

論文の内容の要旨

Exploring the Architecture of Transiting Exoplanetary Systems with High-Precision Photometry (高精度測光観測によるトランジット系外惑星系の探究)

氏名 増田 賢人

太陽系の8つの惑星の公転軸は、太陽の自転軸と 7° 以内で揃っている。この事実は、太陽系の惑星が、太陽の周囲を回転するガスとダスト粒子の円盤（原始惑星系円盤）から形成されたとする惑星形成の標準シナリオの根幹をなすものである。

ところが、このような整然とした構造は、あらゆる惑星系に共通のものではない。1995年以来、約3000個もの**太陽系外惑星**（太陽以外の恒星を公転する惑星；以下では系外惑星と呼ぶ）が発見され、その多くは太陽系の惑星と大きく異なる軌道や物理的性質をもつことが示されてきた。これらのうち、**ホットジュピター**と呼ばれるタイプの惑星（主星の周囲を10日以下という非常に短い周期で公転する、木星のような巨大ガス惑星）に対しては、惑星が主星の前面を通過

（トランジット）する際に主星の視線速度に生じるアノマリー（Rossiter-McLaughlin 効果；以下**RM効果**）を分光観測によって測定することで、惑星の公転軸と主星の自転軸がなす角（**スピン軌道角**；図1の ψ ）を天球面に射影したもの（図1の λ ）が推定されている。その結果、これまで λ の測定が行われた約80のホットジュピター系のうち、約3割で公転軸と自転軸が有意にずれていることが明らかとなった（図2）。

この事実は、ホットジュピターが太陽系の木星と同様に主星から遠方で形成されたのち、惑星どうしの重力散乱のような軌道を大きく変化させ

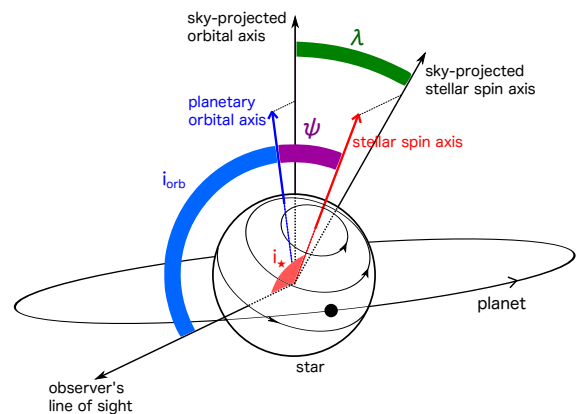


図1：スピン軌道角 ψ の定義と、その天球面への射影 λ 、主星の自転軸傾斜角 i_\star 、および惑星の軌道傾斜角 i_{orb} との関係。トランジット惑星系では i_{orb} はほぼ 90° であるため、 λ と i_\star を求めれば ψ が決定できる。

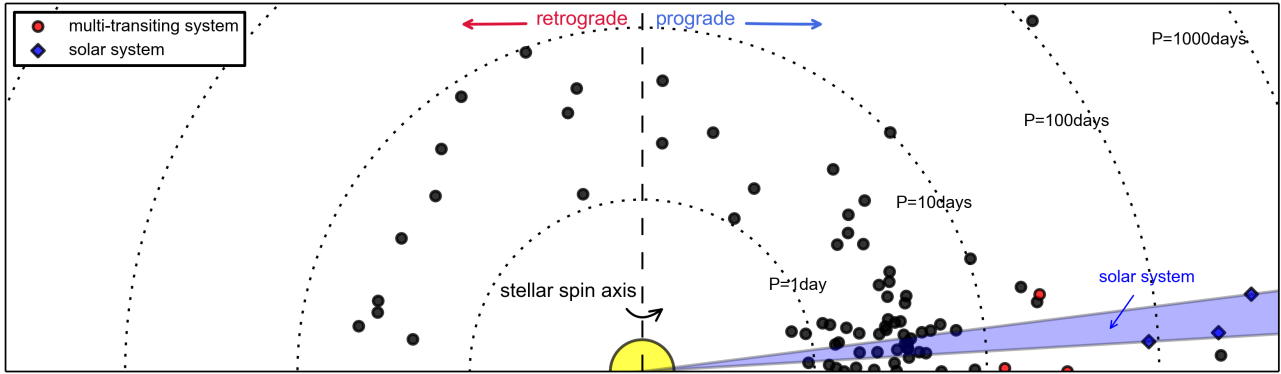


図2：系外惑星の軌道の向きの観測結果の要約。各々の点がひとつの惑星に対応し、その位置は公転軌道が紙面（ここでは天球面）を手前から奥へ横切る位置を示す。原点（主星）からの距離は公転周期に対応する。太陽系の惑星の存在範囲は青い影で示した。主星は紙面左から右へ自転しているため、中央の点線の右側の惑星は主星の自転と同じ向き、左側の惑星は逆向きに公転している。

る力学的過程を経て主星の近傍に**軌道移動**した結果として解釈されてきた。一方で、太陽系で自転軸と公転軸が揃っているのは単なる偶然で、原始惑星系円盤の軸と主星の自転軸は一般には揃っていないというシナリオも、そのようなずれを生じる具体的な物理過程とともに提案されている。この場合、系外惑星の公転軸と主星自転軸のずれは、ホットジュピターの軌道移動とは無関係な単なる初期条件の反映であるということになる。実際、 λ の測定は現状ほぼホットジュピターに限られているため、ずれが本当にホットジュピターに特有の性質であるか否かは明らかではない。

これら2つの可能性を区別するためには、ホットジュピター以外の惑星におけるスピン軌道角の情報が有用である。もしホットジュピターのみが大きなスピン軌道角をもつのであれば、その要因がホットジュピターの形成に特有の過程（すなわち軌道移動）である可能性は高くなる。一方で、もしずれがあらゆる惑星系で普遍的な特徴であれば、その起源は軌道移動とは無関係な初期条件と考えるのが自然である。ところが、ホットジュピターよりも半径の小さい、あるいは公転周期の長い惑星に対しては、技術的な理由からRM効果の観測が困難である。従って、このような検証を行うためには、従来のRM効果に代わる新たなスピン軌道角の測定手法が必要となる。

そこで本学位論文では、スピン軌道角の測定をより幅広い性質をもつ惑星系に拡張するための方法論の確立とその実践に取り組む。特に、NASAの**ケプラー宇宙望遠鏡**によって約4年間にわたって得られた多数のトランジット惑星系に対する高精度の測光データを最大限活用し、従来の分光観測と相補的な解析手法の開拓に注力する。また、スピン軌道角の測定とは異なる観点から惑星系の過去の力学的事象の痕跡を探る一環として、階層的な構造をもつ3重連星系の精細な構造決定も行う。その具体的な内容と成果は以下の通りである。

(A) 星震学とトランジット光度曲線およびRM効果の組み合わせによる真のスピン軌道角の推定

従来のRM効果で得られるのは、スピン軌道角の天球面への射影 λ のみであり、その解釈は場合によって大きな不定性を伴う。そこで我々は、RM効果とトランジットによる減光曲線を、**星震学**（恒星の振動による光度変動のスペクトル解析）から得られる主星の自転軸傾斜角（図1の i_\star ）の情報と組み合わせることで、射影ではない真のスピン軌道角 ψ を推定する方法論を確立した。さらに、その手法を HAT-P-7（ホットジュピター系）と Kepler-25（軌道面の揃った2つの海王星サイズ惑星を有する系）という実際の惑星系に初めて適用した。その結果、射影成分 λ のみの測定とは質的に異なる構造を見出すとともに、上記のような同時解析によってスピン軌道角以外の系の性質（軌道離心率など）についてもより精密な制限が得られることを示した。

例えば HAT-P-7 では、 λ の測定からは惑星の公転と主星の自転がほぼ真逆 ($\lambda \sim 180^\circ$) であることが示唆されていたが、我々の解析からはむしろ両者の関係は直交に近い ($\psi \sim 120^\circ$) ことが明らかとなった (図3左)。前者のような公転軌道は、たとえ惑星散乱のような力学的な過程を伴う軌道移動のシナリオでも形成が困難であるとされている。従って我々の結果は、力学的な軌道移動が HAT-P-7 系の形成の自然な説明となりうることを示すものである。

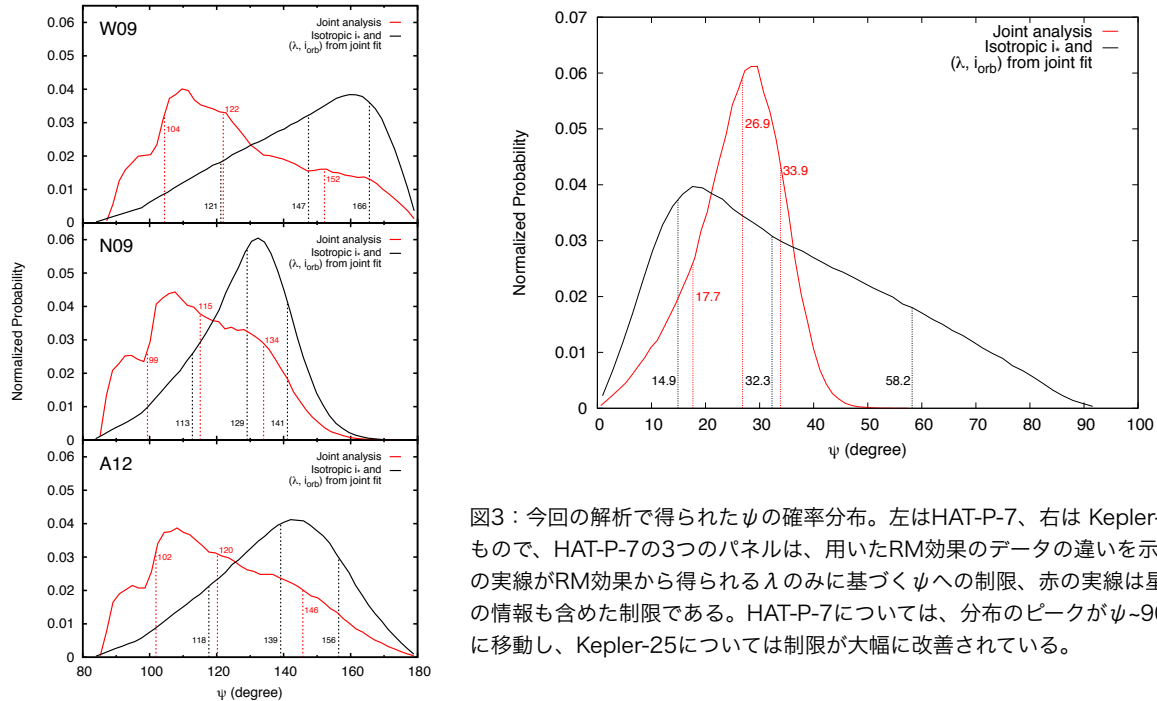


図3：今回の解析で得られた ψ の確率分布。左はHAT-P-7、右は Kepler-25 のもので、HAT-P-7の3つのパネルは、用いたRM効果のデータの違いを示す。黒の実線がRM効果から得られる λ のみに基づく ψ への制限、赤の実線は星震学の情報も含めた制限である。HAT-P-7については、分布のピークが $\psi \sim 90^\circ$ の側に移動し、Kepler-25については制限が大幅に改善されている。

(B) 重力減光を用いた高速自転星まわりの惑星のスピン軌道角測定

星が高速で自転していると、自転の遠心力の効果によって赤道付近が極付近と比べて暗くなる（重力減光）。このような重力減光を示す星を惑星がトランジットすると、トランジットによる減光曲線は主星の極と惑星の公転軌道の位置関係に応じた変形を示すため、その形状からスピン軌道角を推定することができる。この手法は、RM効果の観測が困難な高速自転星まわりの惑星で、公転周期の長いものにも適用できるため、スピン軌道角の測定対象を広げるうえで特に有用である。

この手法は Kepler-13A というホットジュピター系に適用されていたが、その結果はRM効果に類似の分光観測による測定と食い違うことが知られていた。そこで我々は、上記の研究以降にケプラーによって取得されたデータおよび分光観測のデータをすべて含め、Kepler-13A 系の再解析を行った (図4)。その結果、上記の矛盾が主星の輝度分布の不定性を記述するパラメータの不定性を正しく取り入れることで解消することを示すと同時に、トランジット減光曲線と分光観測

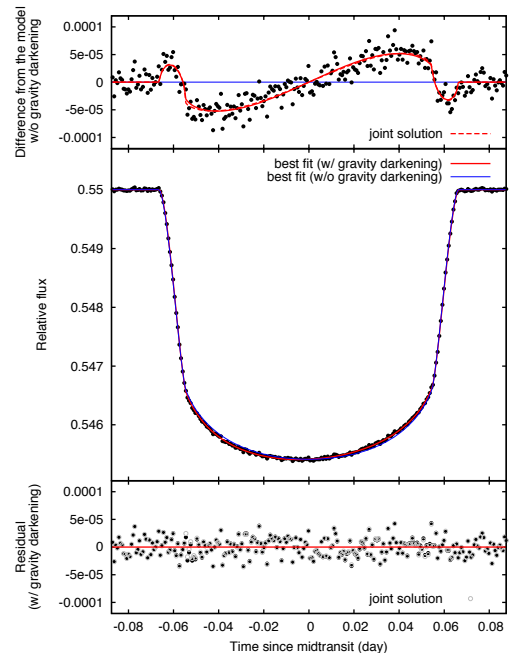


図4：Kepler-13Aのトランジット減光曲線の解析。中央のパネルは観測された減光曲線のデータ（黒点）とモデル（実線）を示す。上段はデータを重力減光を考慮せずにフィットしたときの残差であり、非対称な変形が生じていることがわかる。下段は重力減光を考慮したモデルの残差で、非対称性がよく説明されていることがわかる。

の結果を組み合わせ、スピン軌道角 ψ へのより良い制限を与えた。さらに、主星の高速自転による変形に起因する惑星軌道の歳差運動がトランジット減光曲線に及ぼす影響の力学的なモデル化と今後の軌道進化の予言を行い、将来の追観測によって我々の得た新たな解の検証が可能であることも示した。

また、同様な手法を (A) で解析した HAT-P-7 のトランジット減光曲線において発見した変形に適用し、(A) の手法で得られた結果と整合的な値が得られることを示した。これらの研究で確立した手続きは、今後ケプラーのデータを用いた重力減光の系統的解析を行い、ホットジュピター以外のスピン軌道角分布を明らかにする基盤となるものである。

(C) 3重食連星系 KIC 6543674 の測光データによる構造決定

KIC 6543674 は、公転周期2.4日の近接した食連星と、その周囲を周期1100日で公転する第3の恒星からなる階層的な3重連星系である。我々は、ケプラーによって得られたこの天体の光度曲線から、第3の恒星が内側の連星双方と食を起こしているのを発見した (図5)。さらに、3つの星の食の光度曲線と、これらの星の重力相互作用が食の時刻に及ぼす影響の力学的なモデルを組み合わせることで、3つの星の軌道および質量・半径を含む物理的性質を測光データのみから精密に推定した。通常、このような長周期の天体の特徴づけを行うには、公転周期と同程度の期間の地上観測が必要となることを考えると、ここで示した手法はこのような階層的な系の性質を明らかにするうえで極めて効率のよいものであるといえる。

また、力学的な過程によるホットジュピターの軌道移動の過程では、最終的にホットジュピターが形成されるか否かに関わらず、上記のような階層的な構造をもつ2惑星系が生じると考えられている。従って、このような系が同定され、詳細な特徴づけが行われれば、ホットジュピターの力学的な軌道移動の直接的な証拠となりうる。今回の解析は、測光データを用いてそのような惑星系の探索・解析を行う雛型ともなるものであり、スピン軌道角とは異なる観点からホットジュピターの力学進化に迫る手がかりを与える。

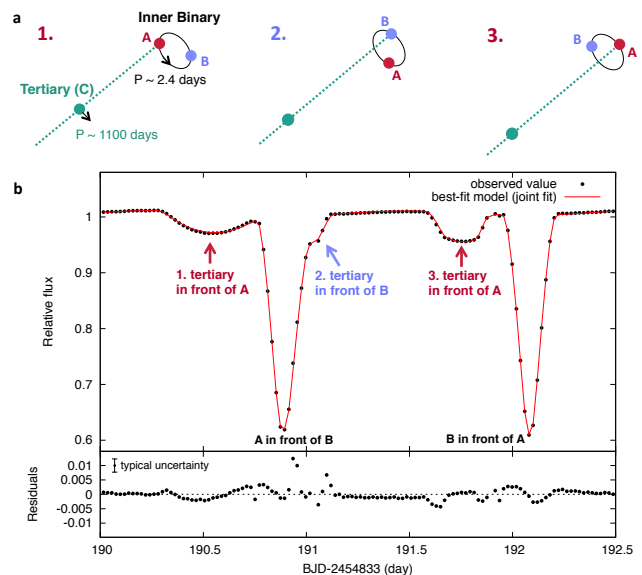


図5 : KIC 6543674系で発見した第3天体による食の光度曲線 (パネルb) と、その最中の系の配置の模式図 (パネルa)。

以上の研究は、ホットジュピターとは性質の異なる多様な惑星系にスピン軌道角の測定を拡張することで、ホットジュピターの真の特異性を明らかにするとともに、一般の惑星系の基本的な性質のひとつとしてスピン軌道角を位置付けることをも可能にする。加えてこれらの多様な解析は、高精度測光データのもつ新たな可能性を切り拓き、ケプラーに引き続き計画されている将来の衛星データの活用にも資するものである。