

論文の内容の要旨

Stellar Inclinations from Asteroseismology and their Implications for Spin-Orbit Angles in Exoplanetary Systems

(星震学を応用した恒星の自転傾斜角測定と
太陽系外惑星系のスピン軌道傾斜角に与える示唆)

氏名 上赤 翔也

太陽系内の惑星とは異なり、太陽以外の恒星を公転する惑星(太陽系外惑星)の中には、主星の赤道面に対して大きく傾いた軌道を持つものが見つかっている。このような観測された主星の自転軸と惑星の公転軸の間の“ずれ”はスピン軌道傾斜角 ψ として定義され、しばしば議論される(図1)。このような軌道の傾きの起源は現在の標準的な惑星形成・進化モデルでは説明できないため、それを解決するため複数の有力なモデルが提示されてきた。例として、惑星の軌道の傾きは惑星が誕生する前の主星や原始惑星系円盤の傾きに由来するとする説や、惑星が誕生した後の軌道の力学的進化に起因するとする説などがある。モデルに応じて予想されるスピン軌道傾斜角 ψ の分布は異なるため、観測から統計的に ψ の値の分布を決定することは惑星の形成や進化の歴史を紐解く上で重要である。しかしながら、観測的な制約により ψ の値の測定はこれまで主に海王星より大きな惑星(近接巨大ガス惑星ホットジュピターに代表される)に限定されてきた。

CoRoT や *Kepler* といった宇宙望遠鏡の成功を受け、星震学は恒星の音響振動の解析を通じて恒星の特徴付けを行う手段として確立した(図2)。星震学は質量や半径、年齢といった恒星の基礎物理量を正確に与えるため、惑星系の特徴を明らかにする上でも有用である。加えて、星震学は観測者に対する恒星の自転軸の傾き (i_*) を測ることで、惑星の軌道の傾きの推定を可能とする(図1)。観測的に恒星の音響振動が確認されるかどうかは惑星のサイズとは無関係のため、星震学を応用することで巨大惑星のみならず比較的小型の惑星もついても軌道の傾きを測定できると期待される。また、星震学は恒星の自転傾斜角に加えて恒星の自転周期 (P_{rot}) も他の観測とは独立に測定することができる。

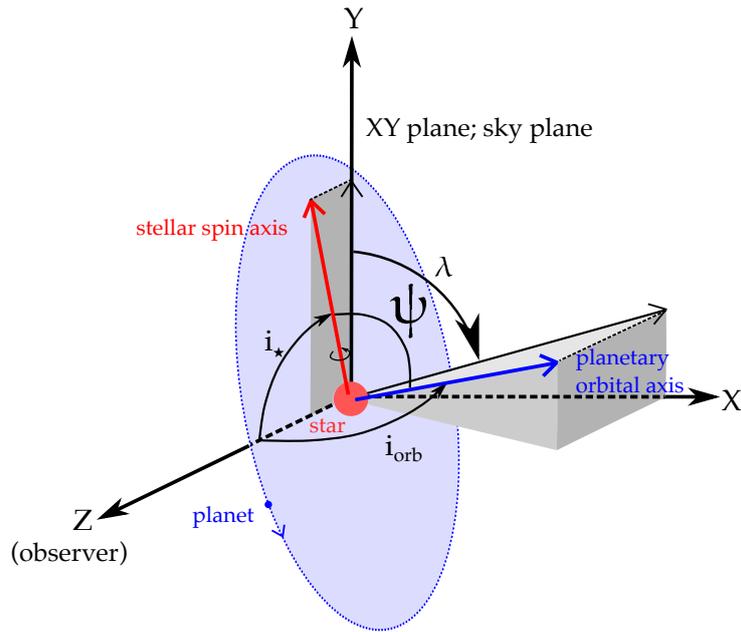


図 1: 恒星-惑星系の幾何学の模式図。スピン軌道傾斜角 (ψ) は、惑星の公転傾斜角 (i_{orb})、主星の自転傾斜角 (i_{star})、天球面上に射影されたスピン軌道傾斜角 (λ) の 3 つの観測可能量に分解される。

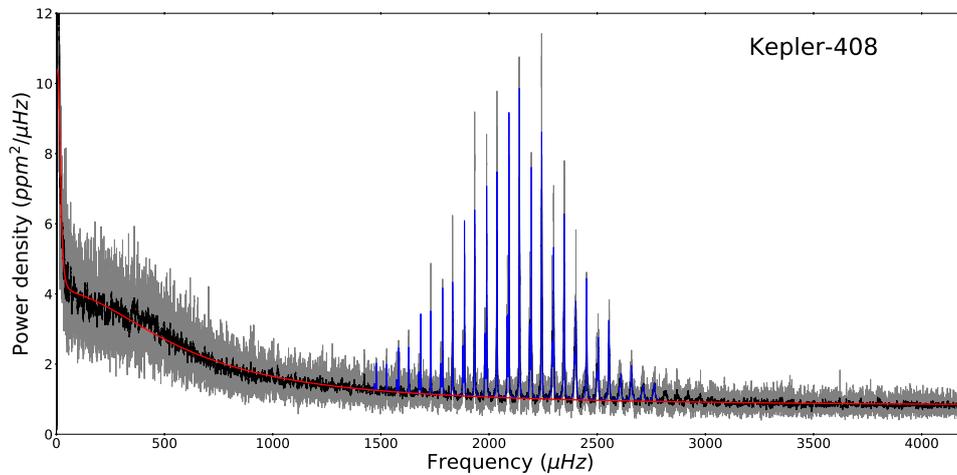


図 2: 恒星の音響振動の周波数空間での視認性の例 (Kepler-408)。2,000 μHz 付近のピークの高さが恒星の固有音響振動数に対応する。

本学位論文では、惑星を保有し、かつ検出可能な音響振動を示す 33 の恒星に対し系統的に自転傾斜角と自転周期を測定した。これは惑星を持つ恒星に対して星震学を応用して自転傾斜角や自転周期を導出したカタログとしてはこれまでで最大のものである。加えて、参考として惑星の存在が確認されていない 61 個の恒星についても同様の解析を行った。以下では、これら計 94 個のサンプルを用いて惑星系の恒星の自転傾斜角、ひいてはスピン軌道傾斜角に対し可能な制限を模索する。

まず第一に、本研究では恒星の自転傾斜角と自転周期を正確に測定するために必要な条

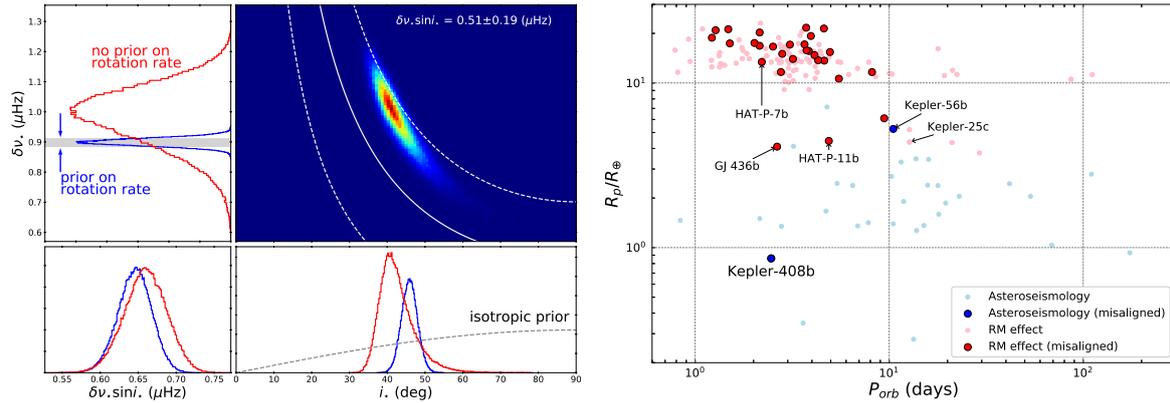


図 3: 左: (右上) 恒星の自転傾斜角 (i_*) と自転周波数 (自転周期の逆数; $\delta\nu_* = 1/P_{rot}$) の事後確率分布。(右下) 自転傾斜角の周辺確率分布。青は測光観測より決定された自転周期 ($P_{rot} = 12.9 \pm 0.19$ 日) を事前確率として用いた場合の分布。自転傾斜角 i_* が 90° に近いとスピン軌道傾斜角 ψ が小さいことを意味するが、どちらの結果も $i_* = 40 - 50^\circ$ を支持し、惑星の軌道が傾いていることを示す。(左上) 自転周波数の周辺確率分布。(左下) 上記を組み合わせた $\delta\nu_* \sin i_*$ の事後確率分布。分光観測より決定された値と整合的である (右上図中の白線)。右: ロシター効果を用いて観測された λ (赤) と星震学を用いて i_* (青) が観測された惑星の、公転周期-惑星半径上での分布。濃い色が傾いた軌道に対応し、Kepler-408 (図の左下に位置) はその中でも最小の惑星である。

件を解析的に導出し、次いで数値シミュレーションを通してこれらの条件が実際の解析に適用可能であることを確認した。これらの条件を満たす恒星は惑星を保有する、しないものでそれぞれ 9 個、22 個確認された。これら一連の解析は、星震学を用いて導出される物理量の信頼性を初めて体系的に検証するものである。

正確な自転傾斜角測定が可能な恒星のうち、Kepler-408 系は 2σ 以上の有意性で惑星の軌道が傾いていると見積もられる唯一の惑星系である。また星震学により測定された自転周期は、恒星の光度の周期的変動から導出されたものと整合的であり、我々が得た自転傾斜角や自転周期の結果の信頼性を高めている。Kepler-408 を公転する惑星は地球と同程度の大きさのため、従来の手法 (例として、**ロシター効果**を利用したものなど) ではこの系の惑星軌道の傾きを検証することは困難である。故にこれは海王星より小さい惑星において軌道の傾きが検出された初めての例であり (図 3)、加えてこれまで主に巨大惑星を想定しモデル化されてきた惑星軌道傾斜機構が、地球型惑星に対しても働くことを示すものである。

周期的光度変動から決定された恒星の自転周期 ($P_{rot,photo}$) は大きな不確実性が伴う場合が多いため、それと独立した手法である星震学から得た値 ($P_{rot,astero}$) と比較することが有用である。本研究にて解析された惑星を持つ 33 個の恒星のうち、13 個の系で光度変動と星震学の予言する自転周期がよく一致した ($P_{rot,photo} \approx P_{rot,astero}$)。よってこれらの系においては自転周期が正確に決定されていると考えられる。このうちいくつかの惑星系において、主星の自転周期 (P_{rot}) と惑星の公転周期 (P_{orb}) の間に規則性を発見した。事実、 P_{orb}/P_{rot} の値はランダムに分布するのではなく、特定の有理数比を取ることが多いとわ

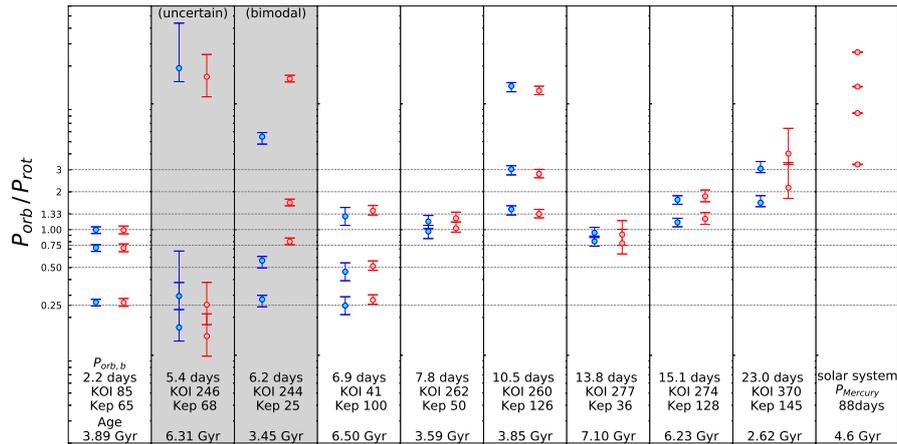


図 4: 9つの複数惑星系における惑星の自転周期と主星の公転周期の比 (P_{orb}/P_{rot}) の分布。恒星光度の周期的変動 (赤) と星震学 (青) より決定された自転周期 (P_{rot}) が一致する7つの系 (灰色以外の系) で、有意な数が $P_{orb} : P_{rot} = 1 : 1$ もしくは $1 : 4$ に存在する。最右列は参考のため太陽系の岩石惑星を示す。

かった (図 4)。このような規則性は惑星が複数存在する系において、惑星の公転周期の間ではこれまでも多く報告されており、それらは軌道の共鳴状態にあると解釈されている。上記の発見は、同様の規則性が恒星の自転と惑星の公転周期の間においても成立しうる可能性を観測的に示すものである。この主星と惑星の共鳴状態は、主星と惑星の間に働く潮汐効果の標準的なモデルでは説明が難しいため、実際の系では両者の間により効率的な相互作用が働いていることを示唆する。

これらの発見は星震学を用いて太陽系外惑星系の新たな側面を明らかにするものである。また、本研究で行った通り、星震学は測光観測や分光観測などと組み合わせることで惑星系の高い精度での特徴付けを可能にする。以上より、本研究は太陽系外惑星系の本質を探る上で星震学が貢献可能な役割を数多く提示し、具体例を通じてその有用性を証明するものである。加えて本研究で示した方法論は、今後計画されている衛星のデータに対して、星震学を応用する際の基本的な枠組みを提供するものである。