

2023年11月30日

東京大学

自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター

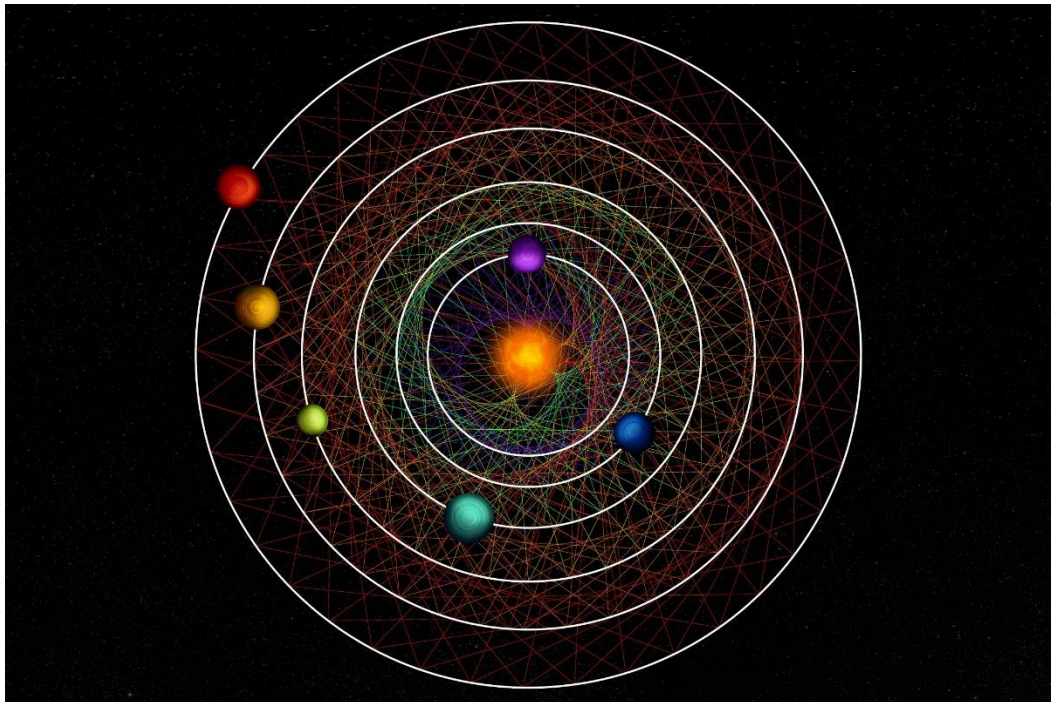
科学技術振興機構（JST）

共鳴し合う6つ子の惑星を発見

——全ての隣り合う惑星の公転周期が尽数関係を持つ惑星系 HD 110067——

発表のポイント

- ◆ 宇宙望遠鏡と地上望遠鏡による世界的な連携観測によって、太陽系から約100光年離れた恒星 HD 110067 の周りで6つのトランジット惑星を発見した。
- ◆ 6つの惑星は、全ての隣り合う惑星同士の公転周期が簡単な整数比で表される尽数関係にある。
- ◆ この惑星系は、惑星がどのように形成したかを考える上で貴重な惑星系となるほか、それぞれの惑星大気の観測が行われれば、惑星の大気獲得過程や恒星からの光が惑星大気の散逸や化学進化に与える影響の理解につながると期待される。



発見された6つの惑星の位置を一定の時間間隔で繋いだ線が作る幾何学模様

(クレジット: Thibaut Roger/NCCR PlanetS, CC BY-NC-SA 4.0)

概要

東京大学大学院総合文化研究科の成田憲保教授（自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター客員教授）、福井暁彦特任助教らの MuSCAT チーム（注1）を含む国際共同研究チームは、宇宙望遠鏡と地上望遠鏡の連携した観測により、太陽系から約100光年離れた恒星 HD 110067 の周りで6つのトランジット惑星（注2）を発見しました。

この6つの惑星は、全ての隣り合う惑星の公転周期が2:3や3:4という簡単な整数比（尽数関係：注3）となっており、惑星が原始惑星系円盤の中でどのように形成し、移動してきたかを考える手がかりを与えてくれます。また、今後これらの惑星の大気の観測が行われれば、惑星の大気獲得過程や恒星からの光が惑星大気の散逸や化学進化に与える影響の理解につながると期待されます。

今回の発見は、アメリカ航空宇宙局（NASA）のトランジット惑星探索衛星 TESS（Transiting Exoplanet Survey Satellite:注4）、欧州宇宙機関（ESA）の宇宙望遠鏡 CHEOPS（CHAracterising Exoplanets Satellite:注5）、MuSCAT チームが開発した多色同時撮像カメラ MuSCAT2、MuSCAT3（図1、図2）を含めた複数の地上望遠鏡が連携した観測によって実現しました。

本研究成果は、2023年11月29日（英国時間）に英国科学誌「Nature」に掲載されます。

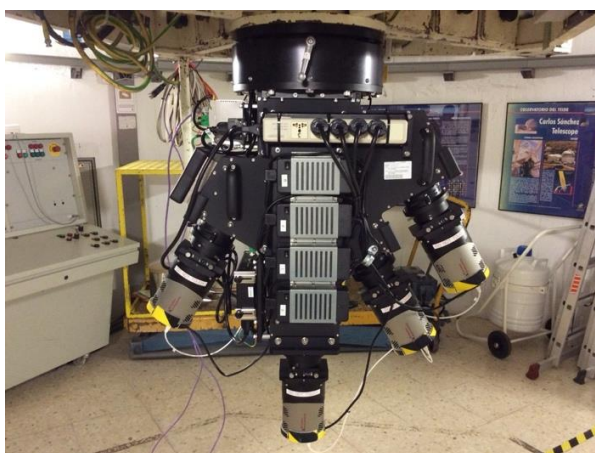


図1：スペイン・テネリフェ島テイデ観測所の1.52 m Telescopio Carlos Sánchezに搭載された MuSCAT2
クレジット：MuSCAT チーム



図2：アメリカ・マウイ島ハレアカラ観測所の2 m Faulkes Telescope Northに搭載された MuSCAT3
クレジット：MuSCAT チーム

発表内容

太陽の約 8 割の質量と半径を持つ恒星 HD 110067 は、かみのけ座の方向、約 100 光年の距離にあります。この恒星は NASA の TESS によって、2020 年 3~4 月と 2022 年 2~3 月に約 27 日ずつ明るさの変化をモニタリングする観測が行われました。TESS の観測によって、約 9.11 日と約 13.67 日の周期でトランジットによる減光が起きていることがわかりました。しかし、観測された TESS のデータには他にもトランジットらしき減光がいくつもあり、この恒星の周りに一体いくつのトランジット惑星があるのか、それぞれの惑星の周期は何日なのかがわからない状態でした。そこで国際共同研究チームは、考察に基づく仮説と観測による検証により、この謎解きに取り組みました。

研究チームはまずトランジットの形（減光の深さと継続時間）に着目しました。これは、ある惑星によるトランジットは毎回同じ形をしているためです。そして研究チームは TESS のデータに 2 種類の同じ形のトランジットのペアが存在し、2020 年と 2022 年にそれぞれ 1 回ずつ観測されていることを見出しました。しかし、TESS は約 2 年の間の時期は観測をしていなかったため、必ずしも周期が 2 年というわけではありません。約 2 年離れて観測された 2 回のトランジットの時間間隔を自然数で割ったものが真の周期の候補となります。これらの候補の周期で予想されるトランジットの時間帯に ESA の CHEOPS が観測を行った結果、2 種類のうち 1 つのトランジットは約 20.52 日の周期で起きていることが確認されました。

確認された 3 つの惑星の周期（9.11 日、13.67 日、20.52 日）をよく見ると、隣り合う惑星の周期比がそれぞれ 2:3 という簡単な整数比になっていることに気づきます。同一の天体を公転する天体の周期比がこのように簡単な整数比になることを「尽数関係」と呼びます。太陽系にも尽数関係を持つ天体は存在し、例えば海王星と冥王星の公転周期の比は 2:3 となっており、木星の衛星であるイオ・エウロパ・ガニメデではそれぞれのペアの公転周期の比が 1:2 となっています。

このように尽数関係を持つ 3 つの惑星があることを惑星形成の観点から考えると、この惑星系では形成時に複数の惑星がお互いに尽数関係を持つ平均運動共鳴（注 3）の軌道にとらわれ、原始惑星系円盤の中でその関係を保ちながら現在の軌道まで移動してきたと考えられます。そうすると、残りのトランジットを起こしている惑星の周期も尽数関係を持つと考えることが自然です。そこで研究チームは約 2 年間離れて観測されたもう 1 種類のトランジットの真の周期は約 20.52 日に対して尽数関係を持つ、すなわち観測された 2 回のトランジットの時間間隔を自然数で割った値が約 20.52 日と簡単な整数比を持つと考えました。そして、そのような条件を満たす唯一の解として約 30.79 日の周期を見出しました。

このように 4 つの惑星の周期が同定された後も、2022 年の TESS のデータにはそれぞれ異なる形の 2 つのトランジットが残っていました。この 2 つはそれぞれ 1 回しかトランジットをしていないので、真の周期がわかりません。そこで研究チームは、5 つ目の惑星の周期は約 30.79 日に対して尽数関係を持ち、さらに 6 つ目の惑星の周期は 5 つ目の惑星の周期に対して尽数関係を持つと仮定し、50 通りのシナリオを考えました。具体的には、それぞれの周期比が 1:2、2:3、3:4、4:5、5:6 の 5 通り、かつ観測された 2 つのトランジットがそれぞれ 5 つ目と 6 つ目のどちらかがわからないので 2 通りの場合分けを考えました。これらのシナリオの中から、既存の TESS のデータにトランジットがないことや、天体力学的な考察をもとに、研究チームは 5

つ目の惑星の周期は約 30.79 日に対して 3:4 となる約 41.06 日、6 つ目の惑星の周期は 5 つ目の惑星の周期に対して 3:4 となる約 54.77 日である可能性が高いと考え、以下の 2 つの方法でその仮説の検証を行いました。

その 1 つが、2022 年 5 月 23~24 日（協定世界時）にかけて行われた複数の地上望遠鏡による 5 つ目の惑星（約 41.06 日周期）のトランジットの追観測キャンペーンです。MuSCAT チームはこのキャンペーンに参加し、スペイン・テネリフェ島にある MuSCAT2 でトランジットの開始、アメリカ・マウイ島にある MuSCAT3 でトランジットの終了を精度良くとらえました（図 3）。このトランジットは減光の深さが 0.1%程度しかなく、トランジットの継続時間は 5 時間以上、予報の誤差も大きいという難度の高い観測でしたが、地上最高レベルの測光精度を 4 色で同時に達成でき、時差の離れた望遠鏡に搭載されている MuSCAT2 と MuSCAT3 の連携が大きな威力を発揮しました。このキャンペーン観測により、5 つ目の惑星の周期が約 41.06 日であることが確認されました。

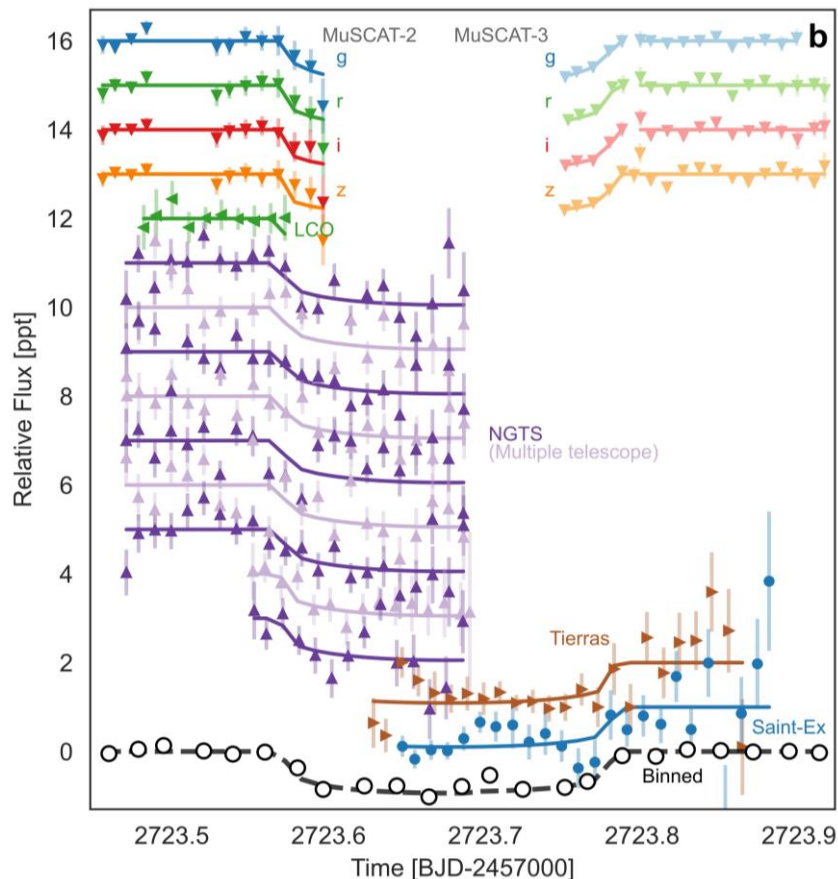


図 3 : 2022 年 5 月 23~24 日（協定世界時）にかけて行われた複数の地上望遠鏡による内側から 5 つ目の惑星のトランジット追観測キャンペーンのデータ（掲載論文の Extended Data Fig. 4 を改変して引用）。

横軸は紀元前 4713 年 1 月 1 日正午を 0 としたユリウス日から 2457000 を引いた値（単位は日）。縦軸は HD 110067 の相対的な明るさの時間変化で、単位の ppt は 0.001 (0.1%)。各望遠鏡のデータを 1ppt ずつ縦にずらしてプロットしています。最上部の 4 つが 4 色で観測された MuSCAT2 と MuSCAT3 のデータです。これらのデータに対して、トランジットが起きていないと考えるモデルとトランジットが起きていると考えるモデルを WAIC（渡辺・赤池情報量基準）を使って比較することで、トランジットが起きていると判断されました。

もう1つは、解析対象外となっていた2020年のTESSのデータの解析です。TESSは観測方向や時期によっては月や地球からの散乱光が観測視野に混入してしまい、そのようなデータはノイズが大きくなってしまいます。そうしたデータは取得されているものの、通常解析が行われません。しかし研究チームは、上の仮説が正しければ5つ目と6つ目の惑星のトランジットが2020年のTESSのデータの中にあるはずだと考え、解析対象外となっていたデータの解析を行いました。そして実際に、仮説によって予想された時刻にトランジットがあることが確認されました。

以上のように、研究チームは仮説と検証に基づいてTESSで観測された複雑なトランジットの謎を解き、HD 110067は全ての隣り合う惑星の公転周期が尽数関係を持つ6つ子の惑星系であることを明らかにしました。なお、7つ目以降の惑星の存在はまだ確認されていませんが、存在が否定されたわけではなく、今後も探索が続けられる見通しです。また、6つの惑星は地球の1.9~2.9倍の半径を持っており、地球のような岩石惑星ではなく、水素大気を持つ小さな海王星（海王星の半径は地球の約4倍）のような惑星であると考えられます。

2023年までに既に5千個を超える系外惑星が発見されていますが、HD 110067のように3つ以上の惑星が尽数関係を持つ惑星系は両手で数えられるほどしか発見されていません。このような惑星系は、惑星が原始惑星系円盤の中でどのように形成し、移動してきたかを理論的に深く考察する手がかりを与えてくれます。また、同一の主星の周りで5つ以上のトランジット惑星が発見されている中で、HD 110067は最も明るい恒星です。明るい恒星を公転するトランジット惑星は大気の観測に適しており、しかも同じ惑星系に複数のトランジット惑星があることから、それらの惑星の大気を観測し比較することが可能です。そのため、この6つ子の惑星は今後惑星大気の絶好のターゲットとなり、尽数関係にある惑星が原始惑星系円盤の中でどのように大気を獲得したかや、恒星からの光が惑星大気の散逸や化学進化にどのような影響を与えたかが調べられると期待されます。

○関連情報：

「プレスリリース① 火山活動の可能性がある地球サイズの惑星を発見 —潮汐力により加熱された系外惑星 LP 791-18d—」(2023/05/18)

<https://www.c.u-tokyo.ac.jp/info/news/topics/20230518000000.html>

「プレスリリース② ハビタブルゾーンにあるスーパーアースを発見」(2022/09/07)

<https://www.c.u-tokyo.ac.jp/info/news/topics/20220907160000.html>

「プレスリリース③ 大気の詳細調査に適した地球型の系外惑星を発見」(2021/03/05)

<https://www.c.u-tokyo.ac.jp/info/news/topics/files/20210305naritanosobun01.pdf>

発表者情報

東京大学 大学院総合文化研究科

広域科学専攻

成田 憲保 教授

兼：同研究科 附属先進科学研究機構 教授

兼：自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター 客員教授

幾田 佳 特任研究員

森 万由子 特任研究員

デ レオン ピトゴ ジェローム (Jerome Pitogo de Leon) 特任研究員

渡辺 紀治 特任研究員

蔭谷 泰希 博士課程

附属先進科学研究機構

福井 暁彦 特任助教

小玉 貴則 研究当時：特任助教

現：東京工業大学 地球生命研究所 特任准教授

自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター

リビングストン ヘンリー ジョン (John Henry Livingston) 特任助教

論文情報

雑誌名：Nature

題名：A resonant sextuplet of sub-Neptunes transiting the bright star HD 110067

著者名：Rafael Luque*, Hugh P. Osborn, Adrien Leleu, et al.

DOI：10.1038/s41586-023-06692-3

URL：<https://www.nature.com/articles/s41586-023-06692-3>

研究助成

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（科研費：課題番号 JP18H05439）、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST（課題番号 JPMJCR1761）、自然科学研究機構アストロバイオロジーセンターサテライト（課題番号 AB022006）の支援を受けて実施されました。

用語解説

（注1）MuSCAT チーム

成田教授と福井特任助教らが岡山県の188 cm 望遠鏡、スペイン・テネリフェ島の1.52 m 望遠鏡、アメリカ合衆国・マウイ島の2 m 望遠鏡、オーストラリア・ニューサウスウェールズ州の2 m 望遠鏡用に開発した、3 つもしくは4 つの波長帯で同時にトランジットを観測できる多色同時撮像カメラ MuSCAT シリーズ（装置名称はそれぞれ MuSCAT、MuSCAT2、MuSCAT3、MuSCAT4）を用いて研究を行なっているチーム。MuSCAT は Multicolor Simultaneous Camera for studying Atmospheres of Transiting exoplanets の略で、岡山県の名産マスカットにちなんでいます。

(注2) トランジット惑星

系外惑星がその主星の手前を通過する時、主星の明るさが見かけ上わずかに暗くなります。この現象をトランジットと呼び、トランジットを起こすような軌道を持つ惑星をトランジット惑星と呼びます。

(注3) 尽数関係と平均運動共鳴

2つの天体の公転あるいは自転の周期が簡単な整数比になること。本文では公転周期同士の尽数関係を例に挙げましたが、自転と公転の周期比についても使われる言葉で、例えば月の自転周期と月の公転周期は1:1の尽数関係にあるとすることができます。2つの天体の公転周期が尽数関係を持つ場合は、2つの天体が平均運動共鳴の状態にあると言われます。

(注4) TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)

TESSはマサチューセッツ工科大学の研究者が中心となって立案したトランジットによって系外惑星を探すNASAの衛星計画です。TESSは2018年4月18日に打ち上げられ、2年間でほぼ全天のトランジット惑星を探索するという計画を実施してきました。現在は第2期延長計画が実施されており、少なくとも2024年まで観測が続けられる予定です。これまでの5年間で、6千個を超えるトランジット惑星候補を発見しています。

(注5) CHEOPS (CHaracterising ExOPlanets Satellite)

CHEOPSはスイスの研究者が中心となって立案し、ESAによって2019年12月18日に打ち上げられたトランジット惑星の観測専用の宇宙望遠鏡です。主に既知のトランジット惑星のトランジットを高精度に観測し、そのトランジットが起きた時刻や惑星の半径を精度良く決定することを目的としています。当初は3.5年の計画でしたが、第1期延長計画が認められ、少なくとも2026年まで観測が続けられる予定です。

問合せ先

(研究内容については発表者にお問合せください)

東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻・附属先進科学研究機構

教授 成田 憲保 (なりた のりお)

E-mail: narita[at]g.ecc.u-tokyo.ac.jp

東京大学 大学院総合文化研究科 広報室

Tel: 03-5454-6306 E-mail: pro-www.c[at]gs.mail.u-tokyo.ac.jp

自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター 広報担当

日下部 展彦 (くさかべ のぶひこ)

Tel: 0422-34-4066 E-mail: nb.kusakabe[at]nao.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel: 03-5214-8404 E-mail: jstkohe[at]jst.go.jp

〈JST事業に関する問合せ〉

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔 (あんど う ゆうすけ)

Tel : 03-3512-3531 E-mail : crest[at]jst.go.jp