

「日本惑星科学会2012年度最優秀研究者賞受賞論文」 観測による巨大惑星の軌道進化理論の検証

成田 憲保¹

2013年9月30日受領, 2013年11月3日受理.

(要旨) 太陽系外には実に多様な軌道を持った惑星が発見されている. この多様な軌道の惑星の存在を説明するため, 太陽系の枠を超えた惑星の形成と移動の理論(以下, 軌道進化理論)が提案されている. 一方で, それらの理論を実際の観測によって検証しようという試みも行われている. 本稿では, 特に巨大惑星の軌道進化理論について, 観測的検証の取り組みがどのようにして行われてきたかを筆者の研究を交えて解説し, より低質量の惑星も含めた今後の研究の展望について紹介する.

1. はじめに

1995年のベザス座51番星bの発見に始まる太陽系外惑星の発見により, 私たちの世界観は一変した. 太陽系とは全く異なる姿を持つ多様な惑星系が, 宇宙には存在することがわかったのである. このことは, 惑星科学においても非常に大きな意味を持つ. これまで太陽系に限られていたその存在を説明するべき惑星が, より多様になり飛躍的に増加したのである.

太陽系外惑星の発見は多くの難題を惑星科学者につけつけた一方で, 見方を変えれば, 太陽系外惑星は太陽系も含めた多様な惑星系形成の理論を検証する場を与えてくれたとも言える. この意味で, 太陽系外惑星は太陽系という存在をもっと大きな視点から理解する機会をもたらしてくれたと言えるだろう.

2010年より以前まで, 発見された太陽系外惑星の大多数は木星に近い質量・サイズを持つ巨大惑星であった. 近年では巨大惑星より小さくて軽い太陽系外惑星の発見も相次いでいるが, 本稿では巨大惑星の軌道進化に話題を絞って解説する. もちろん, 巨大惑星の軌道進化もまだ統一的な理解が得られているわけではないが, 全体像の解明にはまだ道半ばであることを踏まえた上で, これまでにどんな研究が行われ, どんなことがわかってきたのかと, 今後の研究の展望を紹介

したい.

2. 太陽系外惑星の軌道の多様性と軌道進化理論

2.1 太陽系の惑星の軌道と太陽系外惑星の軌道

太陽系の8つの惑星は, どれもほぼきれいな円軌道を持ち, 太陽の自転の向きと同じ向きに公転している. また, 太陽系ではスノーライン(主星のまわりで水・二酸化炭素などの揮発性物質が凝固し始める限界の位置. ここでは特に水のスノーラインを指す)の内側には岩石を主体とした地球型惑星が存在し, スノーラインの外側には木星・土星といった巨大惑星が存在している.

一方, 太陽系外ではベザス座51番星bを始めとして, 公転周期がたった数日程度の主星近傍に存在する灼熱の巨大惑星(ホットジュピター)が数多く発見されている. また, 太陽系の惑星はどれもほぼ円軌道であるのに対して, 太陽系外では大きな軌道離心率を持った惑星(エキセントリックプラネット)も多数発見されている.

これらの多様な軌道の太陽系外惑星の姿は, 私たちの太陽系の常識からすれば奇妙に見える. なぜなら, 太陽系形成を説明した京都モデル[1]では, 巨大惑星がそのような高温の場所でその場形成されるとは考えられないし, 原始惑星系円盤の中で巨大惑星が最初か

1. 国立天文台
norio.narita@nao.ac.jp

ら大きな軌道離心率を持って形成されることは困難だからである。しかし、ホットジュピターやエキセントリックプラネットは宇宙に少なからず存在しており、むしろこれらの多様な軌道を持った惑星系の姿が宇宙における真実であると言える。そのため、この惑星軌道の多様性を生み出す要因をきちんと理解できれば、惑星形成の全体像を理解していくことができるだろう。特に、巨大惑星はより小さな惑星の軌道にも大きな影響を与えることから、その軌道がどのような過程を経て形成されるのかを理解することは重要である。ホットジュピターやエキセントリックプラネットなどを含む巨大惑星の軌道進化理論はこれまでにいくつか提案されているが、本稿では話を整理するため、それを3つに大別して紹介する。

2.2 円盤相互作用モデル

まず最初は、コア集積モデルによる惑星形成の延長として、惑星と原始惑星系円盤との相互作用を考えたモデル(以下、円盤相互作用モデル)である。円盤相互作用モデルは、惑星が円盤に間隙を空けない場合のType I移動と、惑星が周囲の円盤ガスを取り込み、間隙を空ける場合のType II移動などに分けられるが、特に巨大惑星の場合は後者に対応する。このモデルでは例外的な場合を除いて、惑星は中心星へ向かって落下する方向に移動する。太陽系はこのモデルの範疇で、惑星の内側への落下がほとんど起きなかった場合に相当すると考えられる。

このモデルが预言する巨大惑星の軌道は、円盤のガスとの相互作用によって軌道離心率が減衰するため太陽系の巨大惑星のようにほぼ円軌道となり、主星と共に回転する原始惑星系円盤の中で形成されるので、惑星の公転軸も主星の自転軸とほぼ揃ったものとなる。このモデルでは、惑星の落下が主星近傍で止まったと考えれば離心率の小さなホットジュピターは説明ができる[2]。また、太陽系外惑星の軌道長半径の分布はこのモデルの预言ともほぼ一致する[3]。しかし、大きな軌道離心率を持たせることができないため、このモデルだけで全ての巨大惑星の軌道を説明することは不可能である。

2.3 惑星散乱モデル

一方で、巨大惑星に大きな軌道離心率を持たせるモ

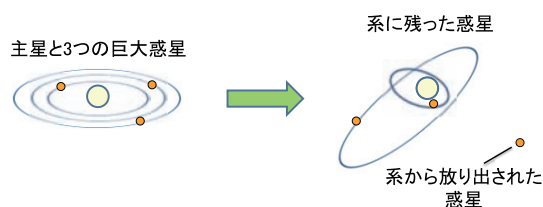


図1：惑星散乱の模式図。

デルが、以下で紹介する惑星散乱モデルと古在移動モデルである。

惑星散乱モデルは、コア集積あるいは重力不安定によって惑星系に複数の巨大惑星が形成された場合、円盤が晴れ上がった後に惑星同士が軌道不安定を起こし、重力的に散乱される状況(図1, [4,5])を考えたモデルである。

このモデルではエキセントリックプラネットが持つ大きな軌道離心率を説明することができる。さらに、内側に散乱された惑星が惑星散乱の結果、あるいはその後の別の惑星による永年効果によってだいたい0.1天文単位以下の小さな近星点距離を持った場合、主星からの潮汐力によって軌道が少しずつ円軌道化するため、最終的にホットジュピターを作り出すこともできる[6]。また、惑星散乱の際には惑星の軌道離心率だけでなく軌道傾斜角も大きく変化する可能性があり、このモデルは軌道が大きく傾いた惑星の存在も预言する。

2.4 古在移動モデル

古在移動モデルは、太陽系外惑星の軌道進化に古在機構[7]の考え方を取り入れたモデルである。古在機構とは、ある天体を公転する質量の小さな天体の軌道が、外側の別の天体からの摂動を受けて、その近点経度が90度または270度のまわりで振動(秤動)する現象である。この時、内側の天体の軌道離心率も長期的な変動を起こし、角運動量の z 成分($\sqrt{GMa(1-e^2)}\cos i$)を保ったまま時間変化する。ここで G は重力定数、 M は天体の質量、 a は軌道長半径、 e は軌道離心率、 i は軌道傾斜角である。そのため、軌道傾斜角も軌道離心率と連動して振動することになる。特にこの i が約40度をを超えていると、 e と i は大きく変化し、天体の軌道は小さな軌道離心率で大きな軌道傾斜角を持つ状態と、大きな軌道離心率で小さな軌道傾斜角を持つ状

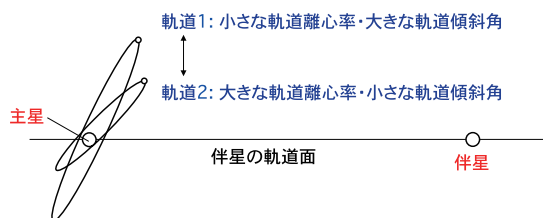


図2: 伴星による巨大惑星への古在機構の模式図。

態で連続的に変化する(図2)。

複数の巨大惑星の存在を仮定する惑星散乱モデルに対して、古在移動モデルは遠方に伴星の存在を仮定している[8,9]。古在移動モデルでは、伴星の軌道が惑星の軌道に対して約40度以上傾いていた場合、伴星が惑星に対して古在機構を引き起こし、惑星の軌道離心率と伴星の軌道面に対する惑星の軌道傾斜角が変化する。

このモデルでも、軌道離心率が大きくなって近星点距離が小さくなれば潮汐力によってホットジュピターが形成できる。そのため、惑星散乱モデルと同様にエキセントリックプラネットとホットジュピターの形成を説明することができ、さらに軌道が傾いた惑星の存在も予言する。

ただし、このモデルは伴星の質量や軌道長半径、軌道の傾きなどが、惑星系の年齢より短いタイムスケールで古在機構を起こすことができるという条件を満たさなくてはならない。とはいえ、遠方の伴星の軌道は主星の自転軸や惑星の公転軸と揃っている必然性はないので、伴星が存在してその軌道面が惑星の軌道面に対してランダムに傾いているとすれば、条件が満たされる場合も多い。

また、最初から遠方に伴星がいる場合(伴星による古在移動)だけでなく、惑星散乱によって外側の軌道に散乱された惑星が内側の惑星に古在機構を起こす場合(散乱された惑星による古在移動[10])もあり、3つ以上の惑星があって最も外側の軌道が傾いていると外側から内側へ順々に古在機構が働くという場合(連続的古在機構[11])もある。

本稿ではこのように古在機構が絡んだ移動モデルを古在移動モデルと総称するが、混乱をさけるため、以下では何による古在移動などと明記する。

3. 軌道進化理論の検証方法

多様な太陽系外惑星の発見後、2010年より前までに以上のような軌道進化理論が提案されてきた。それでは、これらの理論で考えられているような状況は、果たして宇宙で実際に起こっているのだろうか？起こっているとしたら、どのモデルのシナリオがどの程度の割合で実現しているのだろうか？それらを検証していくためには、それぞれの理論が含んでいる仮定や結果を、実際の観測によって確かめていくことが必要である。

この章では、その検証のために行われてきたいくつかの観測の方法論を紹介する。

3.1 ロシター効果

太陽系外惑星が発見されて間もない頃から視線速度によって惑星の軌道離心率は測定されてきたが、もうひとつの重要な惑星の軌道要素である軌道傾斜角は長らく測定されてこなかった。なお本稿では、惑星の公転軸が主星の自転軸に対してどれくらい傾いているかを表す量を軌道傾斜角と呼ぶこととする。一方、太陽系外惑星の軌道のパラメータとして使われる「軌道傾斜角」という言葉は、地球から見た天球面に対して惑星の軌道がどれだけ傾いているかを表す量で、ここでの定義とは異なる量なので注意されたい(図3を参照)。

この軌道傾斜角(より正確には軌道傾斜角を天球面

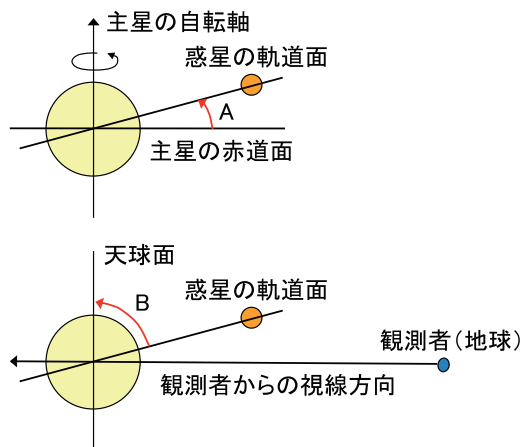


図3: 本稿での惑星の軌道傾斜角の定義(A)と、系外惑星のパラメータとしてよく使われる軌道傾斜角の定義(B)の違い。

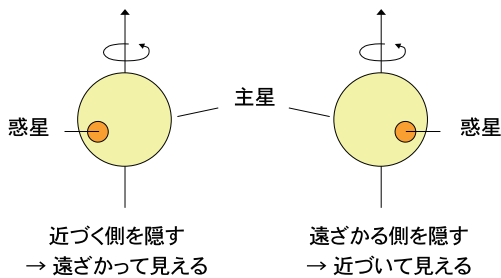
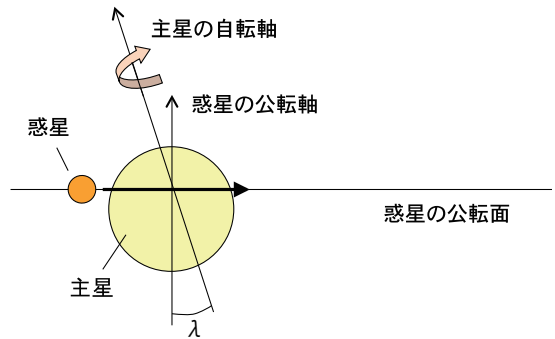


図4：ロシター効果の模式図。

図5：ロシター効果の観測量である λ の模式図。

上に射影した角度)を測定できるのが、惑星が食を起こすようなトランジット惑星系で観測されるロシター効果である。ロシター効果はもともと1924年に食連星に対して発見された効果[12,13]であり、食の最中に恒星のスペクトルの吸収線のうち観測者に対して近づく側あるいは遠ざかる側の速度成分が隠されてしまうため、視線速度の解析を行うと本来の主星の視線速度からずれてしまう現象として知られていた。トランジット惑星系の場合では、惑星がトランジットをする際に同様の現象が観測される。結果的に、主星の前を惑星が通り過ぎる時に、近づいてくる側を隠すと主星が遠ざかって見え、逆に遠ざかっている側を隠すと近づいて見えるという効果となる(図4参照)。

この効果をトランジット惑星系で観測すると、惑星の軌道傾斜角の値によって見かけ上の視線速度の変化が異なるため、トランジット中の視線速度変化を観測すれば結果として惑星の軌道傾斜角(図5の λ)を測定することができる。

ロシター効果で測定できるのは現在の惑星の軌道傾斜角だが、惑星の公転軸が惑星形成直後は主星の自転軸と揃っていたと考え、この軌道傾斜角は軌道離心率と同様に惑星の軌道進化の過程を反映している。

3.2 高コントラスト直接撮像

惑星軌道進化の理論のうち、伴星による古在移動モデルであればその惑星系には伴星が存在するはずであり、惑星散乱モデルや、惑星散乱+惑星による古在移動のモデルなどでは、内側だけでなく外側にも別の巨大惑星が存在するはずである。この理論の仮定を証明できる観測方法が高コントラスト直接撮像と、次で述

べる長周期視線速度測定である。

高コントラスト直接撮像は、望遠鏡に地球大気による光の波面の乱れを補正する補償光学と、主星の明るい光を低減して主星のまわりにある暗い天体まで観測できるようにするコロナグラフといった装置を用いて、主星に対しておよそ 10^{-6} 倍の明るさ(高いコントラスト比)の暗い天体を発見・観測する方法である。すばる望遠鏡の高コントラスト観測装置HiCIAOは、主星から1秒角ほど離れたところで 10^{-6} 程度のコントラストを出すことができるが、これは主星が年老いた太陽型星の場合、そのまわりにある褐色矮星程度の質量の天体まで発見できる感度に相当する。つまり、現在の装置では惑星系の外縁部にある別の巨大惑星そのものを発見することはできないが、主星から数十天文単位よりも外側に伴星があるかどうかについてははっきりと判別できる。

3.3 長周期視線速度測定

恒星のまわりを惑星が公転していると、惑星の存在によって主星も惑星と同じ公転周期で運動する。例えば、公転周期が約12年である木星は、約5天文単位のところであって太陽に振幅約12メートル毎秒の視線速度変動を与えている。そこで恒星の視線速度を長期にわたって測定すれば、周期の長い惑星まで発見することができる。

現在の世界の望遠鏡に搭載されている視線速度測定装置では、1メートル毎秒ほどの精度で恒星の視線速度が測定可能である。惑星がもたらす視線速度の振幅は質量に比例するため、長周期の低質量惑星の発見は困難だが、数年以上にわたって視線速度測定を行うこ

とで、だいたい10天文単位より内側の巨大惑星の有無は現在の観測装置で十分に調べることができる。

このように長周期視線速度測定は、惑星系のかなり遠方しか調べられない高コントラスト直接撮像とは相補的に、惑星系のやや外側にある巨大惑星以上の質量の天体を発見することができる。

4. 観測の取り組みとその結果

本章では、2章で紹介した惑星の軌道進化理論の観測的検証を行うことを目標として、3章で紹介した観測手法を用いて筆者がどのような研究を行ってきたのかを、世界の他のグループによる取り組みのエピソードも交えて紹介する。

4.1 ロシター効果の観測競争

太陽系外のトランジット惑星に対する最初のロシター効果の観測結果は2000年に発表された[14]。これは測光観測による最初のトランジット惑星HD209458bの発見[15]とほぼ同時に行われたもので、軌道傾斜角の決定精度は約20度とそれほど高くなかったものの、HD209458bが太陽系の惑星と同様に主星の自転と同じ向きに順行していることが明らかにされた。

さらに2004年以降、地上のトランジット惑星探索グループによって新しいトランジット惑星が発見され始めた。筆者を含めていくつかの世界の観測グループが興味を持ったのは、発見された新しいトランジット惑星たちについてもロシター効果を観測していくことだった。これは主星の自転軸に対する惑星の公転軸の傾きを多数のトランジット惑星で調べることで、その軌道傾斜角の分布がどの惑星移動理論の予言とよく一致するかを調べるためである。

そこで筆者は、新しく発見されてきたトランジット惑星のロシター効果の観測を、すばる望遠鏡の共同利用観測に提案することを開始した。その頃アメリカやヨーロッパの他の研究グループも新しいトランジット惑星のロシター効果の観測に取り組み始め、2005年頃から世界でロシター効果の観測競争が行われることになった。

4.2 逆行惑星の発見まで(の裏側)

筆者らの観測グループは、すばる望遠鏡の観測時間

を獲得し、可視の高分散分光器HDSを用いてロシター効果の観測に取り組んだ。しかし、2008年3月までに7個のトランジット惑星でロシター効果の観測を行ったものの、軌道が大きく傾いた巨大惑星は発見できていなかった。また世界の他のグループでも、2008年までに10個近くのホットジュピターやエキセントリックプラネットでロシター効果の測定が行われていたが、大きく軌道が傾いた惑星は発見されていなかった。

大きな転機となったのは2008年に発見されたXO-3bというトランジット惑星である[16]。この惑星は公転周期が約3.2日のホットジュピターである上に、軌道離心率が0.26という比較的大きな値を持つエキセントリックプラネットでもあった。そしてロシター効果の観測から、この惑星の天球面上で見た軌道傾斜角が37度程度と有意に傾いていることが明らかとなった[17,18,19]。

大きな軌道傾斜角を持つ巨大惑星が存在することが明らかになったことにより、世界の観測グループの大きな興味はもっと多くのトランジット惑星でロシター効果を測定し、その軌道傾斜角の分布を統計的に明らかにすることと、理論的には存在が予言されている主星の自転に逆行して公転する「逆行惑星」の発見に移っていった。この逆行惑星という存在は、円盤相互作用モデルで説明できないという点では大きく傾いていて順行している惑星と物理的な意味に大きな差はないが、当時はひとつのマイルストーンとして認識されていた。

その中で筆者たちのグループはすばる望遠鏡での観測を続け、8個目の観測ターゲットとして2008年5月30日にHAT-P-7bというホットジュピターのロシター効果を観測した。それまでにすばる望遠鏡で観測した7個の観測ターゲットのロシター効果は全て惑星の公転が主星の自転と揃っている形だったが、この惑星のロシター効果は図6に示すように最初に視線速度が若干マイナスになり、後半で少しプラスになるという逆行を示す形をしていた。

しかし当時、筆者を含めて共同研究グループの中では、これは恒星由来などのノイズによるものかもしれないという慎重な意見が多く、再観測の結果が出るまで論文化は見送る方針となった。また、その解析結果が出たのが2009年前期のすばる望遠鏡の観測提案の

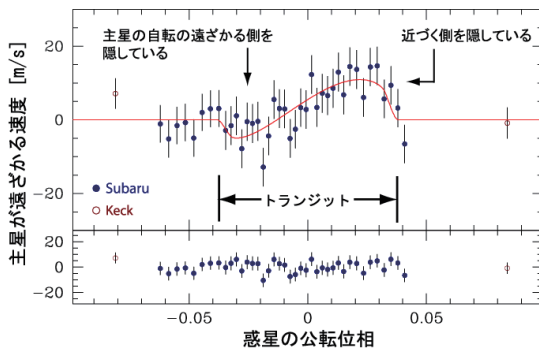


図6：すばる望遠鏡で観測されたHAT-P-7bのロシター効果([20]の図を改変)。

締め切りを過ぎた2008年9月半ばだったこともあり、共同研究者のWinn氏に解析結果を送り、独立な観測をしてはどうかと提案した。その結果、Winn氏らはハワイ大学時間で2009年前期のすばる望遠鏡の観測時間を獲得し(ハワイ大学時間は観測提案の締め切りが10月1日なので間に合った)、2009年7月1日にHAT-P-7bのロシター効果の再観測が行われた。

Winn氏からその観測結果の連絡があったのは、2009年7月31日(金)だった。メールの内容は「この惑星は逆行しているかもしれない。できれば来週には論文を投稿したい。」というのである。そこでWinn氏や日本の共同研究者との調整の結果、HAT-P-7bのロシター効果の論文を日本とアメリカのグループで2本に分けることとなり、7月31日から論文執筆を開始した。8月3日(月)にはWinn氏からアメリカグループの完成形になった初稿が届いて焦りつつも、日本グループも論文執筆を急ぎ、8月5日(水)には両グループがそれぞれ論文を投稿することができた。この短時間での論文作成のため、解析やモデル化、英文の校正などをすぐに行っていただいた共著者の佐藤文衛氏、平野照幸氏、田村元秀氏には深く感謝したい。

しかしこれで無事に世界初の逆行惑星の発見となったかという、実はそうではなく、この後でもうひとつ波乱があった。Winn氏らが投稿していた論文が、イギリスの科学雑誌に不掲載の判断をされ、その翌日にイギリスのグループが別の逆行惑星 WASP-17b の発見を arXiv に掲載したのである。そこで Winn 氏らは別の科学雑誌に論文を再投稿し、筆者と Winn 氏も相談の上、その日のぴったり同じ時刻に arXiv にお互いの論文を投稿することとした。しかし折しも筆者は

シンガポールで開催されていた Asia Oceania Geosciences Society の会議に参加しており、インターネットの回線速度が予想外に遅かったため、同時に投稿したはずではあるもののアップロードに時間がかかってしまった。筆者らの論文の arXiv の番号が Winn 氏らの論文より 1 だけ大きい(時間的に遅い)のはこのためである。

以上のようにいろいろ波乱はあったものの、筆者らの論文[20]は2009年8月27日に、Winn氏らの論文[21]は2009年8月21日に受理され、どちらも2009年10月に出版された。一方、イギリスグループの論文[22]は2009年11月30日に受理され、2010年1月に出版された。このように逆行惑星の発見とその発表は、ほぼ同時期に日米欧の3つのグループによって行われた(最初の観測と論文投稿は日本、最初の論文受理と出版はアメリカ、最初の arXiv 掲載はイギリスが最も早い)。これが最初の逆行惑星の発見時のエピソードである。

4.3 その外側には何があるのか?

HAT-P-7b などの逆行軌道の発見によって、宇宙には逆行惑星も実在することが明らかとなった。これはエキセントリックプラネットの存在と合わせて、惑星散乱や古在移動のような軌道進化が宇宙で実際に起きていることの強い証拠である。しかし、ロシター効果の観測結果や軌道離心率の情報だけではその惑星が惑星散乱で軌道進化してできたのか、古在移動で軌道進化してできたのかはわからない。軌道進化の仕方をもっと詳しく判別して、この惑星系がどのようにしてできたのかを明らかにするためには、外側に何があるのかを明らかにしなくてはならない。

そこで筆者らは HAT-P-7b の軌道進化の仕組みを解明することに取り組んだ。ちょうど筆者らが HAT-P-7b の逆行軌道を発表した2009年は、すばる望遠鏡に高コントラスト直接撮像装置である HiCIAO が搭載され、120 夜に渡る直接撮像観測を行う SEEDS プロジェクトが始まった年であった。そこでその試験観測の時間を使わせていただき、2009年8月6日に HAT-P-7b の観測を行うことができた。そこで見つかった伴星の可能性のある候補天体については、同じ固有運動(天球面上での移動)をしているかどうかを確認するため、2012年にも HiCIAO での再観測を行った。

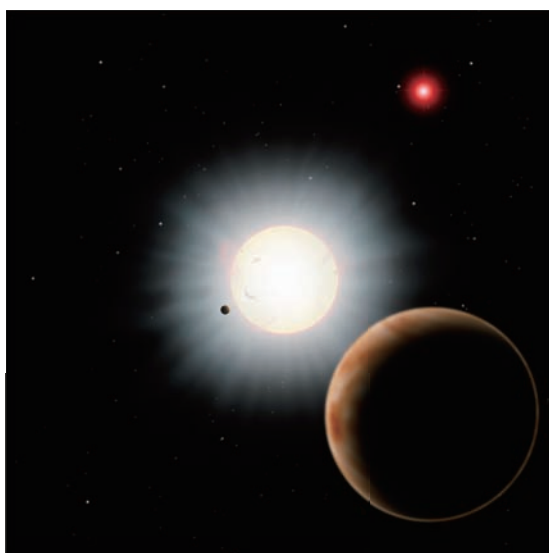


図7: すばる望遠鏡が明らかにしたHAT-P-7のイメージ図(クレジット: 国立天文台)。

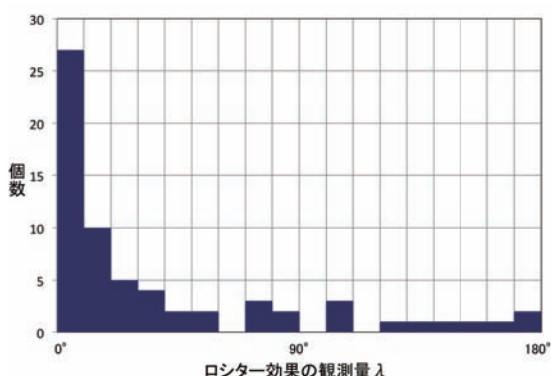


図8: これまでにロシター効果で測定された巨大惑星の λ の分布。

また、3章で紹介したように惑星系の遠方を探査できる直接撮像とは相補的に、惑星系のやや外側の巨大惑星の存在を調べるには長周期視線速度測定が必要である。そこで筆者らはHAT-P-7の視線速度を2010年にも測定し、長周期の変化がないかどうかを調べた。

この結果、HiCIAOでの直接撮像観測では外側にひとつの赤色矮星の伴星が見つかり、長周期視線速度測定では別の巨大惑星の存在が確認された[23]。このことから、惑星系HAT-P-7は約0.04天文単位という主星のすぐそばに逆行するホットジュピターを持ち、約5天文単位より外側に別の巨大惑星、さらに約1500天文単位の距離に赤色矮星の伴星を持つという姿をして

いることがわかった(図7参照)。このように視線速度の観測と直接撮像の観測によって、ひとつの逆行惑星系の内側から外側まで(巨大惑星以上の質量の天体だけではあるが)を明らかにすることができたのは、これが初めてである。

では結局この惑星系がどのようにしてできたかを考えてみよう。まずこの惑星系で初期に2つの巨大惑星が惑星散乱を起こしたかどうかはこれまでの情報では判別できない。しかし、外側の伴星と外側の巨大惑星の軌道のなす角度が最初から、あるいは惑星散乱によって約40度を超えて古在機構の条件を満たした場合、それによって傾いた外側の巨大惑星がさらに内側のHAT-P-7bに対して古在移動を引き起こせば、逆行軌道を生み出すことが可能である。あるいは、惑星散乱でいきなりHAT-P-7bが逆行軌道になった可能性も考えられるが、その場合も外側の巨大惑星からの古在機構を受けて現在の軌道を形成・維持したと考えられる。このように少なくともHAT-P-7というひとつの惑星系では、古在移動が惑星軌道進化の重要な形成要因になっていたのではないかと考えられる。

4.4 これまでの観測結果

前節ではHAT-P-7というひとつの惑星系について詳細に述べたが、ここではロシター効果と直接撮像に関する全体的な観測結果について紹介したい。

図8は2013年10月までにロシター効果で測定された巨大惑星の軌道傾斜角の分布のヒストグラムである。これまでにロシター効果の観測は約60個の巨大惑星で行われ、その約3分の1から2分の1が有意に大きな傾きを持っていることがわかってきた。その中には、逆行惑星も10個近く発見されており、逆行惑星系も決して希少な存在ではないことが明らかとなっている。

一方、直接撮像観測についてはまだSEEDSプロジェクトの観測が完了していないため暫定的な結果になるが、これまでにわかってきたことを紹介する。まず、エキセントリックプラネットを持つ惑星系は伴星があるものもないものもあり、伴星を持つ確率は太陽系近傍の恒星が伴星を持つ確率とあまり変わらないようである。そして、伴星がないエキセントリックプラネットが少なからず存在しているということは、惑星散乱による軌道進化が多く起こっている可能性が窺える。

一方で、軌道傾斜角が有意に傾いている惑星系の外

側では伴星候補が多く見つかっている。これはもしかしたら、軌道が傾いた惑星系では伴星の存在確率が高いことを示しているのかもしれない。ただし、これらの伴星候補はHAT-P-7で行われたような固有運動の確認がまだなされていないので、今後の追観測によって本物の伴星かどうか確認していき、それから軌道進化を議論する必要がある。このSEEDSプロジェクトの観測結果は、今後の論文での発表をご期待いただきたい。

4.5 新しい理論の展開

ロシター効果の観測で測定された軌道傾斜角の分布の考察は、逆に新たな理論的研究の発展を促した。

図8を見ると、巨大惑星の軌道傾斜角はほとんど傾いていない0度のあたりに大きなピークがあり、そこから逆行軌道の180度までまんべんなく分布していることがわかる。しかし、円盤相互作用だけでは有意に傾いた軌道の惑星は形成できず、惑星散乱や古在移動のモデルでは0度のまわりにピークはできないため、まず円盤相互作用、惑星散乱、古在移動の単一のモデルでは説明ができないことがわかる。これまでの分布からは、特に円盤相互作用と惑星散乱が主な軌道進化の仕方ではないかという指摘がなされている[24]。この点からすると、伴星と別の巨大惑星が存在して古在移動が起こった可能性が高いHAT-P-7は例外的な惑星系なのかもしれない。

また、この軌道傾斜角の分布と恒星のさまざまなパラメータとの相関を取ってみると、主星の温度が6250 Kより高い場合には有意に傾いていることが多いという指摘もなされた[25]。これは主星表面に対流層が発達している6250Kより温度が低い恒星では、惑星が潮汐力によって主星(の表面)の自転を惑星の公転に揃えてしまっているのではないかと仮説が立てられている。しかしこの理論では、惑星のQ値によっては惑星が主星に落下してしまう時間スケールが典型的な惑星系の年齢(数十億年)より短く、主星の自転軸が揃う前に惑星が主星に落下してしまうのではないかと言われており、まだ決着が着いていない[25]。

一方で、それ以外にもロシター効果の観測結果を解釈する上でいくつかの理論的な問題提起が行われてきた。例えば、恒星内部の重力波(流体力学で出てくるgravity wave)のことで、一般相対性理論から予言さ

れるgravitational waveではない)によって惑星とは無関係に自転軸が傾くのではないか[26]、とか、そもそも原始惑星系円盤の軸と主星の自転軸は揃っていないのではないかと[27]、などである。

これらは惑星の軌道傾斜角の分布という新しい観測の結果が新しい理論の問題を生み出した例で、これらはまた観測によって検証する必要がある。具体的には、ケプラー宇宙望遠鏡で発見されている複数トランジット惑星系で主星の自転軸と複数の惑星の軌道傾斜角の関係を調べて、もし惑星同士の軌道の傾きはほぼ一緒なのに主星の自転軸だけが傾いているような場合があれば、主星の自転軸がもともと傾いていたのではないかという理論の観測的根拠となるだろう。あるいは、生まれたての星から噴き出すジェットと、その星のまわりの原始惑星系円盤のなす角度を測定できれば、直接的に初期の原始惑星系円盤と主星の自転軸のなす角度を調べることができるだろう。

このように新しい理論の検証のためにまだやるべき観測的研究は多く、まだ全容の解明への道のりは長いものの、惑星の軌道傾斜角の研究は最先端の観測と理論がせめぎあっている場となっている。

5. その他の取り組みと残された課題

3章と4章では特に筆者が取り組んできた観測手法を中心に紹介したが、本章では観測による惑星軌道進化の検証のために行われてきたその他の観測手法や、残されている課題について述べる。

5.1 別の方法論の取り組み

観測による惑星軌道進化の検証方法としてももうひとつ知られているのが、トランジット周期変動の測定である。これは、トランジット惑星系のまわりに別の惑星が存在しなければ基本的にトランジットの周期が一定になるのに対し、近く(特に共鳴軌道)に別の惑星が存在するとトランジットの周期が変動する現象として知られている[28,29]。この観測からわかってきたことは、ホットジュピター(公転周期が数日以内)のまわりには別の惑星が存在しないらしいということである。一方、公転周期が10日程度以上の巨大惑星になると、ケプラー宇宙望遠鏡の観測でトランジット周期変動が発見された例も多く[30]、ホットジュピターとやや公

転周期が長い巨大惑星では軌道進化の仕方が異なる可能性を示している。特にホットジュピターが円盤相互作用で形成されたと考えると外側の共鳴軌道などに別の惑星を伴ってもよいはずなので、この傾向が本当なのかさらに検証が必要だろう。

またこの傾向に関連して、まだ統計的に十分に有意ではないものの、金属量の大きな主星の惑星系では大離心率で近星点が主星に近く、後にホットジュピターに軌道進化するような巨大惑星が多いという傾向が指摘されている[31]。これは定性的には、金属量が大きな惑星系では巨大惑星が多く形成されるので惑星散乱による軌道進化がより多く起こっていると説明できる。逆に金属量が小さな惑星系では、やや公転周期が長くて離心率の小さな巨大惑星が多いことも指摘されており、これは巨大惑星が少ない惑星系では円盤相互作用モデルが起こっていると定性的に説明できる[31]。この傾向はトランジット周期変動の観測結果の示唆とも矛盾しないが、これもまだ統計的に十分有意な水準ではないので、今後検証が進められていくだろう。

5.2 より小さな惑星へ

これまでは巨大惑星を対象とした研究が中心であったが、最近ではロシター効果とはまた違った新しい方法で、より小さな惑星の軌道傾斜角を測定しようという試みもなされている。例えば、(a)主星の黒点を惑星が隠す現象を連続的に観測することで、惑星の公転が主星の自転と揃っているかどうかを調べたり[32]、(b)トランジット惑星(惑星の公転軸は天球面と揃っている)で主星の自転周期と見かけの自転速度を求めることで、主星の自転軸が天球面から傾いていないかを調べる[33]、といった方法である。これらの方法の他に、今後は赤外線による視線速度観測装置が登場すれば、赤色矮星のまわりのより小さな惑星でも視線速度やロシター効果の測定が可能となる。

これらの方法によってより小さな惑星の質量、軌道離心率、軌道傾斜角などの分布がどのようになっているのかを調べていくことは、これまで巨大惑星に対して行われてきたのと同様に、低質量惑星の軌道進化が系外惑星系でどのように起こっているのかを知る手がかりとなる。巨大惑星だけでなく低質量の惑星の軌道進化の仕方も明らかにすることができれば、それは惑星系形成の全体像を理解することにつながるだろう。

そのため、今後は低質量惑星の軌道進化的理論と観測の結果を比較していくことが、惑星軌道進化の研究における重要な課題となると考えられる。

5.3 より外側の惑星へ

現在のすばる望遠鏡のHiCIAOでは、惑星系の外側にある伴星は発見することができるが、恒星より質量の小さな巨大惑星を発見するのは難しい。しかし高コントラスト直接撮像装置の性能が向上すれば、巨大惑星程度の質量の天体まで発見することが可能になると期待されている。これが実現して惑星系の外側にある木星のような巨大惑星まで発見できるようになれば、その惑星系の巨大惑星の数や伴星の有無を含めてその惑星系の全体像を明らかにすることができる。そうなれば、HAT-P-7で行われたようにそれぞれの惑星系の軌道進化の仕方を詳細に議論できるようになるだろう。

6. これまでの理解と今後の展望

本稿ではこれまでに行われてきた巨大惑星の軌道進化的理論の観測的検証について紹介してきた。

これまでの研究によって明らかとなった惑星の軌道傾斜角の分布や伴星の有無、またトランジット周期変動や主星の金属量との相関などの情報を合わせると、あくまで個人的な印象としては、円盤相互作用モデルと惑星散乱(それに伴う外側の惑星による古在移動を含む)が多くの惑星系での軌道進化を占め、伴星を持つ系では伴星による古在移動も少ない割合だが実際に起こっているというのが現在の印象である。この印象が正しいかどうかを、複数惑星系における軌道傾斜角の測定、次世代の観測装置による高コントラスト直接撮像、より精度の高い長周期の視線速度測定などの様々な方法を駆使して検証していくことが必要である。

また、5章で述べたように今後はさらに小さな惑星や外側の惑星の軌道分布も明らかになっていくと考えられる。太陽系外惑星系でも太陽系のように内側から外側まで、そして低質量惑星から巨大惑星に至るまでの軌道分布が明らかになってくれば、太陽系のような惑星の分布が宇宙の中でよくあるタイプなのか、希少なのかを知ることができ、惑星の軌道進化の全体像に迫ることができるだろう。

7. さいごに

以上で紹介してきたように、太陽系外惑星はこれまで太陽系の研究をもとに培われてきた惑星形成・移動理論を観測的に検証する場を与えてくれた。何度も言うようにこの研究はまだ道半ばであるが、今後の太陽系外惑星系の観測的研究と理論的研究の進展によって、より大きな視点から惑星形成と軌道の進化を理解していくことができるだろう。

また、本稿では特に惑星軌道進化の研究に焦点をあててきたが、同じようにこれまでの太陽系の惑星の知識が太陽系外惑星の研究でも活かされるような場が、これからの系外惑星大気の研究にもあるはずである。特に今後はより小さな太陽系外惑星の軌道進化や大気の観測的研究も進んでいくと考えられる。その際には、現在太陽系を中心とした研究をされている方々にも、ぜひその検証の場として、太陽系外惑星へと目を向けていただければ幸いに思う。

謝 辞

本稿は日本惑星科学会2012年度最優秀研究者賞受賞論文として執筆させていただきました。今回の受賞に際し、私を推薦してくださった生駒大洋准教授に厚くお礼申し上げます。また、本稿の執筆にあたり助言をいただいた堀安範氏に感謝いたします。本稿で紹介させていただいた筆者の研究は、どれも多くの方々との共同研究であり、その協力なくしては成し得なかったものです。全ての方のお名前を列举できず申し訳ありませんが、この場を借りて全ての共同研究者の皆様に深く感謝いたします。最後に、本稿で紹介した中の多くの重要な研究が日本人の研究者によってなされていることに鑑み、今後もこの分野の研究が日本で発展していくことを期待しております。

参考文献

- [1] Hayashi, C. et al., 1985, in *Protostars and Planets II*, 1100.
- [2] Lin, D. N. C. et al., 1996, *Nature* 380, 606.
- [3] Ida, S. and Lin, D. N. C., 2004, *ApJ* 616, 567.
- [4] Rasio, F. A. and Ford, E. B., 1996, *Science* 274, 954.
- [5] Marzari, F. and Weidenschilling, S. J., 2002, *Icarus* 156, 570.
- [6] Wu, Y. and Lithwick, Y., 2011, *ApJ* 735, 109.
- [7] Kozai, Y., 1962, *AJ* 67, 591.
- [8] Wu, Y. and Murray, N., 2003, *ApJ* 589, 605.
- [9] Fabrycky, D. and Tremaine, S., 2007, *ApJ* 669, 1298.
- [10] Nagasawa, M. et al., 2008, *ApJ* 678, 498.
- [11] Kita, Y. et al., 2010, *Astrobiology* 10, 733.
- [12] Rossiter, R. A., 1924, *ApJ* 60, 15.
- [13] McLaughlin, D. B., 1924, *ApJ* 60, 22.
- [14] Queloz, D. et al., 2000, *A&A* 359, L13.
- [15] Charbonneau, D. et al., 2000, *ApJ* 529, L45.
- [16] Johns-Krull, C. M. et al., 2008, *ApJ* 677, 657.
- [17] Hébrard, G. et al., 2008, *A&A* 488, 763.
- [18] Winn, J. N. et al., 2009, *ApJ* 700, 302.
- [19] Hirano, T. et al., 2011, *PASJ* 63, L57.
- [20] Narita, N., et al., 2009, *PASJ* 61, L35.
- [21] Winn, J. N., et al., 2009, *ApJ* 703, L99.
- [22] Anderson, D. R. et al., 2010, *ApJ* 709, 159.
- [23] Narita, N. et al., 2012, *PASJ* 64, L7.
- [24] Morton, T. D. and Johnson, J. A., 2011, *ApJ* 729, 138.
- [25] Winn, J. N. et al., 2010, *ApJ* 718, L145.
- [26] Rogers, T. M. et al., 2012, *ApJ* 758, L6.
- [27] Lai, D. et al., 2011, *MNRAS* 412, 2790.
- [28] Holman, M. J. and Murray, N. W., 2005, *Science* 307, 1288.
- [29] Agol, E. et al., 2005, *MNRAS* 359, 567.
- [30] Ford, E. B. et al., 2011, *ApJS* 197, 2.
- [31] Dawson, R. I. and Murray-Clay, R. A., 2013, *ApJ* 767, L24.
- [32] Sanchis-Ojeda, R. and Winn, J. N., 2011, *ApJ* 743, 61.
- [33] Hirano, T. et al., 2012, *ApJ* 756, 66.