

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13980

研究課題名（和文）多様なアーカイブデータの統合で迫る太陽系外惑星の軌道の多様性の起源

研究課題名（英文）Exploring the origins of orbital diversity of exoplanets through archival data integration

研究代表者

増田 賢人（Masuda, Kento）

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：20874168

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：恒星の自転周期を調べる方法の一つとして、恒星表面に存在する黒点が自転とともに見え隠れすることに伴う明るさの変化を検出するものがある。この手法はこれまで数万を超える恒星に適用されてきたが、黒点による光度変化が検出される恒星は一部であり、またなぜ一部でしか検出されないのかも明らかでなかった。本研究では、多数の恒星に対する分光観測データ（明るさと波長の関係）から、それらの恒星の自転周期分布を導出する解析手法を新たに開発した。この手法は黒点の方法が適用できない恒星に対しても適用可能である。また、黒点検出の有無が主に恒星の年齢と対応していることを初めて明確に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、恒星の自転周期の新たな決定手法を開発し、また既存の決定手法の限界を明らかにした。恒星の自転周期の決定は、恒星の自転方向とそのまわりの惑星の公転方向の決定において重要な役割を果たす。太陽系では両者は揃っているが、太陽系外惑星では一般にずれていることがわかっており、この違いは惑星系の形成・進化の経路の多様性を反映するものと考えられている。したがって本研究の成果は、宇宙における太陽系や地球の普遍性・特殊性を解明する礎となる。

研究成果の概要（英文）：A new analytical method has been developed to derive the distribution of stellar rotation periods from that of projected rotational velocities (Masuda et al. 2022, MNRAS 510, 5623). This method is useful for measuring the rotation periods of stellar populations to which previous methods could not be applied. Additionally, a new methodology was established to formalize observational biases dependent on stellar age in detecting stellar rotation periods using photometric time-series data. It was clearly demonstrated for the first time that there is a significant bias in older stars compared to the Sun (Masuda 2022a, ApJ 933, 195; Masuda 2022b, ApJ 937, 94).

研究分野：太陽系外惑星

キーワード：恒星の自転・年齢 測光観測 太陽系外惑星

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽系の 8 つの惑星の軌道離心率は小さく、かつ惑星の公転と太陽の自転の方向は全てよく揃っている。これらは原始惑星系円盤内でのコア集積という惑星形成の標準的な描像の観測的な基盤をなす性質である。一方、太陽系外の惑星系に目を向けると、軌道の離心率が大きい惑星や、主星の自転に対し大きく傾いた公転軌道をもつ惑星の存在が明らかになっている。このような特徴は、これまで主にドップラー法で検出された巨大ガス惑星で確認されていたが、近年のトランジット法を用いた観測により、大きな離心率や傾斜角は、より小さな惑星をもつ系においても普遍的であるという示唆が得られつつある。

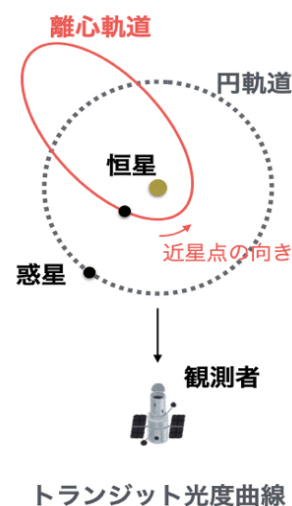
2. 研究の目的

本研究申請時の目的は、地上・宇宙の様々な望遠鏡で取得されたデータを組み合わせることで、(1) 惑星の軌道形状 (離心率) の主星質量への依存性 (2) 恒星の自転に対する原始惑星系円盤の傾きを調べることを通じて、系外惑星軌道の多様性が惑星形成の初期条件・惑星の形成環境・惑星形成後の軌道進化のいずれに起因するものであるかを観測的な観点から解明する手がかりを得ることであった。

3. 研究の方法

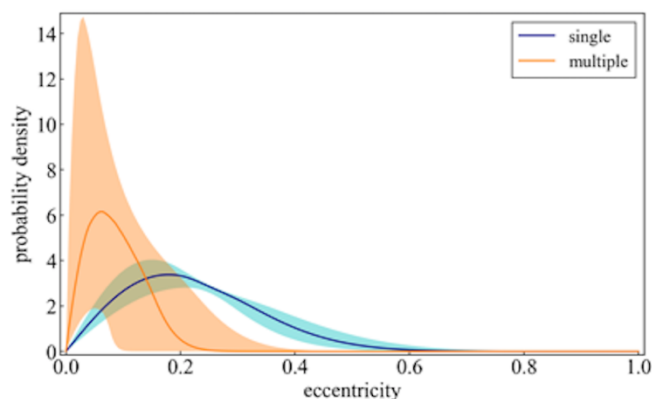
(1) NASA の Kepler 探査機データから検出された低質量の M 型星まわりのトランジット惑星に対し、その軌道離心率の分布を推定する。右下図に示すように、トランジットの継続時間 (惑星が恒星の前面を通過するのに要する時間) は、惑星の公転速度の情報を含んでいるため、多数の惑星に対するトランジットの継続時間の分布から、離心率の分布を統計的に推定できる。この際に重要となる恒星の半径については、Gaia 衛星のデータから精密に推定する。得られた離心率の分布を、より質量が大きい太陽型の恒星まわりの同様な惑星について得られた結果と比較することで、大きな離心率をもつ惑星が形成される過程の手がかりを得る。

(2) 測光観測衛星による恒星の自転周期の測定と、地上分光観測から得られる射影自転速度 (自転速度の視線方向への射影成分)、Gaia 衛星データから得られる恒星の半径を組み合わせると、恒星の自転軸の視線方向に対する傾斜角 I_{star} が推定できる (下図参照)。そのような恒星が、ALMA 望遠鏡で空間的に分解された円盤をもつ場合、撮像データから円盤の傾斜角 I_{disk} も推定できる。 I_{star} と I_{disk} の比較により、恒星の自転と原始惑星系円盤の回転方向のずれの分布を明らかにする。結果を系外惑星で得られた恒星自転と惑星軌道のずれと比較し、ずれが惑星形成段階で生じたのか、進化の過程で生じたのかを解明する。



4. 研究成果

(1) M 型星を公転する公転周期 50 日以下、地球-海王星サイズの 100 程度の惑星に対し、右図のような離心率分布を得た。青(single)がトランジット惑星が 1 つのみ検出されている系、オレンジ(multiple)が複数検出されている系を示す。全体の平均離心率は 0.2 程度であり、複数のトランジット惑星を有する系の離心率はより小さい傾向があることがわかった (山崎祐斗, 大阪大学 2021 年度修士論文)。



これらの結果は、太陽型の恒星で同様な手法を用いて得られた結果と定量的に一致しており、離心軌道の短周期惑星を形成する機構が恒星の質量にあまり依存せず働くことを示唆する。この情報は離心軌道の起源を説明する理論モデルの検証に役立つ。例えば有力な可能性の一つとして、短周期惑星の外側に存在する巨大ガス惑星からの摂動の影響がこれまで議論されている。そのような巨大ガス惑星の存在頻度は恒星の質量に依存することが知られているので、もしこのような効果が支配的であれば、離心軌道の惑星の存在と恒星の質量は相関することが期待される。今回得た結果は、これとは異なる過程の重要性を支持する。

(2) この研究を計画通りに遂行する上で重要となるのが、恒星の自転周期が測光データから無バイアスに検出されている（または検出バイアスの性質がきちんと理解でき、解析に取り入れられる）ことである。しかしながら、測光データから検出された自転周期サンプルを調べる過程で、自転周期が検出されている恒星は、周期性が探査された恒星の一部（太陽型星では半数以下）であり、かつ周期性が検出される恒星とされない恒星でどのような差異があるのか明らかにされていないことが判明した。そこで、まずこれらの必要なデータについての理解を深めるための研究を行い、以下の成果を得た。

(2)①恒星の分光観測から得られる射影自転速度のデータから、それらの恒星の自転周期の分布を導出する解析手法を新たに開発した (Masuda et al. 2022, MNRAS 510, 5623)。測光データを用いる手法では、恒星表面の黒点が自転に伴い見え隠れすることに起因する光度変動を検出するが、そのような変動は一部の恒星でしか検出されておらず、この方法で検出された自転周期の分布が実際の自転周期分布をどの程度反映しているかは不明であった。開発した手法により、黒点による変光の有無を問わずに自転周期の分布を推定でき、測光データから得られた自転周期分布がどの程度真の分布を反映しているかを独立に検証することが可能となった。

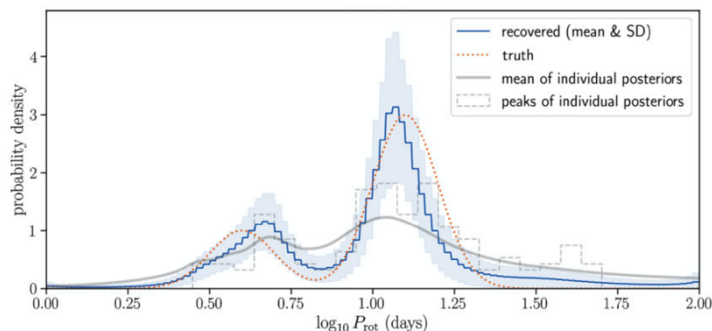


図: 本研究の手法による自転周期分布の推定例。オレンジの点線が真の分布、青の実線と影が本手法での推定結果と不定性を示す。灰色の実線およびヒストグラムは既存の方法を同様なサンプルに適用した結果を示す。これらと比較して、本研究の手法の方が真の分布をより正確に推定できている。

(2)②測光データを用いた恒星の自転周期検出において、恒星の年齢に依存する観測バイアスを定式化する新たな方法論を確立し、実際のデータに適用した。その結果、自転周期検出の有無は主に恒星の年齢で決定されており、特に太陽程度より老いた恒星では検出率が極めて低いことを初めて明確に示した (Masuda 2022a, ApJ 933, 195; Masuda 2022b, ApJ 937, 94)。つまり、測光データから検出された自転周期のサンプルを解釈する上では、そのような選択に伴う恒星年齢分布のバイアスを考慮する必要があることが示された。

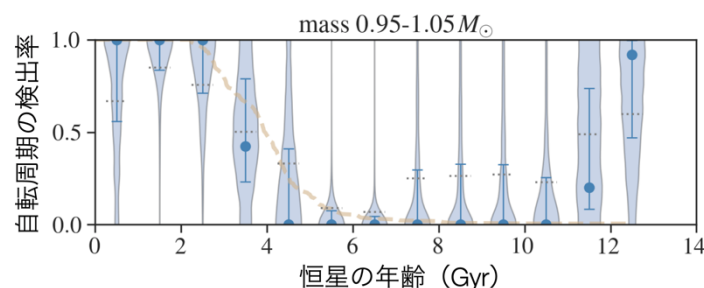


図: 0.95-1.05 太陽質量の恒星に対する、Kepler 探査機データによる自転周期の検出率と年齢の関係。推定された検出率（青）は、恒星年齢が 3Gyr 程度未満では 100%と整合的だが、より老いた恒星ではほぼ 0%になっている。黄色の点線は、恒星年齢と黒点による光度変動の振幅の関係、恒星の明るさに依存するノイズのモデルから予測される検出率を示す。推定結果と概ね整合的である。

これらはいずれも当初の目的(2)から派生して得られた研究成果であるが、恒星の自転軸傾斜角の推定に必要なデータの解釈についてより一般的な観点から理解を深めるものであり、最終的にこの課題そのものを遂行する上でもやはり必要な知見となる。またこれらの成果は、恒星の自転周期を用いた年齢の推定においても重要な知見を与えるものであり、惑星系以外の研究にも波及効果を有する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kento Masuda	4. 巻 933
2. 論文標題 On the Evolution of Rotational Modulation Amplitude in Solar-mass Main-sequence Stars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 195
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac7527	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kento Masuda	4. 巻 937
2. 論文標題 Detectability of Rotational Modulation in Kepler Sun-like Stars as a Function of Age	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 94
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac8d58	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kento Masuda, Erik A. Petigura, Oliver J. Hall	4. 巻 510
2. 論文標題 Inferring the rotation period distribution of stars from their projected rotation velocities and radii: Application to late-F/early-G Kepler stars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5623-5638
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stab3650	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 増田賢人
2. 発表標題 太陽型星の自転に伴う光度変動の振幅と自転周期・年齢の関係
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田賢人
2. 発表標題 射影自転速度と半径を用いた恒星の自転周期分布の推定：磁気制動則への示唆
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田賢人
2. 発表標題 太陽型星の自転・活動性進化の調査：系外惑星系の時間進化の解明に向けて
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	University of California, Los Angeles		
オランダ	ESTEC		