星と中心星のサイズ比に大きく依存するため、太陽型星を公転する地球型惑星に対してロシター効果を検出するのは現在の精度では難しい。しかし将来的には M 型星の周りであれば地球型惑星によるロシター効果の観測が現実味を帯びてくる。というのも、M 型星は一般に星の半径が小さいため、同じ地球型惑星であっても中心星とのサイズ比にすると相対的に有利になるからである。現在、日本を含め世界で赤外領域におけるドップラー法などを用いた M 型星周りの惑星探査が進行中であることを考えると、低質量星しかも地球型惑星を含めた惑星の形成・進化モデルを観測的に検証・制限することはもはや時間の問題と言える。

謝辞

指導教員の須藤 靖教授、いつも議論させてい

ただいているトランジット惑星系研究チームの皆様感謝いたします。本稿で紹介した研究は、すばる望遠鏡を用いた観測をもとにしているものが含まれます。いつも HDS を用いた観測でお世話になっている田実晃人氏にはこの場を借りて深く感謝いたします。最後に、この原稿を注意深く読んで有益なアドバイスをくださった成田憲保氏、樽家篤史氏、岡 アキラ氏に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Lin D. N. C., et al., 1996, *Nature* 380, 606
- 2) Chatterjee S., et al., 2008, *ApJ* 686, 580
- 3) Nagasawa M., et al., 2008, *ApJ* 678, 498
- 4) Fabrycky D., Tremaine S., 2007, *ApJ* 669, 1298
- 5) Ohta Y., et al., 2005, *ApJ* 622, 1118
- 6) Winn J. N., et al., 2005, *ApJ* 631, 1215
- 7) Narita N., et al., 2007, *PASJ* 59, 763
- 8) Hirano T., et al., 2011b, *ApJ* 742, 69
- 9) Narita N., et al., 2009, *PASJ* 61, L35
- 10) Hirano T., et al., 2011a, *PASJ* 63, S531
- 11) Hirano T., et al., 2011c, *PASJ* 63, L57
- 12) Winn J. N., et al., 2010, *ApJL* 718, L145
- 13) TriAUD A. H. M. J., 2011, *A&A* 534, L6

Measurements of Stellar Obliquities and Its Implication to Planetary Migrations Teruyuki HIRANO

*Department of Physics, The University of Tokyo,
Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: The origin of close-in giant planets is the most enduring problem in exoplanetary science. A promising approach to solve this problem is to measure the inclinations of the planetary orbits with respect to the spin axes of their host stars. This is because the various “migration” theories for close-in giant planets differ strongly in their predictions about spin-orbit alignment. In order to investigate the spin-orbit relations, we have been focusing on the measurements of the Rossiter–McLaughlin (RM) effect, an apparent radial velocity anomaly during a transit, which enables us to estimate the angle λ on the sky between the stellar spin axis and the planetary orbital axis. In this article, I present an observational status of the RM measurements and also introduce a new technique to estimate stellar inclinations through the combination of ultra-precise photometry and spectroscopic observations.