

系外惑星「遠い世界の物語」その16 ～晴れた惑星大気を持つ系外惑星の探査～

川内 紀代恵¹

(要旨) 現在,数十以上の系外惑星大気において様々な原子や分子による吸収が検出されているが,その多くは雲やヘイズに覆われているため予想より小さい。よって, 将来の宇宙望遠鏡による系外惑星大気観測で効率的な成果を上げるためには,あらかじめ晴れた大気を持つ惑星を探しておく必要がある。系外惑星大気中でナトリウム吸収線は強く現れるため,小型の望遠鏡でも多くの惑星で観測可能である。そこで我々は,ハワイとオーストラリアの2 m望遠鏡に搭載された自作の多色同時撮像装置(MuSCAT3とMuSCAT4)に,惑星大気中のナトリウム吸収を観測するための狭帯域フィルターを取り付けた。本稿では,惑星大気中のナトリウム吸収線観測の説明と,新たに作成した狭帯域フィルターについて今後の展望とともに報告する。

1. はじめに

1995年に初めて系外惑星が発見されて以来,世界各国に存在する地上望遠鏡や特にケプラー宇宙望遠鏡などの探査によって系外惑星の発見数が飛躍的に増加し,現在では5500個以上の系外惑星が発見されている。2018年に打ち上げられたトランジット系外惑星探索衛星(TESS)による系外惑星の全天探査は今もなお実施されており,系外惑星の発見数はこれからも増えていくだろう。

これまで発見された系外惑星は恒星近傍を周回する木星型惑星(ホットジュピター)や高い離心率を持つ惑星(エクセントリックプラネット),地球半径より大きく海王星半径より小さい惑星(スーパーアース・サブネプチューン)といった太陽系には存在しないものばかりであった。これらがどのように形成されどうやって進化してきたのかを説明するため,これまでに数多くの理論研究が行われてきているが,構築された惑星の形成進化モデルは未だ完全ではない。現

在の惑星大気の組成や構造は,形成場所やこれまで経験してきた軌道進化過程などによって変化すると考えられている。よって,惑星大気を直接観測し大気組成や構造を調査することでこれらの惑星の形成進化に新たな示唆を与えることができるだろう。

系外惑星大気の観測の歴史は,2002年に典型的なホットジュピターであるHD209458bの大気中でナトリウムを検出したことから始まった[1]。その後二十数年の間に,数十個以上の系外惑星大気において,ナトリウムやカリウム,鉄などの原子から水蒸気や一酸化炭素などの分子まで多種多様な大気成分が検出されている[例2]。しかし,そのほとんどでは原子や分子の吸収特徴が予想より小さかったり存在しなかったりするため,大気組成や大気構造が詳しく調査されている天体は未だに限られている。これは,ヘイズや雲の存在によって光が遮られるためという説が有力であり,ハッブル宇宙望遠鏡(HST)による37天体における水の吸収線の観測から晴れた大気を持った惑星は7%以下だということが報告されている[3]。手当たり次第発見された惑星の大気観測をするのも一つの手段ではあるが,雲やヘイズによって吸収線が弱められてしまうと原子や分子を検出するた

1.立命館大学
kawauchi@fc.ritsumeai.ac.jp

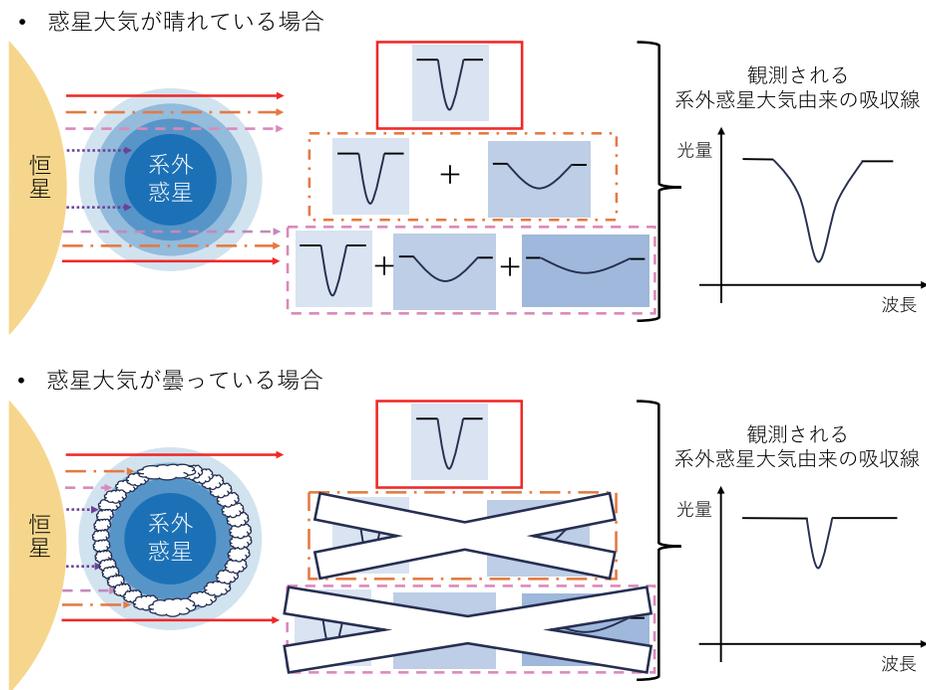


図1: 系外惑星大気が晴れている場合(上図)と曇っている場合(下図)の透過分光法を用いて観測される系外惑星大気による吸収線の概念図。

めにはより多くの観測が必要となってしまう。限られた観測時間の中で効率よく調査するためには、比較的観測夜数の確保しやすい2 m級の望遠鏡で大気が晴れているか否かを先に調べておくのが好ましい。

ナトリウムD線は可視光領域に存在し、太陽組成を仮定すると可視光領域で最も強い吸収を引き起こすため[例4]、比較的小型な望遠鏡でも晴れていれば観測可能である。そこで我々は、ハワイ州マウイ島のハレアカラ観測所とオーストラリアのサイディング・スプリング観測所にある2 m望遠鏡に搭載している多色撮像カメラ(それぞれMuSCAT3とMuSCAT4)にナトリウムD線における惑星大気中の吸収の観測を目的とした狭帯域フィルターを新たに取り付けた。本稿では、惑星大気観測とナトリウム吸収線について説明し、新たに作成した狭帯域フィルターについて今後の展望とともに報告する。

2. 惑星大気中のナトリウム吸収線観測

系外惑星大気の観測は難しい。現在最もよく用いられている調査方法の一つとして、透過分光法¹と呼ばれるものがある。この手法は、恒星の前を惑星が通過(トランジット)する際に届く恒星からの光を分光することで、惑星大気中の原子や分子による特定の波長での超過吸収を捉える方法であり、この超過吸収はわずかであるため非常に高い観測精度が必要である。そのためこれまでの大気観測は地上大型望遠鏡や宇宙望遠鏡によるものがほとんどである。また、先行研究から多くの場合で予想より小さな吸収特徴を持つことが明らかとなり[例9]、このような惑星大気の詳細な調査を行うためには、複数回の観測が必要となる。地上観測の場合、惑星によっても異なるが一つの観測地点から惑星のトランジットを観測できる機会は半年に数回ぐらしかなく、トランジットしている間ずっと晴れ続けなければならない。筆者もハワイのマウナケア山頂にある口径8.2 mのすばる望遠鏡において研究代表者

¹透過分光法については福井暁彦氏と成田憲保氏、亀田真吾氏、川島由依氏、大野和正氏の遊星人記事でも紹介されているため、合わせて読んでもらえると幸いである[5-8]。

(PI)として5晩獲得したが、そのうち有用なデータを取得できたのは1晩のみであった。宇宙望遠鏡においても現在最も活躍しているジェームズ・ウェッブ望遠鏡(JWST)や、2029年に打ち上げ予定である系外惑星観測専用宇宙望遠鏡Arielのおかげでこれまでに比べ多くの系外惑星大気観測が実現することが期待されるが、宇宙望遠鏡は地上望遠鏡に比べ寿命が数年~10年程度と短いため限りはある。よって今後、系外惑星大気の観測を用いて普遍的な形成起源や進化過程を調査するためには、効率よくなるべく多くの系外惑星の大気を観測していく必要がある。

ではどのような惑星大気を調査するのが効率的であるだろうか? 考えうる条件としては、短時間で高精度なデータを取得できることと大気の原子や分子の吸収による波長依存性(これを透過光スペクトルという)が検出しやすいことの2つがまず挙げられる。短時間に高精度なデータを取得するには、太陽系からの距離が近くて主星が明るい惑星を選べばよい。また、惑星大気の広がり(温度や表面重力によって決まる。温度が高く表面重力の小さい(スケールハイトの高い)惑星は大気が膨張しているため、大気中の分子や原子による吸収は大きくなり強い波長依存性を示す。よって、これまでこのようなスケールハイトが高く、比較的太陽系近傍の明るい恒星周りの惑星が中心に観測されてきた。しかし、この条件を満たす惑星であっても、雲やヘイズが存在するとそれらによって恒星の光が吸収され、それよりも低い高度を通過する光は遮られてしまい、原子や分子の吸収が弱くなる(図1)。特にこれまで主に観測されてきた可視光や近赤外領域での影響は大きく、多くの惑星大気において透過光スペクトルを“平坦”にしてきた。雲やヘイズの惑星大気透過光スペクトルへの影響についての詳細は川島由依氏や大野和正氏の遊星人を参照されたい。

こういった雲やヘイズ自体の研究も、金属量など惑星大気組成を調査する上でとても大切であるが、原子や分子を検出する場合には、必要な観測夜数が増えるため厄介なものである。そのため、将来望遠鏡で詳細な効率的に調査するためには雲やヘイズが存在しない晴れた惑星から観測していくのが好ましい。現在、TESSによる全天探査のおかげ

により太陽系近傍で新たに多くの惑星が発見されてきており、スケールハイトの比較的高い惑星も見つけられてきている。よって、我々は次の段階としてこれらの新しく発見された惑星大気が晴れているかどうかを調査することが大切である。

では、どのようにして調査するのか? ここで白羽の矢が立ったのはナトリウムD線での惑星大気による超過吸収の観測である。ナトリウムは平衡温度が約900 K以上で気体として存在するとされており、我々が調査するような恒星近傍の惑星大気中ではほとんどの場合、気体として存在している。また、ナトリウムD線は遷移確率が高く僅かな量でも大きな吸収線を示し、惑星大気が晴れていれば比較的小型の望遠鏡でも観測可能な惑星は多く存在する。さらに、可視光領域に位置しているため、地上からも比較的観測しやすい。これらの条件から、比較的多くの観測夜数を確保できる2 m級の望遠鏡を用いた惑星大気の透過スペクトルにおけるナトリウムD線の観測は、晴れた大気を持つ惑星の探査に最も適していると考えられる。

3. 多色同時撮像装置(MuSCATs)

成田憲保氏を筆頭とした我々のグループでの可視光領域における多色同時撮像装置の開発や観測は、国立天文台 岡山天体物理観測所(現・同ハワイ観測所岡山分室)の188 cm反射望遠鏡から始まった。この188 cm反射望遠鏡において、系外惑星の発見・確認を目的に3色同時撮像装置(MuSCAT)を開発し、2014年12月24日に最初のテスト観測をおこなった[11]。その後、24時間観測体制の実現や多くの観測夜数の確保を目的にMuSCATを改良した4色同時撮像装置が開発され、2017年にはスペイン・テネリフェ島のテイデ観測所にある1.52 m望遠鏡に、2020年にはハワイ州マウイ島・ハレアカラ観測所の2 m望遠鏡に搭載された(それぞれMuSCAT2と MuSCAT3)[12, 13]。そして2023年秋には南天観測のためにオーストラリア・サイディングスプリング観測所にある2 m望遠鏡にも搭載された(MuSCAT4)。これらの装置(全ての装置を総称してMuSCATsと呼ぶとする)はなるべく広い視野と高い変換効率が望める光学系や検出器(CCD)を用

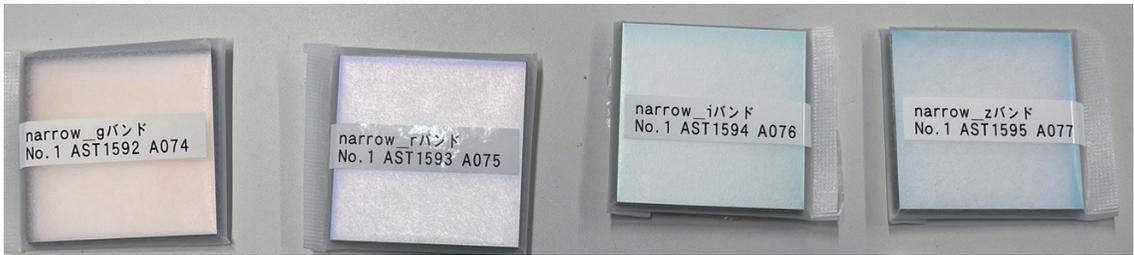


図2: 狭帯域フィルター。

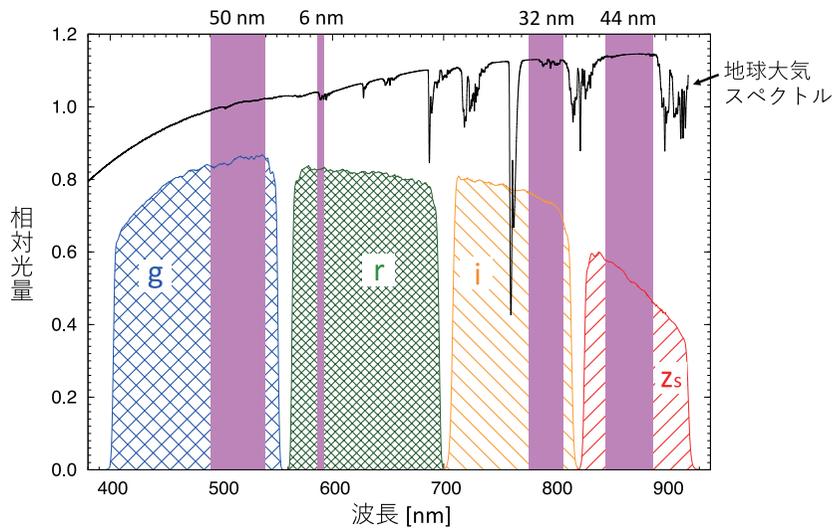


図3: 網掛けは各バンドでの透過率(左から順にg, r, i, z_s), 塗りつぶし領域は各バンドの狭帯域フィルターの波長域を示している. 黒実線はMuSCAT4があるオーストラリアのサイディングスプリング観測所を仮定して理論的に求めた地球大気スペクトル. 見やすくするため, 0.2を足して表記している.

いているため, 口径2 m級の地上望遠鏡の観測装置として世界最高レベルの測光精度が達成されている[14].

これまでこの高精度な同時測光観測により, TESSで発見された惑星候補の半径などのパラメータを精度良く推定したり[例15], 複数惑星系において他惑星からの重力相互作用によるふらつきから公転周期が変動する現象(TTV)を捉えて質量の上限値を求めたりしている[例16]. また, 系外惑星大気においてはレイリー散乱などによる可視光領域でのトランジット減光率の変動の検出などもおこなわれている[例17].

現在MuSCATsでの観測は年間200夜以上確保している. この豊富な観測夜数を用いて晴れた惑星の探査ができないかと考え開発されたのが, 大気中のナトリウム観測を目的とした狭帯域フィルターである.

4. 狭帯域フィルター

狭帯域フィルターは文字通り特定の狭い波長域だけを透過することが可能であり, 各CCDの前に取り付けることで任意の波長域での観測が可能となる(図2). MuSCATsは入射した光を反射・透過することで3色または4色に分け, 各箇所にはCCDカメラを取り付けることで多色同時撮像観測をする. これらの観測領域は4色の場合, gバンド(400-500 nm), rバンド(550-700 nm), iバンド(700-820 nm), z_sバンド(820-920 nm)の波長域が設定されており, ナトリウムD線は589 nm付近に存在するため, rバンドを観測するチャンネルにナトリウムD線を観測するためのフィルターを取り付ける必要がある. また, 他のチャンネルにおいてもナトリウム吸収によるトランジット

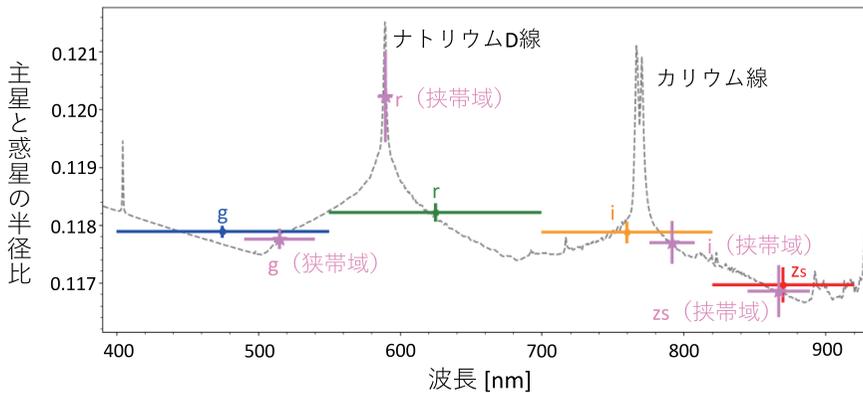


図4: 典型的なホットジュピターHAT-P-1bにおける理論透過光スペクトルと各バンドで観測した時に推定される主星と惑星の半径比 (トランジット減光率の2乗根). 左から順にg, r, i, z_sバンドであり, 星印は各バンドでの狭帯域フィルターを示す. 各点での水平線は波長域を示している. 系外惑星大気による吸収が大きいほど光量は小さくなり, トランジット減光率は大きくなるため, 主星と惑星の半径比も大きくなる.

減光率の違いを捉えるために, 他の吸収線が存在しない波長帯を観測する必要がある. さらに, 地球大気での吸収の影響が効かないように, なるべく地球大気吸収線の存在しないことが望ましい. よって, 上記の条件にあった透過波長帯をもつカスタムフィルターを残り3つのチャンネル用にそれぞれ製作した(図3, 4).

4.1 ナトリウム吸収線

狭帯域フィルターの波長幅の設定は, ナトリウムD線での吸収を検出するために重要である. 波長幅を広げると測光精度は向上するが, 吸収線がなまらされてしまうため, 他波長領域との差が小さくなる. 星からの光量による誤差は複数回の観測によって軽減できるが, 装置などによる系統誤差はどうしても一定の値で生じてしまう. 経験的に, 主星と惑星の半径比 (=トランジット減光率の2乗根)には2%の系統誤差があるため, ナトリウムD線での超過吸収を検出するためには, 多波長領域との違いがこれよりも大きい必要がある. 我々はまず波長幅を5 nmと10 nmにした場合を比較するために, 現在発見されている惑星の中で, 惑星の半径が0.5木星半径, 質量が0.3木星質量以上のホットジュピター計533天体において, 太陽組成で晴れている時を仮定した場合のナトリウムD線における主星と惑星の半径比を求めた. その結果, 幅5 nmにした場合の方が, 他波長領域と比べて2%以上の違いを示した天体が倍以上多かった. よっ

て, より多くの天体について調査するためには波長幅5 nmにするのがいいと考えた. また, 波長の端は透過率が50%程になるため, 透過率が100%の領域が5 nmになるよう波長幅(半値全幅)を6 nmとした.

4.2 他の波長領域

ナトリウム吸収線周辺でのトランジット減光率の違いを求めるだけならば, 他の波長域は挟帯域フィルターを入れずにそのまま観測しても問題はない. しかし, 実際の観測では, 観測波長幅が波長域ごとに異なりすぎる場合, ナトリウム吸収線付近で十分な光量を確保しようとすると, 他の波長域で飽和してしまう可能性がある. また, レイリー散乱やカリウム吸収線など他の超過吸収要因によりトランジット減光率の違いが小さくなってしまう可能性がある. よって, これらの要因を排除するために他の波長域でも狭帯域フィルターを取り付ける必要がある. 短波長領域ではなるべくナトリウム吸収線の裾野が終わったあたりを, iバンドでは, ナトリウム吸収線の次に大きな吸収を示すカリウム吸収線をなるべく拾わない波長帯に設定した. また, 地上での観測では地球大気の影響が影響する. 特に水蒸気の吸収は天候などにより一晩の中でも変動するため, 注意が必要である. そこで我々は水蒸気の影響を最も受けるz_sバンドについては地球大気の影響も考慮しなるべく水蒸気の吸収線が入らない波長帯に設定した.

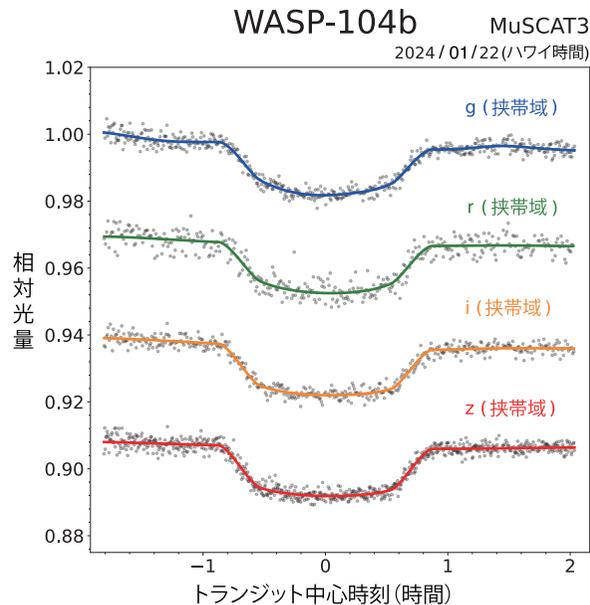


図5: 2024年1月22日(ハワイ時間)に、ハワイ州マウイ島のハレアカラ観測所にある2m望遠鏡に搭載されているMuSCAT3に挟帯域フィルターを取り付けて観測した光度曲線(上から順にg, r, i, zバンド)。各データは見やすくするためにずらして表記している。

5. 現状と今後の展望

前章で述べた4つの波長帯の狭帯域フィルターは、2023年夏に完成し我々のもとに届いた。その後、当時日本で製作中であったMuSCAT4に取り付けてからオーストラリアのサイディングスプリング観測所に搬送し、2023年10月に開発チームのメンバーが現地に赴き望遠鏡に設置した。また2023年11月には、既に稼働しているMuSAT3に取り付けるため、開発チームのメンバーがハワイ州マウイ島のハレアカラ観測所に赴いた。その結果、現在北天と南天の両方で狭帯域フィルターを使用した観測が可能であり、性能評価のための観測を行っている。その一環としてホットジュピターWASP-104bのトランジット観測をMuSCAT3で行ったところ、挟帯域フィルターを用いても精度の高い結果が得られることがわかった(図5)。残念ながら、大気中にナトリウムが検出されると予想される惑星についてはまだ観測できていないが、2024年2月から7月までの観測期間に向けての提案がMuSCAT3やMuSCAT4が搭載されている望遠鏡を運用しているラスカンプレス天文台(LCO)

の共同利用時間で採択され、計24時間の観測時間が確保された。よって、MuSCAT3とMuSCAT4でそれぞれ該当する2つの天体を観測する予定である。その後、これらの観測結果を基に、TESS等で新しく発見された惑星を含む、理論的に大気によるナトリウム吸収が大きいとされる惑星で検出可能性を求め、その検出可能性が高い順にナトリウム吸収が検出されるかどうかを調査していく予定である。

また、この調査で新たな惑星においてナトリウム吸収が検出されたとしても、完全に晴れているのか、雲やヘイズの上に予想よりも多いナトリウムが存在していたのかを区別することはできない。そこで、低分散分光装置を用いてナトリウムの吸収線の形状を詳しく調べる必要がある。なぜなら、晴れている場合は裾野まで大きく広がっているが、雲やヘイズが存在している場合、低層の圧力が高く広がった吸収線は隠されてしまい、細くて鋭い形になるはずだからである。この追観測により、Ariel等将来の宇宙望遠鏡を用いた惑星大気観測において、より適切に効率的な観測天体を選び出すことができるだろう。さらに、これらの天体は高分散分光装置を用いた観測でも十分な精度で惑星大気によるナトリウムD吸収

線を検出できる可能性が高く、高層での大気の状態（風の存在や温度変化等）を調査するための優れたターゲットにもなるだろう。我々の挟帯域フィルターを用いた系外惑星大気中のナトリウム吸収観測によって、晴れた大気を持つ惑星が新たに数多く発見されることを期待しつつ、今後もこの調査を進めていきたい。

謝辞

本稿で紹介した挟帯域フィルターの開発や取り付け、そしてそれを用いた観測検討に携わっていただいたMuSCATチームのメンバーをはじめとする皆様に感謝いたします。特に、本稿の執筆機会をいただき、原稿の添削等をしていただいた成田憲保氏と、原稿の添削や最新結果の図を提供までしていただいた福井暁彦氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] Charbonneau, D. et al., 2002, *The Astrophysical Journal* 568, 377.
- [2] Madhusudhan, N., 2019, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 57, 617.
- [3] Wakeford, H. R. et al., 2019, *Research Notes of the American Astronomical Society* 3, 7.
- [4] Seager, S. and Sasselov, D. D., 2000, *The Astrophysical Journal* 537, 916.
- [5] 福井 暁彦, 成田 憲保, 2014, *遊星人* 23, 1.
- [6] 亀田 真吾, 2018, *遊星人* 27, 4.
- [7] 川島 由依, 2020, *遊星人* 29, 2.
- [8] 大野 和正, 2020, *遊星人* 29, 3.
- [9] Chen, G. et al., 2017, *Astronomy and Astrophysics* 600, L11.
- [10] Sing, D. et al., 2016, *Nature* 529, 29.
- [11] Narita, N. et al., 2015, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 1, 045001.
- [12] Narita, N. et al., 2019, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 5, 015001.
- [13] Narita, N. et al., 2020, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Conference Series*, Vol. 11447, 114475K.
- [14] Fukui, A. et al., 2016, *The Astrophysical Journal* 819, 27.
- [15] Kawauchi, K. et al., 2022, *Astronomy and Astrophysics* 666, A4.
- [16] Fukui, A. et al., 2021, *The Astronomical Journal* 162, 167.
- [17] Luque, R. et al., 2020, *Astronomy and Astrophysics* 642, A50.

著者紹介

川内 紀代恵



立命館大学理工学部物理科学科助教。東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。博士(理学)。東京大学特任研究員,カナリア天文物理観測所・IAC(スペイン)ポスドクを経て,2023年4月から現職。専門は系外惑星大気観測。