系外惑星「遠い世界の物語」その3 ~複数惑星系KOI-94から紐解く惑星の軌道進化~

平野 照幸1

(要旨) 中心星近傍を公転する巨大惑星の起源を議論する上で、惑星軌道の傾き(軌道傾斜角)は重要な情報となる。巨大惑星を中心星近傍に移動させるプロセスは様々であるが、プロセスごとに異なる惑星の軌道傾斜角を予言するためである。本稿では、KOI-94(Kepler-89とも呼ばれる)という複数のトランジット惑星を持つ系に着目し、ロシター効果と呼ばれる現象を使って惑星の軌道傾斜角を制限する手法を紹介する。KOI-94に注目した過程で偶然発見した惑星同士の食についても触れ、その解析とロシター効果の観測を組み合わせる事でKOI-94系では太陽系同様に複数の惑星がほぼ同じ面内を公転し、さらにその公転面は中心星の自転軸にほぼ直交している事を示す。最後に、KOI-94を含む惑星系の軌道傾斜角の最新の観測から見えて来た惑星系の進化への示唆を述べる。

1. はじめに

1.1 短周期巨大惑星の起源

太陽系外惑星が最初に見つかってからすでに20年近くが経過し、現在ではより小さな惑星、より長周期の惑星を見つけようというプロジェクトが精力的に進められている。また惑星の発見そのものに加えて、見つかった惑星をいかに特徴付けるかや、さらにその特徴から惑星系の起源を探る議論も活発である。

最初に見つかった太陽型星周りの系外惑星であるペガスス座51番星を含め多くの巨大惑星は中心星近傍を公転しており、太陽系とは全く異なる姿をしていた。これはもちろん周期の短い巨大惑星(ホットジュピター、ホットネプチューンなどと呼ばれる)の方が見つかりやすいという観測バイアスによるところが大きいが、そもそもそういった惑星系がどのようにして形成されたのかが問題となった。一般に巨大惑星は氷などの固体材料が豊富に存在する中心星から十分離れた1領域でしか形成されないと信じられており、短周期巨大惑星を説明するには何らかの方法で惑星を内側まで

落としてくるメカニズムが必要となった. 現在ではこの惑星移動として以下のような重要なモデルが提唱されている.

- (a) **タイプI, II 惑星移動** 原始惑星円盤内で形成され つつある惑星が、円盤との重力相互作用で角運動 量の交換が起き徐々に内側に移動する場合がある。 特に木星サイズの巨大惑星の場合惑星周辺のガス は惑星に降着して円盤内にギャップを作るので、 ギャップを保ったまま円盤の散逸と共に惑星が内 側に移動する(タイプII 惑星移動)[2].
- (b) スリングショットモデル 複数の巨大惑星が円盤 内で形成された場合,円盤が散逸したあとも惑星 同士の重力によって惑星軌道が大きく変化する事があり,最終的に軌道交差を経験して一部の惑星が散乱されたり,軌道離心率が大きくなったりする.離心率が極端に大きくなると惑星の近星点が中心星に近づくため(~0.05AU),今度は惑星と中心星の潮汐相互作用が働き軌道エネルギーの散逸が起こる.このプロセスは惑星の近星点距離をほぼ保ったまま進行するため,最終的に円軌道の短周期惑星が形成される(スリングショットモデル)[3,4].

^{1.} 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻 hirano@geo, titech, ac, jp

^{1.} 太陽型星だと一般に中心星から数AU以上.

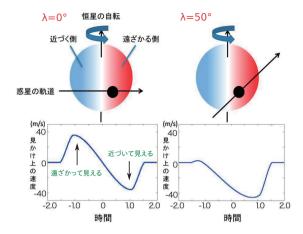


図1: ロシター効果の概念図. 左半分が $\lambda = 0^\circ$, 右半分が $\lambda = 50^\circ$ の場合の視線速度変動を表す.

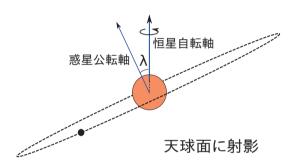


図2:角λの定義.

(c) **古在移動** ある惑星系の近くに伴星などの大質量 天体があると、円盤が散逸した後も伴星からの永 年摂動が作用し、惑星の軌道が変化する事がある (古在効果). 古在効果は特に最初の惑星軌道面と 伴星の公転面がずれている場合に起こり、惑星の 軌道離心率や軌道傾斜角を振動させる. 軌道離心 率が極端に大きくなると上記(b)と同様に中心星 と惑星の潮汐力が作用し、最終的に円軌道の短周 期惑星となる[5].

上記プロセスはいずれも物理的にはもっともらしいが、数多く見つかっている短周期巨大惑星の形成にどのプロセスが支配的に関わっているのかは自明ではない。 筆者らは上で述べたような巨大惑星の起源・進化の歴史を観測的に制限する事を目的として、以前から惑星の軌道傾斜角に着目して来た。 通常軌道傾斜角とはある基準面の法線と惑星軌道の角運動量ベクトルの向きのなす角であるが、ここでは惑星の公転軸と中心

星の自転軸のなす角度とする. なぜ軌道傾斜角が惑星の進化過程を調べる上で重要かと言うと、上で述べた(a)-(c)のプロセスが軌道傾斜角の分布に対して異なる予言をするためである. 例えば(a)のタイプIまたはⅡ惑星移動では、基本的に惑星軌道面は保たれたまま静かに内側に移動してくるので観測される惑星軌道面は形成当初の円盤面を反映している可能性が高い. 一方(b)や(c)のシナリオでは惑星の散乱や古在効果によって惑星軌道面が大きく変化する場合が多く、結果として観測される惑星公転軸は円盤の角運動量の向きを反映する中心星自転軸と揃っていないという事が予想される. つまり惑星の軌道傾斜角を調べる事で惑星の進化の歴史を紐解く事が出来るのである.

本稿では、このように惑星系の起源や進化を論じる 上で重要な情報となる惑星の軌道傾斜角の測定法について具体的な観測例も交えて紹介し、これまでの観測 から見えてきた惑星系の進化への示唆を述べる.

1.2 惑星の軌道傾斜角測定

軌道傾斜角の測定にはこれまで様々な手法が考案されており、(1)トランジット惑星系のロシター・マクローリン効果(以下、単にロシター効果) [6,7,8,9,10]、(2)惑星による黒点前通過[11]、(3)星震学[12]、(4)射影自転速度測定[13]、(5)恒星面の重力減光[14]、を用いるものなどがある。ここでは以下で説明する(1)ロシター効果について注目し、実際の観測結果と合わせて紹介をする。

一般に恒星は自転しており、我々の視線方向に相対的に近づく側と遠ざかる側が存在する(図1). トランジット惑星系ではこの恒星面の一部分が遮蔽される事によって減光が起こるが、その際恒星の視線方向の速度(以下単に視線速度)を測定すると恒星面上で惑星が隠している場所に応じて見かけ上視線速度が変化する. すなわち、惑星が恒星面の近づく側の半分(図1の恒星図の左側)を隠している時は恒星の視線速度は遠ざかって観測され、逆に遠ざかる側(図1の恒星図の右側)を隠している時は恒星の視線速度は見かけ上近づいて観測される. この現象はロシター効果と呼ばれており、連星系やトランジット惑星系など天体同士が食を起こす系では普遍的に見られる現象である. ロシター効果の観測からは図1に示したように、恒星の自転軸と惑星の公転軸のなす関係を調べる事が出来る. こ

こでは惑星の軌道傾斜を表すパラメータとして、恒星自転軸と惑星公転軸が天球面上でなす角度 λ を用いている (図2). 例えば図1の左半分のように λ = 0°で惑星がトランジットを起こすと、トランジット中の視線速度の変動はトランジット中央時刻に対して点対称な形となるが、一方で図1の右半分のように λ = 50°でトランジットが起こると、惑星は恒星面上のほぼ遠ざかる側だけを隠す事になるので恒星の視線速度の変動は大きく非対称なものとなる。この違いを利用して惑星の軌道傾斜を表すパラメータ λ を調べる事ができ、短周期巨大惑星の起源を論じる上で重要な情報となる。

ロシター効果の観測はすでに多くのトランジット惑 星系(>70)に対して行われているが、観測結果は惑星 軌道の傾き λ が必ずしも0°を示すわけではなく. λ が0°から有意にずれている系が少なからず存在して いる[15]、このような惑星の公転軸と恒星自転軸の向 きの不一致は、短周期巨大惑星が円盤との相互作用に よって徐々に内側に落ちて来たのではなく、惑星同士 の散乱や伴星からの摂動によって軌道面が乱され、後 に恒星との潮汐相互作用で短周期惑星となったという 見方が一般的である 2 (上記(b)または(c)のプロセス). 一方. $\lambda \approx 0^{\circ}$ となる系に関しては二つの考え方が存 在し、単に上記(a)のプロセスによって円盤の中を惑 星が落ちて来たというものと、短周期巨大惑星は(b) や(c)のプロセスによって形成されたが(その場合最初 は惑星の軌道面が大きく傾いていた), その後中心星 との長期間の潮汐相互作用の結果, 再び惑星の軌道と 中心星の自転の角運動量の向きが揃ったというもので ある. これらをロシター効果の観測だけから厳密に区 別する事は難しく、伴星の有無や潮汐力の大きさの指 標となる惑星の質量や軌道長半径などから総合的に評 価する他ない.

2. KOI-94系における惑星同士の食 の発見とロシター効果の観測

ここではロシター効果の観測ターゲットとして KOI-94系に着目した経緯と実際に筆者らが行った観 測について述べ、その過程で明らかになった惑星同士 の食という現象についても報告する.

2.1 複数惑星系における軌道傾斜角測定

系外惑星に対するロシター効果の観測は、最初のトランジット惑星であるHD 209458bを筆頭にこれまで数多くの系で行われており、筆者がKOI-94系に着目した2012年当時すでに観測から解析までがルーチン化されている状況であった。ただしそれまでのロシター効果の観測は全て、トランジット惑星が一つしか系にない「単一トランジット惑星系」に対してのみであった。

トランジット惑星が複数存在する惑星系に対してロ シター効果を測定する事は重要な意義を持つ、一般に、 複数の惑星が同じ恒星をトランジットするというのは それらの惑星の軌道面がよく揃っていなければ極めて 起こりにくく、複数の惑星が同じ軌道面内を公転する という事は惑星同士の散乱など、動的なプロセスを経 ていない事が示唆される。また、それら惑星が共有す る軌道面は惑星が形成された当時の原始惑星系円盤の 円盤面を反映していると考えるのが自然である.一方. 恒星の自転角運動量の向きは円盤があった当時の円盤 の角運動量の向きを反映していると考えられるため、 当然このような複数トランジット惑星系では中心星の 自転軸と複数の惑星の公転軸の向きが互いによく揃っ ている事が予想される. 従ってもし仮に、ロシター効 果の観測から少なくとも一つの惑星のλが有意に0° からずれているという証拠が得られれば、それは上記 の論法のうちの少なくとも一カ所が成り立たないとい う事を意味する. 単一トランジット惑星系に対するこ れまでのロシター効果の観測結果に対する解釈を確か める上でも、複数トランジット惑星系に対するロシタ -効果の観測は重要であった.

そこで筆者らが着目したのが、ケプラー宇宙望遠鏡によってトランジットが報告されたKOI-94(別名 Kepler-89)という複数惑星系である。恒星の視線速度測定によるロシター効果の検出には惑星の半径がある程度大きい必要があるが、KOI-94系は表1に示したように0.83RJ(木星半径)の惑星KOI-94.01³を含む4つのトランジット惑星で構成されており、KOI-94.01のトランジットによるロシター効果は検出可能という試算

^{3.} ケプラー望遠鏡によって見つかった惑星候補は、見つかった 順にKOI-??.01, ??.02, · · · といった名称が付けられる(??は系の 番号).

表1: KOI-94(Kepler-89)系の惑星

惑星名称	公転周期 (日)	惑星半径 (R_J)
KOI-94.01	22.34	0.83
94.02	10.42	0.31
94.03	54.32	0.49
94.04	3.74	0.13

となった. KOI-94系が筆者らの特に注意を引いたのは、複数惑星系でしかも木星型惑星(KOI-94.01)を持つにもかかわらず、そのいずれの惑星も周期が100日以内の比較的短周期惑星であったという点である。すでに述べたように、KOI-94.01のような巨大惑星がスノーラインよりも内側で出来たとは考えにくく、恒星から数AUのところで形成され内側に落ちて来たという可能性が高い。さらに複数の惑星が同じ軌道面内を公転している事を考えると、KOI-94系は惑星散乱などによる軌道進化ではなく、むしろ原始惑星系円盤内を徐々に惑星移動して来たと見るのが自然であろう。ロシター効果の観測によってもし恒星自転軸と惑星公転軸が揃っていたら、上記のシナリオが裏付けられる事となり、これまでの惑星進化の議論を一歩進める事が出来る。

筆者らはこのように興味深いKOI-94系でのロシター効果をすばる望遠鏡で観測するため観測提案を準備していたが、観測可能日を計算したところなんと2012年は8月10日(UT)以外は観測できないという事が判明した。これはKOI-94.01の公転周期がトランジット惑星としては比較的長いというのと、トランジットの継続時間が非常に長い(6-7時間)ために一晩のうちに観測するのが困難である事に起因していた4.これほど特定の日付を指定するとなかなかプロポーザルを通してもらえない可能性もあったが、それでも一か八かで提案する運びとなった。結果的に興味深い天体であるというのをレフリーにも認めてもらえ、8月10日を観測夜としてもらえる事になった。

2.2 惑星同士の食

観測夜が無事割り当てられたので、筆者らは2012年7月下旬くらいから観測の準備を行っていた。一方

KOI-94系は惑星の軌道進化を議論する上で極めて重 要なサンプルであるため、ロシター効果の観測が決ま った後にすばる望遠鏡の高コントラスト撮像装置 "HiCIAO"を使って伴星の有無についても調べられた [17]. これに関連して、筆者らはケプラー望遠鏡の測 光データの解析を行っていたが、その際偶然二つの惑 星(KOI-94.01と94.03)が同時にトランジットを起こし ているの(ダブルトランジット)を発見した(図3). 通 常のトランジットだと惑星が恒星面の一部を隠す事で "U字型"の減光が起こるが、図3のダブルトランジッ トではU字の途中でさらに別のU字型の減光が起こ っている. しかもよくよく拡大してみると. ダブルト ランジットの中心付近で逆にわずかながら増光してい る様子が見える(図3矢印で示したあたり). このよう なトランジット途中の増光は惑星が恒星面上の黒点を 通過した場合などに起こるが、KOI-94については観 測された程度の増光を起こすサイズの黒点はケプラー の測光データには見られず、増光はそれ以外の要因に よって起こった可能性が高い事が分かった。我々は増 光が起こったタイミングと大きさから、これが惑星同 士がトランジット中に重なり合った事(惑星同士の 食)による増光であると結論付けた. このような現象 は予言こそされていたものの[16]、実際の報告例はこ れまでなかった. こうしてKOI-94系は単に巨大惑星 を持つ複数トランジット惑星系という以上に、惑星同 士の食が初めて見つかった希有な系となった.

トランジット中の惑星同士の食は単に天体現象として興味深いという以上に、そのライトカーブから食を起こした二つの惑星(今回の場合 KOI-94.01 と 94.03)の軌道面同士のなす角度を制限する事が出来る(後述). 複数の惑星の軌道面同士のなす角は太陽系でこそよく分かっているが、太陽系外ではほとんど分かっていない. 太陽系のように ± 3°程度の範囲内で惑星軌道面が揃っているのか(あるいはずれているのか)は惑星の形成や進化過程を議論する上で貴重な情報となる.

2.3 すばる望遠鏡での観測

さて、いよいよKOI-94.01のロシター効果をすばる 望遠鏡で観測するために、観測日前日にハワイに向かった。観測は筆者と東大大学院生の増田賢人氏(現 D1)で参加した。行きの飛行機の中では、ケプラー望 遠鏡の公開データで見られた惑星同士の食から情報を

^{4.2012}年8月10日を逃すと, 次の観測可能日まで2年程待つ必要があった.

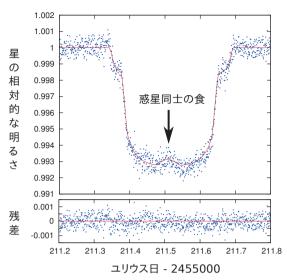


図3: 2010年1月15日(UT)に起こったKOI-94系での惑星同士の食.

引き出すためにそのライトカーブのモデル化を行った のを記憶している。 すばる望遠鏡のあるマウナケアの 山頂まで到達した時の天気は晴れ、観測は予定通り開 始された、ところがしばらく経ち、すばる望遠鏡のお 隣にあるケック望遠鏡(口径10 m)がすばるとほぼ同 じ方角を向いているのに気付いた。その後もずっとケ ックはすばると同じ方角をトレースし続けており、ひ ょっとしたら同じターゲットを観測しているのではな いかという不安がよぎった. 気になってケック望遠鏡 のサイトから観測提案者を調べてみると8月10日の提 案者がG. W. Marcy氏⁵となっており、不安は確信に 変わった。すばるとケックではやはり望遠鏡の口径に 加えて解析のパイプラインがケックの方が充実してお り、同じロシター効果の観測でも彼らの方が精度が高 い可能性が高かったため、筆者らはすばるの観測結果 をすぐさま公表する必要が出て来た6.

観測は最後まで順調に進行し、観測中のクイックルックでもまずまずのデータの質であった。下山直後に早速視線速度解析を行ったところ、図4のような結果となりロシター効果は予想通り検出された。視線速度変動のパターンは図1の左側のようにトランジット中心に対して対称な形となり、恒星自転軸と惑星公転軸はよく揃っている事が分かっ

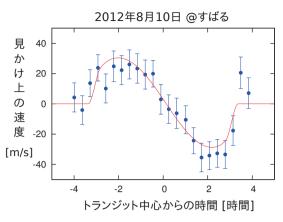


図4: すばる望遠鏡で観測されたKOI-94 01のロシター効果

た($\lambda \approx -6^{\circ}$).

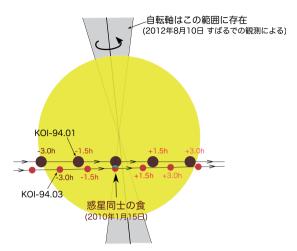
観測から戻ってくると、筆者らはロシター効果の解 析に加えてケプラーのライトカーブについても解析を 行い、図3の惑星同士の食をモデルでフィットしてみ た。フィッティングでは、通常のトランジット・ライ トカーブを記述する恒星と惑星の半径比、惑星軌道傾 斜角、恒星半径で規格化した惑星の軌道長半径などに 加えて、天球面上で惑星同士の軌道のなす角(δ: mutual inclination)を自由パラメータとした. 定性的 には、 δ は惑星同士の食が起こっている継続時間を 決める. δ が0°付近の場合は, 惑星はほぼ同一方向 に移動するため惑星同士の食の継続時間が長い。一方 で惑星同士が互いに逆行している場合は δ ≈ 180° と なり、惑星同士の食は短時間で終わる、4つのトラン ジット惑星を持つKOI-94系では当然惑星は全て同じ 方向に公転しているものと予想される. 実際フィッテ ィングの結果も δ =1.15° ± 0.55° となり、惑星同士の 食を起こしたKOI-94.01と94.03の軌道面は太陽系同 様に高い精度で一致している事が明らかとなった.

3. 解析結果のまとめと複数惑星系の起源への示唆

KOI-94系に関する解析結果をまとめると図5のようになる。すなわち、まずKOI-94.01のトランジット中のロシター効果の観測により94.01の公転面はKOI-94の中心星の自転軸にほぼ直交している事が分

^{5.} カリフォルニア大学パークレー校にて系外惑星の研究を行う 研究者. ロシター効果の観測にも関わっている.

^{6.} 最終的に筆者らのグループが先に結果を公表する事が出来た.



複数トランジット惑星系KOI-94

図5: KOI-94系に対する観測結果のまとめ.

かり、またケプラーの公開データを用いた惑星同士の食の解析から、食を起こしたKOI-94.01 と 94.03 の公転面がほぼ一致している事(δ =1.15° ± 0.55°)が明らかとなった。このように精密に複数惑星系の軌道角運動量が特徴付けられたのはもちろん初めての事である。

このような複数惑星系における軌道角運動量と中心星の自転角運動量の向きの一致は太陽系と酷似しており、惑星が原始惑星系円盤内で形成され、円盤の降着によって恒星も同じ向きの角運動量を獲得したというシナリオと合致する。ただ太陽系と大きく異なるのが、KOI-94系ではKOI-94.01を始め巨大惑星が周期100日以下の中心星近傍に位置している点である。これは、先に述べたようにKOI-94系の惑星が原始惑星系円盤内を円盤と相互作用しながら徐々に内側に移動して来た証拠と考えられる。ここで以下のような疑問が生じた人もあるだろう。

- 1. 同じ中心星近傍に巨大惑星を持つ系でも,惑星公 転軸と恒星自転軸が揃っているものといないもの があるのはなぜか.
- 2. 太陽系の巨大惑星(特に木星・土星)は惑星移動に よって中心星付近まで落ちて来ていないのに, KOI-94系のように落ちて来ているものがあるの はなぜか.

上記1. については、諸説あるが現在では「孤立した (isolated)」短周期巨大惑星は、惑星同士の重力散乱(ま たは古在効果)とその後の恒星との潮汐相互作用によ って形成されたという考えが一般的である[18, 19]. ここでいう「孤立」とは、近くに(例えば周期100日以内に)他に巨大惑星を持たないという意味である。惑星同士の散乱によって形成された場合惑星の軌道傾斜角は幅広い分布となるが、惑星と恒星の潮汐相互作用は徐々に軌道公転軸と恒星自転軸を同じ向きに揃える方向に働く、潮汐力の強さは惑星の質量・軌道長半径や恒星の対流層の大きさに依存しており、それらを考慮すると、孤立した短周期巨大惑星に対するロシター効果の観測結果(λの分布)をある程度説明する事が出来る。

一方、恒星近傍であっても孤立していない巨大惑星 は一般に重力散乱などではなくタイプIまたはタイプ Ⅱ移動などによって内側に移動して来たと考えられる. 特にKOI-94系の場合全ての惑星の軌道面が高い精度 で揃っている事から、形成当時の惑星の配置や軌道面 を保ったまま徐々に円盤内を移動した可能性が高い. このような惑星は上記の孤立した短周期巨大惑星に比 べて, 軌道公転周期が比較的長い(P>5日), 軌道離 心率が小さい(e<0.1)などの特徴を持つ. つまり. 最 近多く見つかって来た「複数トランジット惑星系」は 孤立した短周期巨大惑星とは全く異なる進化の歴史を 持っていると言えよう。なお上記2. については、同 じ複数惑星系でもなぜタイプⅠまたはⅡ移動を経験し た系とそうでない系が存在するのかについては、初期 条件としての円盤の面密度の違いなど様々な可能性が 指摘されているが、はっきりした結論は得られていな 61

4. 今後の展望

海王星サイズ以上の巨大惑星の起源や進化の歴史は 徐々にその全貌が明らかになりつつある。一方ケプラ ー望遠鏡によるトランジット惑星の探査結果は、「ス ーパーアース」を含むより小さな地球型惑星の方が存 在頻度が高い事を示しており、より普遍的に存在する 地球型惑星の起源や進化に対してもこれまでの議論が 適用出来るのかは今後の観測において重要なテーマと なる。

^{7.} Kepler-56系には、周期10.5日、21.4日の二つの巨大惑星が存在 する

^{8.} 原始惑星系円盤自体が伴星からの摂動によって円盤面を変化 させた[21], など.

一般に小さい惑星に対して視線速度法によって質量 や軌道離心率を精度よく決定するのは困難であり、ま たロシター効果などによる軌道の特徴付けも容易では ない、では完全に無理なのかと言うと、条件さえ揃え ば地球型惑星であっても軌道の特徴付けを行う事は出 来る。筆者らはロシター効果が適用出来ないような小 さい惑星を持つ系に対し、測光から求めた恒星の自転 周期と分光学的に求めた射影自転速度を使って惑星の 公転軸と恒星の自転軸の関係を制限する方法を考案し. 実際にいくつかの系に対して観測を行った[13, 20]. ここでは詳細は割愛するが、結果として地球型惑星を 持つような系でも巨大惑星を持つ系同様、惑星公転軸 と中心星自転軸が揃っているもの、揃っていないもの が両方存在する可能性が高い事が分かった. ただしこ の方法はロシター効果の観測に比べ系ごとに軌道傾斜 角を制限できる精度が低く、多くのサンプルを使って 統計的な議論を行う必要がある.

なお巨大惑星の進化の歴史についても実はまだ分かってない部分がある事を強調しておく. 例えば,最新の観測結果によると,複数トランジット惑星系 Kepler-56⁷において星震学を用いた解析から惑星の軌道面と中心星の自転軸がずれている可能性が高い事が報告され[12]、上で述べたルールに当てはまらないケースがある事が分かった. 実際は Kepler-56 については視線速度の観測から長周期の伴星(か巨大惑星)が外側にいる事が示唆されており,通常とは異なった進化*を惑星系が経験したのではないかと提案されている. 今後もこうした惑星軌道を調べる観測を継続することで惑星系の起源・進化の普遍性を紐解く事が出来るだろう.

今回検出されたKOI-94系での惑星同士の食は次回2026年4月1日(UT)に起こると予想される[22]. 惑星同士の重力によってそれらの軌道が変化して食が起こらなくなる可能性もあるが、次回の食が観測された場合その見え方によって惑星の軌道や質量をさらに制限する事が可能となる. いずれにしろ極めて稀に見る天体ショーとして次回が大いに期待される.

謝辞

本稿の執筆を勧めて頂き、原稿を注意深く読んでコメントを下さった共同研究者の成田憲保氏に感謝致し

ます. また大学院時代の指導教官の須藤靖先生, 図5 を提供してくれた増田賢人氏にはこの場を借りて御礼申し上げます. 本研究は日本学術振興会からの助成金をもとに行いました. 感謝致します.

参考文献

- [1] Hirano, T. et al. 2012b, ApJ 759, L36.
- [2] Lin, D. N. C. et al. 1996, Nature 380, 606.
- [3] Nagasawa, M. & Ida, S. 2011, ApJ 742, 72.
- [4] Wu, Y. et al. 2007, ApJ 670, 820.
- [5] Fabrycky, D. & Tremaine, S. 2007, ApJ 669, 1298.
- [6] Rossiter, R. A. 1924, ApJ 60, 15.
- [7] McLaughlin, D. B. 1924, ApJ 60, 22.
- [8] Winn, J. N. et al. 2005, ApJ 631, 1215.
- [9] Ohta, Y. et al. 2005, ApJ 622, 1118.
- [10] Narita, N. et al. 2007, PASJ 59, 763.
- [11] Sanchis-Ojeda, R. et al. 2012, Nature 487, 449.
- [12] Huber, D. et al. 2013, Nature 342, 331.
- [13] Hirano, T. et al., 2012a, ApJ 756, 66.
- [14] Barnes, J. W. 2009, ApJ 705, 683.
- [15] Narita, N. et al. 2009, PASJ 61, L35.
- [16] Ragozzine, D. & Holman, M. J., 2010, arXiv: 1006.3727.
- [17] Takahashi, Y. H. et al., 2013, arXiv: 1309.2559.
- [18] Winn, J. N. et al., 2010, ApJ 718, L145.
- [19] Albrecht, S. et al., 2012, ApJ 757, 18.
- [20] Hirano, T. et al. 2014, ApJ 783, 9.
- [21] Lai, D., 2014, arXiv: 1402.1907.
- [22] Masuda, K. et al., 2013, ApJ 778, 185.