

令和 5 年 5 月 18 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00170

研究課題名（和文）高分散コロナグラフによる系外惑星大気の探索

研究課題名（英文）Exploring Exoplanet Atmospheres with High Dispersion Coronagraphs

研究代表者

河原 創（Kawahara, Hajime）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：90649758

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、未開拓の高波長分解能を活用し、系外惑星と褐色矮星のスペクトルに基づく系外惑星キャラクタリゼーション手法を開発することを目指した。分子データと惑星大気モデリング・放射伝達シミュレーションを組み合わせた第一原理解析ツールを開発し、自動微分を用いた革新的な手法により勾配ベース最適化とHMCによる迅速なベイズ推定が実現可能となった。大気温度プロファイル等だけでなく、準恒星天体の質量もスペクトルから推定可能であることが確認された。さらに、我々が開発中の専用装置を用いてする望遠鏡でスペクトルを取得し、本手法の適用が可能であることを示した。また本装置のKバンドへの拡張の可能性を示せた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽系外惑星のスペクトルから性質を解析する手法は、将来の系外惑星系における生命探査への重要な研究分野である。本研究では、従来着目されていなかった分子線の分解を実現するような高波長分解能によるスペクトル（高分散スペクトル）を用いて系外惑星の物理化学的性質の解明につながる新手法を開発した。その結果、高分散スペクトルから質量を推定することが可能であることが分かった。惑星の質量は、生命探査を目指す直接撮像法では推定困難であり、かつ惑星の表層環境を決定する重要な要素である。本研究で開発された手法は、将来の生命探査において重要な基本情報を提供する可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to develop a novel method for characterizing exoplanets based on the spectra of exoplanets and brown dwarfs, utilizing unprecedented high-wavelength resolution. We successfully developed a first-principles analytical tool combining molecular data with planetary atmospheric modeling and radiative transfer simulations. This innovative method enables gradient-based optimization and rapid Bayesian estimation using HMC by employing automatic differentiation.

By applying this method to brown dwarf data, we confirmed that it is possible to estimate not only atmospheric temperature profiles but also the mass of substellar objects solely from their spectra. Furthermore, we demonstrated that our method can be applied by obtaining spectra using a dedicated device under development with the Subaru Telescope. We showed possibility to extend REACH to K-band.

研究分野：太陽系外惑星

キーワード：系外惑星キャラクタリゼーション 高分散スペクトル ベイズ推定 自動微分

1. 研究開始当初の背景

高分散分光による系外惑星のキャラクタリゼーションは、世界的に大きな成果を出し始めていた。しかし、直接撮像、特に極限補償光学・コロナグラフを用いた高コントラスト装置による直接撮像に対する高分散分光による系外惑星キャラクタリゼーションは、まだ未開拓の状態であった。そのため、我々はすばる望遠鏡の極限補償光学 SCEXAO と近赤外高分散分光器 IRD を組み合わせた REACH という高分散コロナグラフ装置の開発をすすめていた。しかしながら、この装置で取得されたスペクトルの解析方法は、未開拓分野であったため、新たなアプローチが求められていた。

2. 研究の目的

我々の目標は、高分散分光による系外惑星大気のキャラクタリゼーション法を確立し、将来の 30m 級望遠鏡による観測への応用を目指すことである。これにより、より詳細な大気組成や状態の解析が可能となり、系外惑星研究の新たな地平を切り開くことが期待される。

3. 研究の方法

研究の方法として、直接撮像された惑星の高分散スペクトルに対応できるよう、放射伝達シミュレーションを用いたスペクトルのベイズ的解析手法を確立する。さらに、将来的に一酸化炭素などを利用した大気キャラクタリゼーションを見据え、REACH 装置を K バンドに拡張することを計画している。これにより、より広範囲な波長での高精度な大気解析が可能となり、系外惑星研究における新たな知見が得られることが期待される。

4. 研究成果

A. 自動微分可能な高分散スペクトルのベイズ推定手法

自動微分とは、プログラムで関数を定義する際、その関数の変数による微分も計算できる機能である。複雑な関数が基本的な関数の組み合わせで表現されることが多いため、微分連鎖則を使って微分を計算できる。機械学習技術では、勾配ベースで最適化を行う手法が多く、近年、その有用性が高まっている。HMC-NUTS は、MCMC のパラメータ更新を、事後分布のパラメータによる微分、すなわち勾配情報を用いて効率化する手法であり、確率プログラミング言語を用いて HMC-NUTS を実行可能である。このような機能を持つ自動微分を、惑星や褐色矮星の放射スペクトルシミュレーションに組み入れることで、観測された高分散スペクトルと放射伝達シミュレーションを結びつける高効率な最適化やベイズ推定が可能となる。

我々は自動微分可能なスペクトルモデル ExoJAX をリリースし、複雑なモデルに対してマルコフ鎖モンテカルロを行える HMC-NUTS を通じて、高分散スペクトルのベイズモデル化が可能となった。<https://github.com/HajimeKawahara/exojax>

このための技術として、Google の自動微分 JAX (Google の JAX は自動微分だけでなく、GPU/TPU 利用可能な高速線形代数パッケージ XLA の機能も持つ優れた Python ベースのモジュールである) と Uber-AI の確率プログラミング言語 NumPyro を用いて ExoJAX を構築した。図 1 に系外惑星に近い褐色矮星での ExoJAX のテストフィット結果を示す。これまで

にないレベルで高分散スペクトルをモデル化できた。特に、高分散分光では分子線のみから惑星・褐色矮星重力、すなわち質量を推定できるという重要な知見を得た。これは直接撮像観測のメリットを大きく向上させるものである。また、これまでのモデルは分子の断面積のグリッドベースのモデルを事前に用意してからスペクトルモデルを計算するのに対し、ExoJAX は分子データベースから観測スペクトルまで全てを end-to-end に計算できる世界初のスペクトルモデルである。このような第一原理的なモデルであるため、分子データベースの影響を直接観測量と比較できるという能力を世界で初めて持ったスペクトルモデルである。

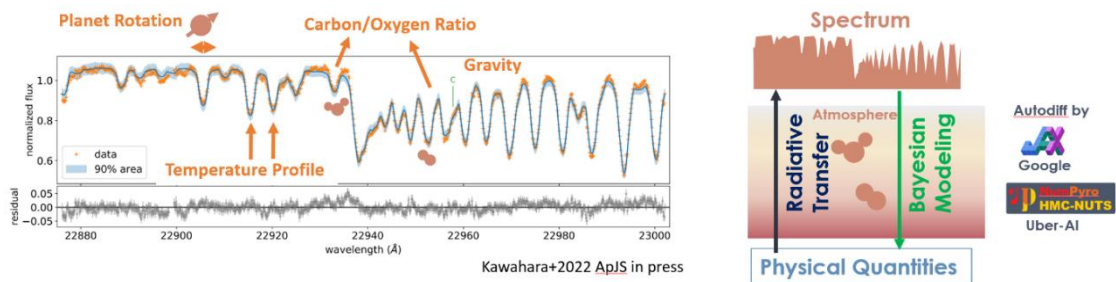


図 1 ExoJAX による褐色矮星 Luhman 16A の高分散スペクトルフィット[1]

さらに広帯域なスペクトルへの適用も可能になり REACH/IRD で得られた高分散スペクトルを解析可能となった。この解析結果は現在論文準備中である。

また、上記の研究の中で一酸化炭素の圧力幅情報が質量推定に重要であるにも関わらず、高温かつ水素大気下での実験的データが不足していることを見出した。そこで、このような情報を直接実験から決められないか試験的な実験を行い、本格的な装置開発ができれば可能であるとの結論に達した。

B. REACH の K バンド拡張

現在、すばる望遠鏡で高分散コロナグラフを実現する装置 REACH は、分光部分を IRD に接続しており、観測バンドは Y、J、H バンドに限定されている。しかし、図 1 のような一酸化炭素を大気キャラクタリゼーションに利用する場合、より長波長の K バンドまで拡張する必要がある。そこで、K バンドの感度を持つ IRCS への接続を試みた。

Covid-19 の影響により、学生の派遣が実現しなかったり、装置の調達が遅れたりしたため、完全な接続には至らなかった。しかしながら、ファイバーに光を入力し、出力光の強度を測定して入射を最適化することまで達成できた。ただし、現状では人工光源によるファイバーへの光入力が可能である。恒星光の入力は、天候が悪いため実現できていない。

今後、天候の良いエンジニアリングランが設定された際に、実際の恒星光を導入し、さらに IRCS まで光を到達させることを目指している。

C. 新たな分子・金属の検出による系外惑星の進展

高分散コロナグラフと同時に、通常の高分散キャラクタリゼーションにおいてもさらなる進展を目指した。具体的には、HDS と IRD の両方で新たな分子・金属の検出に成功した。系外惑星大気中の分子や原子の検出により、惑星形成に関する情報が得られる。その一例として、世界初の中性チタン (Ti) 検出が本年度の成果のひとつである[5]。この天体では、TiO は検出されなかったが、Ti が検出され、TiO が非検出であることから、C/O 比が高い

ことが示唆される。様々なモデルが存在するため一概には言えないが、標準的な考え方では、C/O 比が高いということは、形成時の大気に水蒸気が利用できなかったことを意味し、これは水が固体となっている雪線以遠で形成され、恒星に近い場所まで移動したことを示唆している。[2]

天文学者にはお馴染みの分子 OH は、地球大気にも微量に含まれる分子である。この分子は、大気中に水が存在する場合、紫外線や熱乖離を介して共存する。すばる望遠鏡 IRD を用いた高分散手法で、世界初の系外惑星大気中の OH 検出に成功した。検出された系外惑星は WASP33b という、世界初の TiO (酸化チタン) 検出がすばる HDS で行われた高温のホットジュピターである。TiO の場合と同様に、温度逆転層が存在するため、シグナルは輝線状になる。今回検出された OH も輝線状のシグナルであり、WASP33b が強い温度逆転層を持つことが確実と言える。このように、高分散手法が実際の惑星大気キャラクタリゼーションに非常に有用であることが実証されつつある。[3]

[1] Autodifferentiable Spectrum Model for High-Dispersion Characterization of Exoplanets and Brown Dwarfs

Hajime Kawahara, Yui Kawashima, Kento Masuda, Ian J. M. Crossfield, Erwan Pannier, Dirk van den Bekerom *ApJS* 258 31 (2022)

[2] Neutral metals in the atmosphere of HD149026b

Masato Ishizuka, Hajime Kawahara, Stevanus K. Nugroho, Yui Kawashima, Teruyuki Hirano, Motohide Tamura, *AJ* 161, 153 (2021)

[3] First Detection of Hydroxyl Radical Emission from an Exoplanet Atmosphere: High-dispersion Characterization of WASP-33b using Subaru/IRD

Stevanus K. Nugroho, Hajime Kawahara, Neale P. Gibson, Ernst J. W. de Mooij, Teruyuki Hirano, Takayuki Kotani, Yui Kawashima, Kento Masuda, Matteo Brogi, Jayne L. Birkby, Chris A. Watson, Motohide Tamura, Konstanze Zwintz, Hiroki Harakawa, Tomoyuki Kudo, Masayuki Kuzuhara, Klaus Hodapp, Masato Ishizuka, Shane Jacobson, Mihoko Konishi, Takashi Kurokawa, Jun Nishikawa, Masashi Omiya, Takuma Serizawa, Akitoshi Ueda, Sébastien Vievard, *ApJL* 910, 9 (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Currie Thayne, Lawson Kellen, Schneider Glenn, Lyra Wladimir, Wisniewski John, Grady Carol, Guyon Olivier, Tamura Motohide, Kotani Takayuki, Kawahara Hajime, et al.	4. 巻 6
2. 論文標題 Images of embedded Jovian planet formation at a wide separation around AB Aurigae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 751 ~ 759
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-022-01634-x	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
1. 著者名 Kuwata Atsuki, Kawahara Hajime, Aizawa Masataka, Kotani Takayuki, Tamura Motohide	4. 巻 930
2. 論文標題 Global Mapping of Surface Composition on an Exo-Earth Using Sparse Modeling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac64a1	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 Harakawa Hiroki, Takarada Takuya, Kasagi Yui, Hirano Teruyuki, Kotani Takayuki, Kuzuhara Masayuki, Omiya Masashi, Kawahara Hajime, et al.	4. 巻 74
2. 論文標題 A super-Earth orbiting near the inner edge of the habitable zone around the M4.5 dwarf Ross 508	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 904 ~ 922
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac044	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 該当する
1. 著者名 Aizawa Masataka, Kawana Kojiro, Kashiyama Kazumi, Ohsawa Ryou, Kawahara Hajime, et al.	4. 巻 74
2. 論文標題 Fast optical flares from M?dwarfs detected by a one-second-cadence survey with Tomo-e Gozen	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1069 ~ 1094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac056	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 -

1. 著者名 Kawahara Hajime, Kawashima Yui, Masuda Kento, Crossfield Ian J. M., Pannier Erwan, van den Bekerom Dirk	4. 巻 258
2. 論文標題 Autodifferentiable Spectrum Model for High-dispersion Characterization of Exoplanets and Brown Dwarfs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 31 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac3b4d	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 該当する

1. 著者名 Murakami Naoshi, Yoneta Kenta, Kawai Kenya, Kawahara Hajime, Kotani Takayuki, Tamura Motohide, Baba Naoshi	4. 巻 163
2. 論文標題 Polarization-based Speckle Nulling Using a Spatial Light Modulator to Generate a Wide-field Dark Hole	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 129 ~ 129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac3510	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 Kasagi Yui, Kotani Takayuki, Kawahara Hajime, Tajiri Tomoyuki, Muto Takayuki, Aizawa Masataka, Fujii Michiko S., Hattori Kohei, Masuda Kento, Momose Munetake, Ohsawa Ryou, Takita Satoshi	4. 巻 259
2. 論文標題 Dippers from TESS Full-frame Images. II. Spectroscopic Characterization of Four Young Dippers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 40 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac4e8b	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 Aizawa Masataka, Kawahara Hajime, Fan Siteng	4. 巻 896
2. 論文標題 Global Mapping of an Exo-Earth Using Sparse Modeling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8d30	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

1. 著者名 Kawahara Hajime	4. 巻 894
2. 論文標題 Global Mapping of the Surface Composition on an Exo-Earth Using Color Variability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab87a1	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 -

1. 著者名 Nakagawa Yuta, Kodama Takanori, Ishiwatari Masaki, Kawahara Hajime, Suto Yasushi, Takahashi Yoshiyuki O., Hashimoto George L., Kuramoto Kiyoshi, Nakajima Kensuke, Takehiro Shin-ichi, Hayashi Yoshi-Yuki	4. 巻 898
2. 論文標題 Obliquity of an Earth-like Planet from Frequency Modulation of Its Direct-imaged Lightcurve: Mock Analysis from General Circulation Model Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab9eb8	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 -

1. 著者名 Nugroho Stevanus K., Gibson Neale P., de Mooij Ernst J. W., Herman Miranda K., Watson Chris A., Kawahara Hajime, Merritt Stephanie R.	4. 巻 898
2. 論文標題 Detection of Fe i Emission in the Dayside Spectrum of WASP-33b	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aba4b6	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

1. 著者名 Kawahara Hajime, Masuda Kento	4. 巻 900
2. 論文標題 Bayesian Dynamic Mapping of an Exo-Earth from Photometric Variability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba95e	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 -

1. 著者名 Tajiri Tomoyuki, Kawahara Hajime, Aizawa Masataka, Fujii Michiko S., Hattori Kohei, Kasagi Yui, Kotani Takayuki, Masuda Kento, Momose Munetake, Muto Takayuki, Ohsawa Ryou, Takita Satoshi	4. 巻 251
2. 論文標題 Dippers from the TESS Full-frame Images. I. Results of the First One Year Data and Discovery of a Runaway Dipper	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/abbc17	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 -

1. 著者名 Ishizuka Masato, Kawahara Hajime, Nugroho Stevanus K., Kawashima Yui, Hirano Teruyuki, Tamura Motohide	4. 巻 161
2. 論文標題 Neutral Metals in the Atmosphere of HD 149026b	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/abdb25	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

1. 著者名 Nugroho Stevanus K., Kawahara Hajime, Gibson Neale P., de Mooij Ernst J. W., Hirano Teruyuki, Kotani Takayuki, Kawashima Yui, Masuda Kento, Brogi Matteo, Birkby Jayne L. et al.	4. 巻 910
2. 論文標題 First Detection of Hydroxyl Radical Emission from an Exoplanet Atmosphere: High-dispersion Characterization of WASP-33b Using Subaru/IRD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abec71	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4件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 河原 創、他、ExoJAX contributors
2. 発表標題 系外惑星高分散リトリーバルExoJAX : 広帯域化アルゴリズム
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河原 創、他、ExoJAX contributors
2. 発表標題 系外惑星大気探査のためのオープンソース・プロジェクト: ExoJAX
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 河原 創, JASMINE collaboration
2. 発表標題 JASMINE による系外惑星探査
3. 学会等名 ISAS Astrobiology Exploration Symposium (ABEX) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河原創 (東大), 川島由依 (理研), 増田賢人 (大阪大), Ian J.M. Crossfield (U. Kansas)
2. 発表標題 太陽系外惑星・褐色矮星の高分散キャラクタリゼーションのための自動微分可能なスペクトルモデル
3. 学会等名 日本天文学会秋期年会
4. 発表年 2021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
研究 分担者	小谷 隆行 (Kotani Takayuki) (40554291)	大学共同利用機関法人自然科学研究機構(新分野創成センター、アストロバイオロジーセンター、生命創成探究・アストロバイオロジーセンター・助教 (82675)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	Guyon Olivier (Guyon Olivier) (90399288)	国立天文台・ハワイ観測所・RCUH職員 (62616)	

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